



Die
Dynamoelektrischen Maschinen.

Ein Handbuch
für
Studirende der Elektrotechnik.

Von
Silvanus P. Thompson,
Direktor und Professor der Physik an der Technischen Hochschule der Stadt und Gilden
von London.

Sechste Auflage.

Nach **C. Grawinkel's** Uebersetzung neu bearbeitet

von
K. Strecker und F. Vesper.

~~~~~

Mit 541 in den Text gedruckten Abbildungen und 22 grossen Figurentafeln.



**Halle a. S.**  
Druck und Verlag von Wilhelm Knapp.  
1901.

Die  
**Dynamoelektrischen Maschinen.**

Ein Handbuch  
für  
Studirende der Elektrotechnik.

Von

**Silvanus P. Thompson,**

Direktor und Professor der Physik an der Technischen Hochschule der Stadt und Gilden  
von London.

**Sechste Auflage.**

Nach **C. Grawinkel's** Uebersetzung neu bearbeitet

von

**K. Strecker und F. Vesper.**

**Zweiter Theil.**

Mit 270 in den Text gedruckten Abbildungen und 10 grossen Figurentafeln.

*4. Nr. 23020*



Halle a. S.

Druck und Verlag von Wilhelm Knapp.

1901.

*H. 15.*  
*8.*

*xxx*  
*406*

~~II 5364~~



II - 349380

## Inhaltsverzeichnis zum zweiten Theil.

|                       |                                                                                            | Seite |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Kapitel XVII.</b>  | <b>Muster neuerer Maschinen für Gleichstrom . . . . .</b>                                  | 375   |
|                       | Maschinen der Actiengesellschaft Electricitätswerke vorm.<br>O. L. Kummer & Co. . . . .    | 375   |
|                       | Maschinen der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft, Berlin                               | 379   |
|                       | Maschinen der Berliner Maschinenbau-Actiengesellschaft<br>vorm. L. Schwartzkopff . . . . . | 380   |
|                       | Maschinen von Brown, Boveri & Co. . . . .                                                  | 382   |
|                       | Maschinen der Brush Electrical Engineering Co. . . . .                                     | 384   |
|                       | Maschinen von Crompton & Co. . . . .                                                       | 386   |
|                       | Maschinen der Deutschen Electricitätswerke zu Aachen . .                                   | 386   |
|                       | Maschinen der Electricitäts-Actiengesellschaft vormals<br>W. Lahmeyer & Co. . . . .        | 387   |
|                       | Maschinen der Electricitäts-Aktiengesellschaft vorm. H. Pöge                               | 388   |
|                       | Maschinen der Electricitäts-Aktiengesellschaft vormals<br>Schuckert & Co. . . . .          | 390   |
|                       | Maschinen von Edison . . . . .                                                             | 391   |
|                       | Maschinen der General Electric Co. . . . .                                                 | 392   |
|                       | Maschinen von Gramme . . . . .                                                             | 393   |
|                       | Maschinen von Helios, Electricitäts-Aktiengesellschaft . .                                 | 393   |
|                       | Maschinen von Kapp . . . . .                                                               | 395   |
|                       | Maschinen von Gebr. Körting . . . . .                                                      | 397   |
|                       | Maschinen von Mather & Platt . . . . .                                                     | 397   |
|                       | Maschinen von Oerlikon . . . . .                                                           | 402   |
|                       | Maschinen von Parker . . . . .                                                             | 406   |
|                       | Maschinen von Paterson & Cooper . . . . .                                                  | 407   |
|                       | Maschinen von Siemens & Halske . . . . .                                                   | 408   |
|                       | Maschinen der Union Electricitäts-Gesellschaft . . . . .                                   | 413   |
| <b>Kapitel XVIII.</b> | <b>Maschinen für Bogenlicht . . . . .</b>                                                  | 415   |
|                       | Maschinen mit offener Wickelung . . . . .                                                  | 416   |
|                       | Maschine von Brush . . . . .                                                               | 420   |
|                       | Maschine von Thomson-Houston . . . . .                                                     | 428   |
|                       | Vortheile der Maschinen mit offener Wickelung . . . . .                                    | 434   |
|                       | Andere Maschinen für Bogenlicht . . . . .                                                  | 435   |
|                       | Maschine von Bradley . . . . .                                                             | 435   |
|                       | Maschine von Schuckert . . . . .                                                           | 435   |

|                                                                                                    | Seite      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Maschine von Sperry . . . . .                                                                      | 436        |
| Maschine von Wood . . . . .                                                                        | 436        |
| Phönix-Maschine für Bogenlicht . . . . .                                                           | 436        |
| Maschine von Statter . . . . .                                                                     | 436        |
| Abfallende Charakteristiken . . . . .                                                              | 437        |
| <b>Kapitel XIX. Verschiedene Maschinen . . . . .</b>                                               | <b>439</b> |
| Maschinen zur Ausscheidung von Metallen . . . . .                                                  | 439        |
| Maschinen zum Laden von Accumulatoren . . . . .                                                    | 444        |
| Maschinen mit aussergewöhnlich hoher Spannung . . . . .                                            | 444        |
| Homopolar(Unipolar)maschinen . . . . .                                                             | 446        |
| Scheibenmaschinen . . . . .                                                                        | 450        |
| <b>Kapitel XX. Elektrische Triebmaschinen für Gleichstrom . . . . .</b>                            | <b>455</b> |
| Elementare Theorie der elektrischen Triebkraft . . . . .                                           | 462        |
| Graphische Darstellung der Gesetze für Trieb-<br>maschinen . . . . .                               | 467        |
| Geschwindigkeit und Drehungsmoment von Trieb-<br>maschinen . . . . .                               | 472        |
| Allgemeine Ausdrücke für das Drehungsmoment und die<br>Geschwindigkeit . . . . .                   | 474        |
| Magneto- und besonders erregte Triebmaschine . . . . .                                             | 476        |
| Triebmaschine mit Reihenwicklung . . . . .                                                         | 477        |
| Verwendung von zwei Maschinen mit Reihenwicklung<br>zur Uebertragung . . . . .                     | 480        |
| Triebmaschine mit Nebenschlusswicklung . . . . .                                                   | 481        |
| Wechselwirkung zwischen Anker und Feldmagnet in<br>einer Triebmaschine . . . . .                   | 483        |
| Umsteuerung von Triebmaschinen . . . . .                                                           | 488        |
| Regelung der Thätigkeit von Triebmaschinen . . . . .                                               | 489        |
| Regelung durch einen Centrifugal-Apparat . . . . .                                                 | 490        |
| Dynamometrische Regelung . . . . .                                                                 | 491        |
| Elektrische Regelung . . . . .                                                                     | 492        |
| Theorie der selbstregelnden Triebmaschinen . . . . .                                               | 492        |
| Mechanische Charakteristiken von gemischt und<br>differential gewickelten Triebmaschinen . . . . . | 497        |
| Andere Methoden zur Regelung von Triebmaschinen . . . . .                                          | 499        |
| <b>Kapitel XXI. Neuere Formen von Triebmaschinen für Gleichstrom . . . . .</b>                     | <b>501</b> |
| Maschinen von Sprague . . . . .                                                                    | 503        |
| Maschinen von Crocker und Wheeler . . . . .                                                        | 503        |
| Maschinen der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft . . . . .                                     | 506        |
| Maschinen von Schuckert . . . . .                                                                  | 507        |
| Maschinen der Union . . . . .                                                                      | 508        |
| Bergwerksmaschine von Gooden . . . . .                                                             | 508        |
| Sayer's Motor für Minenbetrieb . . . . .                                                           | 508        |
| Elektrische Maschinen für Fahrzeuge . . . . .                                                      | 510        |
| Maschinen von Siemens & Halske . . . . .                                                           | 513        |
| Grosse Motoren für Eisenbahn-Locomotiven . . . . .                                                 | 514        |
| Triebmaschinen für pulsirenden Gang . . . . .                                                      | 516        |

|                                                                | Seite |
|----------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Kapitel XXI. Die Gesetze des Wechselstromes</b> . . . . .   | 517   |
| Effective Spannung und Stromstärke . . . . .                   | 523   |
| Anwendung des Uhrdiagramms . . . . .                           | 525   |
| Producte periodischer Functionen . . . . .                     | 526   |
| Wirkungen der Selbstinduction . . . . .                        | 528   |
| Geometrische Darstellung des Gesetzes der Wechselströme        | 531   |
| Wirkung der Capacität . . . . .                                | 534   |
| Mittlere Leistung . . . . .                                    | 537   |
| Arbeitsloser Strom . . . . .                                   | 538   |
| Leistungsfactor . . . . .                                      | 539   |
| Messung von Wechselströmen . . . . .                           | 539   |
| Zahlenbeispiel . . . . .                                       | 540   |
| Hohe Wechselzahlen . . . . .                                   | 542   |
| Drehmoment von Wechselstrommaschinen . . . . .                 | 542   |
| Analytische Behandlung der Grundgleichungen von                |       |
| Wechselströmen . . . . .                                       | 544   |
| Mittlere Leistung . . . . .                                    | 549   |
| Oberflächenwirkung . . . . .                                   | 549   |
| <b>Kapitel XXIII. Wechselstrommaschinen</b> . . . . .          | 551   |
| Ringanker . . . . .                                            | 552   |
| Trommelanker . . . . .                                         | 554   |
| Scheibenanker . . . . .                                        | 556   |
| Stromabgeber . . . . .                                         | 557   |
| Schaltung der Ankerwicklung . . . . .                          | 558   |
| Vergleich zwischen Gleichstrom- und Wechselstrom-              |       |
| wicklung . . . . .                                             | 558   |
| Abmessungen der Polflächen und der Ankerwickel-                |       |
| lungen . . . . .                                               | 559   |
| Erregung der Feldmagnete . . . . .                             | 565   |
| Führung der Ankerwickelungen . . . . .                         | 567   |
| Mehrphasige Wechselstrommaschinen . . . . .                    | 569   |
| Bau der Wechselstrommaschinen . . . . .                        | 572   |
| Asynchrone Stromerzeuger . . . . .                             | 577   |
| Beschreibung einiger Wechselstrommaschinen . . . . .           | 577   |
| Maschinen der Actien-Gesellschaft Electricitätswerke vorm.     |       |
| Kummer & Co. . . . .                                           | 577   |
| Maschinen von Alioth . . . . .                                 | 579   |
| Maschinen der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft . . . . . | 579   |
| Maschinen der Berliner Maschinenbau-Actiengesellschaft         |       |
| vorm. L. Schwartzkopff . . . . .                               | 582   |
| Maschinen von Brown . . . . .                                  | 584   |
| Maschinen von Ferranti . . . . .                               | 586   |
| Maschinen von Ganz & Co. . . . .                               | 591   |
| Maschinen der General Electric Co. . . . .                     | 593   |
| Maschinen von Gordon . . . . .                                 | 593   |
| Maschinen von Helios . . . . .                                 | 594   |
| Maschinen von Hopkinson . . . . .                              | 595   |

|                                                                                                                  | Seite      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Maschinen von Kapp . . . . .                                                                                     | 596        |
| Maschinen von Gebr. Körting . . . . .                                                                            | 596        |
| Maschinen von Mordey . . . . .                                                                                   | 597        |
| Maschinen von Oerlikon . . . . .                                                                                 | 602        |
| Maschinen von Parson . . . . .                                                                                   | 607        |
| Maschinen der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals<br>Schuckert & Co. . . . .                                | 608        |
| Maschinen von Siemens & Halske . . . . .                                                                         | 611        |
| Maschinen der Union . . . . .                                                                                    | 613        |
| Maschinen der Westinghouse-Gesellschaft . . . . .                                                                | 615        |
| Die Wechselstrommaschinen für den Niagara . . . . .                                                              | 615        |
| Wechselstrommaschinen mit gleichbleibender Strom-<br>stärke . . . . .                                            | 618        |
| Wechselstrommaschinen mit Inductor . . . . .                                                                     | 618        |
| Kingdon's Wechselstrommaschine mit Inductor . . . . .                                                            | 618        |
| Maschine von Stanley-Kelly . . . . .                                                                             | 619        |
| Brown's dreiphasiger Inductor-Stromerzeuger . . . . .                                                            | 619        |
| Maschinen von Pyke & Harris . . . . .                                                                            | 621        |
| Maschinen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft . . . . .                                                   | 622        |
| Maschinen der Berliner Maschinenbau-Actiengesellschaft<br>vorm. L. Schwartzkopff . . . . .                       | 624        |
| Maschinen der Maschinenfabrik Oerlikon . . . . .                                                                 | 624        |
| <b>Kapitel XXIV. Zusammenschaltung von Wechselstrommaschinen. Synchron<br/>laufende Triebmaschinen . . . . .</b> | <b>627</b> |
| Parallelschaltung von Wechselstrommaschinen . . . . .                                                            | 638        |
| Synchrone Mehrphasen-Triebmaschinen . . . . .                                                                    | 640        |
| <b>Kapitel XXV. Asynchrone Triebmaschinen . . . . .</b>                                                          | <b>642</b> |
| Entstehung eines magnetischen Drehfeldes . . . . .                                                               | 643        |
| Neuere mehrphasige Triebmaschinen . . . . .                                                                      | 652        |
| Motoren der Actiengesellschaft Elektrizitätswerke vormals<br>O. L. Kummer & Co. . . . .                          | 655        |
| Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft . . . . .                                                                  | 656        |
| Elektrizitäts-Actien-Gesellschaft vorm. W. Lahmeyer & Co. . . . .                                                | 658        |
| Gebrüder Körting . . . . .                                                                                       | 660        |
| Helios, Elektrizitäts-Aktiengesellschaft . . . . .                                                               | 660        |
| Maschinenfabrik Oerlikon . . . . .                                                                               | 663        |
| Siemens & Halske Aktiengesellschaft . . . . .                                                                    | 666        |
| Asynchrone Motoren der Union, Elektrizitäts-Gesellschaft . . . . .                                               | 668        |
| Elementare Theorie der mehrphasigen Trieb-<br>maschinen . . . . .                                                | 669        |
| 1. Resultirendes magnetisches Kraftfeld des Motors . . . . .                                                     | 672        |
| 2. Betriebsbedingungen . . . . .                                                                                 | 674        |
| 3. Zugkraft beim Angehen . . . . .                                                                               | 674        |
| 4. Beziehung zwischen Drehmoment und Schlipf . . . . .                                                           | 676        |
| Zweiphasenmotor von Stanley-Kelly . . . . .                                                                      | 679        |

|                                                                              | Seite |
|------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Einphasige Triebmaschinen . . . . .                                          | 681   |
| Theilung des Stromes unter Phasenverschiebung . . . . .                      | 682   |
| Motoren mit Stromtheilung unter Phasenverschiebung . . . . .                 | 683   |
| Theorie der einphasigen Wechselstrommotoren. . . . .                         | 683   |
| Geblätterte Reihenmotoren . . . . .                                          | 686   |
| Motoren mit verzögertem Felde . . . . .                                      | 687   |
| <b>Kapitel XXVI. Umsetzungsapparate.</b> . . . . .                           | 688   |
| Grundlehren über Wechselstromumsetzung . . . . .                             | 689   |
| Bauart der Transformatoren . . . . .                                         | 694   |
| Formen neuerer Transformatoren . . . . .                                     | 696   |
| Phasenverhältnisse bei Transformatoren . . . . .                             | 708   |
| Wirkungsgrad der Transformatoren . . . . .                                   | 712   |
| Entwurf von Transformatoren . . . . .                                        | 714   |
| Wechselstrom-Umformer für constanten Strom . . . . .                         | 717   |
| Einspuliger Transformator . . . . .                                          | 718   |
| Mehrphasige Transformatoren . . . . .                                        | 718   |
| Theorie der Wechselstrom-Transformatoren . . . . .                           | 719   |
| Maxwell's Theorie . . . . .                                                  | 721   |
| <b>Kapitel XXVII. Doppelmaschinen</b> . . . . .                              | 724   |
| Gleichstrom-Transformatoren . . . . .                                        | 724   |
| Theorie der Gleichstrom-Transformatoren . . . . .                            | 728   |
| Gleichstrom-Wechselstrom-Umformer . . . . .                                  | 729   |
| <b>Kapitel XXVIII. Elektrische Uebertragung der Energie</b> . . . . .        | 734   |
| Wirkungsgrad der Uebertragung . . . . .                                      | 737   |
| Graphische Darstellung der Uebertragung . . . . .                            | 741   |
| Wirtschaftlichkeit der Uebertragung . . . . .                                | 742   |
| <b>Kapitel XXIX. Regulatoren für Dynamomaschinen</b> . . . . .               | 745   |
| Regulatoren für Gleichspannung und für gleichbleibende Stromstärke . . . . . | 747   |
| Elektrische Regulatoren für Dampfmaschinen . . . . .                         | 751   |
| Dynamometrische Regulirung . . . . .                                         | 752   |
| Regulirung durch Dampfdruck . . . . .                                        | 753   |
| <b>Kapitel XXX. Prüfung von Dynamomaschinen und Triebmaschinen</b> . . . . . | 755   |
| Bauliche Prüfung . . . . .                                                   | 755   |
| Prüfung des Isalationswiderstandes . . . . .                                 | 756   |
| Versuche über Temperaturzunahme . . . . .                                    | 756   |
| Prüfung der Leistung und des Wirkungsgrades . . . . .                        | 757   |
| Messung der mechanischen Leistung . . . . .                                  | 757   |
| a) Die Indicator-Methode . . . . .                                           | 758   |
| b) Die Brems-Methode . . . . .                                               | 758   |
| c) Die Dynamometer-Methode . . . . .                                         | 760   |
| d) Die Gleichgewichts-Methode . . . . .                                      | 762   |
| e) Die elektrischen Methoden . . . . .                                       | 764   |
| Bestimmung der einzelnen Verluste . . . . .                                  | 767   |
| Prüfung einer Stromerzeugungs-Anlage . . . . .                               | 768   |

|                                                                                           | Seite |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Kapitel XXXI. Behandlung von Dynamomaschinen</b> . . . . .                             | 771   |
| Zusammenschalten mehrerer Dynamomaschinen in<br>einem Stromkreise . . . . .               | 771   |
| Hintereinanderschaltung von Gleichstrommaschinen . .                                      | 771   |
| Parallelschaltung von Dynamomaschinen . . . . .                                           | 772   |
| Nebeneinanderschaltung von Maschinen mit gemischter<br>Wicklung . . . . .                 | 773   |
| Allgemeine Anweisungen für die Aufstellung und<br>Bedienung von Dynamomaschinen . . . . . | 775   |
| Standort der Maschine . . . . .                                                           | 775   |
| Fundirung . . . . .                                                                       | 775   |
| Laufschienen . . . . .                                                                    | 776   |
| Anlassen . . . . .                                                                        | 776   |
| Prüfung vor dem Anlaufen . . . . .                                                        | 776   |
| Tägliche Beobachtung . . . . .                                                            | 778   |
| Fehler in Maschinen . . . . .                                                             | 779   |
| Verbrennen der Anker . . . . .                                                            | 779   |
| Kurzschlüsse im Anker . . . . .                                                           | 780   |
| Bruch von Verbindungen . . . . .                                                          | 782   |
| Unterbrechungen im Anker . . . . .                                                        | 782   |
| Abflachungen am Stromabgeber . . . . .                                                    | 783   |
| Fehler in den Wicklungen der Feldmagnete . . . . .                                        | 783   |
| Fehler in der Erregung . . . . .                                                          | 784   |
| Fehler in Wechselstrommaschinen . . . . .                                                 | 784   |
| Schwingungen und Geräusch . . . . .                                                       | 785   |
| <b>Sachregister</b> . . . . .                                                             | 787   |
| <b>Namenregister</b> . . . . .                                                            | 797   |

## Kapitel XVII.

### **Muster neuerer Maschinen für Gleichstrom.**

---

Gleichstrommaschinen werden je nach ihrem Zwecke in verschiedenen Formen und Grössen hergestellt; sie weichen nicht nur in der Stromstärke, sondern auch in der Spannung, mit welcher sie arbeiten sollen, voneinander ab. Gebräuchliche Spannungen sind folgende:

Für Glühlampen und allgemeine Vertheilung bei constanter Spannung gewöhnlich 100 bis 120 Volt; zuweilen bei isolirt liegenden Anlagen auch 50 bis 60 Volt.

Für dieselben Zwecke bei Dreileitersystem 200 bis 250 Volt, bei Fünfleitersystem 400 bis 500 Volt.

Für Strassenbahnmaschinen 500 bis 600 Volt.

Für Bogenlicht in Reihenschaltung werden gewöhnlich Maschinen mit Reihenwicklung für 8 oder 10 Ampere bei einer Spannung bis zu 2000 und 3000 Volt angewendet.

Zum Laden von Akkumulatoren gebraucht man Maschinen mit Nebenschlusswicklung mit nicht zu stark magnetisirten Feldmagneten.

Für galvanoplastische, galvanostegische und elektrochemische Prozesse gewöhnlich Nebenschlussmaschinen mit geringer Spannung, aber grosser Stromstärke.

Für Kraftübertragung auf weite Entfernungen gewöhnlich Reihemaschinen zu 1000 bis 2000 Volt oder mehr; jedoch sind in diesem Falle der Regel nach Wechselstrommaschinen vorzuziehen.

#### **Aktiengesellschaft Electricitätswerke vorm. O. L. Kummer & Co.**

Die zweipoligen Maschinen, Type Lambda (Fig. 272), werden von 0,22 bis zu 75 Kilowatt ausgeführt. Ihr gedrungener und geschlossener Bau lässt sie in den mannigfachsten Betrieben Anwendung finden. Der vom Gehäuse vollständig eingeschlossene Anker ist als

Ringanker ausgeführt, die einzelnen Bleche sind aus weichem Schmiedeeisen auf einem gegossenen Kreuz auf der Welle befestigt.

Bei den mehrpoligen Maschinen, Type Zeta (Fig. 273), besteht der Feldmagnetkranz aus Stahlfaconguss; er ist bei kleineren Modellen ungetheilt, bei den grösseren besteht er aus zwei Hälften. Die Polkerne sind am Kranz angegossen; sie werden an der inneren Fläche zur Aufnahme der durch Schrauben an ihnen befestigten Polschuhe abgedreht und mit den auf starke Kästen von Vulkanitasbest

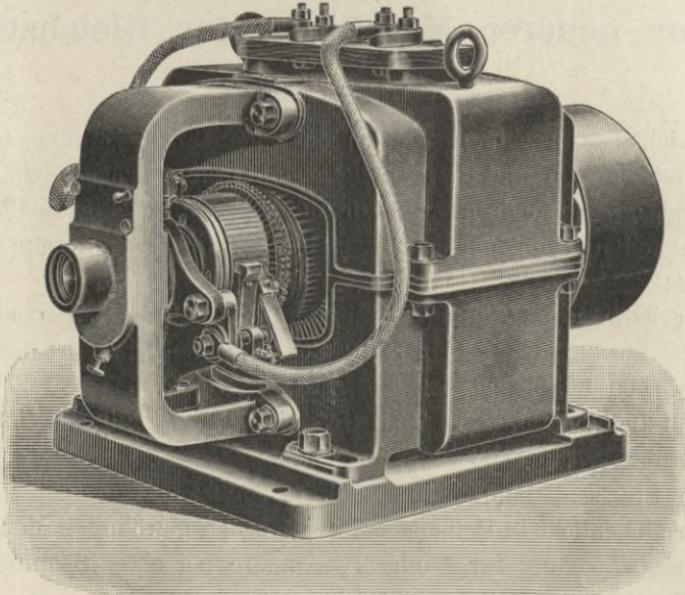


Fig. 272. Zweipolige Maschine der A. G. Elektrizitätswerke vorm. Kummer & Co.

gewickelten Magnetspulen versehen. Der Anker ist, wie bei der vorigen Type, ein Ringanker.

Diese Maschinen werden für Leistungen von 1,9 bis 1300 Kilowatt und für Spannungen bis 600 Volt gebaut. Eine grössere Maschine dieser Art (von Fischinger entworfen) ist die auf Tafel IX dargestellte, als Stromerzeuger für die Dresdener Strassenbahnen dienende Schwungradmaschine, bei welcher eine besondere Einrichtung zur Verhinderung der Verzerrung des Kraftlinienfeldes angewendet ist. Das bei Gusseisen sehr beliebte und vorzügliche Ergebnisse liefernde Mittel, durch Einschnitte in den Polschuhen dem Zusammendrängen der Kraftlinien an dem Austritts-Polhorn zu begegnen, stiess bei Stahlgussgestellen auf Schwierigkeiten, denn die Aussparung der schmalen Zwischenräume vermochte der Stahlgiesser nicht auszuführen.

Durch das hier angewendete Hilfsmittel (D. R.-P. Nr. 104022) nun wird die Zusammendrängung der Kraftlinien an dem Austritts-Polhorn in folgender Weise verhindert (vergl. die Nebenfigur der Tafel):

Der Polschuh wird aus zwei Stücken zusammengesetzt, deren eines aus Gusseisen, deren anderes aus Stahlfaconguss besteht. Das

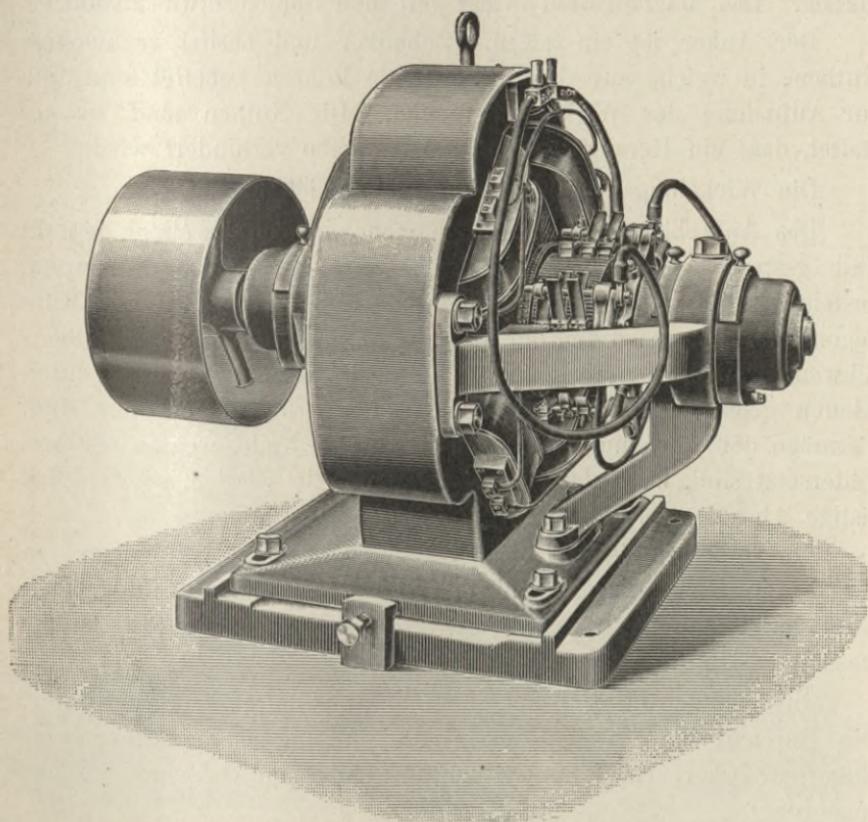


Fig. 273. Mehrpolige Maschine der A. G. Elektrizitätswerke vorm. Kummer & Co.

Letztere nimmt die Eintrittsseite, das andere die Austrittsseite des Polschuhes ein. Vermöge der grösseren Permeabilität des Stahlgusses werden nun die Kraftlinien nach dieser Hälfte des Polschuhes hinübergezogen und dadurch an dem Eintritts-Polhorn eine Zusammendrängung der Kraftlinien erzielt, aus welcher ein starkes Feld hervorgeht. Diese Wirkung wird noch dadurch verstärkt, dass die Berührungsfläche des Stahlgussteiles des Polschuhes mit dem Magnetpol eine grössere ist, als diejenige des anderen Theiles,

während die Austrittsflächen der Kraftlinien entgegengesetzte Verhältnisse aufweisen. Die Abmessungen sind so getroffen, dass die Polschuhtheile ohne weiteres miteinander vertauscht werden können, wenn einmal die Drehrichtung der Maschine geändert werden soll.

Die Anordnung ist nach den vorgenommenen Versuchen von ausgezeichneter Wirkung, das Magnetfeld ist ausserordentlich gleichmässig. Das Magnetgestell wiegt mit den Spulen etwa 23000 kg.

Der Anker ist ein sogen. Lochanker und besitzt rechteckige Nuthen, in welche zuverlässig isolirende Röhren gebettet sind, die zur Aufnahme der Wickelung dienen. Die Nuthen sind so gestaltet, dass ein Herausfliegen der Ankerstäbe verhindert wird.

Die Wickelung ist eine Stab-Schleifenwickelung.

Das Ankerblech ist bestes Dynamoankerblech, zweimal gegläht und gestreckt. Der Anker, dessen Durchmesser 5,5 m beträgt, besteht aus 18 Segmenten, welche blattweise von Mitte zu Mitte gegeneinander versetzt und mit dem Schwungring durch 36 schwalbenschwanzförmige Keile verbunden sind. Die Letzteren werden durch Klauen gehalten, welche auf dem Schwungring angegossen sind. Vermöge der Anordnung einer zweiten Reihe Keile, welche ersteren hintersetzt sind, kann der Anker genau centrirt werden, so dass das lästige Abdrehen erspart wird.

Der Collector sitzt auf der verlängerten Nabe des Ankers, so dass er in festem Zusammenhange mit der Ankerwickelung auch dann noch steht, wenn der Anker von der Kurbelwelle der Dampfmaschine entfernt ist.

Die Lamellen des Collectors bestehen aus hartgezogenem Kupfer. Die Bürstenbrücke besteht aus Gusseisen und ist auf dem verlängerten Lagerkörper durch Handrad leicht und bequem drehbar angeordnet.

Die Bürstenbolzen sind wiederum ihrerseits drehbar in den Armen der Bürstenbrücke gelagert und sämmtlich untereinander mechanisch verbunden, so dass sie zwecks Anspannens und Abhebens der Bürsten von einer Stelle aus bewegt werden können.

Um die verlangte Schwungmassenwirkung  $Gv^2 = 12000000$  zu erhalten, ist im Ankereisen ein — auch schon aus Festigkeitsgründen erforderlicher — Ring von 4,5 Tonnen Gewicht angeordnet. Der Anker wiegt mit dem Collector, dessen Lamellen aus hart gezogenem Kupfer bestehen, etwa 35 Tonnen, er ist auf der Welle durch zwei doppelte Tangentialkeile befestigt.

**Allgemeine Electricitäts-Gesellschaft, Berlin.**

Die Gesellschaft baut zweipolige Maschinen (bis ca. 12 P) in zwei Modellen, N G, P G, geschlossener Bau, Trommelanker, und S, NS in Hufeisenform. Bei grösseren Leistungen sind die Maschinen mehrpolig, mit achteckigem oder rundem Gehäuse. Fig. 274 zeigt

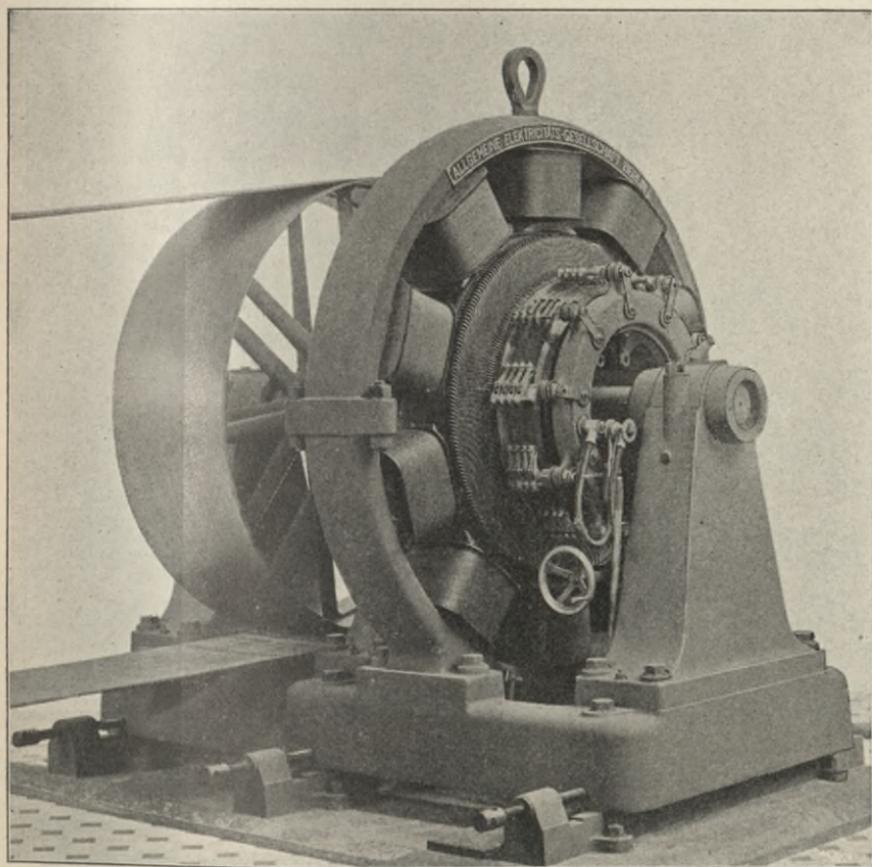


Fig. 274. Zehnpolige Gleichstrommaschine der A. E. G., Berlin. (Modell SG. 1250.)

das Modell SG 1250, welches für 550 Volt, 257 Ampere bei 270 Umdrehungen gebaut wird (Anker siehe Fig. 240, S. 291). Die in Fig. 275 dargestellten P G-Maschinen werden besonders als Motoren für Druckereipressen verwendet. Auf Tafel VI ist eine vierzehnpolige Gleichstrommaschine mit senkrechter Achse, Modell R F 7200, dargestellt, wie sie für die Elektrochemischen Werke Rheinfelden mehrfach ausgeführt wurde. Die Maschine ist für 130 bis 140 Volt

Spannung bei 4300 Ampere gebaut und macht 63 Umdrehungen in der Minute. Die Turbine, mit welcher der Stromerzeuger direct gekuppelt ist, leistet 840 P an ihrer Welle. Zur Aufnahme des

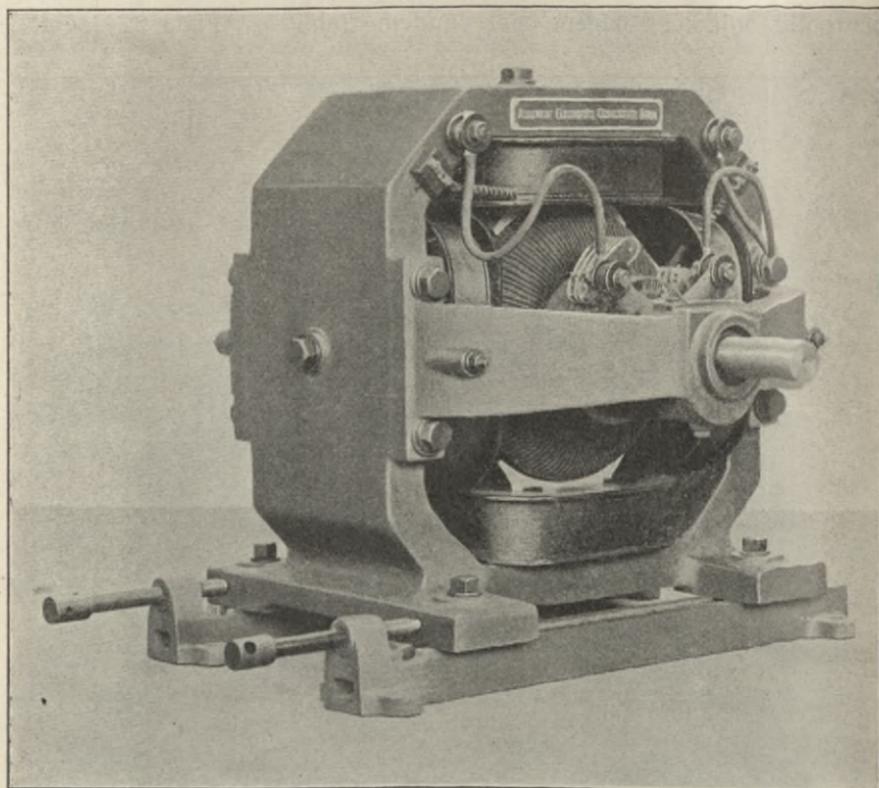


Fig. 275. Vierpolige Gleichstrommaschine der A. E. G., Berlin. (Modell P.G.)

verticalen Druckes ist die Maschine mit einem Oeldrucklager versehen, in welches das Oel mit ca. 17 Atm. Ueberdruck hineingepresst wird.

**Berliner Maschinenbau-Aktien-Gesellschaft vormals L. Schwartzkopf, Berlin.**

Die Gesellschaft verwendet bei ihren Gleichstrommaschinen vorwiegend Trommelanker, in Grössen bis zu 590 Kilowatt. Eine Specialität der Firma ist der Bau von Dampfdynamomaschinen für Schiffsbeleuchtung. Die in Figur 276 dargestellte Maschine ist für Torpedoboote bestimmt, wo besonderer Werth auf möglichst geringes

Gewicht und geringen Raumbedarf zu legen ist. Dieses Modell wird zur Zeit in drei Grössen ausgeführt:

| Dampfdynamo-<br>maschine | Cylinder-<br>durchmesser | Hub   | Umlauf-<br>zahl | Volt | Ampere | Gewicht<br>kg |
|--------------------------|--------------------------|-------|-----------------|------|--------|---------------|
| B                        | 130 mm                   | 80 mm | 500             | 65   | 60     | 480           |
| C                        | 150 "                    | 100 " | 500             | 65   | 100    | 700           |
| D                        | 150 "                    | 100 " | 600             | 105  | 80—90  | 760           |

Die Dampfmaschinen geben die verlangten Leistungen bei einer Eintritts-Dampfspannung von 8 Atm.; die Cylinder sind jedoch stark

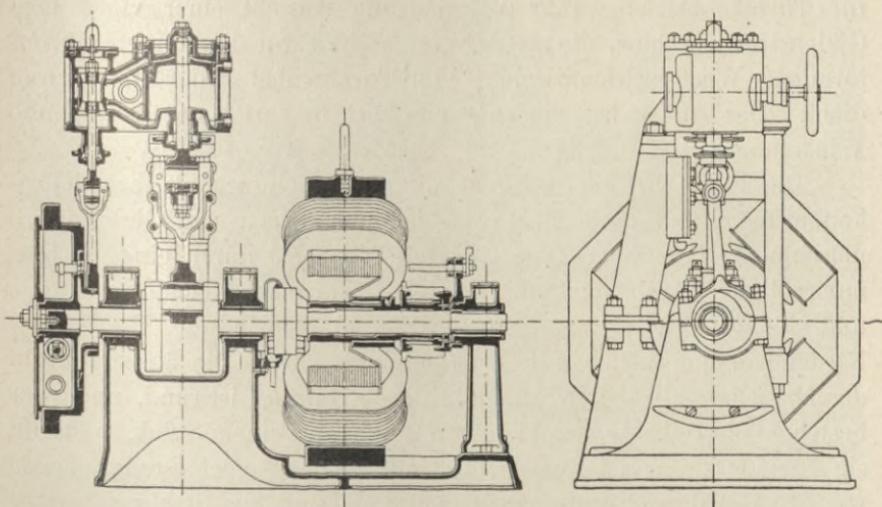


Fig. 276. Dampfdynamomaschine für Torpedoboote der Berliner Maschinenbau-Aktiengesellschaft.

genug gebaut, dass sie eine Spannung von 15—18 Atm., welche bei Schiffskesseln die übliche ist, ohne Vorschaltung eines Reducirventils aushalten können. Dementsprechend ist als Metall für Cylinder, Kolbenschieber und Schieberkasten Special-Phosphorbronce verwendet, während die Welle, Pleuel-, Schieber- und Kolbenstange aus Stahl gefertigt sind. Der Ständer und die Grundplatte sind Gusseisen. Der Kolbenschieber der Dampfmaschine wird in seiner Dampfvertheilung von einem kräftigen, in das Schwungrad eingebauten Achsenregulator so beeinflusst, dass dem jeweiligen Kraftverbrauch entsprechend die Füllung verändert wird. Die Tourenzahl ändert sich bei constanter Belastung höchstens um 1 Proc., und bei plötzlichen Belastungsänderungen bis zur Hälfte der normalen Leistung um ca. 2 bis 3 Proc.

Die Dynamomaschine ist eine vierpolige Compoundmaschine. Das Magnetsystem ist aus weichem Stahlguss hergestellt, der Anker mit Ringwicklung versehen. Wie aus dem niedrigen Gewicht der Maschinen zu schliessen ist, sind die Dimensionen ebenfalls sehr gering, z. B. beträgt bei der Type B die grösste Länge 960 mm, die grösste Höhe 906 mm und die grösste Breite 560 mm.

#### **Brown, Boveri & Co.**

Seit 1892, als die Firma ins Leben trat, hat Brown viele Maschinen-Typen ausgebildet, besonders solche mit verticaler Achse für Turbinenbetrieb. Tafel V giebt die Ansicht einer vierpoligen Gleichstrommaschine, die als Erregermaschine für die grossen schirmförmigen Wechselstrommaschinen im Turbinenhaus der Stadt Aarau dient. Der Anker hat die auf Seite 291 beschriebene überragende Wickelung.

Die Firma hat in Rücksicht auf die Vereinfachung ihrer Fabrikation nach und nach ihre verschiedenen Typen von Gleichstrommaschinen (Manchester-Type, Mantel-Type etc.) durch eine einzige, mehrpolige Maschinengattung, Modell O, ersetzt, welche für grosse und kleine Umdrehungsgeschwindigkeiten, sowie für Hoch- und Niederspannung gleich gut Verwendung findet. Die äussere Form des Magnetgestelles aller Nummern dieser Gattung ist rund, und zwar bestehen die Gehäuse der kleineren Typen aus einem Stück, während sie für die grösseren zweitheilig sind. Alle Magnetgestelle, ebenso wie die radial nach innen stehenden Pole sind aus Stahlguss.

Für die kleineren Nummern werden rechteckige Magnetkerne, für die grösseren runde verwendet. Diese Verschiedenheit in der Ausführung rührt daher, dass die kleineren Modelle geblätterte Polschuhe erhalten, um eine allzu grosse Erwärmung zu vermeiden, welche die Folge der kleinen Luftzwischenräume, sowie der verhältnissmässig weit gehaltenen Nuthen der Anker sein würde. Letztere Anordnung wird zum Zwecke einer bequemen Herstellung der Wickelung und der Möglichkeit einer kräftigen Isolation getroffen. Die Verwendung geblätterter Polschuhe ist bei den Maschinen grösserer Leistung als überflüssig betrachtet worden, weil der Luftzwischenraum hier genügend gross ist; es konnten daher die Magnetkerne rund belassen werden, was die Herstellung der Magnetspulen vereinfacht.

Alle Nummern dieser Gattung besitzen Trommelwicklung, welche in Nuthen des Ankereisens verlegt ist. Die einzelnen Spulen der Wickelung werden vorher auf geeigneten Schablonen geformt. Die

Art und Weise, wie diese Schablonenwicklung angeordnet ist, gestattet, jederzeit einzelne Theile herauszunehmen und durch neue zu ersetzen. Die Bandagen sind in Einfräsungen versenkt, um ihre Beschädigung im Falle des Streifens der Anker zu verhüten.

Die Collectoren bestehen durchweg aus Kupfer; sie sind mit Glimmer isolirt; ihre Oberfläche ist sehr gross, denn es werden nur Kohlenbürsten verwendet. Die Magnetspulen sind hoch und

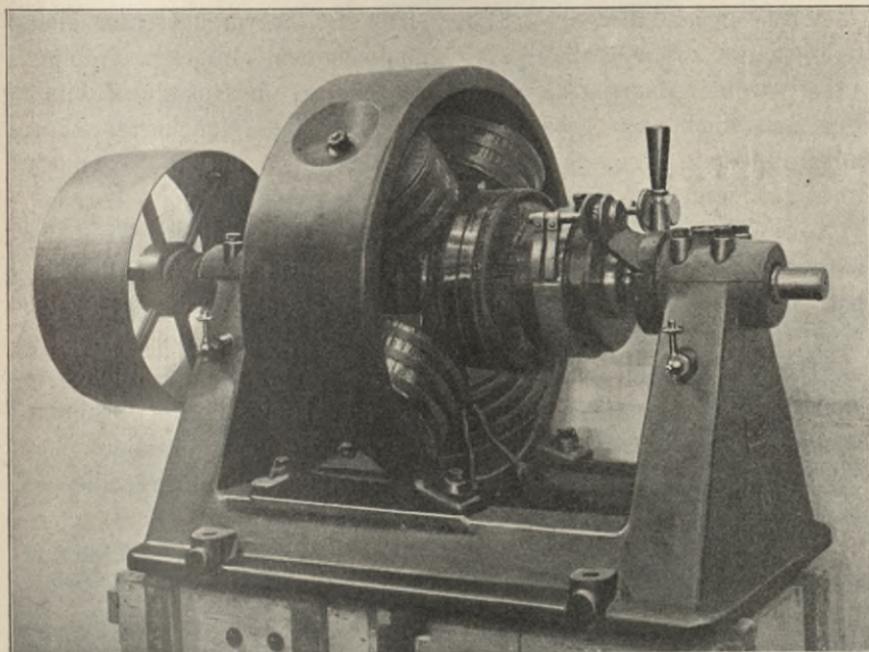


Fig. 277. Hochspannungsmaschine von Brown, Boveri & Co.

dünnwandig, damit in Folge der grossen Abkühlungsfläche ein Verkohlen der gegen die Magnetkerne zu liegenden Windungen ausgeschlossen sei.

Alle Nummern, deren Leistungen bei normaler Drehungsgeschwindigkeit zwischen 2 bis 50 Kilowatt liegen, haben vierpoliges Magnetgestell, gleichviel, ob sie für Hoch- oder Niederspannung bestimmt sind. Von 50 Kilowatt ab kann jede Maschine vier- oder mehrpolig ausgeführt werden, je nachdem es Spannung oder Umdrehungsgeschwindigkeit vortheilhafter erscheinen lassen.

Diese Maschinengattung O wird gegenwärtig bis zu Leistungen von ca. 500 P gebaut, jedoch sind auch die Gleichstrommaschinen

höherer Leistung, die in eine bestimmte Gattung noch nicht eingereicht wurden, nach ganz ähnlichen Principien angeordnet, d. h. die Form des Magnetfeldes, der Pole, der Anker, der Wickelungen, der Grundplatte etc., erfährt nur dann eine Abänderung, wenn es die Verhältnisse der Antriebsmaschinen erheischen.

Figur 277 zeigt eine Hochspannungsmaschine dieser Art.

#### **Brush Electrical Engineering Co.**

Die Brush Electrical Engineering Co. bevorzugt für kleine Grössen die zweipolige Form mit oberliegendem einfachen Trommelanker, wobei Magnetgestelle und Fussplatte ein Gussstück bilden. Für Leistungen von 1 bis 7 Kilowatt wird die »Manchester«-Form mit Ringwicklung angewendet. Für Leistungen bis zu 36 Kilowatt und für Motoren wählt sie eine nach Patenten von Mordey, Winne und Sellon gebaute Form einer vierpoligen Flachringmaschine, welcher sie die Bezeichnung »Victoria«-Maschine beigelegt hat, und die ihre Entstehung einer Entdeckung verdankt, welche Mordey mittelst einer Methode der Prüfung der Potentialvertheilung am Stromabgeber machte. Wenn er die Polstücke verkleinerte, um Raum für ein vierpoliges Feld zu schaffen, erhielt er nämlich mit einem von Schuckert für ein zweipoliges Feld gebrauchten Ringanker die doppelte Leistung, ohne dass die Geschwindigkeit geändert wurde.

Wie man aus der Darstellung der vierpoligen »Victoria«-Maschine in Figur 278 ersieht, sind die gusseisernen Polstücke auf die cylindrischen Kerne von weichem Eisen, welche die Wickelung aufnehmen, aufgesetzt. Der Anker der »Victoria«-Maschine wurde verschiedene Male abgeändert, gegenwärtig wird der Kern mit fast quadratischem Querschnitte hergestellt. Er wird aus Streifen von Holzkohleneisen hergestellt, die man auf einen als Grundlage dienenden starken Ring wickelt. Die Berührung der einzelnen Lagen wird durch zwischengewickeltes Papier verhindert. Der Ringkern und einige der inneren Windungsstreifen sind zur Aufnahme der Arme aus Stückgut ausgeschnitten, von diesen sind zwei Sätze auf jeder Seite miteinander verbunden.

Die Figur 278 zeigt dies, sowie die Art und Weise, den Ring an der Welle mittels Gegenmuttern zu befestigen.

Zur Herstellung der Ankerwickelungen wird quadratischer Draht verwendet. Die Lüftung ist ausgiebig, weil die Wickelungen nicht den ganzen äusseren Umfang des Ankers bedecken. Die Hin- und

Herbewegung der Achse wird durch ein an dem einen Ende angeordnetes, mit tiefen Nuthen versehenes Kammzapfenlager aus Babbitt-Metall verhindert.

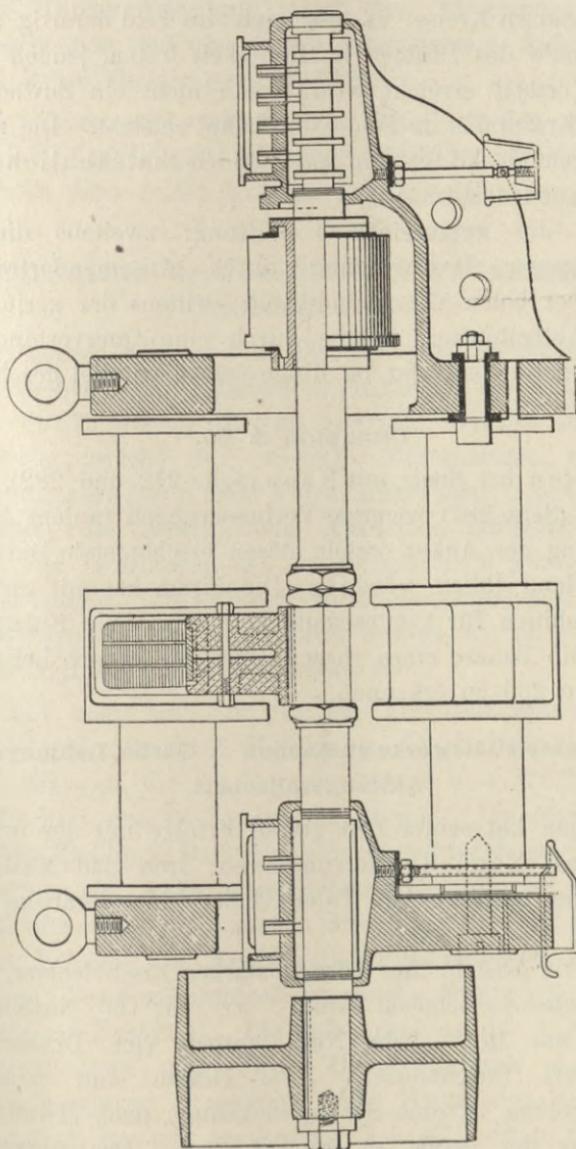


Fig. 278. Mordey-Victoria 18 Kilowatt-Maschine (Querschnitt und Ringaufbau zeigend).

Mordey verminderte, wie schon im Kap. XII erwähnt, durch andere Verbindungsweise der Ankerleiter die Anzahl der Bürsten auf zwei.

Der ursprünglich für den Flachring beanspruchte Vortheil, dass weniger von der gesammten Drahtlänge auf der inneren Seite des

Ringes »unthätig« sein und den Widerstand unnütz vermehren soll, beruht mehr auf Einbildung als auf Thatsachen; denn der gesammte Widerstand des Ankers ist nur ein geringer Bruchtheil des Widerstandes im ganzen Kreise; es lässt sich das Feld derartig ausdehnen, dass alle Theile des Drahtes in Thätigkeit treten, jedoch ohne dass damit ein Vortheil erreicht wird, wenn nicht ein Zuwachs an der Summe der Kraftlinien im Felde überhaupt entsteht. Die zu Gunsten der vielpoligen Flachringanker sprechenden thatsächlichen Gründe scheinen folgende zu sein:

Erstens die ausgezeichnete Lüftung; zweitens die grössere Sicherung gegen Beschädigung durch Auseinandertreiben der Wickelung bei hoher Geschwindigkeit; drittens der geringe Widerstand der Abtheilungen, welche durch eine Querverbindung, entweder an den Bürsten oder im Ringe selbst, parallel geschaltet sind.

#### **Crompton & Co.**

Crompton hat theils mit Kapp (Seite 272 und 282), theils mit Swinburne (Seite 287) wichtige Verbesserungen in dem Aufbau und der Wickelung der Anker erzielt, deren erschöpfende Darlegung für sich einen Band füllen würde<sup>1)</sup>. Die Firma hat mit grossen vierpoligen Maschinen für Centralstationen bedeutende Erfolge zu verzeichnen. Die Bauart eines ihrer Anker für grosse Leistungen ist aus der Figur 236 zu erkennen.

#### **Deutsche Elektrizitätswerke zu Aachen — Garbe, Lahmeyer & Co. — Aktiengesellschaft.**

Die Firma hat seiner Zeit grosse Erfolge mit der ursprünglich von Rankine Kennedy herrührenden, iron-clad-Maschinen genannten Form gehabt. Auf Tafel III ist eine derartige Maschine dargestellt.

Der Anker besteht aus 0,5 mm starken Eisenblechen, die direkt auf die Achse geschoben sind. Er hat 60 Nuthen, 7 mm breit, 24,5 mm tief. Jede Nuth enthält vier Drähte, 5,5 mm (isolirt 6 mm) Durchmesser. Zwei Drähte sind parallel. Die Trommelwickelung ist eine Sehnenwickelung, nach Mordey; es ist gewickelt aus der ersten in die 22. Nuth. Der einseitige Luftzwischenraum ist ca. 4 mm. Die Nebenschlusswickelung hat in jeder

<sup>1)</sup> Vergl. die Bemerkungen von Crompton in Proc. Inst. Civ. Engin., Bd. 83, S. 125. 1885. Journ. Soc. Telegr. Engin., Bd. 15, S. 546. 1886. Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 19, S. 239. 1890, und Bd. 20, S. 308. 1891.

Spule 1150 Windungen 2,5 mm starken Drahtes. Die beiden Spulen sind hintereinandergeschaltet. Der Erregerstrom beträgt bei Vollast und 110 Volt ca. 3,8 Ampere, bei 150 Volt 4,5 Ampere, bei entsprechender Bürstenverstellung. Auf dem Klemmbrett sind zwei Hauptstromklemmen und eine Nebenschlussklemme, Ankerwiderstand 0,015 Ohm, Schenkelwiderstand 13,3 Ohm.

Ausser diesem viel verbreiteten Modell werden noch andere Formen gebaut, sowie neue Modelle eingeführt, sobald die Firma den Betrieb in ihrer neuen, grossen Fabrik eröffnet.

**Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. W. Lahmeyer & Co.,  
Frankfurt a. M.**

Die Maschinen haben bis zu 800 Kilowatt die eisengeschlossene »Lahmeyer«-Form mit Radialpolen, sie werden bis zu 13,5 Kilowatt zweipolig, von 15 bis 55 Kilowatt vierpolig, darüber hinaus sechs- und mehrpolig, solche für niedrige Tourenzahlen und directe Kuppelung mit zehn oder mehr Polen ausgeführt. Die Gestelle sind aus Gusseisen, die Anker ohne Ausnahme Nuthenanker, deren Wickelung, von 15 Kilowatt an, aus entsprechend gebogenen Flachkupferstäben besteht. Als Isolation wird ausschliesslich Glimmer und Mikanit angewendet. Die Collectoren werden bis zu den höchsten Stromstärken mit Kohlenbürsten versehen.

Tafel XIV zeigt eine der für das Elektrizitätswerk Dortmund gelieferten Doppelschwungrad-Maschinen. Die Leistung jedes Ankers beträgt 185 Kilowatt, die der Doppelmachine also 370 Kilowatt, bei 260 bis 370 Volt und 90 Touren pro Minute. Die Maschinen sind mit liegenden Zwillings-Dampfmaschinen gekuppelt und dienen bei Parallelschaltung der Anker zum Lichtbetrieb, während zur Speisung des Strassenbahn-Netzes die Anker in Hintereinanderschaltung arbeiten. Der mittlere Rahmen trägt beiderseits aufgeschraubt je einen Anker mit Collector. Das Gusseisenjoch ist glockenförmig ausgebildet und trägt 30 Pole aus Gussstahl. Die Stabwickelung des Ankers ist nach dem Trommelsystem und unter Benutzung der Arnold'schen Reihenparallelschaltung ausgeführt. Die Hauptdaten sind: Ankerdurchmesser 5 m, Gewicht des Ankers  $G = 47$  Tonnen, Schwerkreisdurchmesser  $D = 4,5$  m, Ungleichförmigkeitsgrad  $\frac{1}{200}$ ,  $GD^2 = 960\,000$ .

Ein besonderes Modell wird für directe Kuppelung mit Dampfturbinen gebaut, in allen Grössen bis 200 P. Die Dynamomaschinen werden hierbei zur Vermeidung einer einseitigen Beanspruchung der

Turbinenwelle als Doppelmaschinen ausgeführt. Figur 279 stellt eine derartige Maschine in der Gesamtanordnung dar.

Zur Speisung von Dreileiternetzen vermittelt einer Maschine baut die Firma Dreileitermaschinen nach D. R.-P. Nr. 90 365 für Leistungen bis zu 125 Kilowatt. Die Maschinen werden vier-, acht- oder mehrpolig ausgeführt und normal für  $2 \times 110$  Volt oder  $2 \times 220$  Volt geliefert. Die Magnete werden so erregt, dass

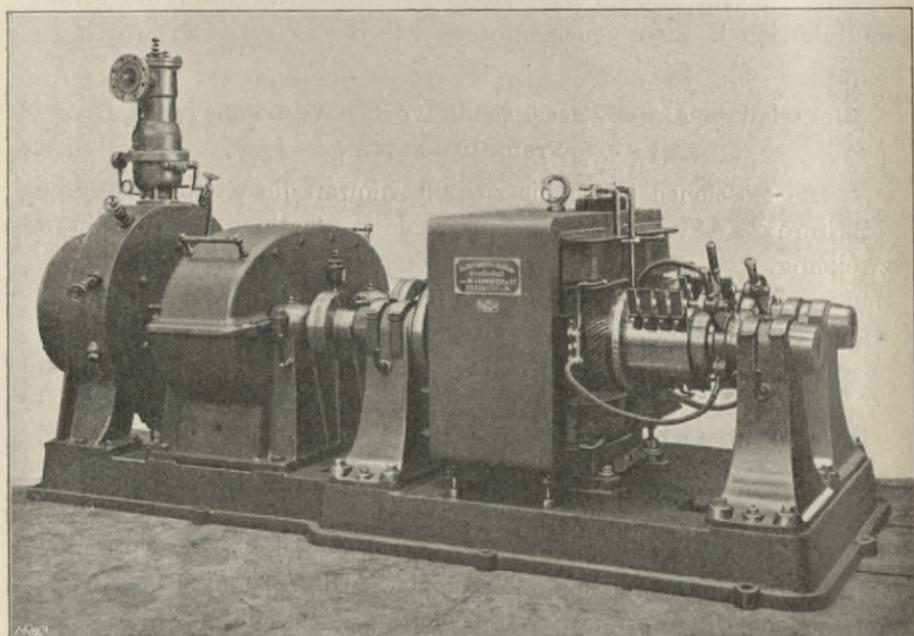


Fig. 279. Doppelmaschine, direct gekuppelt mit einer Dampfturbine.  
Lahmeyer, Frankfurt a. M.

abwechselnd und aufeinanderfolgend je zwei Süd- und zwei Nordpole entstehen. Der Anker wird entsprechend der Anzahl der Doppelpole gewickelt. In der durch die eigenartige Erregung der Pole zwischen den positiven und negativen Bürsten entstehenden neutralen Zone wird durch Auflegen einer dritten Bürste eine funkenlose Spannungsteilung ermöglicht. Die Spannung der einzelnen Zweige ist für sich regulierbar.

**Elektricitäts-Aktiengesellschaft vorm. Hermann Pöge, Chemnitz.**

Die Gleichstrommaschinen werden bis zu einer Leistung von ca. 20 Kilowatt zweipolig mit Trommelanker ausgerüstet. Für höhere

Leistung werden dieselben vier-, sechs-, acht- oder zehnpolig gemacht und der Anker in Reihenschaltung ausgeführt. Der Collector, D. R.-P. Nr. 60369, besitzt ausnahmslos kupferne Lamellen, welche mit Glimmer voneinander isolirt sind. Für alle Maschinen werden Kohlenbürsten verwendet, die Construction gestattet, dass für jede Belastung der Maschine von Null bis Voll die Bürstenbrücke an

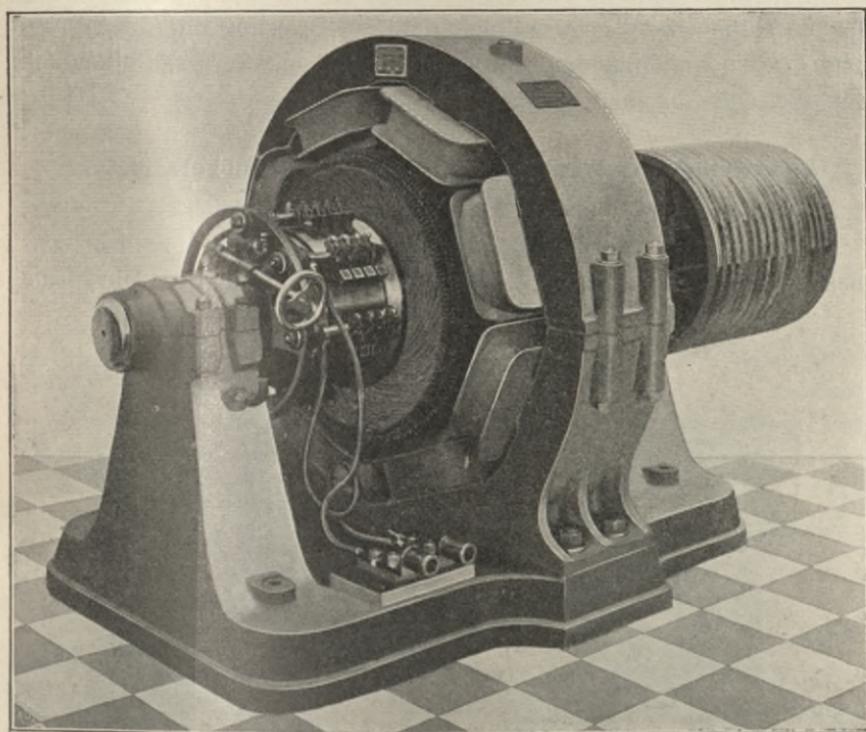


Fig. 280. Dreileitermaschine von Pöge, Chemnitz.

derselben Stelle verbleiben kann, ohne dass die geringste Funkenbildung auftritt.

Für Centralen nach dem Dreileitersystem liefert die Firma Dreileitermaschinen, bei welchen eine Verstellung der Bürsten selbst dann nicht erforderlich ist, wenn die eine Netzhälfte voll, die andere gar nicht belastet ist. Man erreicht also mit dieser Maschine alle Vortheile, welche zwei hintereinander geschaltete Maschinen halber Leistung bieten, jedoch hat dieselbe bezüglich des Antriebes und der Handhabung natürlich bedeutende Vortheile. Die Figur 280 stellt eine Maschine für  $2 \times 125$  Volt, 300 Ampere oder  $2 \times 250$  Volt,

150 Ampere bei 500 Touren dar. Die Maschine hat acht Polvorsprünge, von denen je zwei aufeinander folgende gleiche Polarität besitzen. Der Anker ist demnach für eine vierpolige Maschine zu bewickeln, und sind vier Hauptstromabnahmestellen für den Plus- und Minusleiter und eine Stromabnahmestelle für den Nulleiter angebracht. Das Magnetfeld ist in zwei Theile zerlegt, die beiden Theile können einzeln regulirt werden; je nach der Drehrichtung der Maschine wird das eine Magnetfeld zur Speisung an die Aussenleiter gelegt, währenddem das andere an einen Aussenleiter und den Nulleiter angelegt wird.

**Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals Schuckert & Co.,  
Nürnberg.**

Die für die Firma Schuckert ehemals typische Flachringmaschine wird als normale Maschine nicht mehr gebaut. Die Firma

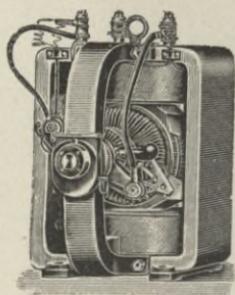


Fig. 281. Zweipolige Dynamomaschine von Schuckert.

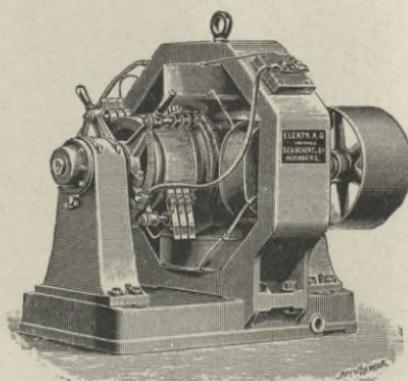


Fig. 282. Vierpolige Dynamomaschine von Schuckert.

baut jetzt Maschinen nach dem sogenannten Aussenpoltypus, bei welchem das feststehende Magnetgestell in Gestalt eines Rahmens, an welchem, radial nach innen gerichtet, die eigentlichen Magnetpole sitzen, den Anker umschliesst. Die Magnetgestelle sind aus Fluss-eisen, mit Ausnahme der kleinsten Maschinen (unter 2 Kilowatt), bei welchen sie aus Gusseisen mit eingesetzten schmiedeeisernen Magnetkernen bestehen. Der Anker wird meistens als Trommelanker ausgeführt, die Wicklung besteht aus einer Lage rechteckiger Stäbe, die Stirnverbindungen aus evolventenförmig gebogenen Blechen, mit welchen je zwei Stäbe unter benachbarten Polen verbunden sind. Die Stirnverbindungen bilden in ihrer Gesamtheit ein Gitter,

welches der Luft freien Durchgang gestattet, wodurch eine vorzügliche Kühlung und Isolation erreicht wird. Für höhere Spannung besteht die Wickelung aus Drähten, welche auf einer Schablone in Form eines Rahmens aufgewickelt und auf dem Anker befestigt werden. Je nach der Verwendungsart der Maschine wird die Wickelung auf die glatte Oberfläche oder in Nuthen des Ankers gelegt und durch eine Anzahl Drahtbünde festgehalten. Der Stromabgeber wird aus Hartkupfer hergestellt. Als Bürsten verwendet die Firma die ihr gesetzlich geschützten Doppelbürsten, welche die Vortheile der Kohlen- und Kupferbürsten vereinigen.

Die Modelle von  $\frac{1}{20}$  bis 14 Kilowatt werden zweipolig, nach Figur 281, darüber hinaus bis 100 Kilowatt vierpolig (Figur 282) und von 100 bis 1600 Kilowatt mehrpolig ausgeführt.

#### Maschinen von Edison.

Nachdem Edison im Jahre 1879 eine eigenartige Maschinen-gattung als Stromerzeuger in Vorschlag gebracht hatte, bei welcher Inductionsspulen an den Enden einer gigantischen Stimmgabel in Schwingungen versetzt wurden, entwarf er, zusammen mit Upton, die in früheren Auflagen dieses Buches abgebildete Maschine. Sie hatte einen Trommelanker, der zwischen starken Polstücken umlief; letztere wurden durch einen sehr langen Magnet mit säulenförmigen Schenkeln erregt.

In grösseren Maschinen wurden zwei oder drei grosse Feldmagnete nebeneinander und über den Anker von doppelter oder dreifacher Länge gestellt. Bei einer 60 Lampen-Maschine des Musters Z ergab sich bei der Prüfung durch die Commission der Münchener Ausstellung, dass das Verhältniss der äusseren elektrischen Arbeit zur gesammten elektrischen Arbeit (Güteverhältniss) über 87 Procent betrug, während das Verhältniss der äusseren elektrischen Arbeit zu der an die Welle abgegebenen mechanischen Arbeit (der mechanische Wirkungsgrad) höchstens 58,7 Procent betrug. Dies rührte von den Wirbelströmen in den Bolzen her, die den Anker und andere Metallmassen zusammenhielten. Die »Jumbo«-Dampfdynamomaschinen hatten einen noch geringeren Wirkungsgrad und erforderten ein Gebläse von vier Pferdekraften, um den Anker durch einen starken Luftstrom kühl zu erhalten. Hopkinson's Versuche zur Verbesserung dieser Maschinen führten zur Construction der oben erwähnten »Manchester«-Maschine.

Die Feldmagnete aller grösseren Maschinen von Edison, die aus der Zeit vor 1884 stammen, bestanden aus einer Anzahl langer eiserner Säulen als Kerne zur Aufnahme der Wickelung. Seit jener Zeit ist der gedrängtere einfache magnetische Kreis mit kurzen starken Magneten von den Edison-Gesellschaften angenommen worden.

#### Maschinen der General Electric Co.

Figur 283 giebt eine Ansicht einer in den Werken zu Schenectady hergestellten sechspoligen Dynamomaschine für Strassenbahn-

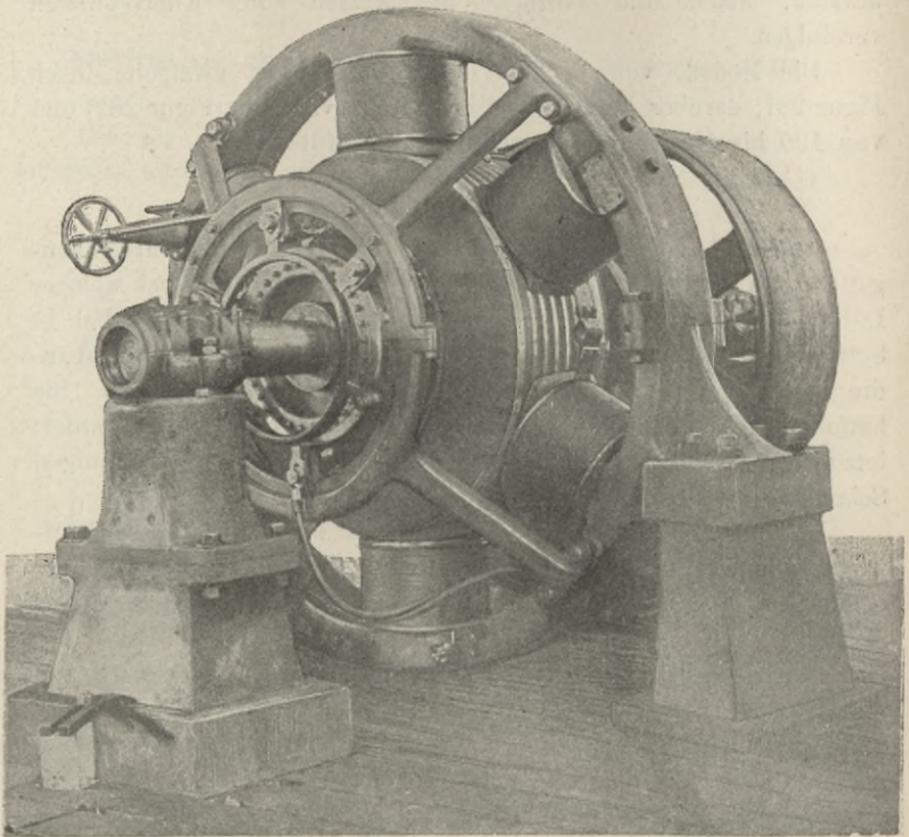


Fig. 283. Dynamomaschine der General Electric Co. für Strassenbahnbetrieb.

betrieb von 400 Kilowatt bei 150 Umdrehungen in der Minute. Die Leistung ist 800 Ampere bei 500 Volt. Diese Maschinen sind so gebaut, dass die magnetische Dichte in den Polkernen etwa 13000 und im Joch etwa 11000 Linien auf das Quadratcentimeter sein soll. In den Ankerkernscheiben ist die Dichte ebenfalls 11000, in den Zähnen

jedoch 21000 Linien auf das Quadratcentimeter; diese hohe Sättigung ist gewählt, um mit ihrer Hilfe Verzerrungen des Feldes zu verhindern. Die zugelassene Zahl der Ampere in den Ankerleitern ist nur 2,3 auf das Quadratmillimeter Querschnitt. Einzelne erheblich grössere Maschinen sind auch für directen Antrieb gebaut, so die sechs 1500 Kilowatt-Maschinen in der Brooklyner Centralstation.

### Dynamomaschinen von Gramme.

Sehr viele Formen — von der kleinen in Figur 7 dargestellten Versuchsmaschine mit Dauermagneten aus Stahl bis zu den grossen Maschinen für mehrere hundert Pferdekkräfte — wurden der Gramme-Maschine seit ihrer Erscheinung im Jahre 1871 gegeben.

Für den, der eingehendere Belehrung über die verschiedenen Muster der Gramme-Dynamomaschine sucht, sei die Abhandlung von Niaudet, »*Machines électriques à courants continus, système Gramme et congénères*« (1881), empfohlen, ferner die früheren Auflagen dieses Werkes, in welchen zahlreiche Formen<sup>1)</sup> beschrieben sind.

### Helios, Electricitäts-Aktiengesellschaft, Cöln-Ehrenfeld.

Die kleinsten Maschinen bis zu 1,82 Kilowatt haben vollkommen geschlossenen Bau, Trommelanker und nur eine Spule; bis zu 8,25 Kilowatt wird eine halb geschlossene, zweispulige Form bevorzugt. Seit 1½ Jahren baut die Firma alle grösseren Maschinen nach einem mehrpoligen Modell MPD mit verhältnissmässig grossen und schweren Nuthenankern, deren Polzahl mit der Leistung wächst, mit Stahlpolen, gut ventilirten Collectoren und Kohlenbürsten. Das Gesetel sämtlicher Grössen dieser Art hat die Grundform einer Kreiswulst von länglichem, überall abgerundetem Querschnitt. Bei den Maschinen zwischen 16,5 und 44 Kilowatt ist es zweitheilig, das Untertheil seitlich zu den Lagerbüchsen ausgebildet (Fig. 284). Die

1) Unter diesen befinden sich die verbesserten Formen von Deprez, die von Hochhausen und die der Fuller Comp. von New York; Wood in New York hat ebenfalls Verbesserungen in manchen Einzelheiten erreicht. Andere Verbesserungen stammen von Raffard, Sautter Lemonnier & Co., und anderen französischen Ingenieuren; hierüber ist Näheres in den Industries vom 5. Nov. 1886 zu finden. Ein Bericht über Gramme's historische Ausstellung in der Pariser Weltausstellung von 1889 befindet sich in Industries, Bd. 8, S. 285, 1889. Vergl. auch das Werk *Éclairage Électrique*, von Fontane, 1890, das über die elektrische Beleuchtung der Pariser Weltausstellung handelt. Eine neue, langsam laufende vielpolige Maschine, von Gramme 1892 erbaut, mit Schuckert'schem Flachring, ist in der französischen Ausgabe dieses Werkes Seite 838 beschrieben.

stählernen Pole werden mittels einer einzigen Schraube an die gusseisernen Joche befestigt und in ihrer Lage durch federartige Vorsprünge gesichert, welche in eine rings um das Joch laufende Eindrehung passen. Die Feldspulen sind auf isolirte Zinkkästen gewickelt und werden von den Polschulen festgehalten.

Die Anker haben offene Nuthen, in deren Isolation die vorher auf besonderen Formen fertiggestellten Spulen mühelos eingelegt werden können. Die Collectorlamellen haben eingefräste, die Ventilation unterstützende Ansätze, welche die vorher verzinnnten Wickelungsenden schliessend aufnehmen; der dauernd gute Contact wird dann durch Löthung gesichert. Als Isolationsmaterial wird bei den Collectoren ausschliesslich Glimmer und Mikanit verwendet.

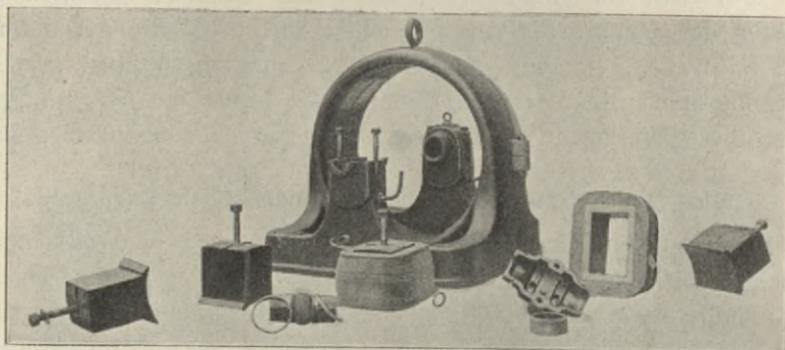


Fig. 284. Einzeltheile der kleineren Helios-Maschinen.

Die Modelle MPD 66 bis MPD 130 haben einen besonderen Fundamentrahmen und abnehmbare Lagerbüchse. Figur 285 zeigt eine Ansicht einer MPD 88-Maschine. Die Pole sind bei dieser wie bei allen grösseren Nummern von kreisförmigem Querschnitt mit angegossenen Polschuhen von rechteckiger Form. Bei den Maschinen von 130 Kilowatt bis zu 1000 Kilowatt ist directe Kuppelung mit den Antriebsmaschinen die Regel, nur selten wird Seilantrieb verlangt, so dass Fundamentrahmen und Lagerbüchse in Fortfall kommen und die Magnetfelder einfach kreisringförmig gestaltet sind.

Auch Schwungradmaschinen werden nach diesem Modell gebaut; hierbei sind die Anker zur Erreichung des erforderlichen Gleichförmigkeitsgrades auf Kosten der Breite im Durchmesser vergrössert und in den rein constructiven Theilen besonders schwer ausgebildet.

Dieses Modell ist zwar mit Bürstenhaltersternen versehen, doch dienen dieselben nur zur ersten Einstellung; während des Betriebes ist ein Verstellen der Bürsten auch bei starken Schwankungen der Belastung nicht mehr erforderlich.

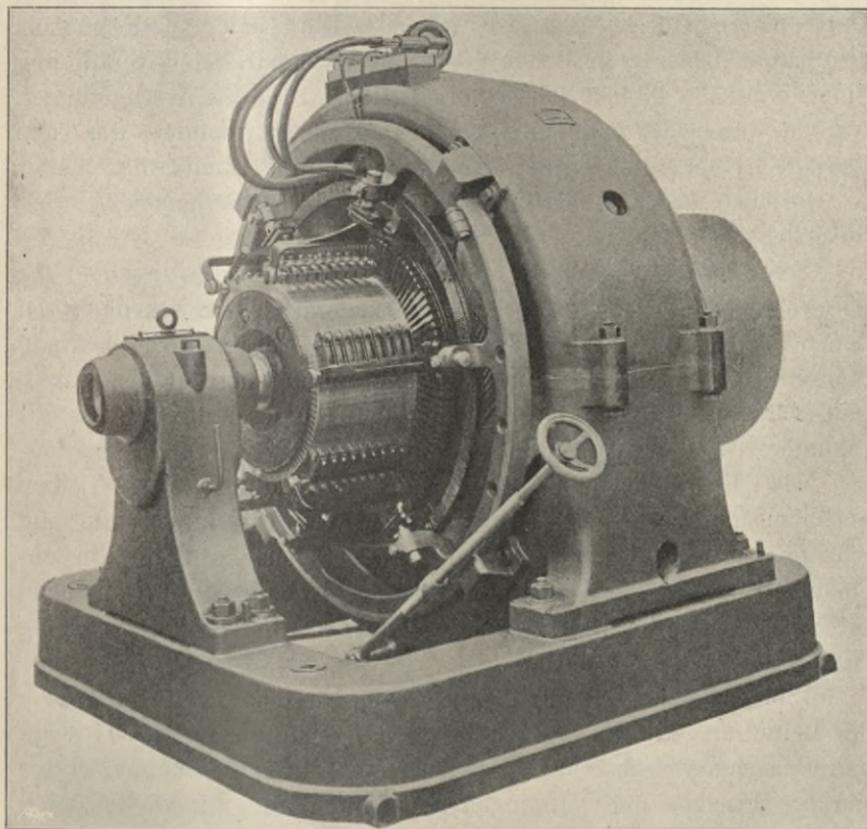


Fig. 285. Ansicht einer Maschine von Helios. (Modell M P D 88.)

#### Maschinen von Kapp.

Gisbert Kapp hat verschiedene Muster für Gleichstrommaschinen entworfen, zuerst solche mit cylindrischen Ringankern, in neuerer Zeit mit Trommelankern. Figur 259 zeigt eine solche zweipolige Maschine, sie gehört zu den Formen, bei denen Anker und Welle nach der Spitze des Feldmagnetes zu belegen sind. Die Maschinen werden von W. H. Allen & Co., sowie von Johnson & Phillips erbaut.

Die Tafel II zeigt den Anker einer von der letzteren Firma hergestellten Maschine für 21000 Watt. Die Maschine leistet

200 Ampere bei 105 Volt und 780 Umläufen in der Minute. Die Abmessungen sind folgende:

Anker. Der Kern ist 40,6 cm lang, 6 cm tief und auf einem gusseisernen Stern befestigt. Die Eisenfläche im Anker einschliesslich der Isolation zwischen den Kernscheiben beträgt 403 qcm. Der äussere Durchmesser ist 28 cm. Die Leiter bestehen aus 120 Kupferstäben, von denen jeder aus zwei parallelen vereinigten Stäben von  $53 \times 28$  mm Stärke hergestellt ist. Die Stirnverbindungen werden durch 120 Kupferstreifen mit Ansätzen gebildet, die Tiefe beträgt 4,1 cm, die Stärke 13 mm. Der Widerstand der Leiter in warmem Zustande ist = 0,025 Ohm. Der Stromabgeber hat 60 Stäbe.

Feldmagnete (Fig. 259). Durchmesser der Ausbohrung 30,3 cm. Die Nebenschlusswicklung besitzt 11 Lagen auf jedem Schenkel, von denen jede aus 139 Windungen runden Kupferdrahtes von 165 mm Stärke besteht. Einschliesslich der Umspinnung beträgt der Durchmesser 2,03 mm. Beide Schenkel sind in Reihe geschaltet. Gesamtzahl der Nebenschlusswindungen 3058.

Die Reihenwicklung liegt in 23 Windungen auf jedem Schenkel und besteht aus Kupferstreifen von 12,2 mm Breite und 3,3 mm Stärke, die Wickelungen auf den Schenkeln sind nebeneinander geschaltet. Der Widerstand der Nebenschlusswickelungen in warmem Zustande beträgt 20,8 Ohm, der der Reihenwicklung 0,0079 Ohm.

Eine Eigenthümlichkeit der Maschine besteht in der Art, wie die Leiter umgetrieben werden. Wie der Schnitt auf Tafel II zeigt, befinden sich zwischen den Kernscheiben in Zwischenräumen einige stärkere Scheiben mit Oeffnungen zum Lüften und mit vorstehenden Stahlstücken. Um diese Stahlstücke sind Stücke von harter weisser Fiber angebracht; da diese in abwechselnder Lage vortreten, so können die Kupferleiter nicht gerade gestreckt gelegt werden, sondern erhalten eine sinusartige Form. Aus der Tafel II ersieht man auch, wie die Kernscheiben mittels Platten, die Oeffnungen zum Lüften besitzen, zusammengehalten werden.

Kapp hat auch vielpolige Trommelmaschinen für Centralstationen construirt. In der vorletzten Ausgabe dieses Werkes war eine sechspolige Maschine mit hintereinander geschalteten Ankerwickelungen beschrieben, bei welcher nur zwei Bürstensätze erforderlich waren. Die Wickelungen bestanden aus einem Kabel von isolirtem Litzendraht.

**Gebr. Körting, Körtingsdorf bei Hannover.**

Die Gleichstrommaschinen sind sämmtlich Aussenpolmaschinen, und zwar sind die schnellaufenden von 0,5 bis 9 Kilowatt zweipolig, bis 40 Kilowatt vierpolig, bis 75 Kilowatt sechspolig, darüber acht- und mehrpolig, die langsam laufenden dagegen von 0,5 bis 1,6 Kilowatt vierpolig, bis 10 Kilowatt sechspolig, bis 55 Kilowatt achtpolig, bis 100 Kilowatt zehnpolig, darüber zwölf- und mehrpolig. Die zweipoligen Maschinen haben ein Magnetgestell aus Gussstahl und sind mit Polschuhen versehen, die vier- und mehrpoligen ein solches aus Gusseisen und sind ohne Polschuhe. Die normale Tourenzahl der schnellaufenden Maschinen liegt zwischen 2000 und 450 Umdrehungen in der Minute, die der langsam laufenden zwischen 260 und 130 Umdrehungen in der Minute. Sämmtliche Stromerzeuger und Motoren werden mit genuthetem Trommelanker ausgeführt. Die Ankerbleche sitzen bei den zweipoligen Maschinen direct auf der Welle, bei den mehrpoligen auf besonderen Büchsen. Die Anker von 50 Kilowatt an erhalten Luftkanäle; die Erwärmung des Ankers beträgt im Maximum 35 Grad C. über die äussere Temperatur.

Besonderen Werth legt die Firma auf die Durchbildung der sogenannten Gasdynamos, d. i. langsam laufender Dynamomaschinen, die direct auf der Kurbelwelle von Gasmotoren sitzen, und zwar werden dieselben bis 4 Kilowatt freischwebend auf der Steuerwellenseite, bei grösseren zwischen Schwungrad und Aussenlager angebracht. Besonders günstig hat sich der Gasbetrieb bei isolirter Lage der Centrale, unter Verwendung einer besonderen Kraftgasanlage erwiesen; eine derartige Anlage mit zwei 40 Kilowatt-Maschinen verbrauchte im ersten Betriebsjahre für jede an das Netz abgegebene Kilowattstunde 1,4 kg Kohle.

**Dynamomaschinen von Mather & Platt.**

Die Figur 286 stellt die von Hopkinson construirte »Manchester«-Maschine dar. Ihr gedrungener Feldmagnet hat cylindrische schmiedeeiserne Kerne und massive Gusseisenjoche. Der Anker ist ein abgeänderter Gramme-Anker mit geringem Widerstande und sorgfältiger Lüftung. Der Stromabgeber besteht aus 40 Stäben von gezogenem, durch Glimmer isolirtem Messing. Bei diesen Maschinen sind die Polstücke gewöhnlich so geformt, dass der Luftzwischenraum gegenüber den höchsten und niedrigsten Punkten des Ankers am kleinsten ist; hierdurch wird das magnetische Feld verstärkt und seine Verzerrung durch den Ankerstrom

vermindert. In einer für 300 Lampen bestimmten 24 Kilowatt-Maschine dieses Musters hat der Ankerkern eine Länge von 30,5 cm und einen ebensolchen Durchmesser und ist mit 120 Drahtwindungen versehen.

Die Widerstände betragen: Im Anker 0,023 Ohm, Nebenschluss 19,36 Ohm, Reihenwicklung 0,012 Ohm. Bei einer Geschwindigkeit von 1050 Umdrehungen in der Minute gab die Maschine 230 Ampere, und zwar für 111 Volt nahezu selbstregelnd; ihr Wirkungsgrad ist 90,9 Procent.

Mather & Platt bauen auch die in Figur 287 dargestellte Edison-Hopkinson-Maschine. J. Hopkinson verbesserte die ursprüngliche zweipolige Edison-Maschine dadurch, dass er den

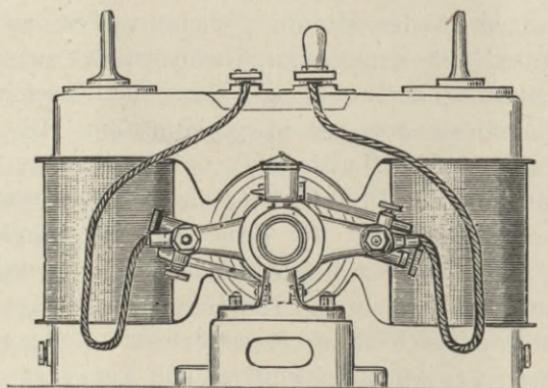


Fig. 286. „Manchester“-Maschine (Endansicht).

magnetischen Kreis gedrungener machte und den Anker mit Kernen von grösserem Querschnitt und besserer mechanischer Construction versah. Bei der älteren Bauart bildeten die Endscheiben des Ankers mit den zum Zusammenpressen der Kernscheiben dienenden Schrauben einen Kreis, in dem beständig Wirbelströme kreisten, wodurch fortwährende Verluste durch Erwärmung entstanden.

Eine bemerkenswerthe vollständige Beschreibung der Bauart und Ausführung einer dieser Maschinen von Edison-Hopkinson wurde 1886 veröffentlicht<sup>1)</sup>. In den theoretischen Kapiteln dieses

1) Vergl. die Abhandlung über Dynamomaschinen von J. und E. Hopkinson in den Philos. Transact. für 1886, Theil I. Diese sehr werthvolle Abhandlung wurde ohne Figuren wieder abgedruckt in Electrical Review, Bd. 18, 1886, auch im Electrician, Bd. 18, S. 39, 63, 86 und 175, in den Nummern vom 19. und 26. November, 3. und 31. December 1886; die Figuren sind dort in den Text eingedruckt. Sie ist auch in Hopkinson's Buch enthalten.

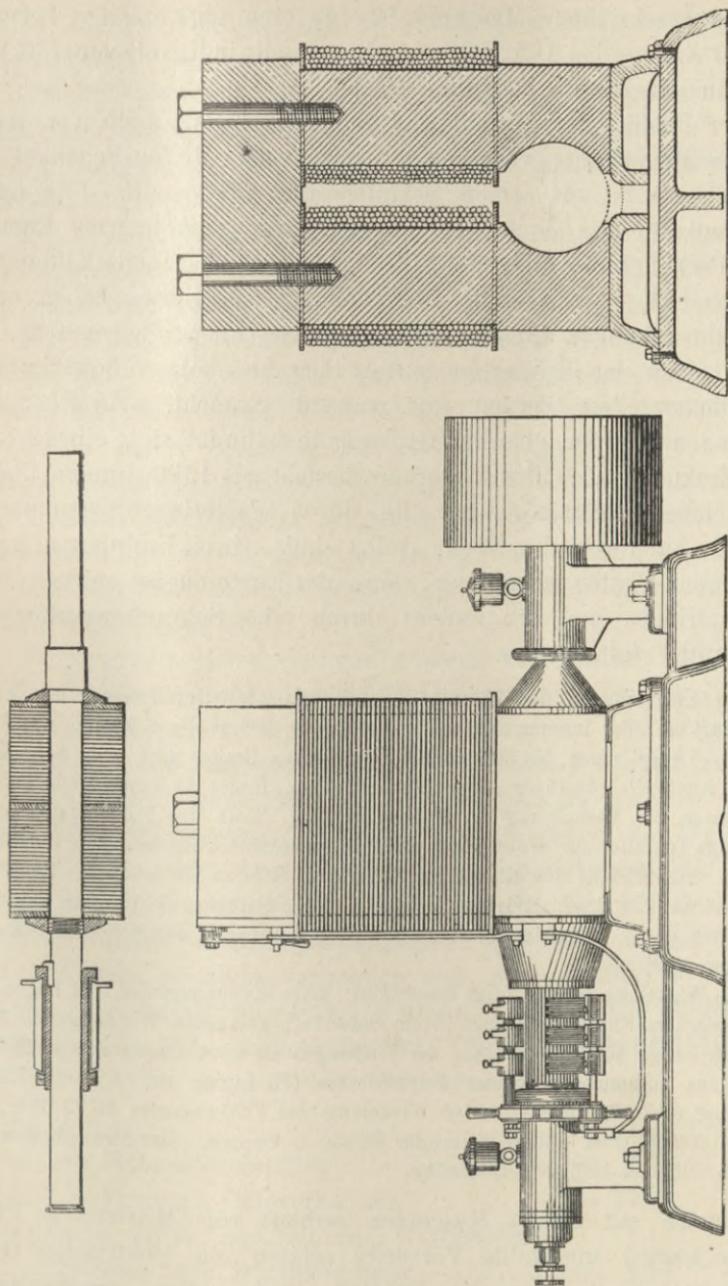


Fig. 287. Maschine von Edison-Hopkinson (Aufriß, Querschnitt und Schnitt durch den Anker).

Werkes wird häufig auf diese Maschine Bezug genommen, eine eingehende Beschreibung ist deshalb wesentlich. Die Bauart kann man aus der Figur 287 ersehen.

Die beschriebene Maschine ist für eine regelmässige Leistung von 320 Ampere bei 105 Volt und eine Geschwindigkeit von 750 Umläufen in der Minute bestimmt.

Der Feldmagnet besteht aus zwei durch ein Joch von rechteckigem Querschnitte verbundenen Schenkeln. Jeder Schenkel mit dem Polstück ist aus einem Schmiedestück hergestellt. Für diesen Theil und für das Joch wird ausgeglühtes, gehämmertes Ramseisen (Packeisen) verwendet; die magnetischen Eigenschaften sind im Kapitel IV beschrieben. Die Theile des Magnetes haben einen fast rechtwinkligen Querschnitt, die Ecken sind abgerundet. Das Joch wird an den Schenkeln mittels Schraubenbolzen befestigt, die Verbindungsstellen werden gut passend gemacht. Zwischen der Maschine und deren eiserner Bodenplatte befindet sich ein 12,7 cm hoher Zinkuntersatz. Der Ankerkern besteht aus 1000 dünnen Platten von weichem Schmiedeeisen, die durch Papierlagen voneinander getrennt, auch von der Welle isolirt sind. Zwei Endplatten halten die dünnen Platten zusammen, eine der ersteren ist mittels eines Schrumpfringes und die andere durch eine Schraubenmutter mit Gegenmutter festgelegt.

Die Abmessungen der Eisentheile sind folgende: Durchmesser des Ankerkernes 24,4 cm, der inneren Ausbohrung 7,62 cm, der Welle 6,98 cm, Kernlänge 50,8 cm, Länge eines Magnetschenkels 45,7 cm, Breite 22,1 cm, Seitenlänge (parallel zur Welle) 44,45 cm. Jochlänge 61,6 cm, Breite 48,3 cm, Tiefe 23,2 cm. Durchmesser der Ausbohrung im Magnet 27,5 cm, Tiefe des Polstückes 25,4 cm, Seitenlänge (parallel zur Welle) 48,3 cm; Zwischenraum zwischen den Polstücken 12,7 cm. Schnittfläche des Eisens im Ankerkern 810 qcm, Winkel der Bohrfläche der Polstücke 129 Grad. Wirksame Fläche des Polstückes 1513 qcm, wirkliche Fläche 1600 qcm. Luftzwischenraum 1,5 cm, Schnittfläche der Schenkel 980 qcm, des Joches 1120 qcm.

Die Wickelung ist wie folgt beschaffen: Magnetisirungsspulen: 11 Lagen von 2,4 mm starkem Kupferdrahte auf jedem Schenkel; gesammte Windungszahl 3260, gesammte Länge 4570 m. Anker: 40 Windungen in zwei Lagen von je 20 Windungen aus zusammengedrehtem Kupferdrahte (16 Litzen von 1,7 mm Stärke). Widerstand (bei 13,5 Grad C.): der Wickelung des Feldmagnetes 16,93 Ohm, des Ankers 0,009947 Ohm. Magnetisirender Strom: 6 Ampere. Der Stromabgeber hat 40 durch Glimmer isolirte Kupferstäbe.

Neuere mit diesen Maschinen (erbaut von Mather & Platt in Manchester) angestellte Versuche zeigten ein elektrisches Güteverhältniss von über 95 Procent und einen mechanischen Wirkungsgrad von über 93 Procent. Die Maschinen sind in der Regel mit zwei bis fünf besonderen Bürsten an jeder Seite des Stromabgebers versehen; die Bürsten können einzeln entfernt

werden, so dass man sie, ohne die Maschine anzuhalten, in Ordnung bringen kann.

Um die neutralen Punkte des Stromabgebers in passende Lagen rechts und links zu bringen, werden die Verbindungsstücke zwischen den Stromabgeberstäben und den Ankerwindungen spiralförmig um etwa 90 Grad verlegt.

Die Erbauer dieser Maschinen haben die Ankerwindungen später im Einzelnen verändert<sup>1)</sup>, indem die Einrichtung so getroffen ist, dass Kupferstäbe an Stelle der zusammengedrehten Litzen verwendet werden.

Für Eisenbahn- und Strassenbahnbetrieb verwenden Mather & Platt jetzt Stromerzeuger mit Nebenschlusswicklung in Verbindung mit einer Sammlerbatterie, welche die Maschine bei aussergewöhnlich hoher Belastung unterstützt, dagegen in den Zeiten geringer Belastung geladen wird, und somit den Stromerzeugern eine ziemlich gleichmässige Belastung sichert. Dies System ist von Hopkinson bei der Douglas and Laxay-Strassenbahn angenommen mit dem Ergebniss, dass die Belastung der Stromerzeuger eine nahezu völlig gleichmässige ist.

Prüfungsversuche an einigen grossen, von Mather & Platt für die Manchester Corporation gebauten Dynamomaschinen der Edison-Hopkinson-Type, welche für eine Leistung von 590 Ampere und 410 Volt bei 400 Umdrehungen in der Minute gewickelt und nach der Hopkinson'schen Methode (Kapitel XXX) geprüft wurden, hatten folgendes Ergebniss: Die Maschinen waren in der Weise miteinander verbunden, dass die eine als Stromerzeuger, die andere als Motor lief; der bei dieser Verbindung eintretende Verlust wurde durch eine dritte, unabhängig betriebene Maschine, welche mit den beiden Ankern in Reihe verbunden war, ausgeglichen, so dass alle Messungen elektrisch ausgeführt werden konnten. Die Widerstände waren folgende: Nebenschlussrollen 52,7 Ohm, der Anker 0,01167 Ohm. Die in Procenten ausgedrückten Verluste waren:

|                                                                                       |                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Im Anker . . . . .                                                                    | = 1,56 Procent, |
| in den Nebenschlussrollen . . . . .                                                   | = 1,22 »        |
| also elektrisches Güteverhältniss . . . . .                                           | = 97,22 »       |
| Verluste durch Lagerreibung, Wirbelströme,<br>Hysteresis und Bürstenreibung . . . . . | = 2,11 »        |
| also mechanischer Wirkungsgrad, alle Ver-<br>luste einschliessend . . . . .           | = 95,11 »       |

1) Vergl. Industries, Bd. 2, S. 549, 1887 und Spec. of Patent [1886] Nr. 4884.

Mather & Platt bauen auch vielpolige Maschinen, bei welchen der Anker wie bei ihren »Manchester«-Maschinen aufgebaut, aber mit spiralförmiger Trommelwicklung versehen ist. Die Wicklung ist dabei entweder so hergestellt, dass die Windungen im Zickzack aufgebracht, die Wirkung aller Pole also in Reihe gebracht wird, oder die Windungen sind parallel geschaltet. In jedem Falle aber sind die gleichgelegenen Ankerleiter vor gleichnamigen Polflächen auf annähernd demselben Potential, so dass ebensoviel Stromwendepunkte als Pole vorhanden sind und die den gleichnamigen Polen entsprechenden Bürsten alle parallel miteinander verbunden werden können. Die erste Wicklungsart ist besonders geeignet für langsam laufende Hochspannungsmaschinen von grosser Leistung, während die zweite Art bei Maschinen von geringer Spannung und grosser Stromstärke, wie sie bei elektrolytischen Betrieben gebraucht werden, zweckmässig Anwendung findet.

#### **Maschinenfabrik Oerlikon in Oerlikon.**

Die Maschinenfabrik Oerlikon baut Gleichstrommaschinen in 30 normalen Typen, von 1 bis 4 Kilowatt bei 1500 Touren, bis 700 Kilowatt bei 90 Touren.

Die Stromerzeuger bis 40 Kilowatt besitzen ein Magnetgestell aus Grauguss; die Polkerne, welche keine vorspringenden Polschuhe tragen, sind an dem Jochring angegossen. Figur 288 ist eine 40 Kilowatt-Maschine für 125 Volt bei 700 Touren. Die Ankerwicklung der Maschinen bis zu 100 Kilowatt besteht aus Drahtspulen, die in Schablonen gewickelt und fertig isoliert werden. Für die grösseren Anker wird jede Windung mit zwei Leitern aus einem einzigen Drahtstück abgebogen.

Die Maschinen über 40 Kilowatt haben Stahlgussgestelle mit aufgeschraubten cylindrischen Polkernen. Figur 289 ist die Zeichnung eines normalen Stromerzeugers für Strassenbahnen von 200 bis 250 Kilowatt bei 370 Touren.

Fast ausnahmslos sind die Collectoren mit Kohlenbürsten versehen, die zwischen Leerlauf und Vollast nicht zu verschieben sind.

In den Rheinfeldener Kraftwerken sind sechs Gleichstrommaschinen der Maschinenfabrik Oerlikon in Betrieb mit 55 Touren und einer Leistung von 75 Volt 7500 Ampere. Die Welle steht senkrecht. Der Collector befindet sich unterhalb der Armatur in Mannshöhe über Boden. Die Anker haben 4400 mm Durchmesser und mussten wegen der Transportschwierigkeiten aus zwei getrennten

Hälften zusammengesetzt werden. Das 32 polige Magnetgestell besteht aus vier gusseisernen Bogen mit angegossenen Polkernen. Bei einer dauernden Ueberlastung von 50 Procent arbeiten die Collectoren funkenlos.

Ausser diesen Modellen werden auch noch für Kraftübertragung und Bahnbetrieb Maschinen nach der Manchesterform mit Ringanker

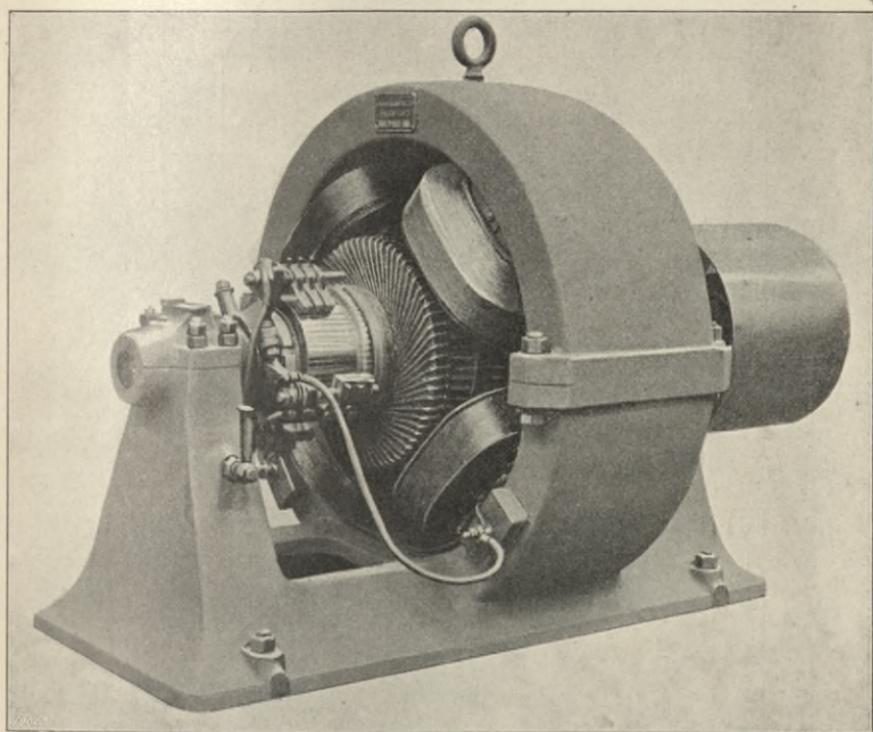


Fig. 288. 40 Kilowatt-Maschine von Oerlikon.

hergestellt, und zwar in sieben Grössen, von 20 bis 150 Kilowatt, mit Normalspannungen von 1000, 1500 und 2000 Volt.

Auf Tafel IV ist eine ältere Maschine dieser Bauart für Glühlicht von 28 Kilowatt dargestellt. Die Stromstärke beträgt 400 Ampere bei 70 Volt, bei 400 Umdrehungen in der Minute sind 38,5 P erforderlich. Der Anker hat Trommelwicklung. Die Kernscheiben sind auf einer langen Buchse befestigt und zur Aufnahme der Kupferleiter durchbohrt; die Durchbohrungen haben 12 mm Durchmesser und liegen 1 mm unter der Peripherie. Der Zwischenraum von Eisen zu Eisen wird dadurch auf 2,5 mm verringert. Die

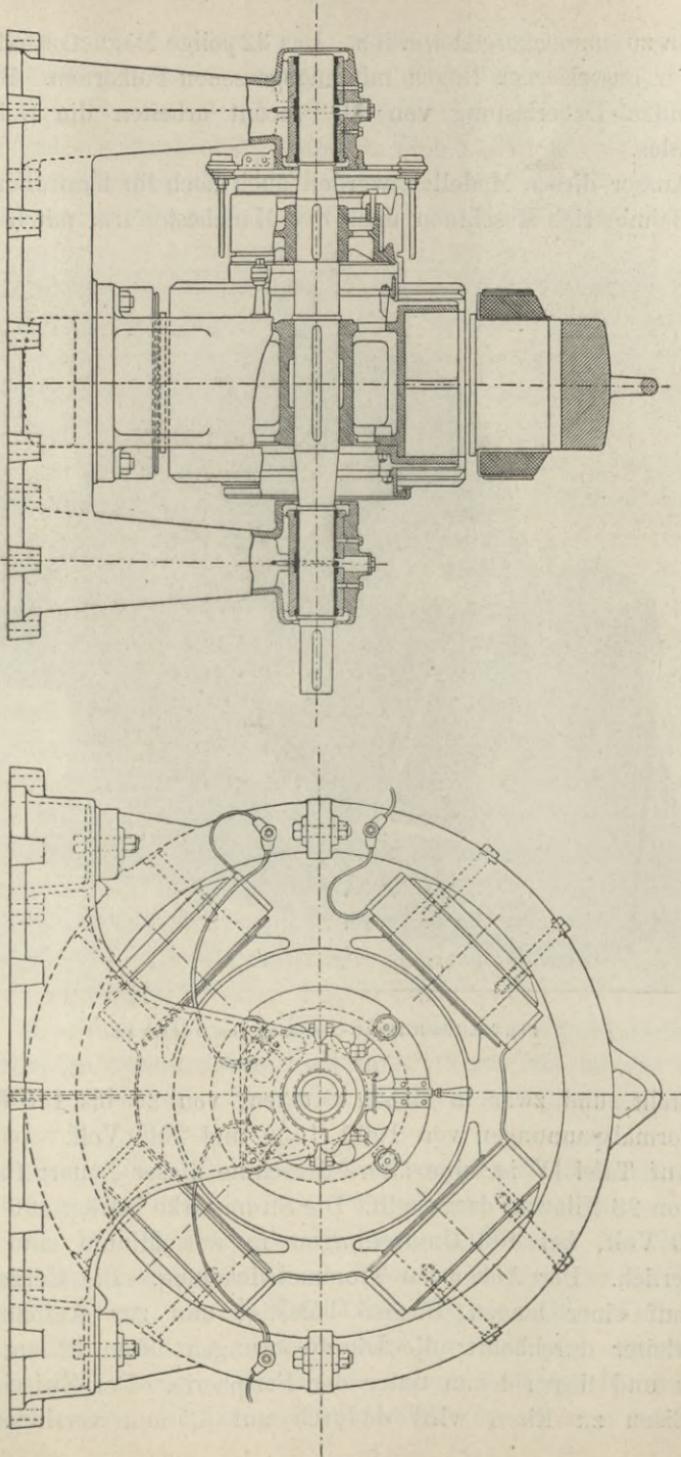


Fig. 289. Normaler Stromerzeuger für Strassenbahnen, Oerlikon.

Kernscheiben haben einen äusseren Durchmesser von 51,4 cm, einen inneren Durchmesser von 22 cm und eine Stärke von 0,6 mm, die Anzahl der mittels Papier isolirten Scheiben beträgt 570. Die gesammte

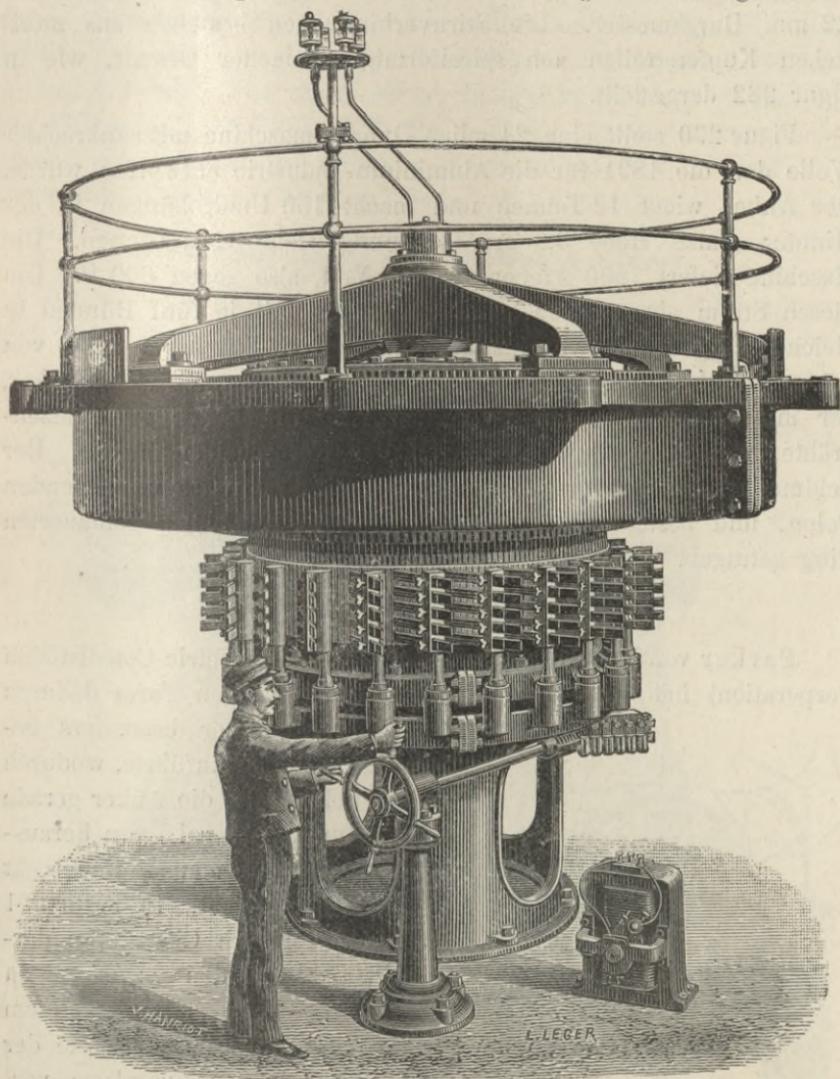


Fig. 290. Maschine von Oerlikon für Elektrometallurgie.

Querschnittsfläche des Eisens im Anker beträgt 480 qcm. Ankerleiter sind 80 vorhanden; im Stromabgeber befinden sich 40 Stäbe, der Widerstand des Ankers von Bürste zu Bürste stellt sich auf 0,00525 Ohm. Die Feldmagnete sind im Nebenschluss mit 2800 Windungen von 3,2 mm starkem Draht belegt, der Widerstand

beträgt 6 Ohm, ausserdem 1 Ohm für die Reihenwicklung zur Regulirung für die angegebene Geschwindigkeit und Leistung. Die durch die Bohrungen im Anker führenden runden Kupferdrähte haben 9,2 mm Durchmesser. Die Stirnverbindungen bestehen aus zweifachen Kupferstreifen von spiralförmig gebogener Gestalt, wie in Figur 232 dargestellt.

Figur 290 stellt eine 24 polige Dynamomaschine mit senkrechter Welle dar, die 1891 für die Aluminium-Industrie entworfen wurde. Der Anker wiegt 12 Tonnen und macht 150 Umdrehungen in der Minute; ganze Höhe 3,8 m; Gesamtgewicht  $34\frac{1}{2}$  Tonnen. Die Maschine liefert 7600 Ampere bei 55 Volt, also gegen 600 P. Um diesen Strom abzunehmen, sind 24 Reihen mit je fünf Bürsten in gleichen Abständen voneinander um einen Stromabnehmer von 1,7 m Durchmesser angeordnet. Letzterer liegt unter dem Anker, der mit Trommelwicklung versehen ist. Die Leiter sind Litzen-drähte, welche in Durchbohrungen der Kernscheiben liegen. Der Feldmagnet hat die Form eines Kranzes mit 24 einwärts vorstehenden Polen, und besteht aus Gusseisen; er wird von einem gemauerten Ring getragen.

#### Parker's Dynamomaschinen.

Parker von Wolverhampton (früher bei der Electric Construction Corporation) hat eine Verbesserung der zweipoligen Form dadurch eingeführt, dass er besonders befestigte Polstücke einführte, wodurch es möglich wurde, die Anker gerade nach oben aus ihren Lagern heftauszuheben, statt dass man sie wagerecht seitwärts herauszieht. In Figur 291 ist die Bauart mit Charnieren dargestellt. Bei den zweipoligen Maschinen mit untenliegendem Anker sind die unteren Theile der Polkörper mit der Fussplatte verbunden; der Haupttheil des Magnetes wird, wenn der Anker in seinen Lagern liegt, heruntergelassen und befestigt. Parker benutzt die Methode von Eickemeyer (S. 290), die Wicklungen sowohl für zwei-

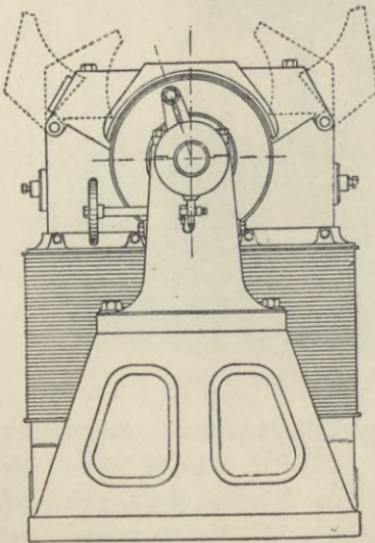


Fig. 291. Parker's zweipolige Dynamomaschine mit beweglichen Polschuhen.

als auch für mehrpolige Anker besonders zu formen und zieht diese Bauart besonders bei Verwendung von Stableitern vor. Bei der Benutzung der Eickemeyer'schen Wickelung in Anker für starke Ströme vermindert sich die Zahl der gelötheten Verbindungen, und gleichzeitig wird ein völliges mechanisches und elektrisches Gleichgewicht gesichert. Nur glatte Kerne finden Anwendung. Zwischen den Stromabnehmerstäben wird die Isolation durch Glimmer hergestellt, die Endscheiben bestehen entweder aus Mikanit oder aus rother, mit Glimmer bedeckter Fiber.

#### Dynamomaschinen von Paterson & Cooper.

Die »Phönix«-Dynamomaschine, erbaut von Paterson & Cooper nach den Plänen von Esson, hat einen Cylinder-Ringanker, der

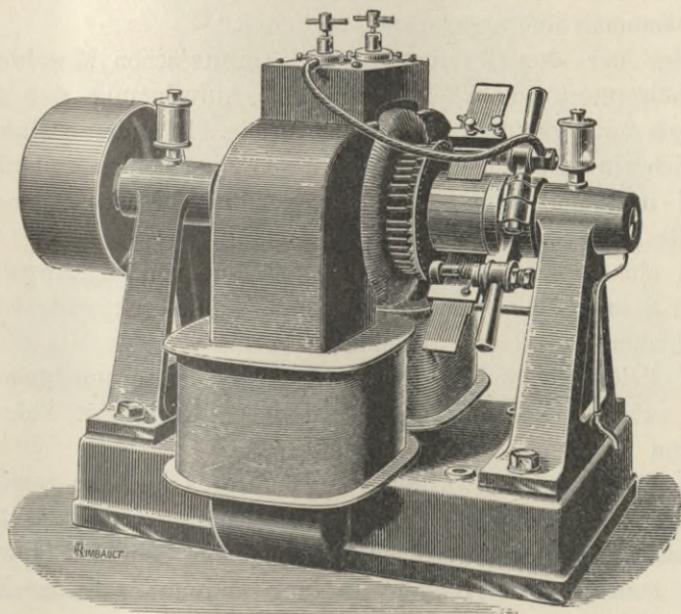


Fig. 292. Maschine „Phönix“ (Form aus 1887).

aus sehr dünnen Ringen aus schwedischem Eisen aufgebaut ist, die von einander durch Papier isolirt und durch drei durch Verzahnungen der Kernringe gehende Bolzen mit den beiden Radnaben verbunden sind (Fig. 220).

Die Maschinen haben aufrecht stehende Hufeisenmagnete, die in einzelnen Fällen aus einem einzigen Schmiedestück bestehen.

Figur 292 stellt das Muster einer anderen Maschine dar, deren Feldmagnet in einem Stück gegossen ist. Bei gleichem Gewicht hat

diese Maschine etwas geringere Leistung. In beiden Maschinen besteht keine Verbindungsstelle in dem magnetischen Kreise; die Magnetwickelungen sind auf besonderen Hülsen aus Eisenblech mit Messingflanschen aufgebracht und werden über die Kerne gestreift. Die Figur 241 stellt den Stromabgeber dar, sowie die Art und Weise, wie seine Streifen isolirt sind und vor dem Abfliegen bewahrt werden.

Die baulichen Angaben einer Maschine für 90 Ampere und 105 Volt bei 1420 Umdrehungen in der Minute waren mit vollständiger Berechnung der Wickelung und mit maassstäblichen Zeichnungen in der vorigen Ausgabe dieses Werkes enthalten.

#### **Siemens & Halske, Aktiengesellschaft.**

Die Fabrik von Siemens & Halske ist mit der Entwicklung der Dynamomaschine aufs engste verknüpft.

Einige der ältesten Muster der Siemens'schen Maschine besaßen hölzerne Trommelkerne, die vor Aufbringung der Längswindungen mit Eisendraht besponnen wurden. In anderen Maschinen befand sich ein feststehender Eisenkern von einer hohlen umlaufenden Trommel umgeben, andere Maschinen endlich besaßen ausser der Triebwelle gar kein Eisen im Anker.

Das alte horizontale Muster der Maschine von Siemens ist in der Figur 8 dargestellt. Darauf folgte 1880 eine senkrecht stehende, in den früheren Auflagen abgebildete Form.

Die Feldmagnete bestanden aus schmiedeeisernen gebogenen Stäben; es war ein doppelter magnetischer Kreis mit Folgepolen rechts und links vom Anker vorhanden.

Um das Jahr 1882 wurden verschiedene Arten der gemischten Wickelung versucht. Bei den früheren Maschinen wurden die Reihen- und Nebenschlusswickelungen auf verschiedene Schenkel gewickelt, während man jetzt die Reihenwickelung getrennt von der Nebenschlusswickelung auf denselben Schenkel aufbringt.

Die Figur 293 stellt eine derartige von der Londoner Firma Siemens Brothers gebaute Maschine mit unterhalb liegendem Anker dar.

Im Jahre 1886 gingen Siemens & Halske, nachdem sie verschiedene Zwischenformen versucht hatten, für Leistungen von 1 bis 30 Kilowatt zu einer Form über, bei welcher der Feldmagnet aus einem einzigen massiven Gussstück bestand. Auf Tafel I ist diese lange Zeit sehr beliebte Form, Modell LH 5, dargestellt. Die Ankerbleche haben einen Durchmesser von 182 mm bei 0,5 mm

Stärke. Die Zahl der Nuthen des Trommelankers beträgt 60, ihre Tiefe 16 mm; die Ankerwicklung besteht aus 120 Windungen von 2,9 mm starkem Draht, während die Schenkelwicklung 5208 Windungen von 1,38 mm Draht enthält. Der Stromwender hat 30 Theile.

Dieses Modell ist erst in der allerneuesten Zeit verlassen worden. An seine Stelle ist ein Modell A getreten, eine Aussenpolmaschine, deren gusseisernes Elektromagnetsystem aus einem in sich geschlossenen Gehäuse besteht. Die Elektromagnetschenkel befinden sich auf der Innenwand dieses Gehäuses und umschliessen mit ihren Polschuhen oder polschuhartig ausgebohrten Enden den Anker. Die Eisenwand, welche den magnetischen Schluss zwischen den einzelnen

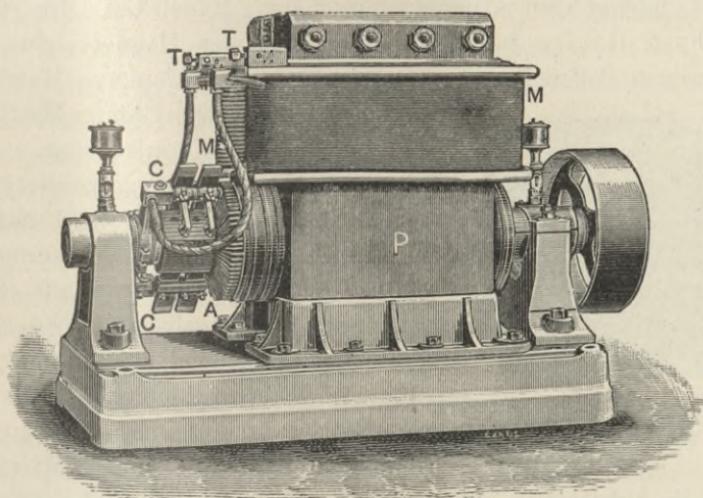


Fig. 293. Maschine von Siemens (London, 1890).

Schenkeln bildet, ist bei den A-Maschinen breiter als die Schenkel, und zwar so breit, dass sie die auf die Schenkel aufgeschobenen Elektromagnetspulen und die Stirnwicklung des Ankers überragt; das Gehäuse bietet daher einen vollständigen Schutz für Schenkel- und Ankerwicklung.

Für sämtliche A-Maschinen kommen Trommelanker zur Verwendung, deren Eisenkerne aus dünnen Blechen zusammengesetzt sind. Um das Entstehen von Wirbelströmen im Kern zu verhindern, sind die einzelnen Blechscheiben durch dünne, vor dem Stanzen aufgeklebte Papierlagen voneinander isolirt.

Die A-Maschinen werden in fünf verschiedenen Ausführungsformen gebaut. Die Verschiedenheit der Construction liegt im Wesentlichen in der verschiedenen Gestaltung des Magnetgehäuses.

Die kleinsten A-Maschinen (Fig. 294) sind zweipolig. Sie werden meist als Motoren für eine Leistung von 0,25 bis 3,5 P verwendet. Sie sind vollständig von einem würfelförmigen Gusseisenkasten eingeschlossen, der zugleich einen Bestandtheil des Feldmagnetes bildet. Dieses Gusseisengehäuse, das diese Motoren auch in Anlagen, in denen leicht entzündbare Stoffe verarbeitet werden, wie in Spinnereien und Webereien, verwendbar macht, bildet den Gegenstand des D. R.-G.-M. 21782. Das eigentliche Elektromagnetsystem ist aus gestanzten Blechen zusammengesetzt, die in den Gusseisenkasten eingelegt werden. Die beiden Schenkelpulen sind über die Elektromagnetschenkel geschoben und durch Leisten festgehalten.

Die mehrpoligen Aussenpolmaschinen Modell GA der Firma Siemens & Halske besitzen ein ringförmiges Magnetgehäuse mit angegossenen Polstücken aus Gusseisen, das bei kleineren Maschinen

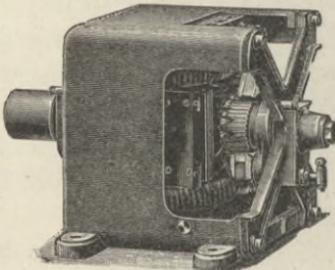


Fig. 294. Kleine Gleichstrom-Maschine (Modell FA) von Siemens & Halske.

aus einem Stück, bei grösseren Maschinen aus zwei Theilen, die mit gutem magnetischen Schluss zusammengesetzt sind, besteht. Die Wickelung wird auf gut isolirten Kästen auf die Polkerne geschoben. Die Kästen werden durch Rothgussbügel festgehalten. Die Eisenkerne der Anker sind aus dünnen, einseitig mit Papier beklebten, am Umfang mit Nuthen versehenen Blechen zusammengesetzt. Bei kleineren Maschinen

werden die Ankerbleche auf die Ankerachse geschoben und durch zwei Schraubenmuttern fest zusammengepresst. Bei grösseren Maschinen werden die Bleche auf einen gusseisernen Armstern geschoben und mittels zweier Ringe, von denen der eine mit Nabe und Stern zusammengelassen ist, mittels durchgehender Schrauben festgehalten. Der Anker ist durch Anordnung radialer Spalten im Ankereisen, durch die die nahe der Achse angesaugte Luft herausgeschleudert wird, gut gekühlt. Die Lager sind selbstölend und mit Ringschmierung versehen. Die Wickelung aus Kupferdrähten oder Kupferstäben wird als Oberflächenwickelung ausgeführt und isolirt in die offenen Nuthen eingelegt. Die einzelnen Wickelungsabtheilungen werden in besonderen Formen ausserhalb des Ankers so hergestellt, dass sie bequem in die Nuthen eingelegt werden können. Hierdurch wird einerseits eine schnelle und zuverlässige Bewickelung gewährleistet, andererseits ermöglicht dies eine leichte

Auswechselbarkeit einzelner Wickelungsabtheilungen. Die Ankerwicklung ist in eine grosse Anzahl von Abtheilungen getheilt, deren Abzweigungen mit den Stegen des auf die Ankerachse aufgeschobenen Commutators verlöthet sind. Die nebeneinander isolirt auf eine Metallbuchse gelegten Commutatorstege werden durch aufgeschraubte Metallkeile oder aufgeschobene isolirte Ringe auf der Buchse festgeklemmt. Diese Herstellung ermöglicht leichte Auswechselbarkeit einzelner etwa schadhaft gewordener Stege. Der Bürstenträger besteht bei kleineren Maschinen aus einer Scheibe von isolirendem Material, in die die Bolzen für die Bürstenhalter eingeschraubt sind; bei grösseren Maschinen sind die Bolzen für die Bürstenhalter isolirt auf Metallscheiben aufgesetzt. Die Bolzen der Bürstenhalter mehrpoliger Maschinen sind in abwechselnder Reihenfolge mit zwei Metallringen verbunden, von denen die Leitungen zum Schaltbrett abgehen. Der Bürstenträger ist um das Lager drehbar, um die Bürsten auf funkenlosen Gang einstellen zu können; er kann bei kleineren Maschinen durch Umdrehen einer zugleich als Handgriff dienenden Klemm- oder Druckschraube festgestellt werden. Die Bürstenträger der grossen Maschinen sind vermittelt Schnecke und Schneckenrad zu bewegen und festzustellen. Für die Stromabnahme werden meist radial aufliegende Kohlenbürsten verwendet, nur bei Entnahme hoher Stromstärken Kupferbürsten.

Eine sechspolige Gleichstrommaschine GA 42 für 150 Kilowatt und 500 Volt bei 400 Umdrehungen ist in Figur 295 dargestellt. Sie besitzt einen Anker mit 166 Nuthen von  $32 \times 9$  mm Oeffnung. Die Wickelung ist als Trommelwicklung ausgeführt. Die Stäbe sind auf Schablone gebogen und bilden einen Cylinder. Die Wickelung hat 166 Gesamtwindungen in Hintereinanderschaltung. Die Ankerstäbe haben einen Querschnitt von  $6 \times 12$  qmm. Der Ankerwiderstand beträgt 0,0211 Ohm. Der Commutator besitzt 166 Stege. Die Schenkelwicklung hat  $6 \times 1965$  Windungen von 1,94 mm starkem Kupferdraht und einen Widerstand von 100 Ohm.

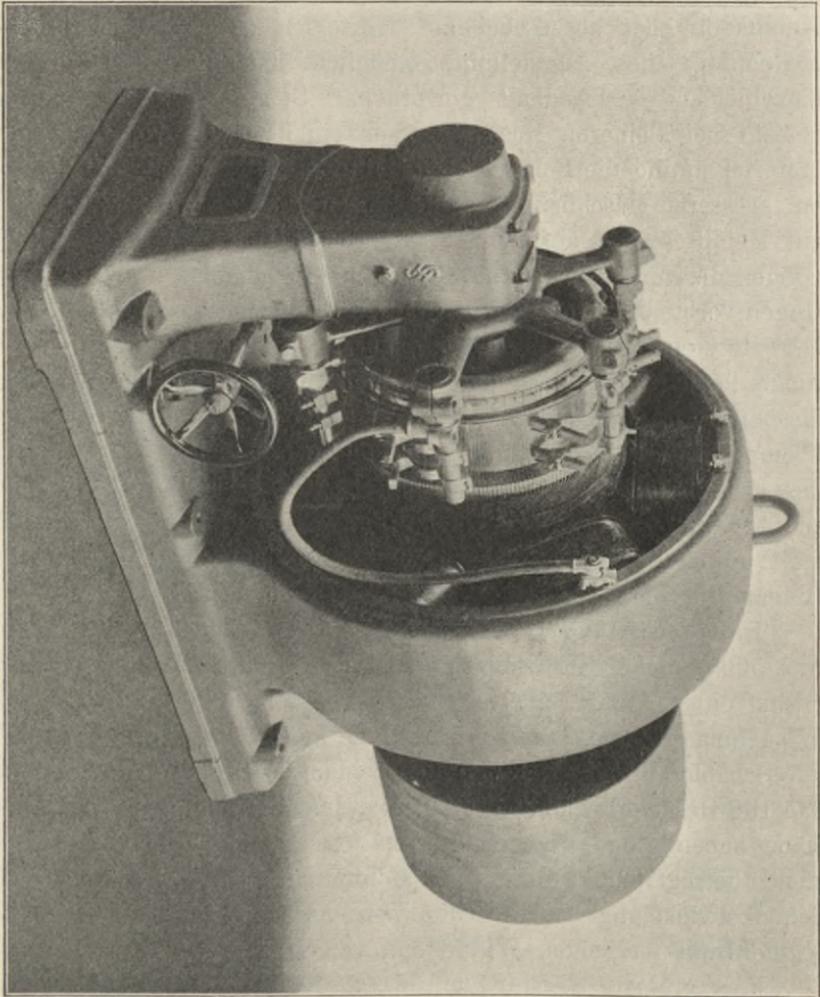
Für grössere Leistungen (bis 2000 Kilowatt) werden eisen-geschlossene Maschinen mit lamellirten Polen gebaut (Type B A).

Die zweite Hauptform der Gleichstrommaschinen ist die bekannte Innenpolmaschine. Tafel VIII. Diese Form wurde zu Ende des Jahres 1886 fast gleichzeitig ausser von Siemens auch noch von Ganz in Budapest und von Fein in Stuttgart hergestellt<sup>1)</sup>.

1) Vergl. Elektrotechn. Zeitschr. 1887 für April und Mai; La Lumière électr., Bd. 24, S. 182; Centralblatt für Elektrotechnik 1887, Bd. 9, S. 186, 410 und 581.

Bei diesen Innenpolmaschinen sind die mit Polschuhen versehenen Elektromagnetschenkel radial auf dem Umfang einer ringförmigen Nabe befestigt. Kern und Polschuhe sind entweder aus einem Stück gearbeitet oder aus zwei Theilen zusammengesetzt.

Fig. 205. Sechspolige Gleichstrommaschine (Modell GA) von Siemens & Halske.



Ueber die Schenkelkerne werden isolirte Kästen mit den Bewickelungen geschoben. Der ringförmige Anker umgiebt aussen den Schenkelstern. Der Ringanker ist an dem Ankerstern, einer mit strahlenförmigen Armen versehenen Nabe, befestigt. Das Ankereisen besteht aus dünnen, von einander durch Papierbeklebung isolirten Blechen, die durch isolirte Bolzen zusammengehalten werden. Den

Eisenring umgibt eine oder mehrere parallel geführte, in sich zurücklaufende Drahtwickelungen. An den Ankerstern ist entweder ein besonderer Commutator angesetzt, dessen Stege mit den einzelnen Wicklungsabtheilungen der Ankerwicklung verbunden sind, oder die Ankerstäbe sind am Umfange zum Stromsammel ausgebildet. Im letzteren Falle besteht die Wicklung aus geraden und U-förmig gebogenen Kupferstäben, die in Rinnen von Isolationsmaterial gelegt und derart ineinander gepasst und verlöthet sind, dass eine fortlaufende Ringwicklung entsteht. Auf dem Commutator schleifen soviel Bürstenreihen, als die Maschine Pole besitzt.

Der Bürstenträger ist eine um einen ringförmigen Ansatz des Lagerbocks drehbare gusseiserne Scheibe, in die die zur Aufnahme der Bürstenhalter dienenden Bolzen isolirt eingesetzt sind. Der Bürstenträger ist verstellbar, und zwar bei kleineren Maschinen mit Hilfe zweier Handgriffe, bei grösseren durch ein Zahnrad, in das ein durch Handrad und Hebel drehbares Trieb eingreift, dessen Achse durch eine Klemmschraube festgestellt werden kann.

Um sämtliche Bürsten vom Commutator gleichzeitig abheben zu können, ist an der Scheibe des Bürstenträgers ein Eisenring drehbar aufgesetzt, der an seinem Umfange runde Zapfen trägt, entsprechend der Anzahl der Bolzen für die Bürstenhalter. In diese Zapfen greifen gabelförmig geschlitzte Hebel, die mit den drehbaren Bolzen des Bürstenträgers verbunden sind. Durch diese Vorrichtung können die Bürsten gleichzeitig angeedrückt oder abgehoben werden. Die Innenpolmaschinen sind für niedrige Umlaufzahlen bestimmt, da schon bei geringer Umlaufzahl eine hohe Umlaufgeschwindigkeit erreicht wird.

Die Maschinen werden für eine Leistung von 20 bis 950 Kilowatt hergestellt.

Eine sechspolige Maschine, Modell J <sup>58</sup>/<sub>34</sub>, ohne besonderen Commutator, für 99 Kilowatt, bei 120 Volt 200 Umdrehungen, mit 14 Ankerspeichen, besitzt auf dem Anker 448 Gesamtwindungen bei einem Ankerwiderstand von 0,0025 Ohm. Die Stäbe haben an der äusseren Fläche eine Höhe von 25 mm und 8,6 bis 8,95 mm Breite, während die auf der Innenfläche befindlichen Stäbe 12 mm Höhe und 5 mm Breite haben. Die Schenkel der Maschine besitzen  $6 \times 535$  Windungen von Kupferdraht von 4,37 mm Durchmesser, mit einem Widerstand von 4,75 Ohm.

#### **Union Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.**

Die Maschinen der Union haben sämtlich geschlossenes Gehäuse und Trommelanker; für Riemenantrieb sind sie zwei- bis

sechspolig und bis 250 Kilowatt Leistung, für directe Kuppelung sechs- bis zwölfpolig, von 30 bis 1500 Kilowatt.

Die Maschine MP 8, Tafel XI, ist eine Maschine mit gemischter Wickelung für 500 Volt bei Leerlauf und 550 Volt bei voller Last. Das Magnetgestell besteht aus Flusseisen vorzüglichster Qualität. Die Pole sind in einer Weise am Rahmen angebracht, dass dieselben herausgenommen werden können, ohne den Anker aus seiner Lage zu entfernen; ebenso sind die Spulen leicht abzunehmen, resp. einzusetzen. Nebenschluss und Reihenwicklung sind in besonderer Abtheilung auf dem Spulenkörper untergebracht. Der Anker ist mit Nuthen versehen und durch Luftkanäle ausreichend ventilirt. Die Ankerbleche sind so montirt, dass kein Bolzen durch den Kern geht. Die Nuthenisolation besteht aus Rothpapier und geöltem Baumwollentuch. Die Stromabnahme wird ausschliesslich durch Kohlenbürsten vermittelt. Die Lager sind mit Ringschmierung versehen.

Der Wirkungsgrad ist: bei Vollast 94 Proz., bei  $\frac{3}{4}$  und  $\frac{1}{2}$  93 Proz., bei  $\frac{1}{4}$   $89\frac{1}{2}$  Proz.

---

## Kapitel XVIII.

### Maschinen für Bogenlicht.

---

Zum Betriebe von Bogenlampen schaltet man dieselben gewöhnlich hintereinander, und zwar sogar 100 bis 200 Lampen. Man wählt eine Maschine, die bei genügend hoher Spannung eine gleichbleibende oder nahezu gleichbleibende Stromstärke liefert. Die Bogenlampen werden in der Regel für eine Stromstärke von 6 bis 10 Ampere hergestellt. Die zu Absuchungszwecken, sowie zur Verwendung auf Leuchttürmen dienenden Lampen werden für grössere Stromstärken, bis zu 200 Ampere und darüber, gebaut. Der Lichtbogen im Gleichstromkreise lässt sich nicht stetig erhalten, wenn nicht für jede Lampe eine Spannung von etwa 40 bis 45 Volt verfügbar ist. Bei unzureichender Spannung äussern die Lichtbogen ein zischendes Geräusch. Ein stetiger Bogen verhält sich so, als ob er eine gegenelektromotorische Kraft von etwa 39 Volt ausübte.

Wechselstrom-Bogenlampen erfordern nur eine Spannung von 30 bis 33 virtuellen (effectiven) Volt. Sollen Bogenlampen in Nebeneinanderschaltung betrieben werden, so muss in den Hauptleitungen eine grössere Potentialdifferenz als 45 Volt herrschen — 55 bis 60 Volt ist vorzuziehen —, damit man Zusatzwiderstände zur Stetighaltung des Stromes in jeder Lampe hinzufügen kann. Ist eine Anzahl von Bogenlampen hintereinander geschaltet, so braucht man keine Beruhigungswiderstände, da die Lampen sich gegenseitig so beeinflussen, als wenn Beruhigungswiderstände vorhanden wären. Die Reihenschaltung hat den grossen Vortheil, dass an Kupfer zu den Leitungen gespart wird. Hierbei hat die Dynamomaschine nur die Aufgabe zu erfüllen, die Stromstärke gleichbleibend zu erhalten, gleichviel ob wenig oder viel Lampen eingeschaltet sind, während die Regelung der Länge des Lichtbogens und der Spannung an jeder Lampe durch geeignete Vorrichtungen bewirkt wird. 20 hintereinander geschaltete Bogenlampen würden demnach eine

Dynamomaschine erfordern, die beim Betriebe sämtlicher Lampen eine Spannung von nahezu 1000 Volt entwickeln muss. Dann entfallen 45 Volt auf jede Lampe und 5 Volt auf den Widerstand zwischen jeder Lampe und der nächsten.

Maschinen für gleichbleibende Stromstärke werden ferner für Beleuchtungsanlagen gebraucht, in denen besondere Glühlampen mit starken Kohlenfäden, anstatt der dünnen Fäden, in Hintereinanderschaltung verwendet werden, so dass der Strom eine Reihe dieser Lampen durchfließt.

Im Jahre 1881 erfand Deprez eine Art gemischter Wickelung, mittels deren bei gleichbleibender Geschwindigkeit eine gleichbleibende Stromstärke von einer Dynamomaschine erhalten werden sollte. Die der Anordnung zu Grunde liegende Bedingung, dass der Magnetismus proportional der erregenden Kraft ist, trifft, wie wir wissen, nur für den ersten und un stetigen Zustand der Magnetisirung zu; alle Versuche zur praktischen Herstellung einer geeigneten gemischten Wickelung sind deshalb fehlgeschlagen.

Zur Erzeugung gleichbleibender Ströme bei hohen Spannungen von 2000 bis 3000 Volt erscheinen die gewöhnlichen Ring- und Trommelanker mit geschlossener Wickelung, zahlreichen Abtheilungen und einem aus vielen Stäben bestehenden Stromabgeber nicht recht geeignet, weil der Stromabgeber unter der Einwirkung der langen, von Bürste zu Bürste übergehenden Funken und unter den erheblichen Aenderungen der Verschiebung, die untrennbar mit der Betriebsweise verbunden sind, verdirbt. Es sind einfachere Formen nothwendig, denen in der Regel eine andere Anordnung der Wickelung zu Grunde liegt, indem die Wickelung keine geschlossene ist.

### Maschinen mit offener Wickelung.

Wie auf Seite 39 und 40 erörtert worden ist, lassen sich Anker herstellen, in denen die einzelnen Wickelungen oder Abtheilungen der Windungen nicht zu einem geschlossenen Kreise vereinigt werden. Die Figur 296 giebt davon eine Darstellung. Diese (zu vergleichen mit der Figur 33) zeigt einen aus zwei getrennten Schleifen bestehenden Anker; die Ebenen der Schleifen stehen senkrecht aufeinander, so dass, wenn eine Schleife durch die unwirksame Lage geht, die zweite sich in der Lage der stärksten Wirkung befindet.

Es besteht kein Grund, weshalb nicht für jede der beiden Schleifen ein besonderer zweitheiliger Stromabgeber, wie der in

Figur 24 abgebildete, zu verwenden wäre, auch kann gegen beide Stromabgeber ein Paar Bürsten anliegen.

Ebenso ist aber auch klar, dass die beiden Stromabgeber zweckmässig zu einem viertheiligen, wie Figur 296 zeigt, zu vereinigen sind; dann sieht man zugleich, dass beim Umlauf nur eine Schleife zwischen den Bürsten in Thätigkeit sich befindet, die andere aber während dieser Zeit ausgeschaltet ist. Es würde natürlich die Möglichkeit vorliegen, eine beliebige Anzahl von Schleifen oder Wickelungen in der besprochenen Weise anzuordnen, so dass jede Schleife oder Wickelung in der Lage der höchsten Wirksamkeit durch die Bürsten geschlossen wird, während alle anderen Wickelungen während der Zeit offen gehalten werden.

Es möge ein in Abtheilungen bewickelter Ringanker dementsprechend angeordnet werden, so dass jedes Abtheilungspaar einen besonderen Stromabgeber besitzt. Die

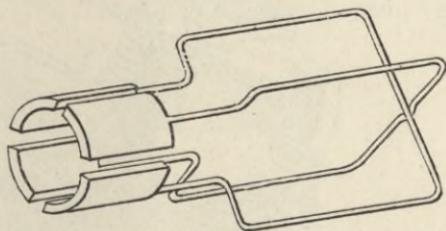


Fig. 296. Einfache offene Wickelung.

Figur 297 (zu vergleichen mit Figur 31) stellt einen derartigen Ring dar, an dem die beiden Stromwender zu einem viertheiligen Stromabgeber gestaltet sind.

Es ist zu bemerken, dass jede Wickelung rückwärts mit der diametral entgegengesetzt liegenden verbunden ist, die vorderen Enden der Wickelungen laufen zum Stromabgeber. Ferner würde es in solchen Ankeren keinen Unterschied herbeiführen, wenn die sich rückwärts kreuzenden Drähte sämmtlich an dieser Stelle miteinander vereinigt werden.

Man sieht, dass hier die Stellung der Bürsten zur Lage der stärksten Wirkung nicht die gleiche ist, wie bei geschlossenen Wickelungen. Bei den Letzteren liegt der Durchmesser der Stromwendung in der Nähe der Windungen mit geringster Wirkung. Bei Ankeren mit offenen Wickelungen wird der Strom unmittelbar von den Windungen, welche die stärkste Wirkung geben, abgeleitet.

Der Strom kann gleichzeitig von mehr als einer Abtheilung abgenommen werden, wenn

1. die Theile der Stromwender gegenseitig übergreifen, oder
2. ein zweites, vorwärts oder rückwärts verschobenes Bürstenpaar mit dem ersten Paar verbunden wird.

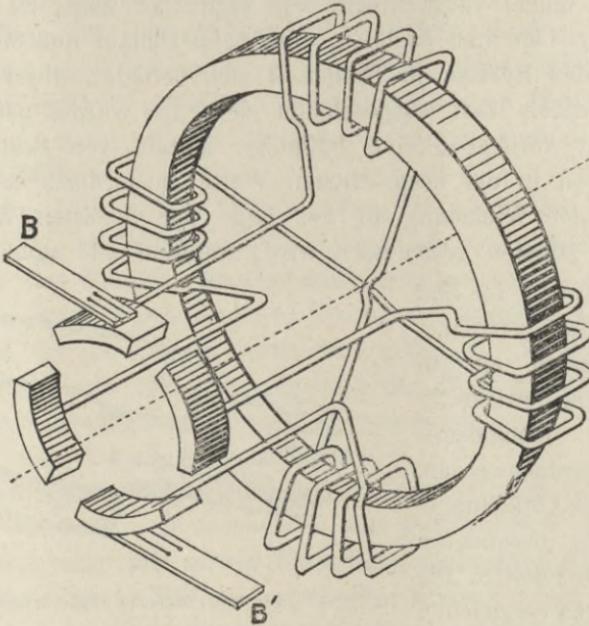


Fig. 297. Viertheilige offene Ringwicklung.

Durch Betrachtung der Figur 298 sehen wir dies etwas deutlicher.

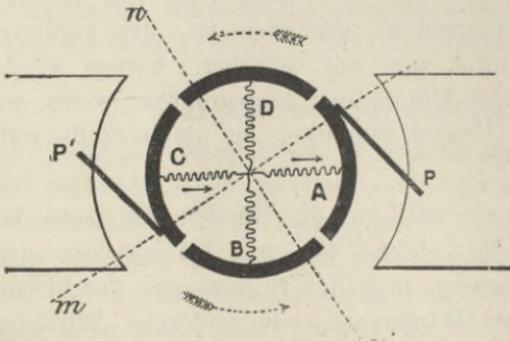


Fig. 298.

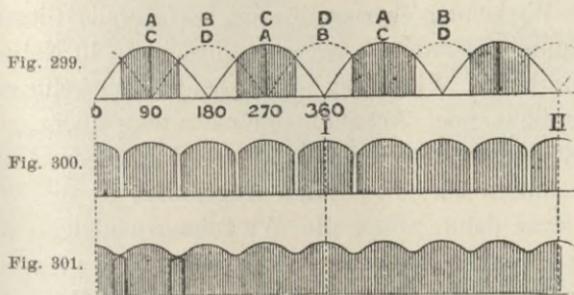
Diese Figur stellt einen solchen Anker dar, in dem jedoch die Wicklungen oder Schleifen nur durch Wellenlinien angedeutet sind.

Die Wellenlinie  $AC$  kann entweder ein Paar Wicklungen des Ringes (wie in Figur 297) oder eine einzelne Schleife oder Gruppe von Windungen auf einer Trommel vorstellen.

Die Wicklungen  $A$  und  $C$  gelangen gerade in die Lage  $mm'$  der grössten Thätigkeit, sie führen den Bürsten  $PP'$  einen Strom zu. Derselbe wird erst ein wenig steigen und dann abfallen.

Inzwischen sind die Wickelungen *B* und *D* unthätig. Nimmt jeder der vier Theile des Stromabgebers gerade ein Viertel des Umfanges ein, so ist klar, dass, wenn die Wickelung *A* in Thätigkeit gelangt, deren Ebene mit *mm'* einen Winkel von 45 Grad bildet und beim Aufhören der Berührung auf der anderen Seite wiederum 45 Grad von der Bürste entfernt ist, in allen Zwischenlagen aber mit der Bürste in Berührung bleibt; dasselbe geschieht mit jeder Wickelung, die an den Bürsten vorbeiläuft. Es wird nur dann eine augenblickliche Unterbrechung des Stromes und ein Funken eintreten, wenn die beiden aufeinanderfolgenden Theile unter der Bürste hinweggehen und die Bürste beide Theile nicht zugleich berührt.

Wenn wir uns erinnern, dass Figur 29 die wechselnden Ströme aus einer einzelnen Schleife oder einem Paar Wickelungen, und



Curven zur Darstellung des Stromes aus einer viertheiligen offenen Wickelung.

Figur 30 dieselben, jedoch durch einen zweitheiligen Stromwender gerichteten Ströme darstellt, so vermögen wir die Wirkung unserer neuen Anordnung durch die Darstellung in der Figur 299 zu verzeichnen.

Die unterhalb der ersten Figur angegebenen Winkel sind von der neutralen Linie *nn'* ab gerechnet. Wenn die Wickelung *A* von der genannten Lage aus 90 Grad durchlaufen hat, so befindet sie sich in der Lage der stärksten Induction: weil aber der Theil *A* des Stromabgebers selbst 90 Grad einnimmt, so wird der Strom von 45 Grad bis 135 Grad aufgenommen. Die schattirten Curventheile stellen die nicht zusammenhängende Wirkung der Wickelungen *A* und *C* dar, die während zweier Viertel der Drehung in den Stromkreis gelangen. Die Wickelungen *B* und *D* kommen in den Zwischenräumen zur Wirkung, wie die punktirten Linien anzeigen. Die inducirten Ströme zeigen deshalb annähernden Zusammenhang, der von der Anordnung des Stromwenders und der Bürsten abhängig ist.

Die Figur 300 zeigt die Einwirkung von Zwischenräumen zwischen den Theilen des Stromwenders; es ist ersichtlich, dass die Ströme zwar gleichgerichtet, aber unzusammenhängend sind. Verlassen die Bürsten einen Theil des Stromwenders, und sind sie mit dem nächsten Theile noch nicht in Berührung getreten, so wäre eine beträchtliche Funkenbildung unvermeidlich.

Die Figur 301 zeigt das Ergebniss, wenn die eine Berührung bereits stattfindet, ehe die andere aufhört; die inducirten Ströme sind nunmehr ununterbrochen, zeigen jedoch in ihrer Stärke noch Schwankungen. Wenn beide Wickelungspaare mit den Bürsten in Berührung stehen, so sind sie nebeneinander geschaltet. In diesem Zustande ist der Widerstand des Ankers nur halb so gross, als wenn ein Wickelungspaar ausgeschaltet ist; es wird indessen erforderlich, die unthätige Wickelung auszuschliessen, andernfalls fliesst ein Theil des Stromes unnöthigerweise rückwärts durch die in Nebenschaltung befindliche unthätige Wickelung. Die beiden Wickelungssätze sind während der Dauer der Nebeneinanderschaltung nicht gleichmässig wirksam. Die elektromotorische Kraft steigt in dem einen an und fällt in dem andern ab. Nur einen Augenblick ist die Wirksamkeit gleich, und zwar dann, wenn die Wickelungen gleiche Winkel mit  $mm'$  bilden; zu allen anderen Zeiten sucht die grössere elektromotorische Kraft der wirksameren Wickelung einen Rückstrom durch die weniger wirksame zu senden. Dies wird bis zu einem gewissen Grade durch die Selbstinduction der weniger wirksamen Abtheilung verhindert, und, wenn der Contact gerade in dem Augenblicke unterbrochen wird, wenn die höhere elektromotorische Kraft der einen Abtheilung den Strom in der weniger wirksamen auf Null gebracht hat, wird die Stromwendung ohne Funkenbildung stattfinden.

Aus dem Gesagten wird einleuchten, dass man Anker mit offener Wickelung als Ringe, Trommeln oder Scheiben herstellen kann; man kann sie auch in einem einfachen oder vielfachen Felde umlaufen lassen.

Die wichtigsten auf der erörterten Grundlage beruhenden Maschinen sind die von Brush und die von Thomson-Houston; es gehören aber auch einige andere in diese Abtheilung der Maschinen mit offener Ankerwicklung.

#### **Maschine von Brush.**

Die bekannteste Maschine der genannten Art ist die von Brush. Ihre Form, sowie die Anordnung der Feldmagnete kann man aus der Figur 303 ersehen. Die Feldmagnete sind mittels Platten aus

sogen. vulkanisirter und gefirnisster Fiber isolirt. Die Kerne der Feldmagnete sind zunächst von einem dünnen Kupferbleche umgeben, dem durch Zusammenlöthen der Ränder die Form einer Röhre gegeben ist. Dieser kupferne Ueberzug hat den Zweck, die inducirten Extraströme aufzunehmen, die im Kerne kreisen würden, sobald eine Aenderung des Magnetismus eintritt. Ueber die Kupferhülle sind als Isolation vier oder fünf Lagen von sehr starkem, mit Schellackfirniss getränktem Papier gewickelt. Um den Strom gleichmässig zu halten, wird ein im Kapitel XXIX kurz beschriebener selbstthätiger Regulator eingeschaltet.

Der Anker hat, wie ein Ring von Pacinotti, vorspringende Zähne zwischen den Wickelungen, aber ungleich jener früheren

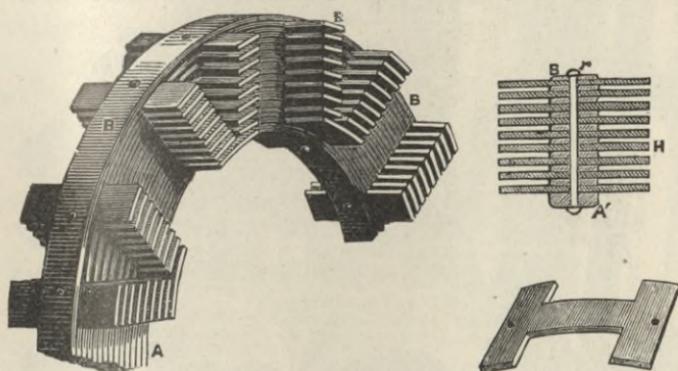
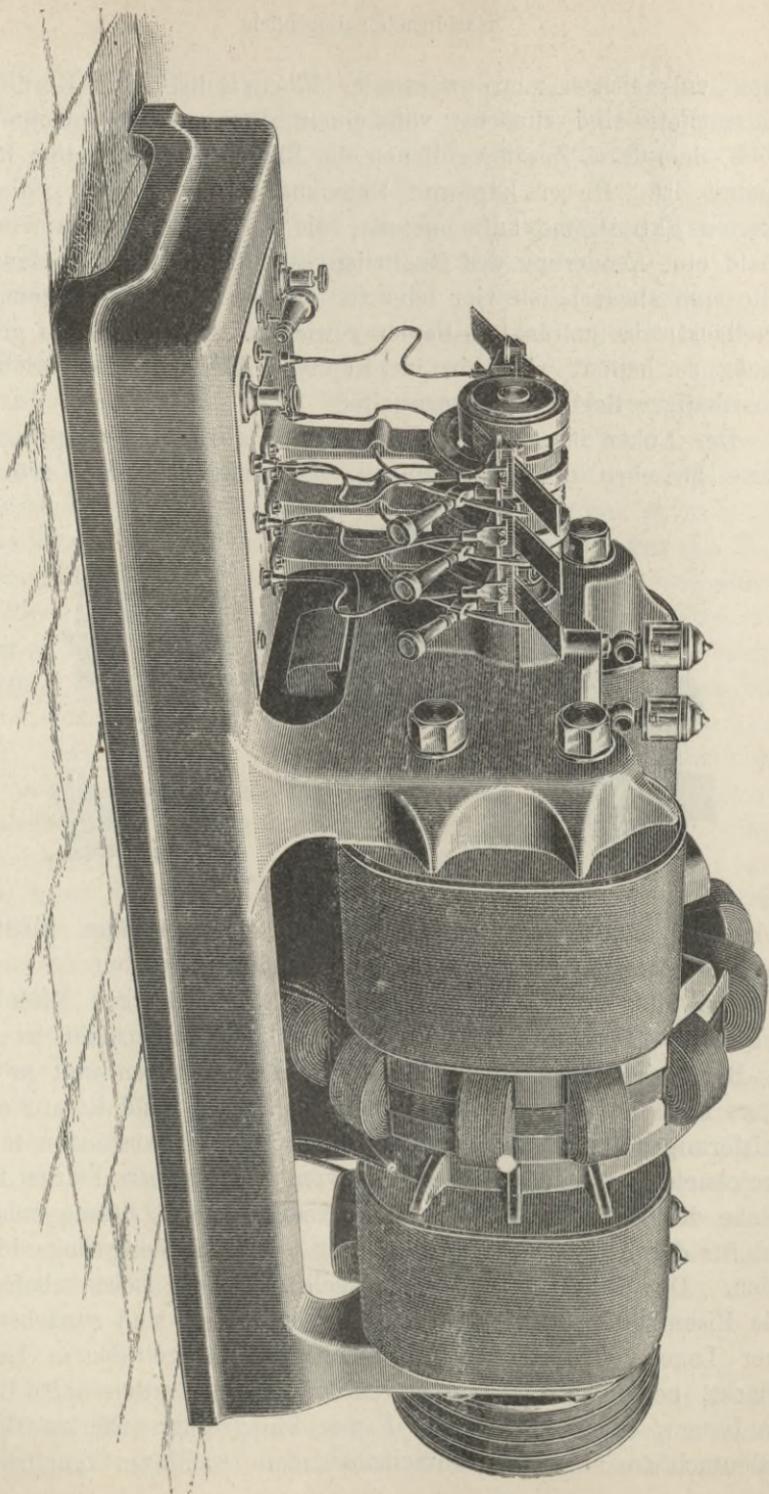


Fig. 302. Ringkern von Brush (neues Muster).

Ankerform sind die aufeinanderfolgenden Abtheilungen nicht zu einem geschlossenen Stromkreise miteinander verbunden.

Der Ring ist aus einem dünnen, 1,5 mm starken Eisenband hergestellt. Figur 302 zeigt die Bauart; in Wirklichkeit ist aber das Band viel dünner und daher die Zahl der Lagen weit grösser, als es nach der Figur den Anschein hat. Das Band ist auf einen kreisförmigen Grundring *A'* aufgewunden, der in Abständen mit *H* bezeichnete vorragende Querstücke von der gleichen Stärke trägt, welche die Windungen voneinander trennen, gute Lüftung zulassen und für die Aufnahme der Wickelung geeignete Vorsprünge bilden sollen. Der Ring ist durch gut isolirte radiale Bolzen befestigt. Alle Eisentheile, die an den Spulendraht stossen, sind zunächst mit einer Lage von starkem, mit Schellackfirniss getränktem Leinen bedeckt, bei Ankeren der grösseren Maschinen werden noch Lagen von festem, ebenso getränktem Papier hinzugefügt. Starkes Baumwollentuch trennt die zusammenstossenden Drahtlagen voneinander,

Fig. 308. Bogentischmaschine von Ruuh.



und zwar sowohl in den Ankerwickelungen als auch in den Wickelungen der Feldmagnete.

Sämmtliche Spulen werden mit der Hand in derselben Richtung gewickelt; die inneren Enden der diametral gegenüberliegenden Spulen werden zusammengelöthet und sorgfältig von allen anderen Drähten und Metalltheilen isolirt. Die äusseren freien Enden jedes Spulenpaares werden getrennt längs der Achse und durch den Zapfen geführt, dann mit diametral gegenüberliegenden Theilen des Stromabgebers verbunden. Für jedes Spulenpaar ist ein besonderer Stromwender vorhanden.

Die in Figur 303 abgebildete Maschine besitzt zwölf Spulen auf dem Anker, sechs in drei Paaren gruppirte Stromwender und drei Bürstensätze. Sie ist für 60 Lampen bestimmt, ihre elektromotorische Kraft ist 3000 Volt bei einer Geschwindigkeit von 800 Umdrehungen in der Minute.

Um die Art, wie die Wickelungsabtheilungen auf dem Anker liegen, kennen zu lernen, wollen wir einen Anker betrachten, der acht Abtheilungen und zwei Paar Stromwender hat. Die Methode lässt sich dann leicht auf die Maschinen mit zwölf Abtheilungen übertragen. Der ununterbrochene Zusammenhang zwischen den Strömen

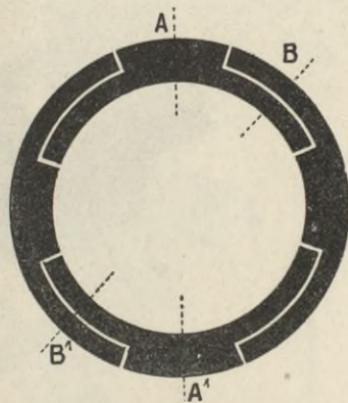


Fig. 304. Uebergreifende Stromwender.

wird dadurch hervorgebracht, dass die beiden Theile des Stromabgebers eines jeden Wickelungspaares über jene Theile des Stromabgebers hinausgreifen, die zu dem in rechten Winkel liegenden Wickelungspaar gehören; ein Paar Bürsten liegt auf beiden Stromabgebern.

Die Darstellung in der Figur 304 zeigt die Einrichtung im Schema, Figur 305 die bauliche Ausführung.

Bis zu einer Ausdehnung von 45 Grad greifen je zwei benachbarte Theile übereinander. Jedes der beiden Wickelungspare wird während einer Umdrehung zweimal umgeschaltet: zweimal bildet jedes einen Kreis für sich, wenn die Bürsten an  $AA'$  liegen; viermal gelangt es mit dem im rechten Winkel abstehenden Paare in einen Kreis, sobald die Bürsten an  $BB'$  liegen.

Es sind vier paarweise gruppirte Stromwender, entsprechend den vier Spulenpaaren, vorhanden; das eine Stromwenderpaar ist

um  $\frac{1}{8}$  eines Umlaufes (45 Grad) gegen das zweite verschoben. Man ersieht aus der Figur, dass, während die punktirt gezeichneten Bürsten  $AA'$  Strom nur von einem Spulenpaar aufnehmen, die Bürsten  $BB'$  zu derselben Zeit den Strom von zwei Paar Spulen entnehmen. Die letzteren sind dann parallel geschaltet, weil die zugehörigen Stromwender von demselben Bürstenpaare gestreift werden. Noch eingehender ist der Vorgang aus der Figur 306 zu ersehen, wodurch die Verbindung der Bürsten mit dem Stromkreise dargestellt wird.

In der Figur finden sich die acht Spulen als vier Paare numerirt, jedes Paar hat seinen eigenen Stromwender, zu dem die

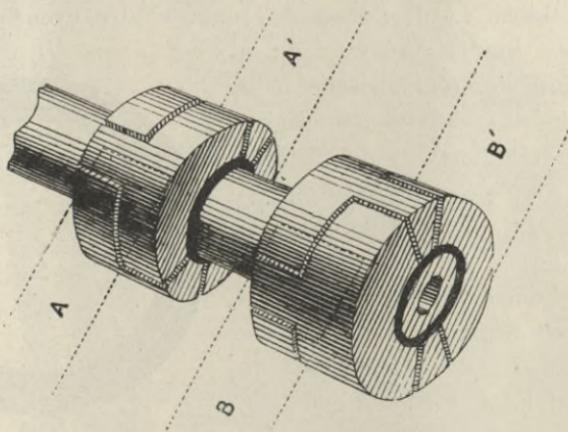


Fig. 305. Stromabgeber für den mit vier Wicklungspaaren belegten Anker von Brush.

äußeren Enden des Drahtes jeder Spule führen, während die inneren Enden querüber (in der Figur nicht sichtbar) miteinander in Verbindung stehen.

In der Maschine ist jedes Spulenpaar ausgeschaltet, sobald es die Lage der geringsten Wirksamkeit durchläuft, d. h. in einer Lage etwas hinter der senkrechten punktirten Linie in der Mitte zwischen den Polen (Fig. 306), wenn die Zahl der hindurchtretenden Kraftlinien ein Maximum wird, das Verhältniss der Aenderung der Linien aber ein Minimum ist. Dies wird dadurch erreicht, dass die beiden Hälften des Stromwenders auf jeder Seite durch Zwischenräume von  $\frac{1}{8}$  des Umfanges voneinander getrennt sind. Aus der Figur ist ersichtlich, dass die beiden mit  $I, I$  bezeichneten Spulen ausgeschaltet sind; gegen keinen der beiden Theile des Stromabgebers liegen Bürsten an.

Bei dieser Lage befinden sich die Spulen 3,3, die rechtwinkelig zu 1,1 stehen, in der grössten Wirksamkeit; der in ihnen inducirte Strom fliesst von der mit *A* bezeichneten Bürste (diese ist die negative) weg in die mit *A'* bezeichnete. Die letztere ist querüber mit der Bürste *B* verbunden, von wo der Strom abermals in den

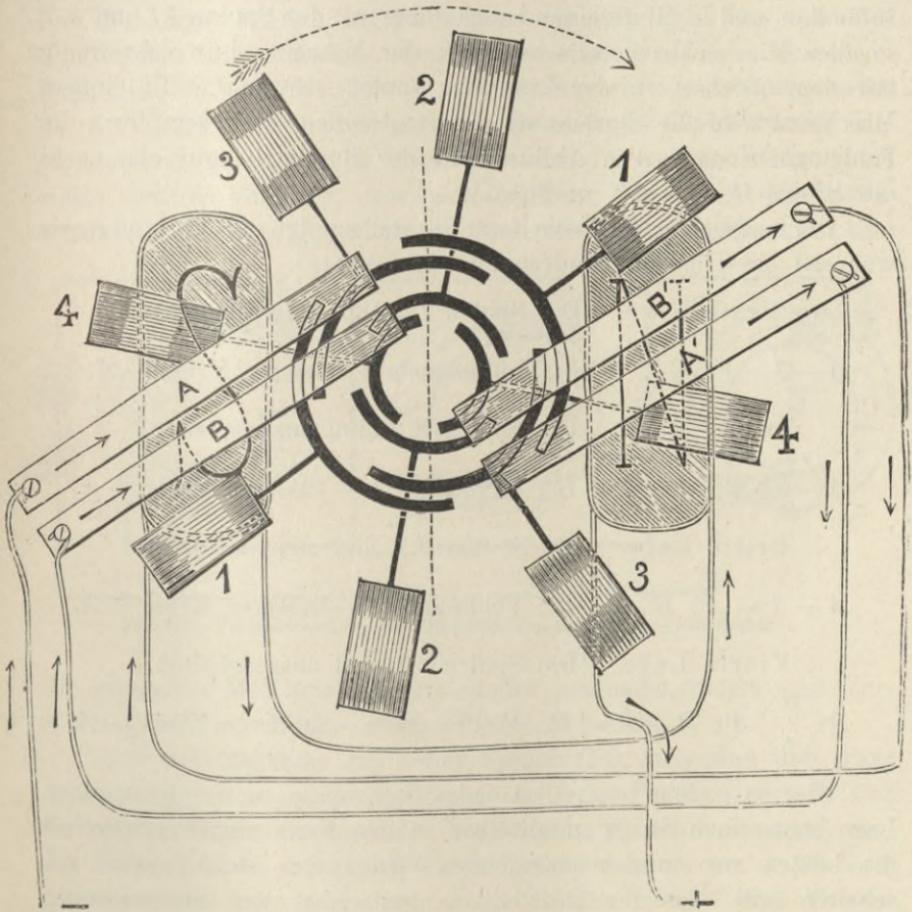


Fig. 306. Verbindungen in der Maschine von Brush.

Anker tritt. Die Spulen 2,2 haben nun gerade die Lage der stärksten Wirkung verlassen, und die Spulen 4,4 beginnen sich derselben zu nähern. In beiden Spulenpaaren wird deshalb Induction stattfinden. Der in *B* eintretende Strom verzweigt sich, ein Theil fliesst durch die Spulen 2,2, der andere Theil durch 4,4, die Wiedervereinigung findet an der Bürste *B'* statt, von wo der Strom die Elektromagnetwickelungen behufs deren Erregung umkreist, dann in

den äusseren Stromkreis tritt und zurück zur Bürste  $A$  gelangt. Es werden also auch hier die Spulen, in welchen die Induction am grössten ist, mit solchen von geringerer elektromotorischer Kraft hintereinandergeschaltet, obwohl auf einem anderen Wege als bei den Maschinen mit geschlossenen Ankerwickelungen. Bei weiterer Umdrehung gelangen die Spulen  $4,4$  in die Lage der grössten Induction, und in Hintereinanderschaltung mit den Spulen  $1,1$  und  $3,3$ , so dass die elektromotorische Kraft der Maschine nur sehr wenig mit dem Wechsel in der Lage der Spulen schwankt. (In einigen Maschinen wird die Einrichtung derart getroffen, dass der Strom die Feldmagnete nach dem Abfluss von der Bürste  $A'$  und ehe er in die Bürste  $B'$  übertritt, umfliesst.)

Die nachstehende Tabelle fasst die Reihenfolge der Verbindungen während einer halben Umdrehung zusammen:

Erste Lage. (Die Spulen  $1,1$  sind ausgeschaltet.)

$A-3-A'$ ;  $B\left\langle\begin{smallmatrix} 4 \\ 2 \end{smallmatrix}\right\rangle B'$ ; Feldmagnete — äusserer Kreis —  $A$ .

Zweite Lage. (Die Spulen  $2,2$  sind ausgeschaltet.)

$A\left\langle\begin{smallmatrix} 1 \\ 3 \end{smallmatrix}\right\rangle A'$ ;  $B-4-B'$ ; Feldmagnete — äusserer Kreis —  $A$ .

Dritte Lage. (Die Spulen  $3,3$  sind ausgeschaltet.)

$A-1-A'$ ;  $B\left\langle\begin{smallmatrix} 2 \\ 4 \end{smallmatrix}\right\rangle B'$ ; Feldmagnete — äusserer Kreis —  $A$ .

Vierte Lage. (Die Spulen  $4,4$  sind ausgeschaltet.)

$A\left\langle\begin{smallmatrix} 3 \\ 1 \end{smallmatrix}\right\rangle A'$ ;  $B-2-B'$ ; Feldmagnete — äusserer Kreis —  $A$ .

Hieraus ersieht man, dass jedes Spulenpaar in der günstigsten Lage stets einen Strom unmittelbar in den Kreis abgibt, während die beiden vor- und nachliegenden Spulenpaare stets parallel geschaltet sind; dasselbe Bürstenpaar bestreicht zwei Stromwender, das übrig bleibende Spulenpaar ist ausgeschaltet.

Infolge dieser eigenthümlichen Anordnung liefert die Messung der Potentiale um einen der Stromwender mittels eines Spannungsmessers ein ganz anderes Ergebniss als bei Maschinen anderer Bauart. Auf  $\frac{1}{8}$  des Umfanges an jeder Seite der positiven Bürste zeigt sich keine merkliche Potentialdifferenz. Dann erfolgt ein starker Abfall. Zum Theil ist derselbe durch die kurze Zeit begründet, während deren die mit dem Spannungsmesser verbundene

verstellbare Bürste und die feste positive Bürste gemeinschaftlich in Berührung mit demselben Theile des Stromwenders sich befinden. Später liefert das Messinstrument keine Angaben, dies entspricht der Lage der Ausschaltung; darauf folgt auf jeder Seite der negativen Bürste eine Gegend, in der derselbe Zustand wie an der positiven Bürste herrscht.

Aus vorstehenden Erläuterungen leuchtet ein, dass die vier Spulenpaare der Maschine thatsächlich vier besondere Maschinen darstellen; jedes Paar giebt Wechselströme an einen Stromwender ab, der letztere verwandelt sie in unterbrochene Gleichströme. Die voneinander unabhängigen Maschinen sind in sinnreicher Art paarweise dadurch vereinigt, dass man ein Paar Bürsten an den Stromwendern von zwei Spulenpaaren schleifen lässt. Schliesslich sind

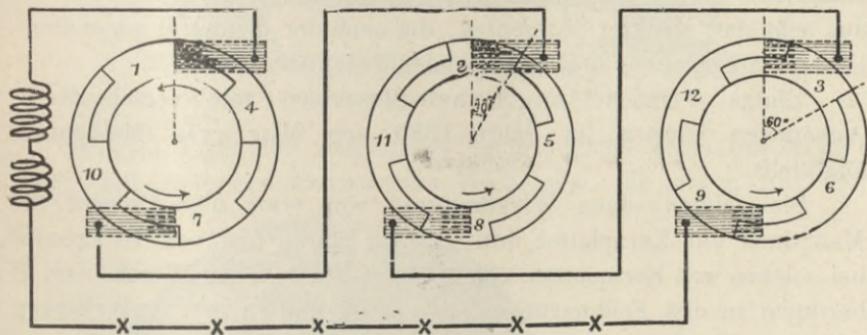


Fig. 307. Verbindungen an einer Maschine von Brush mit zwölf Spulen.

die gepaarten Maschinen hintereinander geschaltet, indem eine Verbindung von der Bürste A' zur Bürste B besteht.

Bei der Maschine mit zwölf Spulen (Fig. 303) sind drei Paar Stromwender vorhanden; die Segmente jedes Paares sind mit vier im rechten Winkel zu einander befindlichen Spulen verbunden, und die Paare sind so auf der Welle befestigt, dass sie um je 30 Grad gegeneinander verschoben sind. Die Spulen 1, 4, 7 und 10 sind mit dem ersten Paare, 2, 5, 8 und 11 mit dem zweiten, 3, 6, 9 und 12 mit dem dritten Paare verbunden. Figur 307 zeigt die Art und Weise, wie die Bürsten hintereinander geschaltet sind.

Vielpolige Brush-Maschinen werden auch mit directem Antrieb gebaut. In der Centralstation der Mutual Electric Light and Power Co., Chicago, sind drei von Willans'schen Dampfmaschinen unmittelbar angetriebene vierpolige Dynamomaschinen von 500 Umdrehungen in der Minute aufgestellt. Jede Maschine kann 125 in

Reihen geschaltete Bogenlampen speisen. Der automatische Regulator arbeitet so genau, dass eine beliebig grosse Zahl dieser Lampen jederzeit ein- oder ausgeschaltet werden kann, ohne irgend eine Störung befürchten zu müssen. Der Anker dieser Maschinen hat bei einem Durchmesser von 99 cm 24 Spulen, d. h. sechs Satz von je vier Spulen. Jede Spule eines Satzes befindet sich in der gleichen Lage gegenüber den vier Polen; alle vier Spulen sind genau so in Reihe geschaltet, wie es die zwei Spulen bei der zweipoligen Maschine sind. Die Verbindungen mit den Stromwendern sind nach denselben Grundsätzen hergestellt, wie bei der oben beschriebenen Maschine mit zwölf Spulen, jedoch mit der Abänderung, dass hierbei ein Unterschied in der Lage der Wickelung von 45 Grad einer Differenz von 90 Grad bei der zweipoligen Maschine entspricht. Jeder der drei Theile des Stromwenders besteht daher aus acht statt aus vier Segmenten; die einander diametral gegenüberliegenden Segmente sind miteinander verbunden.

Einige Versuche an Brush-Maschinen mit verschiedenen Ankerarten wurden im Jahre 1889 von Murray<sup>1)</sup> (Melbourne) angestellt.

Sie zeigten einen Wirkungsgrad von etwa 69,8 Procent für Maschinen mit Kernplatten von 0,13 cm Stärke und von 78 Procent bei solchen mit Kernplatten von 0,06 cm Stärke. Die Werthe von  $\mathfrak{B}$  betragen in den Feldmagneten etwa 4800 und in den Ankerkernen 27000. Die Schwankungen des Stromes stellten sich auf etwa 1,5 Procent<sup>2)</sup>.

#### Maschine von Thomson-Houston.

Diese gleichfalls ausgezeichnete Maschine wurde von Professor Elihu Thomson und Edwin J. Houston zu Philadelphia gebaut. Wie man aus der Figur 308 ersieht, besteht der Feldmagnet aus zwei eisernen Röhren mit Flanschen, die an ihren inneren Enden becherartig gestaltet sind. Rohr und Becher werden als ein Stück gegossen und so ausgedreht, dass der kugelförmige Anker genau hineinpasst. Auf den Röhren liegt die Wickelung *CC*. Nach Aufbringung der letzteren werden die Flanschen durch schmiedeeiserne

1) Journ. Inst. Electr. Eng., Bd. 19, S. 710. Nov. 1889.

2) Wegen weiterer Prüfungen siehe Thurston im Journal of Franklin Institute, September 1886. Vergleiche auch ein kleines Büchlein, betitelt „Electrical Engineers' and Students' Chart and Handbook of the Brush Arc Light System“ von H. C. Reagan jun. (New York 1895).

Stäbe *bb* verbunden, die als Joch der Magnete und gleichzeitig zum Schutze der Wickelung dienen. Die Feldmagnete ruhen auf einem Gestell, an dem sich auch die Lager für die Ankerwelle *X* befinden.

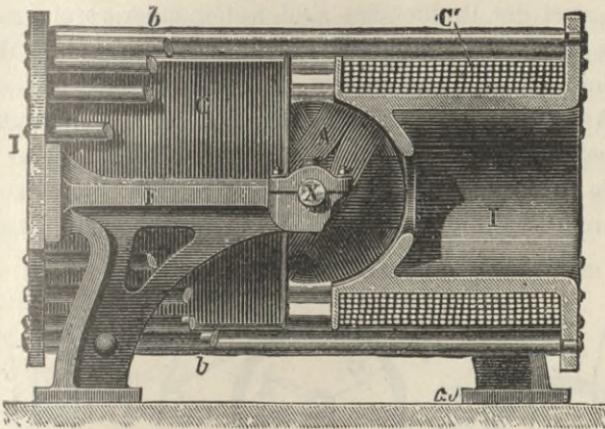


Fig. 308. Bogenlichtmaschine von Thomson-Houston.

Die in Figur 309 dargestellte ursprüngliche Form des Ankers hatte eine sehr bemerkenswerthe Wickelung. Es waren nur drei

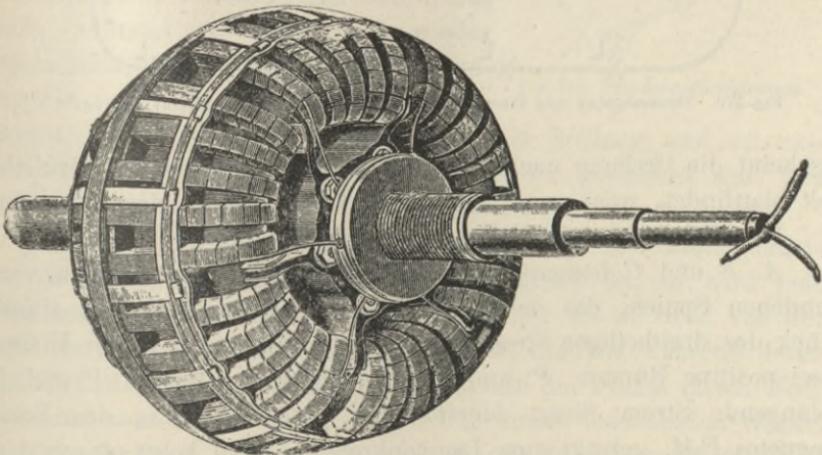


Fig. 309. Ringanker der Thomson-Houston'schen Maschine.

Spulen vorhanden. Die inneren Enden der Spulen waren miteinander verbunden, von ihnen ging keine weitere Verbindung zu irgend einem Leiter aus. Die drei Drähte wurden nunmehr über dem mit gefirnisstem Papier bedeckten Kern in drei Abtheilungen, die Winkel von 120 Grad miteinander bilden, so aufgewickelt, dass die Abtheilungen etwa gleichweite Abstände vom

Kern besessen, wobei die einander überdeckenden Theile die äussere Form nahezu kugelförmig gestalteten. Die neuerdings gebauten Ringanker haben sechs Gruppen von Spulen, die in drei Paaren angeordnet sind. Die drei Paare sind sternförmig untereinander verbunden, drei der Drahtenden sind miteinander vereinigt, während die andern drei Enden der Drähte durch die hohle Welle zum Stromwender führen. Die Spulen sind einzeln auswechselbar. Sobald der Anker in der Höhlung zwischen den Polen umläuft, entstehen in jeder einzelnen Wickelung Ströme abwechselnder Richtung. Wir wollen untersuchen, wie dieselben durch den Stromwender gerichtet und vereinigt werden. In den folgenden Darstellungen

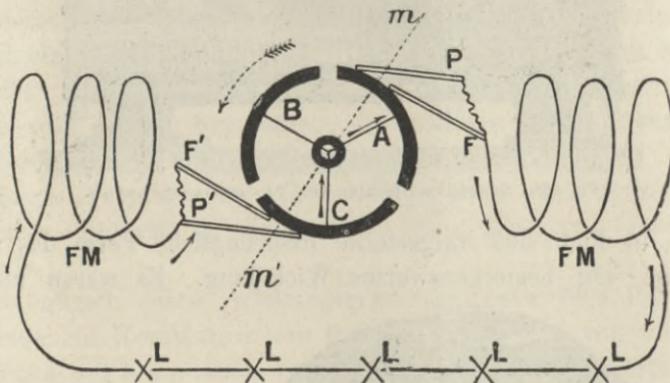


Fig. 310. Stromabgeber und Stromkreis der Maschine von Thomson-Houston.

erscheint die Drehung nach links hin gerichtet, wie sie in Wirklichkeit stattfindet, wenn man den Anker vom Stromwender aus sieht.

Die Figur 310 zeigt die Anordnung.

$A$ ,  $B$  und  $C$  bedeuten die drei mit ihren inneren Enden verbundenen Spulen, das äussere Ende einer jeden steht mit einem Stück des dreitheiligen Stromwenders in Verbindung.  $P$  und  $F$  sind zwei positive Bürsten,  $P'$  und  $F'$  zwei negative. Der zu  $P$  und  $F$  gelangende Strom fliesst zuerst durch eine Wickelung des Feldmagnetes  $FM$ , gelangt zum Lampenkreis  $LL$  und kehrt durch den anderen Theil der Wickelung  $FM$  zu den Bürsten  $P'$   $F'$  zurück.

Man vergleiche diese Figur mit der Figur 306, wo die neutrale Linie den Ankerkreis schräg in zwei Hälften schneidet und die inducirten Ströme in allen denjenigen Spulen vom Mittelpunkte zum Stromwender fließen, die in der rechts liegenden Kreishälfte in aufsteigender Bewegung begriffen sind, während in der anderen Hälfte während der niedergehenden Bewegung die Richtung der

Ströme vom Stromwender weg zum Mittelpunkte geht. Dem entsprechend wird in der Figur 310 in *A* der Strom nach aussen, in *C* der Strom nach innen gerichtet sein, *B* ist während des Durchlaufens durch die neutrale Lage ausgeschaltet. Der ununterbrochene Zusammenhang zwischen den Strömen wird in der auf Seite 418 erwähnten Weise dadurch erlangt, dass ein zweites Bürstenpaar *F* und *F'* auf die Bürsten *P* und *P'* folgt. Bei der gezeichneten Lage des Ankers bilden *A* und *C* ungefähr gleiche Winkel mit der Linie *mm'*, welche die höchste Wirksamkeit bezeichnet. Aus diesem Grunde haben die elektromotorischen Kräfte in diesen Spulen im gezeichneten Augenblicke ungefähr gleiche Grösse, jedoch steigt die Kraft in *A* an, während die in *C* im Abnehmen begriffen ist. Die elektromotorischen Kräfte beider Spulen summiren sich aber, weil die letzteren hintereinander geschaltet sind. Den Augenblick darauf befindet sich *A* in der Lage der grössten Wirksamkeit; *C* nähert sich rasch der neutralen Linie, ist aber noch nicht ausgeschaltet; in *B* beginnt wieder eine elektromotorische Kraft, während die Spule eben wieder eingeschaltet wird. *B* und *C* sind nebeneinander und mit *A* hintereinander geschaltet. Dann kommt *C* in die neutrale Stellung und ist ausgeschaltet, während *A* und *B* hintereinander geschaltet sind und so fort.

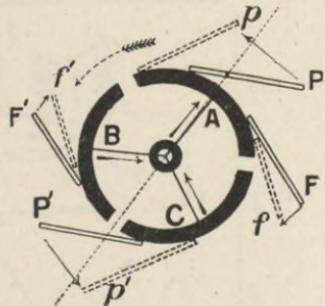


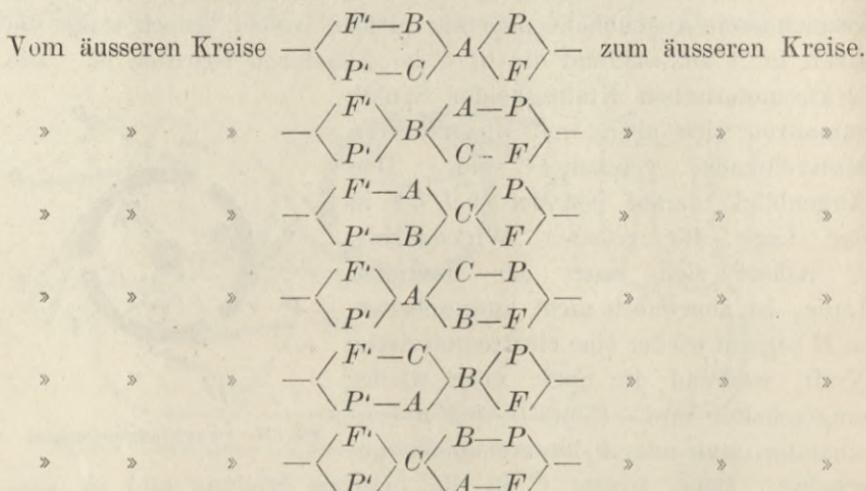
Fig. 311. Stromwenderstellungen.

Wenn der Abstand zwischen den Theilen des Stromwenders dem Abstände der benachbarten Bürsten gleich ist, so wird jede Spule ausgeschaltet werden, sobald sie weiter als 60 Grad von der Lage der grössten Wirksamkeit entfernt ist; die Zeit, während deren zwei Spulen parallel geschaltet sind, ist für die Praxis gleich Null. Wenn indessen die Nebenbürsten *FF'* in einem bedeutenden Winkel — etwa 60 Grad in der Praxis — hinter den Hauptbürsten *PP'* liegen, so werden zwei Spulen beträchtliche Zeit parallel gehalten. Die Regelung der Maschine zur Erhaltung eines gleich starken Stromes wird durch selbstthätige Bürstenverschiebung vervollkommenet.

Die jetzt angewendete Methode wird als »Rückwärts«-Regelung bezeichnet. Das zweite Bürstenpaar *FF'* wird nach *ff'* rückwärts geschoben, wie die Figur 311 zeigt, während zugleich die Hauptbürsten *PP'* um einen dreimal so grossen Winkel vorwärts nach *pp'*

geschoben werden. Wenn die Bürsten nun unter normalen Bedingungen, wie vorhin festgesetzt war, also um 60 Grad, voneinander abstehen, so werden genau 120 Grad auf jeder Seite zwischen den positiven Bürsten  $PF$  und den negativen  $P'F'$  sich befinden; beträgt dann die genaue Länge eines jeden Stromwendertheiles 120 Grad, so wird keine Spule ausgeschaltet, und die Parallelschaltung besteht zwischen zwei Spulen durch Winkel von 60 Grad, d. h. zwei von den drei Spulen werden stets parallel und mit der dritten hintereinander geschaltet sein.

Die sechs Wechselstufen sind dann:



u. s. w.

Falls der Strom bei einer Verminderung der Lampenzahl im Kreise zu stark ansteigt, so wird das zweite Bürstenpaar (Nebenbürsten) zurückgeschoben. Hierdurch verkürzt sich die Zeit, während deren jede einzelne Spule in der Lage der höchsten Wirksamkeit mit ihrer ganzen elektromotorischen Kraft auf den Kreis einwirkt; gleichzeitig wird der Zeitpunkt beschleunigt, zu dem sie mit einer vergleichsweise unthätigen Spule parallel geschaltet ist. Während derartiger Regelungsbewegungen wird die ganze Maschine sechsmal in jeder Umdrehung auf einen Augenblick kurz geschlossen, indem  $F'$  sich soweit gegen  $P'$ , und  $F$  sich soweit gegen  $P$  zurückbewegt, dass beide einen Augenblick mit demselben Theile des Stromwenders in Berührung gelangen. Die Thätigkeit wird unterstützt durch die Vorwärtsbewegung von  $P$  und  $P'$ , der Hauptzweck dieser Verschiebung ist indessen die Verminderung der Funkenbildung. Wenn der Strom zu schwach wird, so müssen die Bürstenpaare näher

zusammengelegt werden, wodurch die Zeit, während deren die wirksamsten Spulen parallel zu den weniger wirksamen sich befinden, abgekürzt wird.

Regulirungsvorrichtung. Die Vor- und Rückwärtsbewegung erfolgt durch die in der Figur 312 dargestellte Vorrichtung. Die selbstthätige Bewegung bewirkt ein Elektromagnet *R*, dessen parabolöidisch geformter Pol den Anker *A* infolge der Stromwirkung anzieht.

Für gewöhnlich ist der durch einen Nebenschluss kurz geschlossene Elektromagnet *R* unthätig und tritt nur in Wirksamkeit, wenn der Nebenschluss sich öffnet. An einer passenden Stelle des Hauptkreises befinden sich zwei Solenoïde; die zugehörigen Kerne

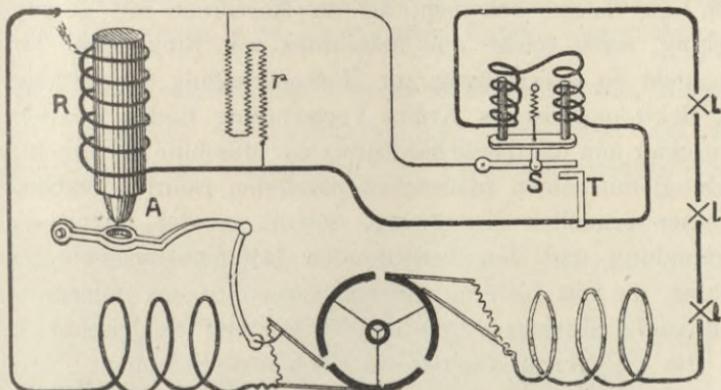


Fig. 312. Stromlauf der Thomson-Houston'schen Regelung.

sind durch ein Joch verbunden und werden von einer Feder gehalten, an dem Joche sitzt der Contacthebel *S*. Wird der Strom zu stark, so öffnet sich der Contact bei *T*, der Magnet *R* gelangt in Thätigkeit und hebt den Arm *A*. Während des Betriebes schwingt der Hebel *S* auf und ab und ändert die Bürstenlage entsprechend den Bedingungen im Stromkreise. Ein aus Kohle bestehender Nebenschluss *r* von hohem Widerstand vermindert die Funkenbildung zwischen *T* und *S*. Es könnte erwartet werden, dass an dem nur dreitheiligen Stromwender die Funken, die beim Vorbeilaufen der Theile an den Bürsten entstehen, sehr bald die Oberfläche des Stromwenders zerstören würden. Dieser Schwierigkeit ist von Thomson in kühnster Weise abgeholfen worden. Durch ein kleines, auf der Achse hinter dem Stromwender angebrachtes mechanisches Gebläse wird durch einen genau gegen die richtige Stelle geführten und zur richtigen Zeit eintretenden Luftstrom der Funken gelöscht.

Die drei Theile des Stromwenders sind durch Zwischenräume getrennt. Gegenüber jeder Hauptbürste ragt ein Rohr hervor; jedes dieser Rohre entsendet während jeder Umdrehung dreimal einen Luftstrom.

#### Vortheile der Maschinen mit offener Wickelung.

Die beiden hervortretendsten grossen Maschinen mit offener Wickelung — die von Brush und Thomson-Houston — scheinen gewisse Eigenschaften zu besitzen, die sie gerade als Stromerzeuger für gleichbleibenden Strom zu Beleuchtungsanlagen mit Bogenlicht geeignet erscheinen lassen. Ein bedeutender Theil aller Bogenlampen der Welt wird durch die eine oder andere dieser Maschinen betrieben. Es möchte scheinen, als ob Maschinen mit geschlossener Wickelung, seien solche nun Maschinen mit Ring- oder Trommelanker, nicht so zweckmässig zur Hervorbringung der nothwendigen hohen elektromotorischen Kräfte Verwendung finden können. Der Stromwender (ein unerlässlicher Zusatz zur Maschine mit geschlossener Wickelung) mit seinen zahlreichen parallelen isolirten Stäben unterliegt einer schnellen Zerstörung, sobald er der unvermeidlichen Funkenbildung und den bedeutenden Bürstenverschiebungen ausgesetzt ist, die mit Lieferung gleichstarken Stromes untrennbar verbunden sind. Für diese Art der Vertheilung elektrischer Energie halten die in diesem Kapitel beschriebenen einfachen, durch Luft isolirten Stromwender am besten gegen Abnutzung Stand. Gegen die Vortheile ist indessen der etwas geringere Wirkungsgrad der Maschinen mit offener Wickelung in Anrechnung zu bringen.

Die Stromschwankungen sind bei gut gebauten Maschinen vernachlässigbar gering. Mordey schickte den Strom einer »Brush«-Maschine durch die secundäre Wickelung eines Transformators; hierbei war an den Klemmen der primären Wickelung ein messbarer Spannungsunterschied nicht zu bemerken.

Einige Versuche an Maschinen mit geschlossener Wickelung sind von Owen und Skinner in den »Proceedings of the American Inst. Electric Engineers« 1893 veröffentlicht.

Die Inductionscurven im Anker einer Maschine von Thomson-Houston sind von Milton E. Thompson<sup>1)</sup> untersucht worden. Er fand, dass bei voller Belastung der gesammte Strom sechsmal bei jedem Umlauf zwischen 5 und 8 Ampere schwankte, die mittlere

---

1) Electr. World, Bd. 17, S. 392, 1891 und Electr. Rev., Bd. 28, S. 773, 1891.

Stromstärke betrug 6,8 Ampere. Die Schwankungen der elektromotorischen Kraft in jeder einzelnen Wicklung waren sehr bemerklich, die Curven waren unregelmässig und fielen zwölf Mal in jedem Umlauf bis nahe auf Null.

## Andere Maschinen für Bogenlicht.

### Maschine von Bradley.

Bradley baute eine Maschine mit geschlossener Ringwicklung, bei welcher die Schwierigkeit der Stromwendung bei hoher Spannung dadurch umgangen ist, dass vier verschiedene Stromwender angebracht wurden, welche in Reihe miteinander verbunden waren. Eine Maschine von ähnlicher Bauart, welche Hurmuzescu für Prüfzwecke construirte, wird im nächsten Kapitel beschrieben.

### Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Co., Nürnberg.

Für Bogenlicht in Reihenschaltung verwendet die Firma Schuckert noch ihr ursprüngliches Flachringmaschinen-Modell.

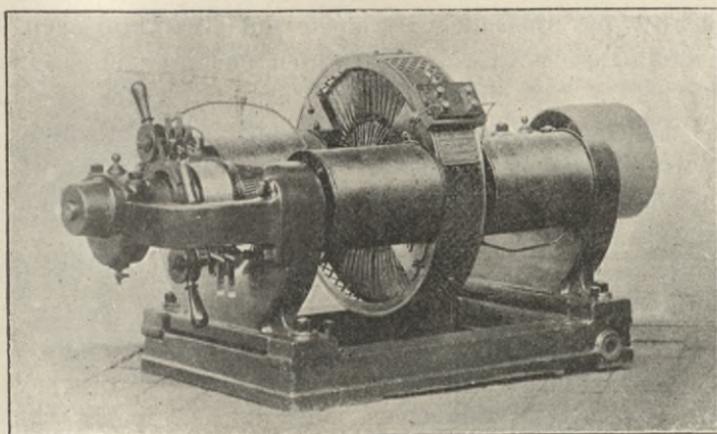


Fig. 313. Bogenlichtmaschine mit Flachring von Schuckert.

Figur 313 zeigt eine Ansicht davon. Die Maschine wird in acht verschiedenen Grössen ausgeführt. Das grösste Modell leistet 12 Kilowatt bei 1500 Volt Spannung und genügt für 30 Lampen von 8 Ampere in Reihenschaltung. Bei Kraftübertragung auf grössere Entfernungen werden Maschinen nach dem sogen. Manchester-Typus gebaut. Die Konstruktion gestattet die Wicklung bis zu 3000 Volt Spannung auszuführen.

### Maschine von Sperry.

Diese Maschine für Bogenlicht besitzt einen Anker von Gramme. Ein unterscheidendes Merkmal der Maschine bildet die Verwendung von inneren und äusseren Polstücken. Sie war in den früheren Ausgaben dieses Werkes abgebildet.

### Maschine von Wood.

Auch dies ist eine abgeänderte Gramme'sche Maschine<sup>1)</sup>. Zur Verhinderung der Funkenbildung ist eine Hilfsbürste fünf bis zehn Abtheilungen vor der abnehmenden Bürste angebracht; die Spannung wird durch eine Anordnung geändert, wodurch die Bürsten vorwärts geschoben werden. Der Abstand zwischen der Hilfsbürste und der hinter ihr liegenden ist veränderlich; er ist klein, wenn die Stromwendung in starkem Felde vor sich gehen soll, und gross bei schwachem Felde, so dass stets funkenlose Stromwendung gesichert ist. Die grösste Station für Bogenlicht, die Station in St. Louis (Missouri), besitzt 53 dieser Maschinen, von denen jede 60 Lampen betreiben kann.

### Phoenix-Maschine für Bogenlicht.

Esso<sup>2)</sup> hat Bogenlichtmaschinen mit Gramme'schen Ringankern für Paterson & Cooper entworfen, und zwar für Spannungen von 800 bis zu 1500 Volt. Da der Anker mit vielen Windungen feinen Drahtes belegt ist, so kommen auf jede Abtheilung viele Windungen, und es entsteht deshalb eine beträchtliche Selbstinduction. Zur Umkehrung des Stromes in einer Abtheilung bei dem Vorgange der Stromwendung wird eine starke elektromotorische Kraft erforderlich. Soll demnach die Regulirung durch Verschiebung der Bürsten bewirkt werden, so ist klar, dass in jeder Lage vom geringsten bis zum weitesten Bereich im Zwischenraum ein gleichmässiges magnetisches Feld vorhanden sein muss. Um funkenfreie Stromabnahme bei allen Bürstenlagen zu erlangen, muss das Feld im Zwischenraum nahezu gleichbleibend stark sein. Das Eisen des Feldmagnetes wird daher bei solchen Maschinen in seiner Masse verringert, aber bis zu einem hohen Grade erregt.

### Maschine von Statter.

Die Maschine von Statter liefert ein anderes Muster mit einer selbstthätig wirkenden Vorrichtung zur Verschiebung der Bürsten.

1) Vergl. Electr. World, Bd. 12, 23. April 1887 und Bd. 14, S. 54 und 260, 1889; ferner Bd. 17, S. 4, 1891.

2) Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 19, S. 161, 1890.

Durch sorgfältige Gestaltung der Polstücke wird ein magnetisches Feld von solcher Anordnung erzielt, dass die Maschine funkenlos läuft.

Viele andere Fabrikanten, wie Crompton, Mather & Platt, Siemens Bros., Holmes & Co., stellen gleichfalls gute Bogenlichtmaschinen her, welche die allgemeine Anordnung der Anker mit geschlossener Wicklung haben, mit gut gesättigten Magnetkernen und aus vielen Theilen bestehenden Stromwendern.

Crocker<sup>1)</sup> fand, dass es bei Maschinen für hohe Spannung mit geschlossener Wicklung besser ist, Kohlenbürsten zu verwenden, da Kupferbürsten das Isolationsmaterial zu sehr angreifen; auf letzterem entsteht ein dünner Kupferüberzug, welcher die Funkenbildung begünstigt. Er baute eine fünfpferdige Gleichstrommaschine, welche 108 Theile am Stromwender besitzt und 11000 Volt liefern kann.

#### **Abfallende Charakteristiken.**

Eine viel angewendete Methode beim Bau von Bogenlichtmaschinen soll näher erläutert werden, wenn sie auch an und für sich die Gleichhaltung des Stromes nicht gewährleistet.

Auf Seite 191 ist auf die abfallende Gestalt der Charakteristiken gewisser Maschinen mit Reihenwicklung aufmerksam gemacht worden. Es ist klar, dass, wenn diese Wirkung genügend erhöht wird, der abfallende Theil der Charakteristik annähernd einem gleichbleibenden Strom entspricht. Die abfallende Charakteristik ist für den stetigen Betrieb von hintereinander geschalteten Bogenlampen von Bedeutung (vergl. Seite 208).

Die Ursachen, aus denen der Abfall der Charakteristik von Reihenmaschinen nach Erreichung einer maximalen Höhe erfolgt, sind: 1. die entmagnetisirende Wirkung des Ankerstromes, sobald eine positive Verschiebung der Bürsten vorhanden ist; 2. die Sättigung des Ankereisens und des Feldmagnetes; 3. die Zerstreung der magnetischen Linien vom Feldmagnet aus; 4. die besonderen Anordnungen zur Stromwendung in gewissen Maschinen — z. B. bei den beschriebenen Maschinen mit offener Wicklung —, infolgederen die elektromotorische Kraft mit der den Bürsten ertheilten Lage erheblich schwankt; 5. der hohe innere Widerstand und die Selbstinduction. Da die entmagnetisirende Wirkung des Ankerstromes nahezu proportional der Stromstärke und dem Sinus des

1) Electrical Congress, Chicago, 24. August 1893.

Verschiebungswinkels ist, und da der Sinus dieses Winkels selbst nahezu proportional der Stromstärke im Anker ist, so folgt, dass die gesammte entmagnetisirende Wirkung nahezu proportional dem Quadrate der Stromstärke im Anker ist.

Es bedeute in der Figur 314 die Curve  $E_1$  die elektromotorische Kraft (bei gegebener Geschwindigkeit), wenn die Feldmagnete besonders erregt werden und der Ankerkreis offen ist; dies schliesst die oben unter 2 und theilweise die unter 3 genannten Wirkungen ein. Es werde ferner eine Curve, deren Ordinaten proportional  $i_a^2$  sind, gezeichnet, um die entmagnetisirende Wirkung des Ankerstromes darzustellen. Aus beiden Curven erhalten wir die Curve  $E_2$  als abfallende Charakteristik. Einen Uebelstand bei allen Maschinen dieser Klasse bildet die Funkenbildung an den Bürsten infolge der Veränderlichkeit des Verschiebungswinkels. Die Wirkung des Abfalls der Charakteristik lässt sich bis

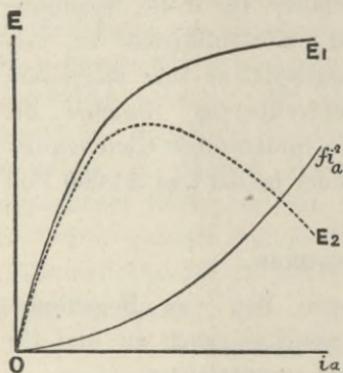


Fig. 314.

zu gewisser Ausdehnung durch Einschaltung eines Widerstandes von 1 bis 2 Ohm in den äusseren Stromkreis erreichen. Dieser ist einem inneren Widerstande, der zur Erhitzung des Ankers beiträgt, vorzuziehen. Der Hilfswiderstand muss aber auf einen eisernen Kern gewickelt werden, da die Selbstinduction zur Stetighaltung des Stromes von Bedeutung ist.

Regulatoren zur Erhaltung gleicher Stromstärke. Im Kapitel XXIX wird eine Anzahl von Vorrichtungen dieser Art für Bogenlichtmaschinen beschrieben.

## Kapitel XIX.

### Verschiedene Maschinen.

---

In diesem Kapitel werden Maschinen zur Ausscheidung von Metallen, Unipolar-Maschinen, Scheibenmaschinen und andere Formen behandelt.

#### Maschinen zur Ausscheidung von Metallen.

Zur Ausscheidung von Metallen (behufs Herstellung metallischer Ueberzüge auf Gegenständen, Fertigung plastischer Abbilder, elektrolytischer Behandlung von Erzen und Läuterung von Rohmetallen) werden besondere Gleichstrommaschinen erforderlich. Im Allgemeinen hat man starke Ströme mit geringer Spannung nothwendig, denn die Menge des in einem Bade ausgeschiedenen Metalles hängt lediglich von der Stromstärke (Zahl der Ampere), nicht aber von der Spannung (Zahl der Volt) ab. Da eine geringe Spannung den Strom durch die Widerstände des Kreises zu treiben vermag, so ist die nothwendige Zahl von Volt in jedem Falle gering. Zur Wassersetzung braucht man weniger als zwei Volt. Um in einem Bade Metall auszuschneiden, in dem die Anode aus gleichem Metall besteht, wird in der Regel nur geringe Spannung gebraucht. Wenn überhaupt zu hohe Spannung angewendet wird oder wenn die Stromdichte (d. h. die Anzahl der auf die Flächeneinheit der Kathode entfallenden Ampere) zu gross ist, so wird der Metallniederschlag ungleich oder pulverig. Diese Umstände führten zum Bau von Dynamomaschinen für höchstens 4 bis 5 Volt elektromotorische Kraft und von sehr geringem inneren Widerstand. Wenn indessen, wie bei manchen Processen, eine grössere Zahl von Bottichen mit der gleichen Stromstärke zu betreiben sind, kann man die Gefässe in Reihe schalten und bedarf dann natürlich einer der Zahl der Gefässe entsprechenden grösseren Spannung. Z. B. bei dem Castner'schen Process zur Erzeugung von Aetznatron durch Elektrolysen von gewöhnlicher Salzlösung gebraucht jedes Bad 2,3 Volt,

demnach ist für 20 hintereinander geschaltete Bottiche eine Spannung von 46 Volt erforderlich. Die erste Anwendung einer Dynamomaschine für Metallausscheidung verdanken wir J. S. Woolrich, der sich im Jahre 1842 zu diesem Zwecke die Benutzung einer magnetoelektrischen Maschine patentiren liess. Wilde war aber der erste Erbauer von Maschinen, die dem Zwecke wirklich entsprachen, indem er eine grosse Maschine anwendete, deren Feldmagnete durch den Strom einer kleineren Magnetomaschine erregt wurden. Seine ersten Maschinen, die Jahre lang von Elkington benutzt wurden, waren mit kleinen Erregermaschinen der alten Siemens'schen Form (Fig. 23) ausgerüstet; die letzteren wurden auf die Elektromagnete der in Figur 100, Nr. 1 dargestellten Form aufgesetzt. Beide Anker besaßen die von Siemens eingeführte alte Form der Längswicklung; die grössere musste während des Betriebes durch Wasser abgekühlt werden. Um das Jahr 1867 führte Wilde eine vielpolige Maschinenform mit verbessertem Stromwender ein.

Für Nickelniederschlag führte Weston eine kleine Maschine mit stählernen Magnetkernen ein, auf denen die Wicklungen für den Hauptstromkreis lagen. Ein selbstthätig wirkender Stromunterbrecher verhinderte die Umkehrung des Magnetismus durch einen Rückstrom aus dem Bade. Der Stromwender richtete die Ströme (Seite 38), ohne sie jedoch ununterbrochen zu machen. Dies ist ein wesentlicher Fehler, denn bei jeder elektrochemischen Arbeit, bestehe diese in Herbeiführung von Metallniederschlägen oder Laden von Sammlern, entsteht unbedingt starke Funkenbildung, falls die Stromschwankungen nicht durch Verwendung eines vieltheiligen Ankers mit geeignetem Stromwender auf ein sehr geringes Maass gebracht werden.

Elmore baute sehr grosse Maschinen für Kupferläuterung; sie besaßen 18 Elektromagnete in jedem Kranze und lieferten einen Strom von 3000 Ampere bei 7 bis 8 Volt Spannung. Eine solche Maschine konnte fast 6 kg Kupfer in der Stunde niederschlagen. Die Wicklung des Feldmagnetes lag im Hauptstromkreis. Dies ist ebenfalls ein Fehler. Alle Maschinen für Metallniederschläge sollten mit Nebenschlusswicklung versehen sein, weil sie andernfalls zu einer Umkehrung des Stromes neigen. Im Jahre 1873 stellte Gramme besondere Formen mit sehr geringem Widerstand her. Der Anker hatte eine Streifenwicklung und an jedem Ende einen Stromabgeber. Er lieferte 1500 Ampere bei 8 Volt. Siemens

& Halske waren ebenfalls frühe auf diesem Felde thätig und erbauten Maschinen mit Stabankern, die bei den Werken in Oker zur Verwendung gelangten<sup>1)</sup>. Auch von Brush sind Maschinen mit geringem Widerstand für elektrolytische Zwecke hergestellt worden. Hierbei machte Brush die wichtige Erfindung, die Feldmagnete mittels einer gemischten Wicklung zu erregen. Spulen aus starkem Draht wurden in Reihen geschaltet und eine Wicklung aus feinem Draht — eine Nebenschlusswicklung — hinzugefügt zu dem Zwecke, den Magnetismus zu erhalten, wenn der Hauptkreis geöffnet war. Mit der Maschine konnte geringe oder grössere Arbeit geleistet werden, ohne dass man eine Umkehrung des Magnetismus zu befürchten brauchte. Die Klemmenspannung der Maschine war nahezu gleichbleibend, sie schwankte zwischen 3,3 und 4,1 Volt, während die Stromstärke von 300 Ampere bis Null sich ändern konnte.

Andere Maschinen für elektrolytische Zwecke sind fast von allen bedeutenden Firmen entworfen worden.

Eine vierpolige Maschine mit Nebenschluss von Elwell Parker<sup>2)</sup> lieferte 1500 Ampere bei 50 Volt und 450 Umläufen in der Minute. Die Wicklung des Trommelankers besteht aus 80 Drahtlitzen, jede von 1,39 qcm Querschnitt. Der Stromabgeber hat 40 Theile. Der Anker ist 50,8 cm lang und hat 55,9 cm im Durchmesser. Vier Bürstensäte sind vorhanden, jeder Satz besteht aus fünf Bürsten. Die Länge der wirksamen Leiter beträgt 4064 cm. Bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 762 m in der Minute wird 1 Volt für je 20 cm Leiterlänge erzeugt.

Eine von Paterson & Cooper<sup>3)</sup> hergestellte Maschine für 50 Kilowatt zur elektrolytischen Herstellung von Bleichflüssigkeit liefert 1200 Ampere bei 42 Volt.

Eine von Hopkinson<sup>4)</sup> entworfene Maschine für 50 Kilowatt zur Kupferläuterung liefert 1000 Ampere bei 50 Volt und 400 Umläufen in der Minute; der Widerstand des Ankers beträgt 0,0016 Ohm, der Wirkungsgrad 93 Procent, das Gewicht 5300 kg.

Eine Maschine von Stafford & Eaves<sup>5)</sup> hat einen einfachen massiven magnetischen Kreis mit einer Erregerwicklung und einem Ringanker mit nur 18 Abtheilungen; sie liefert 150 Ampere bei 6 Volt und 640 Umläufen in der Minute.

Das Erforderniss einer grossen Stromstärke bei sehr geringer Spannung macht die Herstellung solcher Maschinen schwierig, denn eine niedrige Spannung lässt sich entweder nur mit einer geringen Zahl Windungen auf dem Anker oder mit einem schwachen magne-

1) Vergl. Elektrotech. Zeitschr., Bd. 2, S. 54.

2) The Electrician, Bd. 21, S. 183, 188.

3) The Electrician, Bd. 21, S. 183, 188.

4) The Electrician, Bd. 17, S. 62. 1886.

5) The Electrician, Bd. 18, S. 506. 1887.

tischen Felde erreichen oder endlich bei sehr geringer Umlaufgeschwindigkeit. Maschinen mit geringer Geschwindigkeit sind aber im Verhältniss zu ihrer Leistung stets theuer. Maschinen mit schwachen Magneten leiden an Funkenbildung, ebenso Maschinen mit wenigen massiven Leitern und wenigen Theilen am Stromabgeber. Sie neigen auch zur Erhitzung infolge örtlicher Wirbelströme. Man sollte als Ankerleiter Litzendraht oder verschiedene unabhängige Wickelungen (vergl. Seite 255) benutzen und sämmtlich durch Bürsten von besonderer Dicke nebeneinander schalten.

Sayers hat eine ausgezeichnete Anordnung angegeben, um einer Maschine Ströme bei verschiedenen Spannungen zu entnehmen.

Die Polflächen werden, wie die Figur 315 zeigt, durch tiefe Einschnitte zertheilt; dadurch entstehen verschiedene neutrale Punkte am Stromabgeber, an denen man ohne Funkenbildung Bürsten anbringen kann. Während z. B. die Spannung zwischen den beiden Hauptbürsten 10 Volt sein kann, lässt sich durch Zwischenbürsten diese Spannung in 7,5 Volt zur Vernickelung und 2,5 Volt zur Versilberung zerlegen.

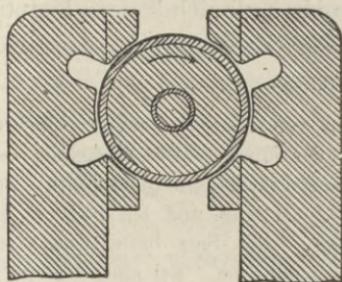


Fig. 315. Maschine von Sayers.

Crompton & Co. haben eine Methode zur Theilung der Hauptleitungen

zwischen zwei Bürstenpaaren erfunden, die benachbarte Stäbe am Stromabgeber berühren. Es wird dadurch möglich, die Maschinen mit weniger Abtheilungen im Anker herzustellen. Die getheilten Zuführungen von der Maschine zu den Bädern kosten nicht mehr als eine ungetheilte Leitung; jedoch wird ein vergleichsweise hoher Widerstand in den Weg des Ortsstromes der kurz geschlossenen Abtheilung gebracht.

Zur elektrolytischen Gewinnung von Aluminium sind verschiedene Maschinenformen angegeben worden. Crompton & Co.<sup>1)</sup> haben eine sehr grosse zweipolige Trommelmaschine für 5000 Ampere bei 60 Volt erbaut. Brown<sup>2)</sup> hat einige sechspolige Maschinen für 6000 Ampere bei 20 Volt und 180 Umläufen in der Minute hergestellt. Der Anker hat zwei besondere Wickelungen mit einem Stromabgeber an jedem Ende, an dem 36 Bürsten in sechs Sätzen

1) The Electrician, Bd. 21, S. 590. 1888; La Lum. électr., Bd. 21, S. 207. 1888.

2) La Lum. électr., Bd. 30, S. 205. 1888.

zu je sechs anliegen. Der Feldmagnet ist wie der in Figur 108 dargestellte beschaffen, hat aber sechs Pole und besteht aus einem Gussstück. Der Durchmesser des Ankers beträgt 96,5 cm, seine Länge 60,9 cm. Die Wicklungen wurden zuerst in Höhlungen der Kernscheiben eingelegt; als jedoch Schwierigkeiten wegen der Isolirung entstanden, wurde der Anker abgedreht und die Wicklung aussen aufgelegt. Obgleich ebensoviele Bürstensäetze als Pole vorhanden

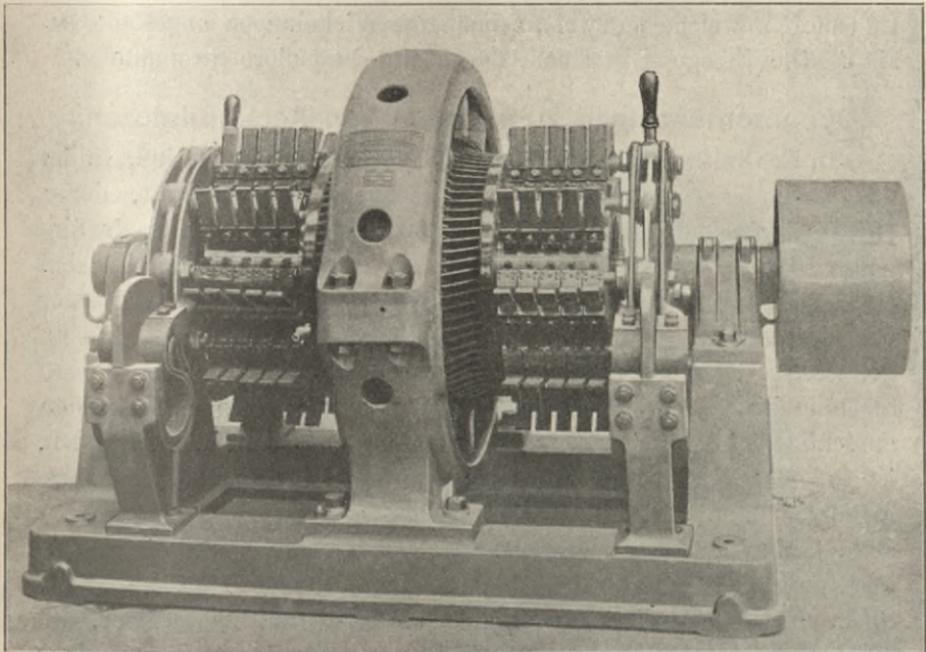


Fig. 316. Dynamomaschine von Lahmeyer, Frankfurt a. M., für 5000 Ampere und 5 Volt bei 450 Umdrehungen.

sind, so dass eine Querverbindung der Wicklungen nicht durchaus nothwendig ist, so sind dennoch zur Abgleichung der Ströme Querverbindungen hinzugefügt worden. Aequipotentielle Theile des Stromabgebers sind innen durch Ringe mit drei vorragenden Ansätzen querüber verbunden. Brown hat auch einige achtpolige Maschinen für eine Leistung von 14000 Ampere bei 30 Volt hergestellt.

Für elektrochemische Zwecke baut die Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. W. Lahmeyer & Co., Frankfurt a. M., besondere Modelle für 4 bis 6 Volt und für Stromstärken bis zu 7500 Ampere. Die Anker dieser Maschinen sind als Ringanker ausgeführt, mit Flachkupferwicklung und mit Nuthen, durch deren Anordnung eine

besonders wirksame Ventilation erreicht wird. Entsprechend den hohen Anforderungen, welche der elektrochemische Betrieb stellt, sind die Maschinen in allen ihren Theilen auf das Sorgfältigste dimensionirt. Besondere Beachtung wird der reichlichen Bemessung der Collectoren geschenkt, so dass die Erwärmung auch bei ununterbrochenem Betriebe in den zulässigen Grenzen bleibt.

Eine derartige Maschine für 5 Volt und 5000 Ampere bei 450 Umdrehungen ist in Figur 316 abgebildet. Sie besitzt zwei Collectoren, welche an zwei unabhängige Wickelungen angeschlossen sind. Die Erregung geschieht durch eine besondere Stromquelle.

### **Dynamomaschinen zum Laden von Accumulatoren.**

In Centralstationen, wo Sammlerbatterien aufgestellt sind, findet das Laden gewöhnlich durch Nebenschlussmaschinen statt, deren elektromotorische Kraft um 25 bis 30 Procent höher ist als diejenige der Batterie bei der Entladung. Die Leitungen sind dabei so angeordnet, dass der Hauptstromkreis je nach Wunsch entweder von der mit der Batterie parallel geschalteten Dynamomaschine (in den Zeiten des grössten Stromverbrauches) oder von jeder der beiden Stromquellen allein Strom erhält. Wenn aber Dynamomaschinen ausschliesslich nur dem Zwecke, Sammler zu laden, dienen sollen, ist es besser, sie besonders zu construiren, und zwar so, dass ihre Magnete unter gewöhnlichen Verhältnissen nicht zu sehr gesättigt sind. Es wird dadurch erreicht, dass beim Laden, wenn die gegen elektromotorische Kraft der Zellen allmählich ansteigt, auch die Spannung der Maschine selbstthätig ansteigt, statt nahezu constant zu bleiben, was eintreten würde, wenn der Magnetismus einer weiteren Steigerung nicht fähig wäre. Dadurch bleibt der Ladestrom einigermassen gleich stark, auch ohne Eingreifen eines Wärters.

### **Dynamomaschinen mit aussergewöhnlich hoher Spannung.**

Zur Kraftübertragung auf weitere Entfernung durch Gleichstrom, sowie zu Laboratorienzwecken werden gelegentlich Maschinen mit aussergewöhnlich hohen Spannungen verlangt. Crocker<sup>1)</sup> baute eine Maschine, welche 0,3 Ampere bei 11000 Volt gab; der Stromwender bestand aus 108 Stäben. Er empfiehlt, für solche Maschinen Kohlenbürsten zu nehmen, um die Funkenbildung zu vermindern.

1) Vorgestellt dem Elektrotechnischen Congress in Chicago am 24. August 1893. *Electrical World*, Bd. 22, S. 201.

Unter der Leitung von Hurmuzescu wurde eine Gleichstromdynamomaschine<sup>1)</sup> von ausnahmsweise hoher Spannung für das physikalische Laboratorium der Sorbonne von der Société Cail gebaut, deren Direktor Helmer die Einzelheiten der Construction angegeben hat. Die normale Leistung der Maschine ist 2 Ampere bei einer Spannung von 3000 Volt; sie kann jedoch mit Leichtigkeit auf eine Spannung von 4000 Volt gebracht werden. Figur 317 zeigt einen Längsschnitt der halben Maschine, Figur 318 zwei verschiedene Querschnitte.

Die Form der Feldmagnete, welche aus den Zeichnungen zur Genüge zu ersehen ist, bedarf keiner weiteren Beschreibung. Der besondere Vortheil dieser

Bauart des Feldmagnetes ist, dass man ein vollkommen symmetrisches Feld erhält ohne den Kupferaufwand, der bei einem doppelten magnetischen Kreise erforderlich ist. Es sind auf derselben

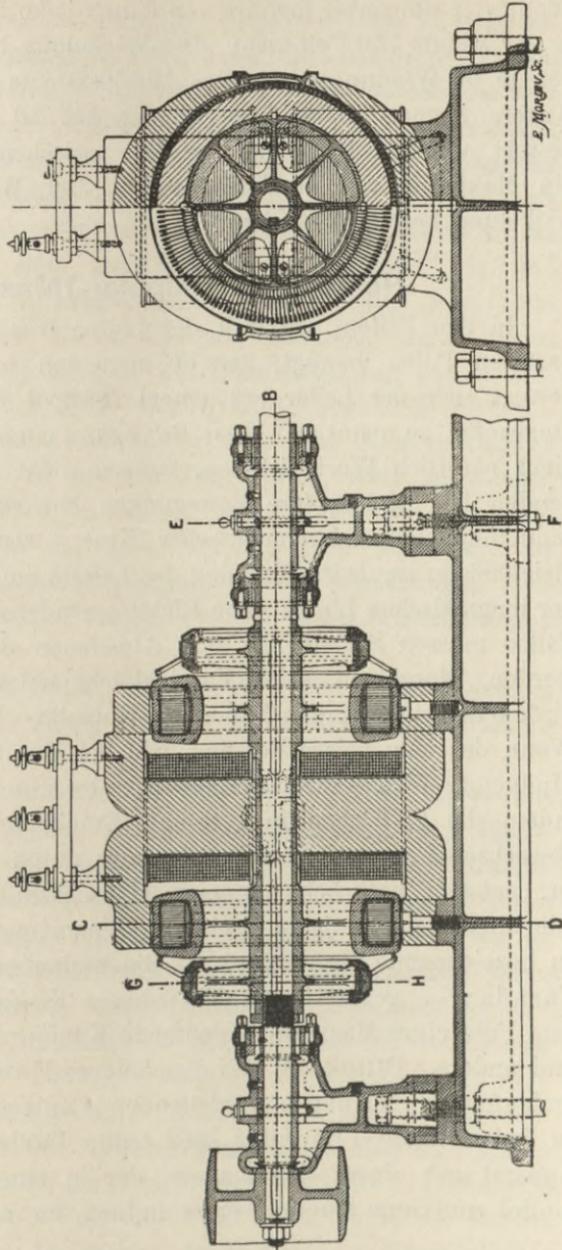


Fig. 317 und 318. Schnitt durch eine Dynamomaschine der Société Cail für 3000 Volt.

1) L'Industrie Électrique, 10. Juli 1895. S. 290.

Welle vier Ringanker montirt, von denen jeder bei 1500 Umdrehungen in der Minute 750 Volt giebt. Die Wickelung besteht aus 160 Theilen von je 66 Windungen, so dass 10560 Drähte auf dem Umfang des Ankers liegen. Jeder Stromwender hat 20 cm Durchmesser und besteht aus 160 Segmenten, so dass zwischen zwei Segmenten nur ein Maximum von 10 Volt besteht. Der Widerstand der Ankerwicklung beträgt 128 Ohm.

### Homopolar- (Unipolar-) Maschinen.

In den Fällen, wo sich der Leiter beständig zwischen gleichnamigen Polen bewegt, spricht man von homopolarer Induction; bewegt sich der Leiter von einem Nordpol zu einem Südpol oder umgekehrt, so nennt man diese Bewegung eine heteropolare. Letztere giebt natürlich Wechselströme, wofern nicht ein Stromwender vorhanden ist. Homopolare Bewegungen bewirken eine gleichmässige Induction von elektromotorischer Kraft, wenn das Feld ebenfalls gleichmässig ist, da die Drehung des Leiters ein beständiges Schneiden der magnetischen Linien ohne Richtungsänderung bewirkt; in solchen Fällen müssen Schleifringe zum Abnehmen des Stromes angebracht werden. Maschinen, welche durch gleichmässige homopolare Induction Ströme lieferten, wurden früher als »Unipolar«-Maschinen<sup>1)</sup> bezeichnet. Wenn der homopolare Vorgang, wie bei Mordey's und einigen der »Inductor«-Wechselstrommaschinen, absichtlich unterbrochen wird, indem die Polflächen in getrennte Stücke getheilt und der Leiter abwechselnd vor- und rückwärts quer durch das Feld aufgewickelt ist, entsteht natürlich nur eine abwechselnd gerichtete Induction. Die älteste, mit einigem Recht als Dynamomaschine (Fig. 1, Seite 6) zu bezeichnende Vorrichtung — die umlaufende Kupferscheibe von Faraday — gehört in der That dieser Klasse an, ebenso der über dem Pole eines Magnetes umlaufende Kupfercylinder (Fig. 3, Seite 7) und andere. Plücker<sup>2)</sup> gab eine andere Form an, mit horizontalem umlaufenden Magnet und gleitenden Contacten in der Mitte und an jedem Ende. Im Jahre 1862 baute Varley einen homopolaren Apparat mit einem Eisenmagnet, der in einem senkrechten Gestell umlief und eine Quecksilberverbindung im mittleren Theile besass.

1) Die Bezeichnung lautet eigentlich widersinnig, weil jeder Magnet zwei Pole besitzt. Der Name ist indessen aus „unipolarer Induction“ abgeleitet. Mit diesem Ausdruck bezeichnete man nach W. Weber die Induction von Strömen durch ununterbrochenes Schneiden der Kraftlinien.

2) Poggend. Annal., Bd. 87, S. 352. 1852.

Um das Jahr 1878<sup>1)</sup> entwarf Werner Siemens eine Homopolarmaschine mit zwei Kupfercylindern; jeder der letzteren lief um einen Pol eines U-förmigen Elektromagnetes. Zur Vermeidung von Wirbelströmen waren beide Cylinder der Länge nach aufgeschlitzt. Ein zweites Elektromagnet mit vorstehenden Polstücken gebogener Form, die oben und unten die Cylinder umfassten, befand sich zwischen letzteren. Jeder Cylinder lief demnach zwischen einem inneren und äusseren Pole entgegengesetzter Polarität um und schnitt die Kraftlinien ununterbrochen durch Gleiten über dem inneren Pol. Der Strom dieser Maschine war sehr stark, besass aber nur wenige Volt Spannung. Zur Herabdrückung des Widerstandes lagen gegen jedes Ende der Cylinder zahlreiche Sammelbürsten an. Die Maschine wurde in Oker zur Niederschlagung von Kupfer verwendet. In neuerer Zeit wurde dieser Maschinenform viele Aufmerksamkeit gewidmet. Der Verfasser selbst hat eine Form hergestellt, in der zwei Scheiben nach Faraday, die an ihren Peripherien ausserhalb eines inneren feststehenden Polstückes verbunden waren, in einem symmetrischen gleichförmigen Felde umliefen.

Willoughby Smith zeigte, dass bei Verwendung einer eisernen Scheibe an Stelle einer Kupferscheibe eine wesentlich stärkere Wirkung erzielt wurde.

Forbes hat auch verschiedene Maschinen dieser Klasse angegeben. Ursprünglich begann er mit der Anwendung einer Eisenscheibe, die zwischen zwei Backen von entgegengesetzter Polarität umlief; der Strom wurde von ihrer Peripherie entnommen. Dann verdoppelte er die Theile; schliesslich vereinigte er die beiden Scheiben zu einem gemeinschaftlichen Cylinder, der innerhalb eines Feldmagnetes mit Eisenmantel umlief. Aus diesem Grunde zog der Erfinder vor, die Form der Maschine als »unpolar« zu bezeichnen. Ein reibender Contact — Forbes wendete Kohlenbürsten oder eine Anzahl federnder Metallstreifen an — wurde an den beiden äussersten Enden angebracht. Eine der früheren Formen der Maschine besass eine einzelne Scheibe von 45,7 cm Durchmesser und sollte 3117 Ampere bei einer Spannung von 5,8 Volt und 1500 Umläufen in der Minute liefern. Eine der späteren Maschinen, deren Anker ein Eisencylinder von 22,8 cm Durchmesser und 20,3 cm Länge bildet, war zur Abgabe von 10000 Ampere bei 1 Volt Spannung und 1000 Umläufen in

---

1) Elektrotechn. Zeitschr., Bd. 2, S. 94. 1881.

der Minute bestimmt. Beim Entwurf solcher Maschinen muss man sich erinnern, dass die Spannung durch die Formel

$$E = \frac{v l \mathfrak{B}}{10^8}$$

ausgedrückt wird, wo  $v$  die lineare Geschwindigkeit des bewegten Leiters (Centimeter per Secunde),  $l$  die Projection seiner Länge (Centimeter) auf die Richtung der Bewegung und  $\mathfrak{B}$  die Feldstärke ist. Z. B. wird ein Kupfercylinder von 20 cm Länge, der sich in einem Felde von 10000 Linien auf das Quadratcentimeter mit einer Geschwindigkeit von 4000 cm in der Secunde dreht, 8 Volt induciren. Die elektromotorische Kraft solcher Maschinen nimmt mit dem Quadrat des Durchmessers zu. Noch andere Formen wurden von Ferraris, Voice, Delafield, Hummel und Anderen entworfen. Die vor dem Jahre 1885 entstandenen wichtigen Formen sind von Uppenborn im Centralblatt für Elektrotechnik für 1885, Seite 324 beschrieben und erläutert worden.

Die Theorie der unipolaren Scheibenmaschine wurde von Lord Kelvin<sup>1)</sup> entwickelt. Kelvin zeigt, dass eine solche Maschine nur bei einer gewissen Geschwindigkeit selbsterregend wirkt, die vom Widerstand des Kreises abhängt.

Bei diesen Maschinenformen treten anscheinend besonders zwei Schwierigkeiten auf, nämlich einmal die Schwierigkeit, die starken Ströme an der Peripherie zu sammeln, und dann die Ueberwindung der sehr beträchtlichen Gegenwirkungen des Ankers, von denen die starken Ströme begleitet werden. Dieser Uebelstand verursacht einen bedeutenden Abfall der Spannung<sup>2)</sup>, sobald die Stromstärke ansteigt. Dieser Abfall lässt sich nur durch dieselben Mittel vermeiden, wie solche für alle anderen Formen der Dynamomaschinen zweckmässig erscheinen, d. h. dadurch, dass man den Feldmagnet verhältnissmässig kräftig macht und die Gegenwirkungen des Ankers durch Anwendung einer gemischten Wickelung ausgleicht.

Neuere Angaben stammen von Atkinson<sup>3)</sup>, dessen Maschine selbsterregend ist, und von Brown, der dem Verfasser einige Ergebnisse und Zeichnungen einer in den Werken zu Oerlikon hergestellten Maschine (Fig. 319) mitgetheilt hat. In der letzteren

1) On a uniform electric current accumulator. Phil. Mag., Januar 1868; und Reprint of Papers, S. 325.

2) Vergl. Handbuch von Kittler, Bd. 2, S. 19.

3) La Lum. électr., Bd. 35, S. 557. 1890.

läuft ein kupferner Cylinder zwischen den Lippen eines gusseisernen Elektromagnetes mit Eisenmantel um. Die Maschine lieferte bei 1200 Umläufen in der Minute eine Spannung von 10 Volt und zeigte kaum einen wahrnehmbaren Spannungsabfall, wenn 3000 Ampere entnommen wurden.

Dies ist die erste praktisch brauchbare Homopolarmaschine. Seitdem hat Thury noch eine ganz ähnliche Form ersonnen.

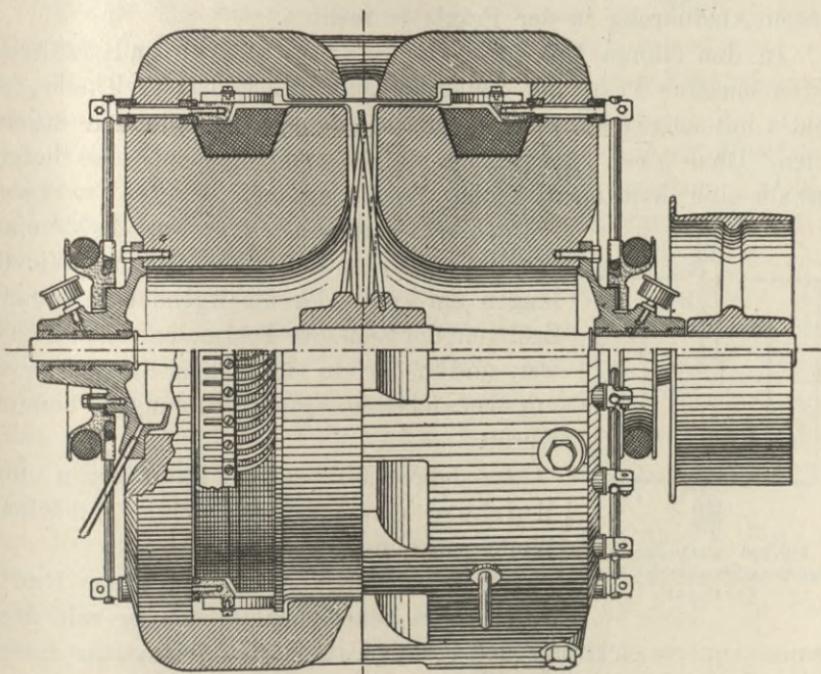


Fig. 319. Brown's Homopolarmaschine.

In den letzten Jahren haben die homopolaren Maschinen viel Interesse erregt, doch ist ihre Theorie noch nicht völlig klar. Es dürfte genügen, Bezug zu nehmen auf die Schriften von Tolver Preston<sup>1)</sup>, Hering<sup>2)</sup>, Arnold<sup>3)</sup>, Hoppe<sup>4)</sup>, Weber<sup>5)</sup> und Lecher<sup>6)</sup>.

1) Phil. Mag., Februar und März 1885, und Februar 1891.

2) Electr. World, Bd. 23, S. 53. 1894.

3) Elektrotechn. Zeitschr. vom 7. März 1895.

4) Wied. Ann., Bd. 29, S. 544. 1886; und Bd. 32, S. 288. 1887.

5) Elektrotechn. Zeitschr. vom 15. August 1895.

6) Wied Ann., Bd. 54, S. 276 bis 304. 1895.

## Scheibenmaschinen.

Bei den Maschinen dieser Klasse werden die Wicklungen zu verschiedenen Theilen eines magnetischen Feldes in der Weise geführt, dass entweder dessen Stärke in den verschiedenen Theilen ungleich ist, oder häufiger, indem die Kraftlinien in verschiedenen Theilen des Feldes in entgegengesetzten Richtungen verlaufen. Die Figur 17 (Seite 29) veranschaulicht diesen Vorgang; wir werden jetzt dessen Ausführung in der Praxis betrachten.

In den älteren Maschinen von Saxton, Clarke und Stöhrer waren einzelne Paare der Spulen so angeordnet, dass sie Theile des Feldes mit entgegengesetzt gerichteter magnetischer Induction durchliefen. Ohne einen Stromwender auf der umlaufenden Achse liefert deshalb eine derartige Maschine Wechselströme.

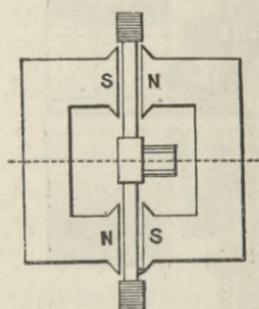


Fig. 320. Feldmagnete  
der Scheibenmaschine von  
Pacinotti.

v. Hefner-Alteneck entwarf 1878 eine Scheibenmaschine, in der die Zahl der Wicklungen um zwei oder um irgend eine gerade Zahl von der Zahl der Feldspulen verschieden war, und in der ein viertheiliger Stromabgeber mit verwickelten Querverbindungen benutzt wurde.

Im Jahre 1881 zeigten Hopkinson und Muirhead eine Scheibenmaschine mit einer Wellenwicklung.

Im Jahre 1875 erfand<sup>1)</sup> Professor Pacinotti einen Scheibenanker, den er mit dem Namen »queres elektromagnetisches Schwungrad« belegte. In dieser im Jahre 1881 in Paris ausgestellten Maschine waren als Feldmagnete zwei Elektromagnete mit entgegengesetzten Polen nebeneinander gelagert, so dass ein magnetischer Kreis mit zwei Zwischenräumen gebildet wurde, wie in der Figur 320 dargestellt ist. Durch die beiden Zwischenräume bewegte sich ein Scheibenanker hindurch. Derselbe war aus radialen Leitern, von denen die kräftigen magnetischen Felder durchschnitten wurden, hergestellt. Die in den Leitern erzeugten elektromotorischen Kräfte waren an einer Seite radial nach Innen, an der andern radial nach Aussen gerichtet. Die Methode von Pacinotti zur Verbindung der radialen Leiter in eine geschlossene Wicklung ist aus der Figur 200 ersichtlich.

1) Nuovo Cimento (3), Bd. 10. September 1881.

Eine andere Form des Scheibenankers wurde von Lord Kelvin angegeben. Er besteht aus einem Speichenrade, wie sie bei Fahrrädern verwendet werden. Sammelbürsten liegen an entgegengesetzten Enden eines Durchmessers.

Bollmann<sup>1)</sup> erfand eine vielpolige Maschine mit einem Anker aus radialen, zickzackartig vereinigten Kupferstreifen, die mit einem mit Querverbindungen versehenen Stromwender verbunden werden.

Neuere Maschinen dieser Klasse wurden von Desroziers<sup>2)</sup>, Robin<sup>3)</sup>, Jehl und Rupp<sup>4)</sup>, sowie von Sayers<sup>5)</sup> erfunden.

Die Theorie der Scheibenanker ist im Kapitel XII behandelt, einige weitere Angaben sind auf Seite 43 zu finden.

Maschinen von Desroziers. Diese vielpoligen Maschinen mit Scheibenankern werden vielfach in Beleuchtungsanlagen in Paris verwendet, und zwar in Grössen bis zu 370 Kilowatt. Sie sind in der bekannten Fabrik von Breguet hergestellt. Figur 321 giebt ein Bild einer derartigen Maschine mit direktem Antrieb. Der Anker ist zur Vermeidung von Verlusten durch Hysteresis ohne Eisen und, wie Seite 262 beschrieben, aus zwei Theilen gebaut. Eine Maschine von 150 Kilowatt, welche bei 150 Umdrehungen 1000 Ampere und 150 Volt leistet, hatte einen Anker von 2,2 m Durchmesser, der mit seiner Achse 2,7 Tonnen wog. Die ganze Maschine wog 15,5 Tonnen.

Fritsche's Radanker-Dynamomaschine. Tafel X giebt in zwei Schnittzeichnungen sämtliche constructiven Einzelheiten einer Radanker-Dynamomaschine für Gleichstrom<sup>6)</sup> (Leistung 120 Volt, 600 Ampere bei 120 Touren per Minute).

Der Anker nach Fritsche's Wellenwicklung für zehn Pole geschaltet zeigt den charakteristischen Aufbau eines Rades; er besteht aus Nabe, Speichen und Felgenkranz. Die gusseiserne Nabe fasst 2×181 Stück Speichen, bestehend aus Eisenblechstäben. Die Hälfte

1) In betreff weiterer Einzelheiten vergl. Centralbl. f. Elektrot., Bd. 9, S. 7. 1887. Eine sehr ähnliche Maschine wird von Mathews in der Englischen Patentschrift [1882] Nr. 3334 beschrieben.

2) Vergl. Lum. Electr., Bd. 24, S. 293, 294 und 517. 1887.

3) Vergl. Lum. Electr., Bd. 24, S. 544. 1887.

4) Vergl. Lum. Electr., Bd. 24, S. 343. 1887. Vergl. auch die genaue Darstellung und Beschreibung in Bd. 25, S. 368. 1887, und Electrician, Bd. 19, S. 94. 1887.

5) Englisches Patent [1887] Nr. 717.

6) Vergl. die deutschen Patentschriften Nr. 45808 und 57170. Ferner: Die Gleichstrom-Dynamomaschine von Fritsche, Berlin 1889. Auch Electrician, Bd. 22, S. 655. 1888; Electrical Review, Bd. 29, S. 472. 1891.

dieser Ankerstäbe trägt metallene Collectorsegmente und kupferne Auflageplatten. Diese Segmente bilden mit ihren isolirenden Zwischen-

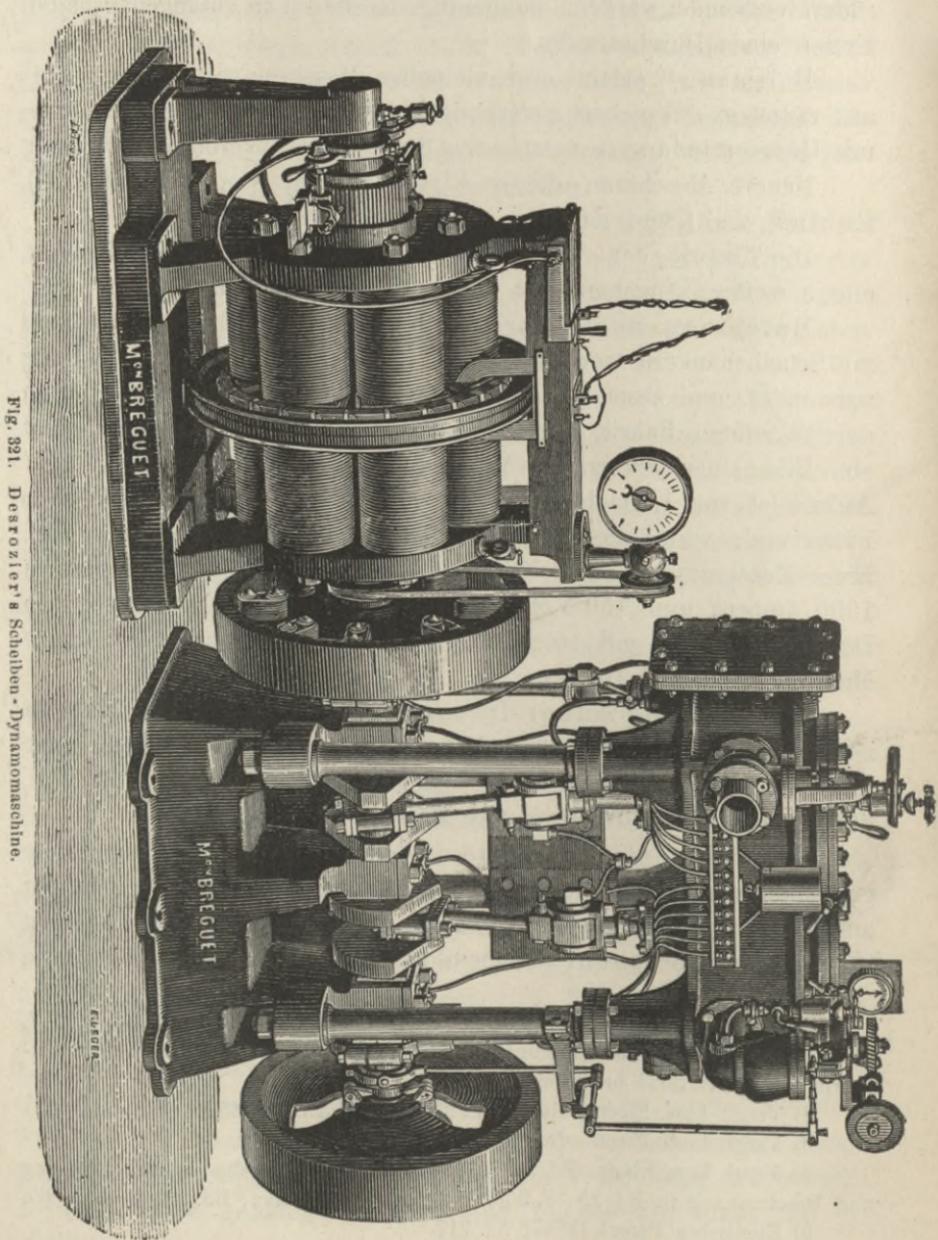


Fig. 321. Desrozier's Scheiben-Dynamomaschine.

lagen aus Glimmer den Felgenkranz und in solcher Gestalt den Collector. Die Vereinigung der beschriebenen Ankerstäbe zu einer

Wicklung erfolgt durch kupferne Verbinder. Die schmiedeeisernen Stäbe, die nur in der Nabe und am Felgenkranz, d. h. am Collector isolirt befestigt sind, bilden erstens ein festes Tragegerüst für die ganze Ankerconstruction einschliesslich des Collectors, zweitens dienen sie als »Ankerkern«, indem sie den Uebertritt der magnetischen Kraftlinien von Pol zu Pol vermitteln, und drittens werden sie auch als Leiter für den Ankerstrom benutzt.

Das Magnetsystem: Der Radanker rotirt zwischen einem Magnetsystem, das aus zehn paarweise einander gegenüberstehenden Polpaaren besteht. Wie die Figuren auf Tafel X deutlich erkennen lassen, sind die einzelnen Pole cylindrisch, sie tragen je eine erregende Wicklung, sind vorn mit Polschuhen versehen und auf zwei Ringen befestigt. Das gesammte Magnetsystem besteht aus Schmiedeeisen. Die Wicklungen sind so geschaltet, dass ungleichnamige Pole einander gegenüberstehen und auf jeder Ankerseite Nord- und Südpol miteinander abwechseln. Die Feldmagnete sind nicht als Gehäuse für die Maschine ausgebildet, sondern es ist ein besonderes zweitheiliges Maschinengestell construirt, das ein mehrfach durchbrochenes dünnwandiges Gehäuse aus Gusseisen darstellt. An dieses Gehäuse sind zwei mit Consolen versehene Lager angeschraubt, in deren Weissmetallbuchsen die Ankerwelle läuft. Die Feldmagnete sind rechts und links so an dem Gehäuse angebracht, dass der Anker vollständig eingeschlossen ist und nur der Collectorkranz oben am Umfang des Gehäuses durch entsprechende Aussparungen sichtbar und zugänglich bleibt. Das eine Lager ist mittels Zug- und Druckschrauben verstellbar, so dass der Anker genau inmitten der gegenüberliegenden Polschuhe eingestellt werden kann. Auf dem Maschinengestell ruht der Bürstenschlitten auf einer Führung, gegen die er zwecks Einstellung der Bürsten mittels Handrad, Zahnrad und bogenförmiger Zahnstange verschoben werden kann. Der Bürstenschlitten trägt zwei Paar Bürstenhalter und Bürsten, die (der Wellenwicklung entsprechend) den Strom an zwei Stellen des Collectors aufnehmen. Dieses Modell M ist von der Firma Fritsche & Pischon, Berlin, für zahlreiche elektrische Anlagen ausgeführt worden, und zwar für 120, 230 und auch 440 Volt Betriebsspannung, meistens für 120, 135 und 140 Umdrehungen in der Minute.

Maschine von Polechko<sup>1)</sup>. Diese Form verwirklicht die Angabe von Lord Kelvin für eine Radmaschine. Das Rad besitzt

---

1) Journ. de la Soc. Physico-chimique russe, Bd. 22, S. 135. 1890.

einen Durchmesser von 1 m, hat schmale Speichen aus Kupfer und läuft zwischen den Polstücken eines Elektromagnetpaares in einem schmalen Zwischenraum um. Die Elektromagnete sind so angeordnet, dass sie ein sehr starkes enges magnetisches Feld längs zwei gegen-

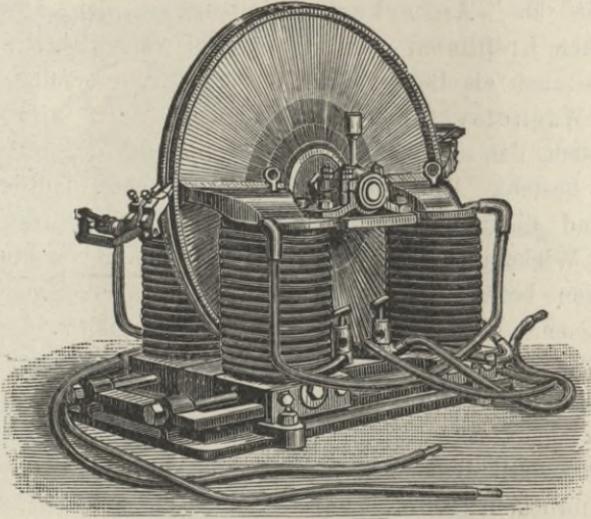


Fig. 322. Polechko's Scheibenmaschine.

überstehenden Radien bilden. Die Figur 322 stellt diese Form und die Anordnung zum Abnehmen des Stromes von der Peripherie dar. Dieselbe besteht aus 320 isolirten Kupferstücken, die durch einen isolirten Stahlring in der Mitte des Reifens zusammengehalten werden. Bei 1500 Umläufen in der Minute lieferte die Maschine einen Strom von 2000 Ampere bei 25 Volt; das Gewicht betrug 1100 kg.

## Kapitel XX.

### Elektrische Triebmaschinen für Gleichstrom.

---

Im ersten Kapitel ist gesagt worden, dass man unter einer dynamoelektrischen Maschine eine solche zur Umsetzung mechanischer Energie in elektrische (in Form elektrischer Ströme) versteht, dass die Maschine aber auch den umgekehrten Vorgang zulässt. Bisher haben wir die Dynamomaschinen in ihren Verrichtungen als Stromerzeuger behandelt und gelangen nunmehr zur umgekehrten Verrichtung, der Umsetzung elektrischer Energie in mechanische.

Eine elektrische Triebmaschine oder, wie man früher sagte, eine elektromagnetische Maschine leistet mechanische Arbeit bei Anwendung elektrischer Energie; es ist dabei gleichgültig, ob die den festen Theil der Maschine bildenden Magnete Dauermagnete aus Stahl, oder Elektromagnete sind.

Jede Dynamomaschine für Gleichstrom oder Wechselstrom lässt sich als Triebmaschine benutzen, wengleich einige sich besser dazu eignen als andere. Da Triebmaschinen für Wechselstrom von denjenigen für Gleichstrom in mancher Hinsicht abweichen, sollen Erstere später, und zwar in Verbindung mit anderen Wechselstrommaschinen behandelt werden.

Ein Magnet zieht stets den entgegengesetzten Pol eines andern an; jeder Magnet, der in ein magnetisches Feld gebracht wird, sucht sich zu drehen und sich in die Richtung der Kraftlinien einzustellen.

Es lässt sich deshalb leicht begreifen, dass sehr bald nach Entdeckung des Elektromagnetismus, der zunächst die Herstellung eines Magnetes ermöglichte, dessen Kraft man beherrschen konnte, scharfsinnige Köpfe die Herstellung einer elektromagnetischen Maschine für ausführbar hielten. In derselben sollte der in ein magnetisches Feld gebrachte Elektromagnet umgetrieben werden, ferner sollte die Drehung ununterbrochen vor sich gehen, indem man zu geeigneter Zeit den Strom unterbrach oder die Richtung des Stromes umkehrte.

Nach diesem Grundgedanken war die erste elektrische Triebmaschine von Ritchie hergestellt, die, obwohl sie in vielen Formen als ständiges Inventariestück aller Sammlungen elektrischer Apparate sehr bekannt ist, doch keine grössere Bedeutung als die eines Spielzeuges besitzt.

Joule<sup>1)</sup> erfand gleichfalls verschiedene Formen von Triebmaschinen. Ein noch älterer rotirender Apparat war Sturgeon's Scheibenrad, das schon 1823 beschrieben wurde. Diese Vorrichtung, obwohl nur ein Spielzeug, doch interessant als Vorläufer von Faraday's Scheibenrad, ist der Vertreter einer bestimmten Maschinengattung, nämlich der Homopolarmaschinen, welche nur einen Gleitcontact haben und keines Stromwenders bedürfen.

Jacobi machte 1838 einen wesentlichen Fortschritt, indem er eine vielpolige Maschine herstellte.

Es möge noch eine andere Art von Triebmaschinen Erwähnung finden, bei denen der sich bewegende Theil hin und her schwingt. Professor Henry erbaute 1831 eine Triebmaschine mit schwingendem Hebel, der durch die aussetzende und wieder eintretende Wirkung eines Elektromagnetes bewegt wurde. Die Maschine von Dal Negro aus dem Jahre 1833 gehörte zu dieser Klasse.

In der Maschine schwang ein Stahlstab zwischen den Polen eines Elektromagnetes und drehte eine Kurbel, mit der er in Verbindung stand. Eine Verbesserung wurde von Page bewirkt, der hohle Wickelungen oder Spulen als Elektromagnete verwendete. Durch deren abwechselnde Thätigkeit wurden eiserne Kerne in die Spulen gezogen, so dass eine auf- und abwärts gerichtete Bewegung entstand.

Die Einrichtung von Page wurde von Bourbouze weiter entwickelt. Der Letztere erbaute die in der Figur 323 dargestellte eigenthümliche Maschine, die in ihrer Gestalt einer alten Dampfmaschine nicht unähnlich ist. Wir haben da einen Balancier mit Lenkstange, Kurbel und Schwungrad und sogar Excenter-Schiebersteuerung und Schieber. Aber statt der Cylinder sind vier hohle Elektromagnete vorhanden, in die die eisernen Kerne gleich Kolben abwechselnd hinein- oder hinausgezogen werden. Statt des Schiebers haben wir einen Stromwender; dieser kehrt bei jedem Hube die Stromrichtung in den Elektromagneten um mittelst eines Paares mit Platinspitzen versehener Federn, welche über drei ebenen, durch zwei Elfenbein-

---

1) *Annales of Electricity*, Bd. 2, S. 222. 1838; und Bd. 4, S. 203. 1839.

streifen voneinander isolirten Messingstückchen hin- und hergezogen werden. Es ist in der That eine sehr scharfsinnig erdachte Maschine, steht aber, was den Wirkungsgrad anlangt, natürlich weit hinter allen modernen elektrischen Triebmaschinen.

Eine andere veraltete Form elektrischer Triebmaschinen rührt von Froment her. Derselbe befestigte eine Reihe paralleler Eisenstäbe auf dem Umfange einer Trommel und vermittelte durch einen Elektromagnet oder mehrere Elektromagnete die Anziehung, so dass eine ununterbrochene Drehung erzielt wurde.

Von den verschiedenartigen geschichtlichen Formen mag noch eine Maschinenart erwähnt werden, bei der der umlaufende Theil

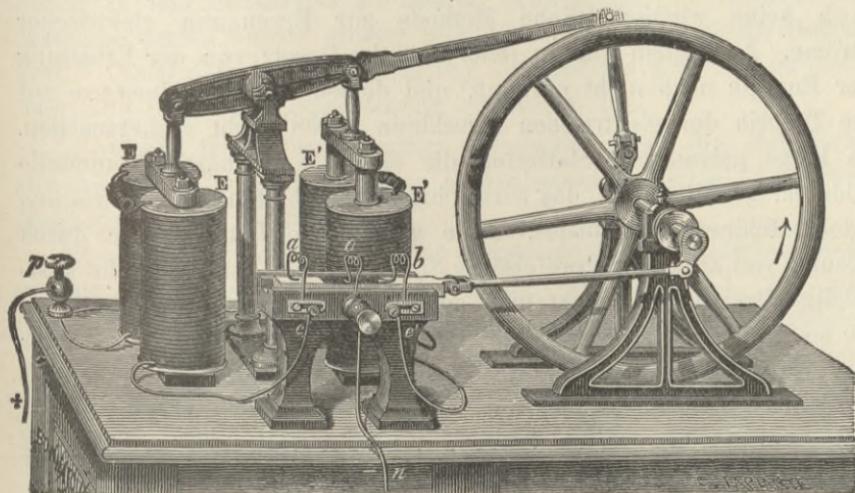


Fig. 323. Elektrische Triebmaschine von Bourbouze.

sich in einem excentrischen Eisenrahmen befindet, welchem er sich bei seiner Bewegung allmählich nähert. Kleine, nach diesem Princip arbeitende Maschinen dienten lange Zeit für leichte Arbeiten bei Versuchen.

Es wäre unmöglich, in dem Rahmen dieses Werkes auch nur eine gedrängte Uebersicht über die wichtigsten Stufen<sup>1)</sup> der

1) Eine sehr gute Uebersicht über ältere Formen der elektrischen Triebmaschinen, sowohl europäischen als amerikanischen Ursprunges, findet sich in Martin und Wetzler's „The Electric Motor and its Applications“ 1887. Es möge auch auf die Abhandlung: „Electromagnetism as a Motive Power“ von dem verstorbenen R. Hunt in Proc. Instit. Civ. Engineers, Bd. 16, April 1857, verwiesen werden, sowie auf die darauf folgende Erörterung, an welcher Sir W. Thomson, Grove, Tyndall, Cowper, Smee und Robert Stephenson Theil nahmen. Wegen neuerer Triebmaschinen vergleiche Kapp, Elektrische Kraftübertragung,

Entdeckung und Erfindung zu behandeln. Der Arbeiten von Page, Davidson, Hjorth und Anderen ist bereits in der historischen Einleitung dieses Werkes gedacht.

Eine raschere Entwicklung folgte erst nach der Einführung der Gramme'schen Maschine im Jahre 1871, als man einzusehen begann, dass zwei dieser Maschinen, von denen die eine als Stromerzeuger, die andere als Triebmaschine wirkte, und die durch eine Leitung verbunden waren, zur Kraftübertragung benutzt werden konnten.

Aus zwei Gründen waren die früheren Versuche zur Einführung von Triebmaschinen nicht von Erfolg begleitet. Man kannte damals noch keine wirtschaftliche Methode zur Erzeugung elektrischer Ströme. Ausserdem war zu jener Zeit das Gesetz von der Erhaltung der Energie noch nicht erkannt, und dessen wichtige Hinweise auf die Theorie der elektrischen Maschinen waren nicht vorherzusehen. So lange galvanische Batterien die einzig benutzbare Stromquelle bildeten, gestaltete sich das wirtschaftliche Arbeiten der elektrischen Triebmaschinen aussichtslos. Eine galvanische Batterie, die durch Lösung von Zink in Schwefelsäure Strom erzeugt, ist eine sehr kostspielige Stromquelle. Sieht man auch von den Kosten für die Säure ab, so ist doch das Zink — das Brennmaterial der Batterie — mehr als zwanzigmal so theuer als Kohle, dabei bildet es eine weit schlechtere Feuerung, denn mit 1 g Zink lässt sich nur ein Wärmebetrag entwickeln, welcher 550 kgm Arbeit gleichwerthig ist, während 1 g Kohle eine Wärmearbeit von 3400 kgm liefert<sup>1)</sup>.

Diejenige Thatsache indessen, die sehr entmuthigend zu sein schien, jedoch unter richtiger Deutung in Uebereinstimmung mit dem Gesetz von der Erhaltung der Energie, im Gegentheile als ermuthigend betrachtet werden durfte, ist folgende: Wurde ein Galvanometer mit der Maschine und der Batterie in den Stromkreis gebracht, so fand man, dass es während des Betriebes der Maschine nicht möglich

---

oder Snell, Electric Motive Power. (Eine Uebersicht über die älteren elektrischen Triebmaschinen findet man auch in dem Werke von Dub, „Die Anwendung des Elektromagnetismus“, II. Auflage, S. 817 ff., wo eine Anzahl von deutschen Erfindern hergestellter Maschinen eingehender beschrieben wird. Zusatz des Uebers.)

1) Ueber den Kostenpunkt einer galvanischen Batterie kann man durch folgende Rechnung bequem Aufschluss erlangen: Wird angenommen, dass eine Triebmaschine sämmtliche elektrische Energie der Batterie ohne Verlust in mechanische Energie umsetzen könne, so beträgt das für die Pferdekraft-Stunde erforderliche Zink etwa 860 g, dividirt durch die Zahl der Volt der zur Batterie verwendeten Zellenart.

war, einen so starken Strom durch die Leiter fließen zu lassen, als während des Stillstandes der Maschine herrschte. Je schneller die Maschine lief, desto schwächer wurde der Strom. Die Ursache konnte nur in einem Widerstande oder einer elektromotorischen Gegenkraft zu suchen sein. Zuerst glaubte man, dass die Maschine während des Umlaufes einen grösseren Widerstand dem Strome entgegensetzte, als während des Stillstandes. Jacobi<sup>1)</sup> fand indessen, dass die beobachtete Abnahme der Stromstärke dadurch entsteht, dass die Maschine infolge des Umlaufes selbst als Stromerzeuger wirkt und einen dem treibenden Strome entgegengesetzten Strom in den Stromkreis zu senden bestrebt ist. Je schneller die Maschine umlief, desto grösser wurde die elektromotorische Gegenkraft. Das Gesetz von der Erhaltung der Energie erfordert es auch, dass eine derartige Gegenwirkung vorhanden sei.

Joule<sup>2)</sup> fand durch weitere Versuche, dass die elektrische Gegenwirkung proportional der Umlaufgeschwindigkeit und dem Magnetismus der Magnete wird.

Zwei Umstände sind für das Verständniss der Thätigkeit elektrischer Triebmaschinen von Bedeutung, und zwar: 1. der umtreibende Zug; 2. die elektromotorische Gegenkraft. Die thatsächlich treibende Kraft, die den Anker zum Umlauf bringt, ist der Zug, den das magnetische Feld auf die stromführenden Ankerleiter ausübt (oder, wenn es sich um tief gezahnte Anker handelt, der auf die vorragenden Zähne ausgeübte Zug). Durch den umlaufenden Anker wird ferner eine elektromotorische Gegenkraft erzeugt, weil die bewegten Ankerleiter die magnetischen Linien schneiden.

Der treibende Zug. In dem Kapitel V ist der Zug, den ein magnetisches Feld auf einen stromführenden Leiter ausübt, erörtert, auch sind Berechnungen über die Grösse des Zuges angegeben worden. In einem Stromerzeuger wirkt der Zug in der Richtung, die der Umlaufsrichtung entgegengesetzt ist, und bildet thatsächlich

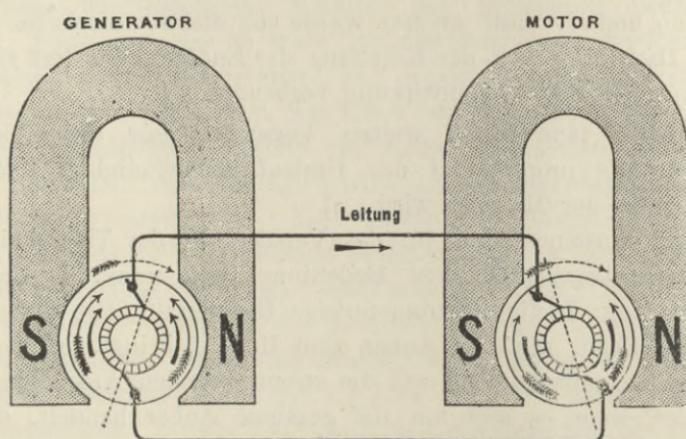
---

1) Mémoire sur l'application de l'électromagnétisme au mouvement des machines, par M. H. Jacobi (Potsdam 1835). Auf Seite 45 der Abhandlung führt Jacobi aus, dass die durch den Batteriestrom in Umlauf gesetzte Maschine vermöge ihrer eigenen Bewegung eine magnetoelektrische Maschine wird, die einen Strom in umgekehrter Richtung in den Kreis sendet; diesem Umstande schreibt er richtig die von der Maschine erlangte Grenze der gleichmässigen Geschwindigkeit zu.

2) Annals of Electricity, Bd. 8, S. 219. 1842; und Scientific Papers, Seite 47.

die von der Triebkraft zu überwindende Gegenkraft. In einer Triebmaschine bildet umgekehrt der Zug die Triebkraft und bringt den Umlauf hervor.

Die elektromotorische Gegenkraft. Wenn in irgend einem elektrischen Kreise durch einen Theil des Kreises, in dem eine elektromotorische Kraft vorhanden ist, Strom fließt, so wird der Strom entweder an Energie gewinnen oder einbüßen, je nachdem die elektromotorische Kraft in derselben Richtung, wie der Strom oder gegen denselben wirkt. Die Figur 324 macht dies ersichtlich, die einen Stromkreis mit einem Stromerzeuger und einer Triebmaschine darstellt. Jede Maschine läuft rechts herum und erzeugt



Rückleitung

Fig. 324.

deshalb eine elektromotorische Kraft, die von der unteren Bürste nach der oberen zu gerichtet ist. In jedem Falle ist die obere Bürste die positive. In der Dynamomaschine (Stromerzeuger), von der Energie dem Stromkreise zugeführt wird, besitzt die elektromotorische Kraft dieselbe Richtung, wie der Strom; während in der Triebmaschine, in der Arbeit geleistet wird, die elektromotorische Kraft die entgegengesetzte Richtung wie der Strom besitzt. In dieser elektrischen Gegenkraft ist also das Wesentliche bei der Beurtheilung der Arbeit von Triebmaschinen zu erkennen.

Verwenden wir mechanische Arbeit zur Erzeugung von Strömen durch Umtrieb einer Dynamomaschine, d. h. leisten wir elektrische Arbeit, so wird mehr mechanische Arbeit zum Umtrieb der Maschine erforderlich, als wenn letztere keine elektrische Arbeit leistet. Es steht also der mechanischen Kraft, die wir zur Erzielung der elek-

trischen Arbeit aufwenden, eine Gegenwirkung gegenüber. Wenden wir etwa mittels einer Batterie elektromotorische Kraft zur Erzielung mechanischer Arbeit auf, so finden wir ebenfalls eine Gegenwirkung; diese ist eine elektromotorische Gegenkraft.

Der Versuch zum Nachweis der elektromotorischen Gegenkraft ist leicht auszuführen. Eine kleine Triebmaschine mit kräftigem Feldmagnet, eine Batterie von geringem inneren Widerstand und ein Galvanometer werden in einen Stromkreis geschaltet; der Ausschlag der Nadel wird beobachtet, wenn die Maschine angehalten ist, und wenn sie bei geringer und grösserer Belastung umläuft.

Bei einem Versuche mit einer Triebmaschine mit besonders erregten Magneten wurden folgende Werthe erhalten:

| Umläufe<br>in der Minute. | Stromstärke<br>in Ampere. | Umläufe<br>in der Minute. | Stromstärke<br>in Ampere. |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 0                         | 20                        | 160                       | 7,8                       |
| 50                        | 16,2                      | 180                       | 6,1                       |
| 100                       | 12,2                      | 195                       | 5,1                       |

Würde man der Triebmaschine durch Nachhilfe eine Geschwindigkeit von 261,5 Umläufen in der Minute ertheilt haben, so wäre der Strom auf Null gesunken. Der Strom von 5,1 Ampere war erforderlich, um den Anker gegen die Reibung bei der Geschwindigkeit von 195 Umläufen umzutreiben.

Von dem Vorhandensein und der Grösse dieser Gegenkraft hängt der Grad ab, in dem man mittels einer gegebenen Triebmaschine die derselben in Form elektrischer Ströme zugeführte elektrische Energie nutzbar machen kann.

Bei den Erörterungen über die Dynamomaschine als Stromerzeuger wurden viele Maassregeln hervorgehoben, deren Beobachtung auf die Verbesserung des Wirkungsgrades solcher Stromerzeuger hinzielte. Es braucht wohl nicht hervorgehoben zu werden, dass manche dieser Maassregeln, z. B. Vermeidung nutzloser Widerstände, unnöthiger Eisenmassen der Kerne und dergleichen bei Triebmaschinen ebenfalls zu beachten sind. Je mehr eine Triebmaschine von derartigen Mängeln frei ist, desto vortheilhafter arbeitet sie. Der Wirkungsgrad einer Triebmaschine für die Nutzbarmachung der Stromenergie hängt nicht nur von ihrem eigenen Wirkungsgrade ab, sondern auch von dem Verhältniss zwischen der elektromotorischen Kraft, die sie selbst beim Umlauf hervorbringt, zu der elektromotorischen Kraft, mit der der Strom ihr zugeführt wird.

Eine Triebmaschine, die beim Umlauf selbst nur geringe elektromotorische Kraft erzeugt, kann ungeachtet zweckmässiger Bauart keine wirksame oder wirthschaftlich wirkende Maschine sein, wenn sie mit Strom von hoher elektromotorischer Kraft versehen wird.

### Elementare Theorie der elektrischen Triebkraft.

Es wird mathematisch erwiesen werden, dass der Grad, in dem eine gute Triebmaschine die Stromenergie nutzbar macht, von dem Verhältniss zwischen der im Anker der Maschine entwickelten elektromotorischen Gegenkraft und der elektromotorischen Kraft des Stromes abhängt, der von der Stromquelle geliefert wird.

Keine Triebmaschine vermag den gesammten Strom in nutzbare Arbeit umzusetzen, weil es unmöglich ist, Maschinen ohne Widerstand zu erbauen. Sobald aber dem Strome Widerstand entgegen gesetzt wird, wird ein Theil des Stromes zur Erwärmung der Leiter verwendet, die den Widerstand besitzen.

Es sei  $W$  die an einen Stromkreis von einer Stromquelle abgegebene elektrische Arbeit und  $w$  derjenige Theil, den die Triebmaschine als nutzbare Arbeit aus dem Stromkreise aufnimmt<sup>1)</sup>. Die Buchstaben sollen die Anzahl der Watt bedeuten. Derjenige Theil der Stromenergie, der in der Maschine nicht nutzbar, sondern in nutzlose Arbeit umgesetzt wird, geht durch Erwärmung der Widerstände verloren. Die Differenz  $W - w$  wird demnach zur nutzlosen Erwärmung der Widerstände verbraucht.

Soll die Maschine mit der höchsten Wirthschaftlichkeit arbeiten, so muss der Verlust durch Umsetzung in Wärme möglichst gering sein, d. h.  $w$  muss so viel als möglich sich dem Werthe  $W$  nähern.

Es ist mathematisch zu erweisen — der Beweis wird später gegeben werden —, dass das Verhältniss zwischen der so bestimmten nutzbaren Energie und der gesammten aufgewendeten Energie gleich

---

1) Das Zeichen  $w$  bezieht sich auf den Werth der Arbeit, welche elektrisch gemessen, von der Triebmaschine aufgenommen wird. Diese gesammte Arbeit erscheint aber nicht als nützliche mechanische Leistung, weil ein Theil durch mechanische Reibung und ein Theil bei der Erzeugung von Wirbelströmen in den sich bewegenden Theilen der Maschine verloren geht. Welcher Theil von  $w$  als nützliche mechanische Arbeit erscheint, hängt vom Wirkungsgrade der Maschine an sich ab. In dem Folgenden nehmen wir an, derartige Verlustursachen seien nicht vorhanden, d. h. wir betrachten die Maschine als eine vollkommene.

dem Verhältniss zwischen der elektromotorischen Gegenkraft der Maschine und der gesammten elektromotorischen Kraft der die Triebmaschine versorgenden Stromquelle ist. (Da es vorerst nicht zweckmässig erscheint, die allgemeinen Betrachtungen dadurch verwickelt zu machen, dass in dem Ausdruck für den Wirkungsgrad die zur Erwärmung der Feldmagnetwickelungen der Triebmaschine verwendete Energie berücksichtigt wird, so wollen wir zunächst annehmen, dass der Magnetismus der Feldmagnete unabhängig erregt sei.) Es sei die gesammte elektromotorische Kraft der Stromquelle, aus der die Triebmaschine versorgt wird,  $\mathcal{E}$ , die elektromotorische Gegenkraft  $E$ . Die Regel heisst dann:

$$\frac{w}{W} = \frac{E}{\mathcal{E}}.$$

Wird die Maschine am Umlauf gehindert, so ist die Stromstärke:

$$J = \frac{\mathcal{E}}{R}.$$

Sind die Widerstände im Stromkreise gleichbleibend, so ist die Stromstärke  $i$  bei umlaufender Maschine geringer als die Stromstärke  $J$  bei stillstehender Maschine. Es ist nach Ohm's Gesetz:

$$i = \frac{\mathcal{E} - E}{R},$$

wenn  $R$  den Widerstand des gesammten Kreises bedeutet. Es folgt:

$$\frac{J - i}{J} = \frac{E}{\mathcal{E}} = \frac{w}{W}.$$

Es lässt sich also das Güteverhältniss, bei dem eine Triebmaschine arbeitet, berechnen, wenn man die ursprüngliche Stromstärke ( $J$ ) und den Abfall der Stromstärke kennt.

Da dieses mathematische Gesetz schon vor vierzig Jahren bekannt war, so muss es befremdlich erscheinen, dass es vielfach unbeachtet blieb oder missverstanden wurde. Gewöhnlich wurde anstatt dessen ein anderes von Jacobi entdecktes Gesetz angeführt, das jedoch kein Gesetz der Wirthschaftlichkeit, sondern ein Gesetz für das Maximum der in einer gegebenen Zeit geleisteten Arbeit ist. Eine Maschine arbeitet im Allgemeinen nicht mit grösster Wirthschaftlichkeit, wenn sie in schnellem Lauf arbeitet und die grösste Leistung in der geringsten Zeit erzielt; die grösste Wirthschaftlichkeit oder der höchste Wirkungsgrad einer elektrischen Triebmaschine besteht nicht, wenn ihre Leistung ein Maximum ist.

Jacobi's Gesetz über die grösste Leistungsfähigkeit einer mit Strömen aus einer Quelle von gegebener elektromotorischer Kraft gespeisten Triebmaschine lautet: Die Leistung einer Triebmaschine ist bei derjenigen Geschwindigkeit am grössten, bei welcher der Strom nur noch die Hälfte der Stärke hat, die er bei stillstehendem Motor haben würde. Dies setzt natürlich voraus, dass die gegen elektromotorische Kraft des Motors gleich ist der halben elektromotorischen Kraft der Stromquelle. Unter diesen Umständen wird nun nur die Hälfte der von Aussen zugeführten Energie nutzbar gemacht, die andere Hälfte ist in Wärme umgesetzt und also verloren. Wäre Jacobi's Gesetz in der That das Gesetz des Wirkungsgrades, könnte kein Motor einen höheren Wirkungsgrad haben als 50 Procent.

Siemens, welcher zuerst die wahre physikalische Bedeutung der mathematischen Ausdrücke, welche bis dahin als bloss abstracte Begriffe betrachtet waren, darlegte, zeigte einige Jahre später, dass eine Dynamomaschine praktisch so gebraucht werden kann, dass sie mehr als 50 Procent der Energie des Stromes wiedergeben kann. Thatsächlich wird der Wirkungsgrad eines Motors grösser, wenn er mit geringerer als der Maximalleistung arbeitet, aber dafür mit grösserer Geschwindigkeit umläuft; in diesem Fall leistet zwar der Motor weniger, aber es wird auch weniger elektrische Energie verbraucht, und das Verhältniss der nutzbaren Arbeit zur verbrauchten Energie kommt der Einheit näher als zuvor. Statt den Motor schneller laufen zu lassen, können wir denselben Vortheil auch erreichen dadurch, dass wir seine Feldmagnete stärker machen.

Das richtige Gesetz des Wirkungsgrades wurde von Thomson 1851 festgestellt und in einer Abhandlung von Joule ungefähr zu derselben Zeit nochmals geprüft.

Jacobi scheint wohl erkannt zu haben, dass sein Gesetz ein solches für die maximale Leistung war, jedoch scheint er nicht verstanden zu haben, dass es nicht das richtige Gesetz für den ökonomischen Wirkungsgrad war. Das Gesetz von Jacobi ist kein Gesetz für das Maximum des Wirkungsgrades, sondern für die maximale Leistung, hierin liegt der Irrthum. Es ist für diesen bemerkenswerthen Ideenwiderspruch bezeichnend, dass Jacobi in seiner 1852 veröffentlichten Abhandlung durchweg von Arbeit spricht als dem Product aus Kraft und Geschwindigkeit, nicht als Product aus Kraft und Weg. Das Product aus Kraft und Geschwindigkeit ist nicht Arbeit, sondern Arbeit dividirt durch die

Zeit, d. h. die Leistung. Hierdurch erklärt sich der weit verbreitete Irrthum.

In einer von Achard im Januar 1879 in den Annales des Mines veröffentlichten Abhandlung wird zwischen dem Maximum der Leistung und dem Wirkungsgrad einer Triebmaschine genau unterschieden; Achard führt aus, dass, wenn der letztere bis zum Maximum steigt, die erstere auf Null fällt. Sir C. W. Siemens und Lord Kelvin führten im April vor einem Parlaments-Comité aus, dass es möglich sei, 21000 P durch einen Kupferdraht von 0,5 Zoll Durchmesser auf 300 engl. Meilen Entfernung zu übertragen, wenn die Spannung 80000 Volt betrüge. Unter Zugrundelegung dieser Angaben schlugen E. Thomson und Houston vor, an einem Ende der Linie mehrere Dynamomaschinen hintereinander zu schalten, ebenso mehrere Triebmaschinen am andern Ende der Linie, um mit geringer Stromstärke und hoher elektromotorischer Kraft zu arbeiten. Der Vortheil der hohen Spannung wurde auch klar von Ayrton in einem vor der British Association in Sheffield (August 1879) gehaltenen Vortrage ausgeführt. Er schlug vor, die hohe Spannung nicht durch Steigerung des Magnetismus, sondern der Geschwindigkeit zu erzielen und beide Maschinen besonders zu erregen. Der wirthschaftliche Gewinn durch hohe Geschwindigkeit, mit der der Wirkungsgrad ansteigt, wurde von W. Siemens auf der Naturforscher-Versammlung im September 1879 ebenfalls ausgeführt (vergl. Siemens, Wissenschaftliche und technische Arbeiten, Bd. 2, S. 374).

#### Theorie der elektrischen Triebmaschine.

Bedeutet  $\mathcal{E}$  die elektromotorische Kraft beim Stillstand der Triebmaschine und  $i$  die Stromstärke im Betriebe, so wird die in der Zeiteinheit aufgewendete Energie  $W$  (in Watt) ausgedrückt durch das Product aus Spannung und Stromstärke nach der Gleichung:

$$W = \mathcal{E}i = \mathcal{E} \frac{(\mathcal{E} - E)}{R} \dots \dots \dots (I).$$

Wenn die Maschine umläuft, so wird ein Theil der Energie zur Arbeitsleistung verwendet, der Rest wird zur Erwärmung des Leitungskreises verbraucht. Die nutzbare Arbeit (in der Secunde) lässt sich ebenfalls als das Product der Spannung im Anker (der elektromotorischen Gegenkraft) und der Stromstärke darstellen

$$w = Ei = E \frac{(\mathcal{E} - E)}{R} \dots \dots \dots (II).$$

Die nicht nutzbare Arbeit wird zur Erwärmung der Widerstände verbraucht, so dass die Beziehung besteht:

Aufgewendete Leistung = Nützliche Leistung + Wärmeleistung  
oder  $W = w + \text{Watt}$ , die in Wärme umgesetzt werden.

Nach dem Gesetz von Joule wird die vom Strome  $i$  im Widerstand  $R$  entwickelte Wärmearbeit ausgedrückt durch  $i^2 R$  (Watt).

Dann folgt:  $W = w + i^2 R$ .

Aus Gl. I und II folgt:

$$\frac{w}{W} = \frac{E(\mathcal{E} - E)}{\mathcal{E}(\mathcal{E} - E)}$$

oder  $\frac{w}{W} = \frac{E}{\mathcal{E}} \dots \dots \dots$  (III).

Dies ist das mathematische Gesetz des Wirkungsgrades, das lange missverstanden wurde, bis Siemens seine praktische Bedeutung erwies.

Man könnte es deshalb wohl als das Siemens'sche Gesetz bezeichnen. Das Verhältniss  $\frac{w}{W}$  ist das Maass für den Wirkungsgrad der Triebmaschine, und die Gleichung zeigt, dass man dieses Verhältniss der Einheit so nahe bringen kann, als man will. Wir müssen entweder die Geschwindigkeit der Maschine oder den Magnetismus ihrer Feldmagnete so einrichten, dass  $E$  nahezu gleich  $\mathcal{E}$  wird.

Da die nützliche Leistung gleich der Differenz zwischen der gesammten Leistung und dem Verlust durch Wärme ist, so ist auch

$$w = \mathcal{E}i - i^2 R \dots \dots \dots$$
 (IV).

Um den Werth von  $i$  zu finden, der das Maximum für  $w$  (Arbeit der Maschine in der Zeiteinheit) ergibt, differenzirt man und setzt den Differentialquotienten = Null<sup>1)</sup>

$$\frac{dw}{di} = \mathcal{E} - 2iR = 0$$

$$i = \frac{1}{2} \frac{\mathcal{E}}{R}$$

1) Ohne Anwendung der Differentialrechnung ist der Beweis wie folgt: Aus Gl. IV erhält man:  $i^2 R - \mathcal{E}i + w = 0$ ,

woraus  $i = \frac{\mathcal{E} \pm \sqrt{\mathcal{E}^2 - 4Rw}}{2R}$ .

Da der Ausdruck unter dem Wurzelzeichen nicht negativ werden kann, so muss der grösste Werth für  $w$  eintreten, wenn

$$4Rw = \mathcal{E}^2$$

ist. Dann wird wie oben  $i = \frac{\mathcal{E}}{2R}$ .

$\frac{\mathcal{E}}{R}$  ist aber nach dem Ohm'schen Gesetz die Stromstärke, wenn die Maschine still steht.

Um die maximale Arbeit in der Secunde zu leisten, muss demnach die Maschine mit solcher Geschwindigkeit umlaufen, dass sie die bei Stillstand herrschende Stromstärke auf die Hälfte vermindert. Wir beweisen damit thatsächlich das Gesetz von Jacobi in betreff der höchsten Leistung.

Da hiernach:

$$i = \frac{\mathcal{E} - E}{R} = \frac{1}{2} \frac{\mathcal{E}}{R},$$

so folgt, dass

$$\mathcal{E} - E = \frac{1}{2} \mathcal{E}$$

oder  $\frac{E}{\mathcal{E}} = \frac{1}{2}$  und auch  $\frac{w}{W} = \frac{1}{2}$ ,

d. h., der Wirkungsgrad beträgt 50 Procent, wenn die Maschine das Maximum der Leistung besitzt<sup>1)</sup>.

### Graphische Darstellung der Gesetze für Triebmaschinen.

Zur Erläuterung der Gesetze sind verschiedene graphische Darstellungen angegeben worden; eine derselben setzt uns in den Stand,

1) Für eine galvanische Batterie lässt sich eine ähnliche Berechnung aufstellen. Mit einer gegebenen Zahl von Zellen lässt sich in einem gegebenen Widerstand die maximale Stromstärke erzielen, wenn man die Zellen so schaltet, dass der innere Widerstand dem äusseren Widerstand möglichst gleich wird. Diese Regel, die für das Maximum der Stromstärke zutrifft (also auch für das Maximum des Zinkverbrauches), entspricht nicht der Bedingung grösster Wirthschaftlichkeit. Denn wenn der innere und äussere Widerstand gleich ist, so wird nur die Hälfte der Stromenergie für den Aussenkreis verfügbar. Wollen wir auf möglichst grosses Güteverhältniss bedacht sein, so muss man die Batterie so schalten, dass der innere Widerstand viel geringer als der äussere ist. Wir erhalten dann allerdings keine so hohe Stromstärke, und das Zink wird langsamer verbraucht, indessen wird ein weit grösserer Antheil der Energie nützlich verwendet und ein weit geringerer Antheil in den Zellen selbst verbraucht. Die grösste Wirthschaftlichkeit würde man erreichen, wenn der äussere Widerstand im Vergleich zum inneren unendlich gross wird, dann wird sämmtliche Energie im äusseren Stromkreise nutzbar, und in der Batterie wird keine Energie verbraucht. Es würde aber unendliche Zeit beanspruchen, um einen endlichen Arbeitsbetrag zu erhalten. Gleiche Schlussfolgerungen lassen sich auch bezüglich der Dynamomaschinen machen, wenn sie als Stromerzeuger benutzt werden; der Widerstand des umlaufenden Theiles entspricht dem inneren Widerstand einer Batterie. Zur Erzielung grossen Güteverhältnisses sollte der Widerstand des Ankers im Vergleich zu dem Widerstand des äusseren Kreises sehr gering sein.

durch ein Diagramm das Gesetz von Jacobi für die Maximalleistung und das Gesetz von Siemens für den Wirkungsgrad zu erklären<sup>1)</sup>:

Es stelle in Figur 325 die Senkrechte  $AB$  die elektromotorische Kraft  $\mathcal{E}$  der Stromquelle dar. Ueber  $AB$  stellt man das Quadrat  $ABCD$  her und zieht die Diagonale  $BD$ . Von  $B$  aus trägt man auf  $BA$  ein Stück  $BF = E$  der elektromotorischen Gegenkraft  $E$  der Triebmaschine ab. Durch  $F$  legt man parallel zu  $BC$  die Linie  $FGH$  und parallel zu  $BA$  durch  $G$  die Linie  $KGL$ . Die Differenz  $\mathcal{E} - E$ , die vorhandene elektromotorische Kraft, wird durch eine der Linien  $AF$ ,  $KG$ ,  $GH$  oder  $LC$  dargestellt. Die in der Secunde verbrauchte Energie ist  $\mathcal{E}i$ ,

$$\text{und da } i = \frac{\mathcal{E} - E}{R} \text{ so ist } \mathcal{E}i = \frac{\mathcal{E}(\mathcal{E} - E)}{R}.$$

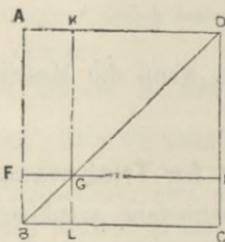


Fig. 325.

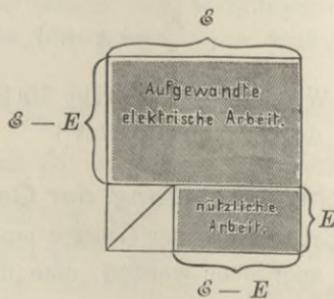


Fig. 326.

Die von der Maschine nützlich verbrauchte Arbeit in Watt ist:

$$\frac{E(\mathcal{E} - E)}{R}.$$

Da  $R$  eine Constante ist, so kann man zur Vergleichung die beiden Werthe auch als

$$\mathcal{E}(\mathcal{E} - E) \text{ und } E(\mathcal{E} - E)$$

schreiben.

Die Fläche des Rechteckes  $AFHD$  ist

$$= \mathcal{E}(\mathcal{E} - E)$$

und die des Rechteckes  $GLCH$

$$= E(\mathcal{E} - E).$$

Das Verhältniss dieser beiden Flächen bezeichnet den Wirkungsgrad einer vollkommenen Triebmaschine bei gegebener gleichbleibender elektromotorischer Kraft der äusseren Stromquelle.

Die Figur 326 zeigt diese Flächen schattirt. Aus der Figur ergibt sich, dass die Maschine zu grosse Belastung hat und nur

1) Vergl. des Verfassers Abhandlung im Phil. Mag. Februar 1883.

langsam umlaufen kann, so dass die Gegenkraft  $E$  sehr klein im Vergleich zu  $\mathcal{E}$  ist. Die Fläche für die verausgabte Energie ist sehr gross, während die Fläche der nutzbaren Arbeit sehr klein ist. Der Wirkungsgrad ist demzufolge nur gering. Zwei Drittel oder noch mehr Energie werden in Wärme umgesetzt.

Wir haben bisher vorausgesetzt, dass der Wirkungsgrad einer Triebmaschine (die bei einer gegebenen gleichbleibenden elektromotorischen Kraft der Stromquelle arbeitet) elektrisch gemessen werde. Keine Maschine indessen setzt die gesammte aufgenommene elektrische Energie in nutzbare mechanische Leistung um, weil ein Theil durch Reibung und ein anderer Theil infolge elektromagnetischer Wechselwirkungen zwischen den festen und beweglichen Theilen der Maschine verloren geht. Was wir als nutzbare Leistung bezeichnen, ist die wirklich an den Anker zu dessen Umtrieb abgegebene Arbeit. Es hängt von der guten Bauart ab, wie gross der Procentsatz sein wird, der für Reibung in den Lagern, für Wirbelströme, Hysteresis u. A. in Abrechnung gebracht werden muss. Betrachten wir aber die Maschine als vollkommen (ohne Reibung, frei von Wirbelströmen, mit lautlosem Umlauf, ohne Funkenbildung an den Bürsten), so können wir die mechanische Leistung als genau gleich der dem Anker zugeführten elektrischen Arbeit ansehen.

Eine derartige vollkommene elektrische Maschine würde, wie die ideale vollkommene Wärmemaschine von Carnot, auch vollkommen umkehrbar sein.

Bei der Wärmemaschine von Carnot wird angenommen, dass die gesammte im Arbeitskreislaufe verbrauchte Wärme in nützliche Arbeit umgesetzt wird; in diesem Falle ist der Wirkungsgrad das Verhältniss der verbrauchten zur gesammten ausgegebenen Wärme. Der Wirkungsgrad der vollkommenen Wärmemaschine lässt sich bekanntlich als eine Function von zwei absoluten Temperaturen ausdrücken, nämlich der des Erhitzers und des Kühlers der Maschine.

Carnot's Maschine ist gleichfalls ideal umkehrbar, d. h. sie ist fähig, mechanische Arbeit wieder in Wärme umzusetzen.

Das mathematische Gesetz des Wirkungsgrades einer vollkommenen elektrischen Maschine, wie solches vorhin erläutert worden ist, gehört in gleicher Weise einem idealen Falle an. Der Wirkungsgrad lässt sich für einen gegebenen Fall ebenso als Function von zwei elektromotorischen Kräften ausdrücken.

Das Gesetz für die maximale Leistung (Jacobi).

Die Fläche  $GLCH$  drückt die in der Maschine nutzbar gewordene Arbeit aus (Fig. 325).

Die Grösse der Fläche ändert sich mit der Lage des Punktes  $G$  und wird ein Maximum, wenn  $G$  in der Mitte von  $BD$  liegt, denn von allen Rechtecken, die dem Dreieck  $BCD$  eingeschrieben werden können, besitzt das Quadrat den grössten Inhalt (Fig. 327). Liegt  $G$  im Mittelpunkt von  $BD$ , so ist das Rechteck  $GLCH$  genau halb so gross als das Rechteck  $AFHD$ , d. h. die nützliche Arbeit ist gleich der Hälfte der aufgewendeten Energie. Ist dies der Fall, so vermindert die elektromotorische Gegenkraft die Stromstärke auf die Hälfte derjenigen, die beim Stillstand der Maschine herrschen würde. Dies ist das Gesetz von Jacobi in betreff des Wirkungsgrades einer Maschine, die ihre höchste Leistung äussert. Der Punkt  $F$  liegt dann ebenfalls in der Mitte von  $BA$ , demnach ist  $E = \frac{1}{2}\mathcal{E}$ .

Gesetz des maximalen Wirkungsgrades.

Es möge der Punkt  $G$  sich nach  $D$  (Fig. 328) zu bewegen. Das Rechteck  $GLCH$  ist gleich dem Rechteck  $AFGK$ . Das Quadrat  $KGHD$ , das als Ueberschuss der Fläche  $AFHD$  über  $AFKG$  sich ergibt, stellt die elektrische Energie dar, die zur Erwärmung der Widerstände der Triebmaschine verwendet wird. Wenn der Wirkungsgrad ein Maximum sein soll, muss die Wärme ein Minimum sein.

In der Figur 325 war das Quadrat für die Wärme aussergewöhnlich gross, in Figur 327 ist es gleich der Hälfte der Energiefläche, während es nach der Figur 328 weniger als ein Viertel beträgt. Es lässt sich die Wärmefläche so klein machen, als wir wollen, wenn wir den Punkt  $F$  sehr nahe nach  $A$  hin verschieben. Der Wirkungsgrad wird ein Maximum, wenn die Umsetzung in Wärme ein Minimum wird.

Das Verhältniss der Flächen  $GLCH$  und  $AFHD$ , welches den Wirkungsgrad darstellt, wird der Einheit nur gleich, wenn das Quadrat  $KGHD$  unendlich klein wird, d. h. wenn die Maschine so schnell läuft, dass ihre elektromotorische Gegenkraft  $E$  von  $\mathcal{E}$  nur um einen unendlich kleinen Betrag verschieden ist.

Wenn man daher durch das Diagramm einen bestimmten Wirkungsgrad (z. B. 90 Procent) darstellen will, so ist die Lage des Punktes  $G$  so zu wählen, dass die Fläche  $GLCH = 0,9 AFHD$  wird, oder  $BG$  muss gleich  $0,9 BD$  sein. Dies bedingt, dass  $E$

gleich 0,9 & oder dass die Maschine so schnell läuft, um den bei Stillstand vorhandenen Strom auf 0,1 seiner Stärke herabzumindern. Findet ein Stromverlust in der Leitung statt, so muss das Gesetz eine Abänderung<sup>1)</sup> erfahren. Denn je grösser die elektromotorische Kraft der Maschine ist, desto höher wird die Spannung in der Leitung und desto grösser der Verlust.

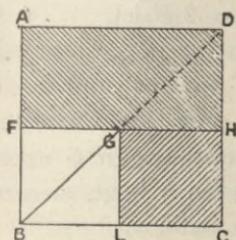


Fig. 327. Geometrische Darstellung von Jacobi's Gesetz der maximalen Leistung.

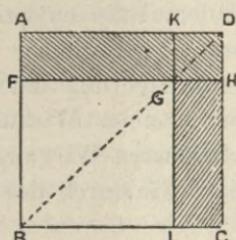


Fig. 328. Geometrische Darstellung des Gesetzes des maximalen Wirkungsgrades.

Es wird auch klar, was geschehen muss, um einen gewünschten Wirkungsgrad zu erhalten. Es möge Strom von 100 Volt den Hauptleitungen zugeführt werden; um 90 Procent nutzbar zu machen, müssen wir als Triebmaschine eine Dynamomaschine verwenden, die, wenn sie selbst mit entsprechender Geschwindigkeitläuft und die gehörige Stromstärke liefert, eine elektromotorische Kraft von 90 Volt erzeugt.

Wir können die graphische Methode nunmehr auf zwei weitere Fälle ausdehnen. Es möge & nicht mehr als constant angenommen werden, aber es sei die von der Maschine in der Secunde geleistete Arbeit gleichbleibend. Die Gl. II heisst für diesen Fall:

$$E(\& - E) = w R.$$

Diese Gleichung wird durch die Curve *PHQ* (Fig. 329) dargestellt.

Die Werthe von & sind als Abscissen, die Werthe von *E* als Ordinaten aufgetragen. Aus der Curve ist ersichtlich, dass ein gewisser Minimalwerth für & vorhanden ist, der genügt, um der

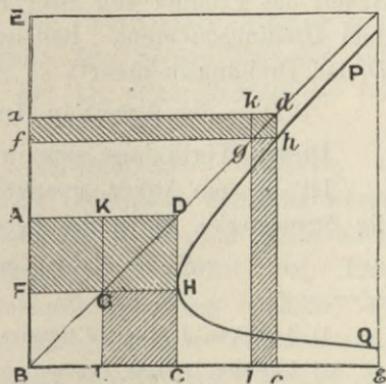


Fig. 329. Curve der Spannung bei gleichbleibender Leistung.

1) Vergl. Kapp's Electric Transmission of Energy. 4. Aufl. Seite 185.

Maschine den vorgeschriebenen Bedarf an Energie in jeder Secunde zuzuführen. Die Curve verläuft durch die Ecke  $H$  aller Flächen, die gleich  $GLCH$  und unterhalb der Diagonale des Quadrates hergestellt sind. Von diesen Flächen, welche die von der Maschine geleistete gleiche Arbeit darstellen, ist die eine, der der Minimalwerth für  $\mathcal{E}$  entspricht, das Quadrat, das am Scheitel der Curve liegt und dem Falle entspricht, wenn  $\mathcal{E} = 2E$  ist.

Dieses von Professor Carhart<sup>1)</sup> zuerst dargestellte Ergebniss liefert die Umkehrung des Gesetzes von Jacobi und bedingt, wie dies Gesetz, einen Wirkungsgrad von nur 50 Procent. Einen bedeutend höheren Wirkungsgrad erhält man, wenn  $\mathcal{E}$  und  $E$  beide grösser sind, wie durch das Rechteck, das bei  $h$  liegt, angezeigt wird.

### Geschwindigkeit und Drehungsmoment von Triebmaschinen.

Zwischen den Bedingungen der elektrischen Speisung, der Geschwindigkeit und dem Drehungsmoment eines Motors bestehen gewisse wichtige Beziehungen.

Im Kapitel V wurde erörtert, dass die an eine Welle abgegebene Arbeit das Product von zwei Factoren ist, der Geschwindigkeit und dem Drehungsmoment. Bedeutet  $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit und  $D$  das Drehungsmoment<sup>2)</sup>, so ist

$$\omega D = \text{der Arbeit in der Secunde (oder der Leistung).}$$

Dieser Werth lässt sich in Watt ausdrücken.

Ist die vom Anker erzeugte elektromotorische Kraft  $= E$ , und  $i$  die Stromstärke, so ist die Leistung im Anker

$$Ei = \text{elektrische Leistung in Watt}^3).$$

1) American Journal of Science, Bd. 31, S. 95. 1886.

2) Leistung ist das Product von Kraft und Geschwindigkeit. Beträgt der Umfang der Riemenscheibe  $2\pi r$  und läuft sie  $n$  mal in der Secunde um, so giebt die Umfangsgeschwindigkeit  $2\pi r n$  mit  $F$  (Kraft) multiplicirt die Leistung. Wird  $F$  in Grammen und  $r$  in Centimetern ausgedrückt, so bedeutet  $2\pi r n F$  die Leistung in Gramm-Centimetern in der Secunde. Dies ergiebt durch Multiplication mit  $981 \times 10^{-7}$  die Zahl der Watt. Ist  $\omega$  in Radianen für die Secunde gegeben und  $D$  in Centimeter-Dynen, so liefert das Product  $Erg$  in der Secunde, und man erhält durch Division mit  $10^7$  die Zahl der Watt.

3) Da 1 Volt  $= 10^8 CGS$ -Einheiten der elektromotorischen Kraft und 1 Ampere  $= 10^{-1}$  Einheiten der Stromstärke ist, so ist 1 Watt  $= 10^7 CGS$ -Einheiten der Leistung oder  $10^7 Erg$  in der Secunde oder  $10^7 : 981$  Gramm-Centimeter in der Secunde.

Werden sämtliche vier Grössen  $\omega$ ,  $D$ ,  $E$  und  $i$  auf den Anker bezogen, so können wir die elektrischen und mechanischen Ausdrücke gleichsetzen, die Gleichung gilt sowohl für den Stromerzeuger als auch für die Triebmaschine. Im Stromerzeuger besitzen  $E$  und  $i$  gleiche Richtung,  $D$  wirkt  $\omega$  entgegen, es ist ein Gegenmoment vorhanden. In der Triebmaschine wirken  $D$  und  $\omega$  in gleicher Richtung,  $E$  wirkt gegen  $i$ , es ist eine elektromotorische Gegenkraft vorhanden.

Bei der Behandlung der Dynamomaschine als Stromerzeuger wurde angenommen, dass die mechanische Kraft unter einer von zwei feststehenden Bedingungen geliefert werden könne: entweder bei gleichbleibender Geschwindigkeit (während das Drehungsmoment mit der elektrischen Leistung geändert wurde) oder aber bei gleichbleibendem Drehungsmoment (während die Geschwindigkeit mit der Leistung sich änderte). War eine dieser Bedingungen vorgeschrieben, so handelte es sich um Auffindung algebraischer Ausdrücke für die beiden Factoren der elektrischen Leistung — elektromotorische Kraft und Stromstärke — unter veränderlichen Bedingungen in betreff des Widerstandes.

Ebenso ermittelten wir die Bedingungen, die sich ergeben, wenn man den einen oder anderen Factor der elektrischen Leistung constant macht. Die Beziehung zwischen den beiden Factoren der Leistung wurde unter Zuhilfenahme der als »Charakteristiken« bekannten Curven studirt.

Wird die Dynamomaschine als Triebmaschine behandelt, so nimmt man in ähnlicher Weise an, die elektrische Speisung werde unter solcher Anordnung bewirkt, dass die elektrische Kraft unter einer der beiden feststehenden Bedingungen zugeführt wird. Entweder handelt es sich um gleichbleibende Spannung (während die Stromstärke mit der mechanischen Leistung der Triebmaschine geändert wird), oder um gleichbleibende Stromstärke (während die Spannung sich mit der mechanischen Leistung ändert). Wird eine dieser Bedingungen vorgeschrieben, so müssen wir algebraische Ausdrücke für die beiden entsprechenden Factoren der mechanischen Leistung finden, nämlich für die Geschwindigkeit und für das Drehungsmoment, wenn verschiedene Belastungen an der Welle angenommen werden. Auch müssen wir die Bedingungen erforschen, die sich ergeben, wenn man den einen oder anderen Factor der mechanischen Leistung constant macht: mit anderen Worten, wir müssen die Bedingungen der Selbstregelung festsetzen, um die

Maschine bei gleichbleibender Geschwindigkeit oder bei gleichbleibendem Drehungsmoment betreiben zu können. Endlich ist es zweckmässig, mit Hilfe von Curven die Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Drehungsmoment zu studiren. Derartige Curven kann man als »mechanische Charakteristiken« bezeichnen.

**Allgemeine Ausdrücke für das Drehungsmoment und die Geschwindigkeit.**

Die in der Secunde der Welle der Triebmaschine zugeführte Arbeit lässt sich in elektrischem oder mechanischem Maasse ausdrücken. Im ersteren Falle erhält man das Product aus der elektromotorischen Kraft der Triebmaschine (d. h. der elektromotorischen Gegenkraft, die gegen die Kraft der Stromquelle wirkt) mit der Stromstärke im Anker; im letzteren Falle das Product der Winkelgeschwindigkeit mit dem Drehungsmoment. Demnach können wir schreiben:

$$w = E i_a = \omega D = 2\pi n D$$

und ebenso wie für einen Stromerzeuger  $E$  (im Mittel)  $= n N \mathfrak{S}$  (vergl. Seite 160). Daraus:

$$2\pi n D = n N \mathfrak{S} i_a$$

$$2\pi D = N \mathfrak{S} i_a.$$

Der Mittelwerth des Drehungsmomentes ergibt sich endlich als

$$D = i_a \frac{N \mathfrak{S}}{2\pi} \dots \dots \dots (a).$$

Ist nun  $\mathfrak{S}$  constant, so ist das Drehungsmoment dem Ankerstrom proportional. Den Werth  $i_a$  kann man durch die elektromotorische Kraft  $\mathfrak{E}$  der Stromquelle, wie solche als Klemmenspannung der Triebmaschine gemessen wird, und durch den inneren Widerstand  $r$  des Ankerstromkreises ausdrücken:

$$i_a = \frac{\mathfrak{E} - E}{r}.$$

Daraus folgt: 
$$D = \frac{N \mathfrak{S}}{2\pi} \cdot \frac{\mathfrak{E} - n N \mathfrak{S}}{r} \dots \dots \dots (\beta).$$

Wenn die Geschwindigkeit so anwächst, dass  $n N \mathfrak{S} = \mathfrak{E}$  wird, so ergibt sich aus der Gleichung das Drehungsmoment  $D = 0$ . Falls wirklich an der Welle kein Widerstand wirkt, so läuft die Maschine leer bei ihrer höchsten Geschwindigkeit, so dass die elektromotorische Gegenkraft fast der elektromotorischen Kraft der Stromquelle gleich wird. Der Maximalwerth für  $D$ , vorausgesetzt, dass  $\mathfrak{S}$  constant ist, tritt offenbar ein, wenn  $n = 0$  ist.

Für die Geschwindigkeit erlangt man wie folgt einen Werth:

$$2 \pi D r = N \mathcal{E} \mathcal{E} - n N^2 \mathcal{E}^2$$

$$n = \frac{\mathcal{E}}{N \mathcal{E}} - \frac{2 \pi D r}{N^2 \mathcal{E}^2} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (\gamma).$$

In der Gleichung ( $\alpha$ ) wird  $D$  in Dyne-Centimetern ausgedrückt, wenn  $i_a$  in absoluten Stromeinheiten gegeben ist; nimmt man für  $i_a$  Ampere an, so muss der Werth durch 10 getheilt werden, wenn man  $D$  in Dyne-Centimetern erhalten will, oder durch 9810, wenn man Gramm-Centimeter erhalten will.

Soll in Gleichung ( $\gamma$ )  $n$  in Umläufen in der Secunde ausgedrückt werden, so muss der in Volt gegebene Werth für  $\mathcal{E}$  mit  $10^8$  und der in Ohm gegebene Werth von  $r$  mit  $10^9$  multiplicirt werden, während  $D$  in Dyne-Centimetern zu berechnen ist.

Beispiele: 1. Bei einer als Motor verwendeten vierpoligen Maschine von Brown war  $N = 368$ ;  $i_a = 275$ ; Leistung 250 P bei 500 Umdrehungen in der Minute. Zu berechnen die Zahl der magnetischen Linien, die durch den Anker gehen müssen. 2. Ein zweipoliger Motor soll in einem Bogenlichtkreise, in welchem der Strom 10 Ampere beträgt, 4 P leisten: Wieviel Volt muss er erhalten? Unter der Annahme  $\mathcal{E} = 2000000$  und 15 Umdrehungen in der Secunde, wieviel Ankerleiter muss er haben?

Die drei Gleichungen  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  gelten nicht nur für Triebmaschinen, sondern auch für Stromerzeuger; im letzteren Falle ist  $\mathcal{E}$  durch  $e$  zu ersetzen.

Für  $D$  ergäben sich dann negative Werthe; das negative Vorzeichen bedeutet, dass das der Wirkung des magnetischen Feldes auf die stromführenden Ankerleiter entsprechende Drehungsmoment dem Ankertrieb entgegengesetzt ist.

Es ist zu bemerken, dass, wenn  $r$  sehr klein und  $\mathcal{E}$  verhältnissmässig gross ist, der zweite Ausdruck vernachlässigt werden kann. Die Geschwindigkeit hängt dann lediglich von dem ersteren Werthe ab. Sie ist um so kleiner, je grösser  $\mathcal{E}$  ist; dies ist nur die Umkehrung der Thatsache, dass bei stärkerem magnetischen Felde die Geschwindigkeit der Dynamomaschine zur Hergabe der gewünschten Leistung um so geringer zu sein braucht. Ebenso ist zu bemerken, dass, wenn  $\mathcal{E}$  gleichbleibend ist, die Geschwindigkeit proportional  $\mathcal{E}$  wird; sie wird gleichbleibend sein, wenn die Stromversorgung bei gleichbleibender Spannung stattfindet, veränderlich, wenn  $\mathcal{E}$  sich ändert. Soll eine Triebmaschine bei niedriger Geschwindigkeit arbeiten, so sollte sowohl  $N$  als auch  $\mathcal{E}$  gross sein.

Demnächst ist zu untersuchen, in wiefern  $n$  und  $D$  durch die Thatsache, dass der Werth  $\mathcal{E}$  von der Bauart und Wicklung des Feldmagnetes der Maschine und von den Bedingungen der Versorgung mit Strom abhängt, berührt werde. Es sollen die nachstehenden Arten von Maschinen zur Betrachtung gelangen:

- A. Magneto-Triebmaschine und besonders erregte Triebmaschine;
- B. Triebmaschine mit Reihenwicklung;
- C. Triebmaschine mit Nebenschlusswicklung;
- D. Triebmaschine mit Verbundwicklung (gemischter Wickelung).

Hierfür sind die Bedingungen für die Stromversorgung, und zwar je nachdem  $\mathcal{E}$  oder  $i$  gleichbleibend ist, in Betracht zu ziehen.

#### Magneto- und besonders erregte Triebmaschine.

$\mathcal{E}$  wird als gleichbleibend angenommen, d. h. die störenden Gegenwirkungen des Ankers können ausser Betracht gelassen werden. Letzteres trifft nur dann zu, wenn die Bürstenverschiebung unerheblich und der Feldmagnet sehr kräftig ist. Unter diesen Umständen hat man die bereits gefundenen allgemeinen Formeln etwas abzuändern.

Der in Betracht kommende innere Widerstand ist der Ankerwiderstand  $r_a$ .

Fall 1.  $\mathcal{E}$  ist gleichbleibend.

Die Formel (7) gibt die gewünschte Beziehung; nach dieser lässt sich die mechanische Charakteristik (Fig. 330) zeichnen.

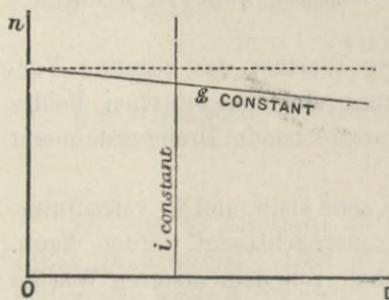


Fig. 330. Mechanische Charakteristik des Magnetomotors.

Letztere schneidet als Gerade die Achse  $n$  in einem Punkte, der nach der Scala die Geschwindigkeit darstellt, bei der  $nN\mathcal{E} = \mathcal{E}$  ist. Die Linie neigt sich unter einem Winkel, so dass die Tangente gleich  $2\pi r_a/N^2\mathcal{E}^2$  oder proportional dem inneren Widerstand ist. Wird die Triebmaschine besonders erregt, so bewirkt das Anwachsen des erregenden Stromes und die Verstärkung des Feldes offenbar, dass die Linie mehr horizontal verläuft; zugleich wird auch die Geschwindigkeit im Ganzen erniedrigt.

Zieht man die Gegenwirkungen des Ankers in Betracht, so ist zu beachten, dass bei Rückwärtsverschiebung der Bürsten der Ankerstrom entmagnetisierend, bei Vorwärtsverschiebung magnetisierend wirkt.

Bei gleichbleibendem  $\mathcal{E}$  würde dann bei einer Rückwärtsverschiebung der Bürsten die schräge Linie mehr gehoben werden, sie würde mit Zunahme des Drehungsmomentes noch mehr horizontal werden, weil der Magnet geschwächt würde und die Geschwindigkeit ansteige; eine Verschiebung der Bürsten nach vorwärts würde eine stärkere Neigung der Linie hervorrufen.

Fall 2.  $i$  ist gleichbleibend.

Wie die Formel  $\alpha$  zeigt, ist in diesem Falle das Drehmoment gleichbleibend, und unabhängig von der Geschwindigkeit, sowie dem inneren Widerstand.

Die mechanische Charakteristik der Maschine wird unter diesen Bedingungen durch eine senkrechte gerade Linie dargestellt.

### Triebmaschine mit Reihenwicklung.

Die Grundgleichungen sind dieselben, wie vorhin, es tritt nur noch die Gleichung

$$r = r_a + r_m$$

hinzu; wir können aber hier mit Vortheil die Seite 134 gegebene Frölich'sche Näherungsformel für das Gesetz des magnetischen Kreises anwenden und schreiben:

$$\mathfrak{C} = \mathfrak{C}' \frac{i}{i + i'}$$

worin  $i'$  der diakritische Strom ist. Setzt man den Werth von  $\mathfrak{C}$  in den Ausdruck  $\alpha$  für das Drehmoment auf Seite 474, und schreibt zur Abkürzung

$$\frac{N\mathfrak{C}}{2\pi} = Y, \text{ so folgt:}$$

$$D = Y \frac{i^2}{i + i'}$$

Diese Beziehung zwischen Drehmoment und Stromstärke ist in der Figur 331 dargestellt.

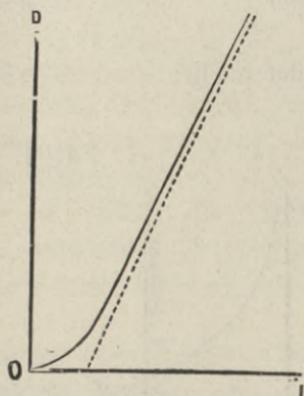


Fig. 331. Drehmoment und Strom.

Für Werthe von  $i$ , die im Vergleich zu  $i'$  klein sind, ändert sich  $D$  nahezu wie  $i^2$ ; für grosse Werthe von  $i$  (wenn die magnetische Sättigung voranschreitet) wird  $D$  nahezu  $i$  proportional.

Die obige Gleichung lässt sich schreiben:

$$i^2 - \frac{D}{Y} i - \frac{D}{Y} i' = 0,$$

woraus

$$i = \frac{D}{2Y} \left[ 1 \pm \sqrt{1 + \frac{4Y}{D} i'} \right].$$

Zur Vereinfachung kann man für grosse Werthe von  $D$  den zweiten Ausdruck unter dem Wurzelzeichen vernachlässigen, da die Magnetisirung nahezu gleichmässig zunimmt. Als Beispiel dienen folgende bei einem 30 pferdigen Strassenbahnmotor erhaltenen

Prüfungsergebnisse, worin das Drehungsmoment in Kilogramm-meter, der Strom in Ampere und die Geschwindigkeit in Umdrehungen in der Minute ausgedrückt sind:

|                                |     |     |     |     |    |    |    |     |     |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|-----|
| Strom . . . . .                | 3,5 | 10  | 20  | 30  | 40 | 50 | 70 | 90  | 94  |
| Drehungs-<br>moment . . .      | 0   | 4   | 13  | 25  | 39 | 53 | 85 | 120 | 127 |
| Geschwindig-<br>keit . . . . . | 479 | 236 | 145 | 118 | 99 | 85 | 61 | 39  | 35  |

Eliminieren wir aus den oben erhaltenen ( $\alpha$ ) und ( $\gamma$ )  $N\mathcal{E}$ , so erhalten wir

$$n = \frac{\mathcal{E}i}{2\pi D} - \frac{ri^2}{2\pi D}$$

oder

$$n = \frac{\mathcal{E}i}{2\pi D} - \frac{r(i+i')}{2\pi Y}$$

oder endlich

$$n = \frac{\mathcal{E} - ri'}{2\pi Y} - \frac{rD}{2\pi Y^2}$$

Fall 1.  $\mathcal{E}$  ist gleichbleibend.

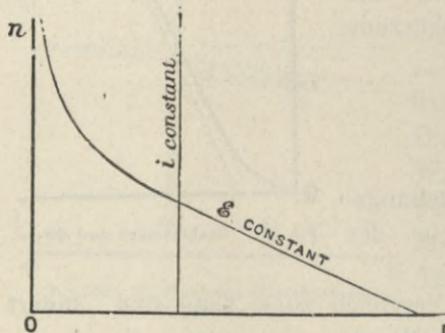


Fig. 332. Mechanische Charakteristik des Reihenmotors.

Wenn  $\mathcal{E}$  gleichbleibend ist, so sind, wie die letzte Gleichung zeigt, für grosse Werthe von  $D$  die Werthe von  $n$  gleich einer gewissen Constante nach Abzug einer Grösse, die proportional  $D$  ist. Die mechanische Charakteristik (wenn die Magnete gut gesättigt sind) ist dann für alle grossen Werthe von  $D$  nahezu eine gerade Linie, wie aus der Figur 332 hervorgeht.

Fall 2.  $i$  ist gleichbleibend.

Abgesehen von secundären Wirkungen wird die Magnetisirung gleich bleiben, das Drehungsmoment wird daher ebenfalls gleichbleibend sein, wie in Figur 330. Ueberschreitet die Belastung einen gewissen Betrag, so läuft die Maschine nicht an, bei geringerer Belastung kommt sie in Gang, bis Reibung und Wirbelströme den Belastungsunterschied ausgleichen.

Die Eigenschaften der Reihenmotoren sind so wichtig, dass wir sie etwas näher betrachten müssen. Wenn der eine Reihenmaschine

durchfließende Strom in seiner Stärke gleichbleibend ist, so ist die entwickelte elektromotorische Kraft fast genau der Geschwindigkeit proportional. Wenn  $E$  proportional  $\omega$  ist, so muss  $D$  proportional  $i$  sein.

Dies ist für eine Reihentriebmaschine durch Versuche hinlänglich erwiesen.

Wurde eine Reihenmaschine von Siemens zur Hebung einer Last von 56 lbs (25,4 kg) eingerichtet, so hob sie dieses Gewicht in der Minute 212 Fuss (64,6 m) und entwickelte eine elektromotorische Gegenkraft von 108,81 Volt. Die zum Betriebe verwendete elektromotorische Kraft betrug 111 Volt, der Widerstand des Stromkreises 0,3 Ohm. Die wirksame elektromotorische Kraft betrug also 2,19 Volt und die Stromstärke 7,3 Ampere. Wurde der Widerstand des Stromkreises auf 2,2 Ohm erhöht, so fiel die Geschwindigkeit auf 169 Fuss (51,5 m) in der Minute, die Gegenkraft auf 94,94 Volt, die wirksame elektromotorische Kraft  $\mathcal{E} - E$  betrug demnach 16,06 Volt und die Stromstärke 7,3 Ampere, wie vorher. Schaltete man 4,8 Ohm Widerstand ein, so sank die Geschwindigkeit auf 141 Fuss (43 m) in der Minute und die Gegenkraft auf 76 Volt, es verblieben für  $\mathcal{E} - E$  35 Volt, die Stromstärke war wieder 7,3 Ampere. Bei derselben Belastung herrschte dieselbe Stromstärke, wie auch die Geschwindigkeit sich stellte.

Die Thatsache, dass das Drehungsmoment einer Triebmaschine mit Reihenwicklung nur von der Stromstärke abhängt, wird von Bedeutung bei Anwendung der Triebmaschinen für die Bewegung von Fahrzeugen (Schienenwagen), die zum Anlaufen während weniger Secunden eine weit grössere Kraft als während des Laufes erfordern<sup>1)</sup>.

Wenn die Reihenmaschine bei gleichbleibender Spannung versorgt wird, so ist  $E$  nicht der Geschwindigkeit proportional, weil der Feldmagnetismus nicht gleichbleibend ist; vielmehr nimmt der letztere ab, wenn  $E$  wächst, und wird (wenn keine Sättigung herrscht) nahezu proportional  $\mathcal{E} - E$ . Die Maschine wird deshalb nicht mit gleichbleibender Geschwindigkeit laufen. Ebensowenig findet dies statt, wenn sie mit Strom von gleichbleibender Stärke versorgt wird.

1) Vergl. Bemerkungen von E. Hopkinson, Proc. Inst. Civil Engineers, Bd. 91, Theil I, S. 6. 1887.

### Verwendung von zwei Maschinen mit Reihenwicklung zur Uebertragung.

Werden zwei gleichgebaute Reihenmaschinen, die eine als Stromerzeuger, die zweite als Triebmaschine verwendet, so arbeitet die Anordnung fast vollkommen selbstregelnd. Die Geschwindigkeit der Triebmaschine am Empfangsorte wird fast gleichbleibend, wenn die Geschwindigkeit des Stromerzeugers am Abgaborte auch gleich bleibt.

Jede Vermehrung der Belastung der Triebmaschine sucht die Geschwindigkeit zu hemmen und verursacht deshalb ein Anwachsen des Stromes. Aus diesem Grunde entfällt auf den Stromerzeuger eine verhältnissmässig höhere Leistung, wodurch wiederum eine grössere Leistung von der Dampfmaschine zur Aufrechthaltung ihrer Geschwindigkeit entnommen wird. Wie vorhin gezeigt wurde, ist das Drehungsmoment der Triebmaschine  $D_2$  bei der gegebenen Maschine allein von der Stromstärke abhängig, und von der Stromstärke wird auch das Drehungsmoment bei der Dynamomaschine  $D_1$  abhängig. Kapp<sup>1)</sup> hat ferner erwiesen, dass bei dem Vorhandensein eines Widerstandes in der Leitung die Anordnung doch so getroffen werden kann, dass Selbstregelung stattfindet. Als Stromerzeuger und Triebmaschine sind dann zwei derartig gewickelte Maschinen zu wählen, dass, wenn man ihre Charakteristiken bei den betreffenden Geschwindigkeiten vergleicht, die Differenz der elektromotorischen Kräfte, die einem gegebenen Stromwerth entspricht, derjenigen elektromotorischen Kraft gleich sein soll, die erforderlich ist, um den betreffenden Strom durch den Widerstand des ganzen Kreises zu treiben. Vergl. Kapitel XXVIII, Kraftübertragung.

W. Siemens<sup>2)</sup> lenkte im Jahre 1880 die Aufmerksamkeit auf die besonderen Eigenschaften der Verbindung einer stromerzeugenden Dynamomaschine mit einer Magneto-Triebmaschine. Er führt als Beispiel eine als Locomotive laufende Triebmaschine an, die bei Abwärtsbewegung auf einer geneigten Ebene ihre Geschwindigkeit erhöht, thatsächlich als Stromerzeuger wirkt und die überschüssige Kraft zurückgiebt. Er bemerkte ausserdem, dass zwei durch Triebmaschinen bewegte Züge, die auf demselben Schienenpaar laufen, sich gegenseitig zu regeln suchen; wenn nämlich der eine sich auf einer abfallenden Stelle der Bahn befindet, so giebt er an

1) Vergl. Kapp's Electric Transmission of Energy, Seite 176.

2) Journ. Soc. Electr. Engineers, Bd. 9, S. 301. 1880.

den andern Kraft ab und wirkt so, als wenn die Züge durch ein unsichtbares Zugseil miteinander verbunden wären.

### Triebmaschine mit Nebenschlusswicklung.

Die Grundbedingungen ergeben sich aus folgenden Gleichungen

$$D = i_a \frac{N\mathcal{C}}{2\pi},$$

$$i_a = i - i_s,$$

$$\mathcal{C} = \mathcal{C}' \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E} + \mathcal{E}'},$$

$$E = \mathcal{E} \left( 1 + \frac{r_a}{r_s} \right) - r_a i.$$

Wir erhalten:

$$D = \frac{N}{2\pi} \left( i - \frac{\mathcal{E}}{r_s} \right) \mathcal{C}' \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E} + \mathcal{E}'}$$

Setzt man  $Y$  für  $N\mathcal{C}'/2\pi$ , so folgt:

$$i = \frac{D}{Y} \cdot \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}'}{\mathcal{E}} + \frac{\mathcal{E}}{r_s},$$

$$n = \frac{1}{N\mathcal{C}} \left[ \mathcal{E} \left( 1 + \frac{r_a}{r_s} \right) - r_a i \right].$$

Wird hierin der Werth für  $i$  eingesetzt, so ist:

$$n = \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}'}{2\pi Y} \left[ 1 + 2 \frac{r_a}{r_s} - \frac{r_a D}{Y} \cdot \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}'}{\mathcal{E}^2} \right] \quad \dots \quad (\delta)$$

Fall 1.  $\mathcal{E}$  ist gleichbleibend.

Aus der letzten Gleichung geht hervor, dass eine Triebmaschine mit Nebenschluss, die bei gleichbleibender Spannung versorgt wird, eine Geschwindigkeit besitzt, die gleichbleibend und unabhängig vom Drehungsmoment wäre, falls der innere Widerstand nicht in Betracht käme. Der mit wachsendem Drehungsmoment erfolgende Abfall wird um so geringer sein, je stärker der Feldmagnetismus ist.

Eine von Mordey geprüfte Victoria-Triebmaschine, deren Belastung von  $91,8 \cdot 10^7$  bis  $1357,2 \cdot 10^7$  Dyne-Centimeter sich änderte, nahm in ihrer Geschwindigkeit nur von 16,25 bis 15,75 Umläufe in der Secunde ab.

Es ist belehrend, das Selbstregelungsvermögen einer Nebenschlussmaschine dem einer Triebmaschine mit Nebenschluss gegenüber zu stellen.

Wird die erstere bei gleichbleibender Geschwindigkeit getrieben, so liefert sie Elektrizität von fast gleichbleibender Spannung; wird die letztere aus den Zuleitungen bei gleichbleibender Spannung

gespeist, so liefert sie mechanische Kraft bei fast gleichbleibender Geschwindigkeit. In beiden Fällen ist die Abweichung von dem absolut gleichbleibenden Zustande proportional dem inneren Widerstand der Ankerwickelungen und der elektrischen oder mechanischen Leistung der Maschine.

Wir haben dabei vorausgesetzt, dass der Anker keine magnetische Rückwirkung äussert. Um einen funkenlosen Gang der Maschine zu erhalten, sind die Bürsten nach rückwärts zu verschieben, in Triebmaschinen aber wird dadurch eine entmagnetisierende Kraft hervorgebracht. Diese sucht indessen, wie wir vorhin sahen, die Geschwindigkeit zu steigern. Wird die Triebmaschine mit Strom von gleichbleibender Spannung gespeist, so sucht gerade die Rückwirkung des starken Stromes bei grosser Belastung die Verminderung der Geschwindigkeit zu hindern und macht die Nebenschlussmaschine nahezu selbstregelnd.

#### Fall 2. $i$ ist gleichbleibend.

Die Erörterung wird hier verwickelter, wenn auch die allgemeinen Betrachtungen einfach genug sind. Ist die Maschine in

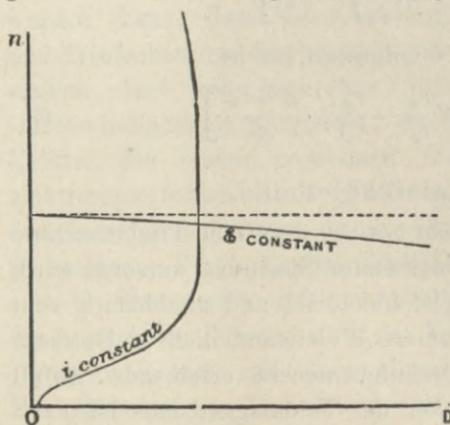


Fig. 333. Mechanische Charakteristik eines Nebenschlussmotors.

Ruhe, wenn der Strom beginnt, so fliesst fast der gesammte Strom durch den Anker, fast nichts durch den Nebenschluss; es entsteht infolge dessen nur geringer Magnetismus und fast kein Drehungsmoment. Eine solche Maschine läuft mit irgend einer Belastung nicht ohne Weiteres an. Ist das Anlaufen aber einmal erfolgt, so verursacht die elektromotorische Gegenkraft das Abfallen des Ankerstromes, während der

Strom im Nebenschluss steigt. Das Drehungsmoment steigt deshalb dann mit der Geschwindigkeit, jedoch nicht unbegrenzt, weil bei dem Anwachsen des Magnetismus seinem Sättigungsgrade zu das Anwachsen von  $\mathcal{C}$  nicht länger das Abfallen von  $i_a$  ausgleicht: von diesem Punkte ab nimmt das Drehungsmoment ab, wenn auch die Geschwindigkeit ansteigt. Theoretisch sollte die Geschwindigkeit ansteigen, bis die eigene elektromotorische Kraft der Triebmaschine

die Spannung genau ausgleicht, die dem gesammten gleichbleibenden Strom, der durch den Nebenschluss fliesst, entspricht; unter solchen Umständen wird aber im Anker kein Strom vorhanden und das Drehungsmoment Null sein.

Die Figur 333, die, wie die vorhergehende, dem Werke von Dr. Frölich entnommen ist, liefert die mechanischen Charakteristiken für die beiden Fälle.

### **Wechselwirkung zwischen Anker und Feldmagnet in einer Triebmaschine.**

Im Kapitel IV wurden die Wechselwirkungen zwischen Anker und Feldmagnet einer Dynamomaschine im Einzelnen betrachtet, jedoch nur in Beziehung auf den Fall, dass die Maschine als Stromerzeuger dient. Der in den Ankerwickelungen inducirte Strom sucht dann den Ankerkern quer zu magnetisiren und das Feld in der Richtung der Drehung zu verzerren, während die Verschiebung der Bürsten im Sinne des Umlaufs, welche zur funkenlosen Stromwendung nöthig ist, eine entmagnetisirende Wirkung ausübt. In einer Triebmaschine findet dies auch statt, es besteht aber ein Unterschied. Der von einer äusseren Stromquelle gelieferte Strom magnetisirt den Anker und macht denselben zu einem kräftigen Magnet, dessen Pole, wie in der Dynamomaschine, fast rechtwinkelig zu der die Polstücke verbindenden Linie liegen würden, wenn nicht in diesem Falle den Bürsten gleichfalls eine Verschiebung ertheilt werden müsste. Man stelle sich vor, dass, wie in den meisten Figuren dieses Buches, der S-Pol des Feldmagnetes links, der N-Pol rechts liegt. Der Strom durchfliesse den Anker so, dass er den höchsten Punkt zum S-Pol und den tiefsten zum N-Pol zu machen sucht. Dies bedeutet, dass bei einem rechtsgängig gewickelten Anker der Strom in die obere Bürste eintritt und an der untern austritt, die obere Bürste demnach die positive Leitung bildet. In diesem Falle wird der Anker offenbar rechts herum laufen, weil der S-Pol oben vom S-Pol links abgestossen und vom N-Pol rechts angezogen wird. Die Maschine wird also nach rechts herumlaufen, wenn der Strom abwärts von der Spitze nach unten fliesst, ebenso wie der Anker eines Stromerzeugers laufen muss, um einen Strom aufwärts zu erzeugen. In jedem Falle ist die Richtung der inducirten elektromotorischen Kraft gleich — aufwärts — mit dem Strom im Stromerzeuger und gegen den Strom in der Triebmaschine.

Daraus folgt, dass eine Verschiebung der Bürsten nach vorwärts beim Motor die quermagnetisierende Kraft in eine solche umwandelt, die den Feldmagnet zu verstärken sucht, während eine Verschiebung nach rückwärts zu entmagnetisieren sucht. Da ferner bei der Vorwärtsverschiebung die Polarität des Ankers die des Feldmagnetes stärkt, so lässt sich eine Triebmaschine — abgesehen von der Frage der Funkenbildung — in Bewegung setzen, ohne dass irgend etwas geschieht, um den Feldmagnet zu erregen; der Anker inducirt einen Pol im Feldmagnet und bewegt sich dann herum nach diesem inducirten Pole zu. Vor vielen Jahren wurde diese Thatsache bei kleinen Triebmaschinen benutzt.

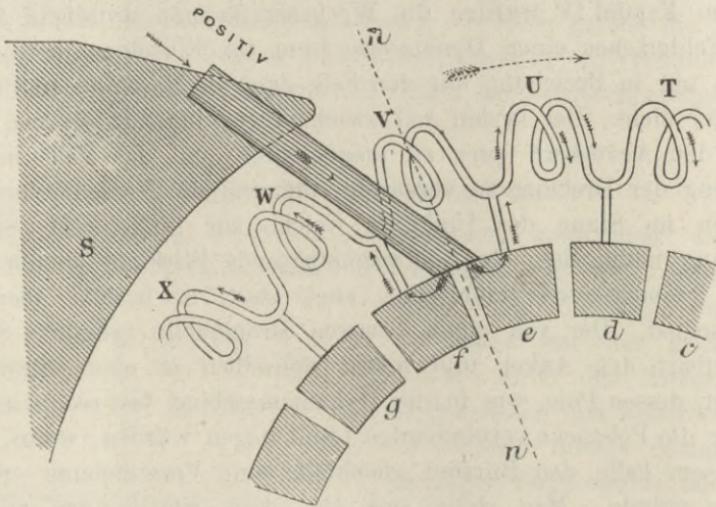


Fig. 334. Stromwendung in einer Ankerspule eines Motors.

Die quermagnetisierende Kraft äussert auch die Wirkung, in umgekehrter Weise wie bei einem Stromerzeuger, das Feld unterhalb der im Sinne der Bewegung verlaufenden Polspitzen zu schwächen und unterhalb der beiden andern zu verstärken. In der Triebmaschine (sogar auch dann, wenn keine Verschiebung der Bürsten stattfindet) sucht die quermagnetisierende Rückwirkung das Feld in einem dem Umlauf entgegengesetzten Sinne herumzudrehen.

Die Bedingungen für die geringste Funkenbildung gehen aus folgender Betrachtung hervor. Es steige (Fig. 334) eine Wicklung *W* links empor. Der Strom tritt in dieselbe durch die obere Bürste ein; die Wicklung ist der Sitz einer elektromotorischen Kraft, die den Strom zu hemmen oder umzukehren sucht. Soll keine Funken-

bildung entstehen, so muss die Wickelung in dem Augenblicke, in dem sie unter der Bürste vorbeiläuft und kurz geschlossen wird, sich durch ein Feld bewegen, das nicht nur genügend stark, sondern auch so beschaffen ist, dass es die Stromrichtung umzukehren sucht. Die Wickelung befindet sich schon in einem solchen Felde, der Vorgang der Stromwendung muss deshalb eintreten, bevor die Wickelung das Feld verlässt, er muss erfolgt sein, ehe die Wickelung zum höchsten Punkt gelangt. Es muss also die Bürste nach rückwärts verschoben werden, wenn keine Funkenbildung eintreten soll. Die neutrale Linie  $nn_1$  liegt deshalb in einer Triebmaschine nach rückwärts (links) geneigt. Da aber in jedem Falle sowohl Wirbelströme als Hysteresis das magnetische Feld etwas in der Richtung des Umlaufes zu verschieben suchen, wodurch in einem Stromerzeuger die Verschiebung der Bürsten grösser, in einer Triebmaschine kleiner wird, so wird folglich bei kleiner Stromstärke und gleicher Erregung die negative Verschiebung (nach rückwärts) in einer Triebmaschine etwas kleiner sein, als die positive Verschiebung (nach vorwärts) in einem Stromerzeuger<sup>1)</sup>.

Der Umstand, dass bei einer Triebmaschine der Anker den Feldmagnet in der Erregung unterstützt, wodurch das Gewicht des letzteren sich verringern lässt, führte Ayrton und Perry im Jahre 1883 dazu, den Bau von Maschinen mit schwachen Feldmagneten und kräftigen Ankern, die bei Vorwärtsverschiebung der Bürsten arbeiteten, zu befürworten<sup>2)</sup>.

Aus den vorstehenden Betrachtungen folgt indessen, dass, wenn man die Bürsten in einer Triebmaschine nach vorwärts verschiebt, um eine kräftigere Drehung zu erzielen, die Maschine unvermeidlich Funkenbildung zeigt, wenn nicht besondere Vorkehrungen, wie sie Sayers angegeben hat, zur Verhinderung der Funkenbildung angewendet werden.

Ein Minimum der Funkenbildung kann mit einem hohen Wirkungsgrade nur auf einem Wege vereinigt werden, nämlich durch eine solche Bauart der Maschine, bei der der Anker das magnetische Feld des Feldmagnetes nicht stört. Zu diesem Zwecke sind aber dieselben Regeln wie beim Bau eines Stromerzeugers zu beachten (vergl. Seite 361).

1) Dies scheint die Erklärung für die von Snell beobachteten, sonst unwichtigen, Unterschiede zu sein. Vergl. Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 19, S. 194. 1890. Abhandl. von Snell.

2) Journ. Soc. Electr. Engin., Bd. 12, Mai 1883.

Sayers, dessen Methode der Ankerwicklung mit Hilfswicklungen Seite 371 besprochen wurde, hat dieselbe Methode<sup>1)</sup> auch bei Triebmaschinen zur Anwendung gebracht. Bei seiner Anordnung arbeitet der Anker funkenlos selbst bei bedeutender Vorwärtsverschiebung der Bürsten, und ist so im Stande, die Magnetisirung der Feldmagnete zu unterstützen. Die Beschreibung eines solchen Motors folgt später.

Mordey hat die Analogieen zwischen Stromerzeugern und Triebmaschinen sorgfältig verfolgt und bemerkt, dass es in verschiedener Hinsicht sehr wichtig ist, die für eine gute Bauart der Stromerzeuger bestehenden Regeln auch für Triebmaschinen zu beachten. Die Entstehung von Wirbelströmen muss mit grösster Sorgfalt ausgeschlossen werden.

Die höchste Aufmerksamkeit muss den mechanischen Anordnungen gewidmet werden, welche die Kraft, die von dem magnetischen Felde auf die im Kreise liegenden Leiter ausgeübt wird, auf die Welle zu übertragen haben.

Vergleichen wir noch einmal sorgfältig die Bedingungen in betreff der Felder eines Stromerzeugers und einer Triebmaschine. In dem einen Falle wird der Anker mechanisch umgetrieben, während die magnetischen Kräfte ihn zurückzuziehen suchen. In dem anderen Falle suchen die magnetischen Kräfte den Anker herumzudrehen, und er wird dadurch zur Leistung mechanischer Arbeit befähigt.

Im ersten Falle ist eine mechanische Gegenwirkung vorhanden, die einen hemmenden Einfluss auf die Dampfmaschine ausübt. Im zweiten Falle tritt eine entgegengesetzte elektrische Wirkung auf (die inducirte elektromotorische Gegenkraft), welche den Strom zu hemmen sucht<sup>2)</sup>.

In beiden Fällen wird gleiche Bewegungsrichtung — rechts herum — angenommen. In beiden Fällen entsteht eine Verschiebung der Linien des Feldes; im Stromerzeuger wirkt die mechanische

1) Inst. Electr. Eng., Bd. 22, S. 377. 1893; Bd. 24. 1895.

2) Das Gesetz der in einem Stromerzeuger bei der mechanischen Bewegung auftretenden elektrischen Gegenwirkung ist in dem bekannten Gesetz von Lenz enthalten: „Der inducirte Strom hat stets eine solche Richtung, dass seine elektromagnetische Wirkung die den Strom erzeugende Bewegung zu hemmen sucht.“ Für die Triebmaschine lässt sich ein ähnliches Gesetz ableiten: „Die hervorgerufene Bewegung ist stets eine solche, dass die durch sie hervorgerufene magneto-electrische Induction den Strom zu hemmen sucht.“

Drehung so, als wenn der Magnetismus im Sinne der Bewegung herumgezogen würde, in der Triebmaschine dagegen sind die magnetischen Wirkungen derart, dass sie den Anker herumzudrehen suchen und eine mechanische Drehung hervorbringen.

Bei dem Stromerzeuger fanden wir, dass die Wirkung der Selbstinduction im Anker eine Vergrößerung der positiven Bürsterverschiebung bedingt, bei der Triebmaschine ist das Umgekehrte der Fall. Wenn eine Triebmaschine ohne Verschiebung benutzt, der Feldmagnet sehr schwach oder überhaupt nicht erregt wird, so läuft die Maschine in jeder Richtung, je nachdem man sie hat anlaufen lassen. Wird bei stärkerer Erregung des Feldmagnetes der Strom nur im Ankertheil umgekehrt, so kehrt sich die Drehrichtung auch um, aber die Bürstenlage muss ebenfalls umgekehrt werden, wenn die Maschine so funkenlos als vorher laufen soll. Kehrt man anstatt des Ankerstromes den Feldmagnetismus um, so tritt dieselbe Wirkung ein. Erfolgen beide genannten Umkehrungen zu gleicher Zeit, so läuft die Maschine ebenso, als ob nichts geändert wäre.

Dynamomaschinen, die als Stromerzeuger für Gleichstrom gewickelt und geschaltet sind, lassen sich in allen Fällen als Triebmaschinen verwenden, jedoch treten Unterschiede hervor.

Eine Reihenmaschine, die bei rechtsläufiger Drehung Strom giebt (und bei der deshalb auch eine Verschiebung der Bürsten nach rechts eintreten muss), wird, aus einer äusseren Stromquelle mit Strom versorgt, als Triebmaschine nach links herum gegen ihre Bürsten laufen. Um sie als Triebmaschine richtig einzustellen, muss man entweder die Schaltung des Ankers umkehren oder die des Feldmagnetes (in jedem dieser Fälle wird sie rechtsläufig), oder man kehrt die Bürstenlage um und giebt den Bürsten eine Verschiebung in entgegengesetzter Richtung (die Maschine wird dann linksläufig).

Eine zur Stromerzeugung eingestellte Nebenschlussmaschine läuft als Triebmaschine in derselben Richtung, wie sie als Stromerzeuger umlief; denn wenn der Strom im Anker dieselbe Richtung wie vorher besitzt, so wird der im Nebenschluss entgegengesetzt.

Eine Maschine mit gemischter Wickelung läuft als Triebmaschine in umgekehrtem Sinne gegen ihre Bürsten, wenn die Reihenwickelung kräftiger wirkt als der Nebenschluss; sie läuft in der Richtung der Bürstenlage, wenn der Nebenschlusstheil kräftiger wirkt. Sind die Verbindungen (wie bei Verbundmaschinen) so, dass der Feldmagnet die Summe der Wirkungen der Nebenschluss- und Reihenwickelung erhält, wenn die Maschine als Stromerzeuger benutzt wird, so kommt

die Differenz der Wirkungen in Betracht, wenn sie als Triebmaschine umläuft.

Bei Anwendung einer differential gewickelten Triebmaschine ergeben sich gewisse Vortheile, wie man später ersehen wird.

Ueber den Gebrauch von Wechselstrommaschinen als Triebmaschinen findet man Angaben im Kapitel XXIV und XXV.

#### Umsteuerung der Triebmaschinen.

Wie vorhin erläutert wurde, lässt sich die Drehrichtung einer Triebmaschine durch Umkehrung des Stromes im Anker ändern, während man gleichzeitig die Bürsten umstellt. Die Umkehrung des Stromes kann auch durch Drehung der Bürsten um 180 Grad bewirkt werden. Demzufolge lässt sich beides in einfacher Weise dadurch erreichen, dass man die Bürsten um 180 Grad  $- 2\varphi$  vorwärts schiebt, wenn  $\varphi$  den ursprünglichen Verschiebungswinkel bedeutet. Da die Bürsten aber dann in falscher Richtung stehen, so ist es zweckmässiger, einen zweiten Satz Bürsten zu verwenden, wie es Hopkinson behufs der Umsteuerung gethan hat. Er verwendet zwei Paar Bürsten, von denen jedes Paar um ein gemeinschaftliches Lager drehbar ist; das eine Paar hat eine Verschiebung nach vorwärts, das andere eine solche nach rückwärts; jedes derselben kann auf den Stromabgeber niedergedrückt werden. Durch Umlegung eines Hebels kann demnach zugleich die Bürstenverschiebung und die Stromrichtung geändert werden.

Für gewerbliche Verwendung von Triebmaschinen ist eine derartige Umsteuerung offenbar sehr zweckmässig; wenn die Schwierigkeiten in betreff der Funkenbildung durch die plötzliche Entfernung der Bürsten vom Stromabgeber vermieden werden, muss die Einrichtung sich besser erweisen, als jede andere mechanische Vorkehrung zur Umkehrung der Bewegung, die etwa in der Weise erfolgt, dass die Bewegung von der Achse der Maschine auf irgend eine andere Achse durch Umsteuerung übertragen wird. Elektrische Triebmaschinen besitzen in der Hinsicht einen wesentlichen Vortheil, dass man sie leicht unmittelbar mit der Welle der umzutreibenden Maschine verbinden kann. Für Motoren werden fast stets Kohlenbürsten verwendet, da sie für jede Drehungsrichtung passen.

Es sind noch verschiedene Formen der Umsteuerung vorgeschlagen worden, die demselben Zwecke dienen sollen.

Wenn die Feldmagnete im Verhältniss zum Anker so kräftig sind, dass den Bürsten keine Verschiebung ertheilt zu werden braucht, so kann die Drehrichtung durch Umkehrung der Polarität jedes Theiles geändert werden. Bei den grösseren Maschinen von Immisch entfernt die sehr kräftige Umsteuerung ein Paar Bürsten und legt an dieselben diametralen Punkte ein zweites Paar, aber in umgekehrter Lage bei umgekehrter Polarität an.

Die aus der Figur 248 c ersichtliche Bürstenform ist von Holroyd Smith für Triebmaschinen, die in jeder Richtung laufen sollen, angegeben worden.

Zu demselben Zwecke dienen die in Figur 249 dargestellten Kohlenbürsten.

Eine andere Art der Umkehrung hat der Verfasser<sup>1)</sup> im Jahre 1882 angegeben, die in der Figur 335 dargestellt ist. Sie besteht darin, dass man die eine Bürste mit der Mitte der Wicklungen des Feldmagnetes verbindet, die als Nebenschluss zu den

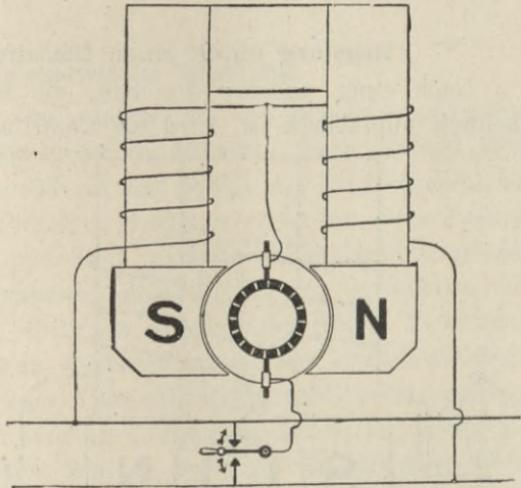


Fig. 335. Elektrische Umsteuerung für eine Triebmaschine.

Hauptleitungen liegen und keinen sehr grossen Widerstand haben dürfen. Der Strom im Anker lässt sich durch einfaches Anschalten der zweiten Bürste an die eine oder die andere Hauptleitung bequem umkehren. Diese Methode hat bei dem Regulator von Maquaire Anwendung gefunden, passt aber nicht für grosse Motoren.

### Regelung der Thätigkeit von Triebmaschinen.

Für elektrische Triebmaschinen ist es von besonderer Bedeutung, die Anordnung so zu treffen, dass sie bei irgend welcher Belastung mit gleichförmiger Geschwindigkeit laufen.

Zum Betriebe von Drehbänken sowie für viele andere Maschinen ist ein regelmässiger Umlauf sehr wesentlich; die Triebmaschine

1) Englisches Patent [1882] Nr. 5122.

darf nicht anfangen schneller zu laufen, sobald der Druck des Schneidzeuges aufhört zu wirken.

Einer der ersten Versuche zur Herstellung einer selbstthätigen Regelung der Geschwindigkeit wurde im Jahre 1878 von Deprez angestellt. Nach seiner sinnreichen Methode wurde der Strom in vollständig regelmässiger Art und Weise durch eine in den Stromkreis gebrachte schwingende Bremse unterbrochen. Die benutzte Triebmaschine besass einen einfachen zweitheiligen Stromwender, dessen Umlauf die Stromschlüsse und Stromunterbrechungen richtig bestimmte. Bei grossen Triebmaschinen ist diese Methode nicht anwendbar.

#### Regelung durch einen Centrifugal-Apparat.

Nach einer anderen Methode, die aber für grosse Betriebe ebenfalls unpraktisch ist, wird ein Centrifugal-Apparat benutzt, um

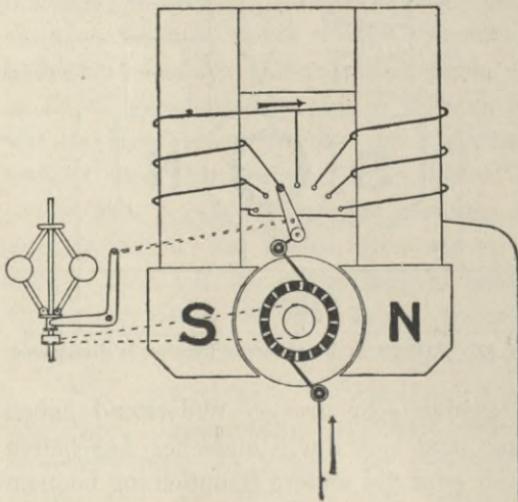


Fig. 336. Selbstthätiger Centrifugal-Regler.

den Stromkreis zu öffnen, sobald bei der Triebmaschine eine gewisse Geschwindigkeit überschritten wird. Eine solche Maschine läuft zuckend schnell und langsam. Man kann auch einen Centrifugal-Apparat verwenden, um den Widerstand eines Theiles des Stromkreises zu ändern; um etwa eine selbstthätige Berichtigung der Stromstärke vorzunehmen, indem man einen

Theil des Stromes durch einen Nebenschluss vom Feldmagnet leitet; man kann auch im Verhältniss zur Geschwindigkeit Widerstand in die Wicklungen einer Nebenschlussmaschine bringen.

Die Figur 336 zeigt, wie ein von der Maschine umgetriebener Centrifugal-Regulator die Zahl der erregenden Wicklungen des Feldmagnetes zu ändern vermag, indem der Magnetismus anwächst, wenn die Maschine zu schnell läuft und so die Geschwindigkeit wieder herabdrückt. Diese Methode wurde von Brush angegeben; sie eignet sich für Triebmaschinen, die in Stromkreisen für Bogenlicht eingeschaltet sind.

Ayrton und Perry haben verschiedene Formen eines periodisch wirkenden Centrifugal-Apparates vorgeschlagen. Mittels dieser Einrichtung wird in jedem Umlaufe nur während eines Theiles desselben Kraft zugeführt, und das zeitliche Verhältniss in jedem Umlaufe, während dessen Kraft zugeführt wird, richtet sich nach der Geschwindigkeit. Eine Hauptschwierigkeit bei diesen Regulatoren ist die Vermeidung der Funkenbildung, sie sind daher nur bei sehr kleinen Motoren anwendbar. Bei allen Centrifugal-Apparaten herrscht aber ein Grundmangel: sie wirken alle zu spät. Sie erfüllen ihre Aufgabe erst, wenn die Geschwindigkeit sich bereits geändert hat.

### Dynamometrische Regelung.

Der Verfasser<sup>1)</sup> hat eine andere Art von Regelung angegeben, gegen die sich der vorhin genannte Einwand nicht erheben lässt. Nach seinem Vorschlage soll an der Welle der Triebmaschine ein Dynamometer angebracht werden. Letzteres wirkt auf einen Apparat, der entweder aus einer periodisch wirkenden Regelungsvorrichtung besteht, die den Strom während eines Theiles der Umdrehung verzweigt oder unterbricht, oder aus einem einstellbaren Widerstand, der mit dem Stromkreise in Verbindung ist. Der dynamometrische Theil kann die Form eines Riemendynamometers (z. B. des von von Hefner-Alteneck) oder eines Riemenscheiben-Dynamometers (z. B. des von Morin oder Smith) besitzen. Im letzteren Falle, der bequemer ist, läuft eine lose sitzende Riemenscheibe auf der Maschinenwelle und ist mittels einer federnden Vorrichtung mit der festen Riemenscheibe verbunden. Durch den Umlauf der Welle wird die feste Riemenscheibe gegen die lose Scheibe gedreht, und der Winkel der Voreilung ist dem Drehungsmoment proportional. Durch die Grösse dieses Winkels wird die Thätigkeit des regelnden Theiles der Anordnung bestimmt. In diesem Falle wirkt der Regulator demnach nicht gemäss der Geschwindigkeit der Maschine, sondern entsprechend der herrschenden Belastung. Jede Aenderung der Belastung wirkt sofort, ehe die Geschwindigkeit sich noch hat ändern können. Wenn ein solcher Apparat zweckmässig angebracht ist, kann er sogar bewirken, dass der Motor sich schneller dreht, wenn eine Belastung eintritt, als wenn er leer läuft.

---

1) *Englisches Patent* [1883] Nr. 1639.

### Elektrische Regelung.

Noch eine andere, nicht auf der Thätigkeit umlaufender Theile beruhende Methode ist von dem Verfasser in Vorschlag gebracht worden.

Als Feldmagnet wird ein doppelter Satz Pole benutzt, die rücksichtlich der Bürsten der Maschine unter verschiedenen Winkeln stehen. Das eine, unter gewisser Verschiebung angeordnete Polpaar wird von Reihenwickelungen beeinflusst; das zweite, unter einer anderen Verschiebung angeordnete Polpaar wird von Nebenschlusswickelungen beeinflusst (vergl. Fig. 265 c). Wenn sowohl die Nebenschluss- als die Reihenwickelungen thätig sind, so wird ein resultirender Pol in einer Zwischenlage entstehen. Wird die Belastung der Maschine vermindert, so sucht sie schneller zu laufen, der Strom im Nebenschlusstheil wächst an und nimmt in der Reihenwickelung ab; die wirksame Verschiebung wird demzufolge geändert und dem Anwachsen der Geschwindigkeit vorgebeugt.

Im Jahre 1880 liess sich G. G. André eine Triebmaschine patentiren, deren Feldmagnete in zwei besonderen Wickelungskreisen lagen; ein Kreis bestand aus dickem, der andere aus dünnem Draht, der Strom verzweigte sich in diese beiden Wickelungen; der Anker war wie eine Brücke zu diesen Zweigen geschaltet, genau wie das Galvanometer in der Brücke von Wheatstone. Später wurden Maschinen auf dieser Grundlage von Sprague hergestellt; sie zeigen eine bemerkenswerth gute Regelung.

Die von Ayrton und Perry<sup>1)</sup> angegebene selbstthätige Regelung ist unzweifelhaft die theoretisch vollkommenste, sie besteht aus einer Differentialwickelung. Diese Theorie der Selbstregelung wird in Folgendem erläutert.

### Theorie der selbstregelnden Triebmaschinen.

Im Kapitel XI über selbstregelnde Dynamomaschinen wurde die Aufgabe behandelt, wie eine Maschine anzuordnen ist, damit sie einen Stromkreis mit elektrischer Energie von gleichbleibender Spannung versieht, wenn sie mit gleichbleibender Geschwindigkeit umgetrieben wird. Die Lösung bestand in der Anwendung gewisser Schaltungen für die Feldmagnete, die ein vom Strome im Hauptkreise unabhängiges anfängliches magnetisches Feld ergeben.

---

1) Journ. Soc. Telegr. Engineers, Bd. 12. Mai 1883; ferner eine Abhandlung im Phil. Mag., Jahrgang 1888.

Diese Aufgabe kann man auch umgekehrt stellen, d. h. Triebmaschinen mit einer solchen Schaltung der Feldmagnete herstellen, dass bei der elektrischen Versorgung unter der Bedingung gleichbleibender Spannung in den Zuführungsleitungen die Geschwindigkeit bei jeder Belastung gleichbleibt. Ohne numerische Berechnungen lässt sich einsehen, dass die Wicklungen gegeneinander wirken müssen — die eine muss das Bestreben haben, den Feldmagnet zu entmagnetisieren, die andere ihn zu magnetisieren.

Es sei eine Triebmaschine mit Nebenschluss vorausgesetzt, die Strom von gleichbleibender Spannung  $\mathcal{E}$  erhält und mit einer bestimmten Geschwindigkeit und Belastung betrieben wird. Hört die Belastung plötzlich auf, so fängt die Maschine an schneller zu laufen, dadurch nimmt die elektromotorische Gegenkraft zu und schwächt den Ankerstrom. Aber die Abnahme des Stromes genügt nicht vollständig, um die Geschwindigkeit herabzudrücken, da der innere Widerstand des Ankers verhindert, dass die gesammte Energie des Ankerstromes als Arbeit nutzbar werde. Eine entmagnetisierende Reihenwicklung, die auf den Feldmagnet wirkt, wird die gewünschte Wirkung herbeiführen. Bei jeder Verminderung der Belastung kann eine entsprechende Herabminderung des Stromes eintreten; das resultierende Anwachsen des Magnetismus der Feldmagnete ist genügend, um die erforderliche grössere elektromotorische Gegenkraft ohne jedes Anwachsen der Geschwindigkeit zu erhalten. Man kann diese Schaltung demnach als eine Differential-schaltung betrachten. Für Vertheilung bei gleichbleibender Stromstärke wird keine Differential-Methode oder Zusatzmethode genügend wirken, es sind dann besondere Regulatoren anzuwenden.

In der nachstehenden Uebersicht finden sich die Anordnungen für selbstregelnde Stromerzeuger denen für selbstregelnde Triebmaschinen gegenübergestellt.

| Stromerzeuger.<br>Gegeben                                         |                                                                               | Triebmaschine.<br>Verlangt                                          |                                                                               |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| gleichbleibende Geschwindigkeit.<br>$e$ soll gleichbleibend sein. |                                                                               | gleichbleibende Geschwindigkeit<br>$\mathcal{E}$ ist gleichbleibend |                                                                               |
| { Anfänglicher<br>Magnetismus<br>von:                             | { Stahlmagneten.<br>Besonderer Er-<br>regung.<br>Nebenschluss-<br>wicklungen. | { Anfänglicher<br>Magnetismus<br>von:                               | { Stahlmagneten.<br>Besonderer Er-<br>regung.<br>Nebenschluss-<br>wicklungen. |
| + regelnden<br>Reihenwicklungen.                                  |                                                                               | - regelnden<br>Reihenwicklungen.                                    |                                                                               |

Bei Erörterung der Theorie der selbstregelnden Triebmaschine schlagen wir im Allgemeinen dieselben Wege wie bei dem selbstregelnden Stromerzeuger ein; wir müssen eine Gleichung finden, aus der die gewünschte Bedingung der Beständigkeit hervorgeht.

$\mathcal{E}$  ist gleichbleibend und gegeben.

Nebenschluss- oder besonders erregte Triebmaschine mit regelnder Reihenwicklung.

Für die im Anker entwickelte elektromotorische Gegenkraft findet man:

$$E = nN\mathcal{E},$$

und

$$E = \mathcal{E} - i(r_a + r_m).$$

$\mathcal{E}$  setzt sich aus zwei Theilen zusammen, nämlich:  $\mathcal{E}'$ , dem dauernd vorhandenen Antheil (welcher bei einem Nebenschlussmotor gleich  $qS_s i_s$  ist) und einem anderen Theil, der von der Reihenwicklung abhängt und den wir mit  $qS_m i$  bezeichnen; hier hat  $q$  dieselbe Bedeutung wie auf Seite 214 und ist gleich  $4\pi$  dividirt durch die zehnfache Summe der magnetischen Widerstände;  $S_m$  ist die Zahl der Windungen der Hauptstromspule. Der Werth hängt deshalb von der Durchlässigkeit des Eisens und also von dem Sättigungsgrade des magnetischen Kreises ab. Wir können demnach setzen:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}' - qS_m i.$$

Würden wir  $+$  anstatt  $-$  setzen, so ergäbe sich eine Lösung mit negativem Vorzeichen, was anzeigt, dass die Windungen so anzuordnen sind, dass der Strom in der Reihenwicklung in negativer, d. h. entmagnetisirender Richtung kreist. Da wir bereits wissen, dass dies der Fall sein muss, benutzen wir gleich das negative Vorzeichen. Wir nehmen auch an, dass keine Gegenwirkungen des Ankers vorhanden sind.

Durch Einsetzen des Werthes von  $\mathcal{E}$  in die Grundgleichung ergibt sich:

$$E = n(N\mathcal{E}' - NqS_m i).$$

Durch Verbindung dieser Gleichung mit der obigen für  $E$  erhalten wir:

$$n = \frac{\mathcal{E} - i(r_a + r_m)}{N\mathcal{E}' - NqS_m i} \dots \dots \dots \text{(I).}$$

Es ist nunmehr zu prüfen, ob die verschiedenen Theile des Ausdrucks veränderlich oder gleichbleibend sind; daraus ist eine Beziehung abzuleiten, nach der  $n$  gleichbleibend gemacht wird. Zähler und Nenner enthalten jeder zwei Glieder, das erste ist eine Constante, jedes zweite enthält die veränderliche Grösse  $i$ . Der

Bruch kann aber nur dann einen gleichbleibenden Werth besitzen, wenn die beiden Coëfficienten der Veränderlichen in den zweiten Gliedern in demselben Verhältniss zu einander stehen, als die ersten Glieder; soll  $n$  gleichbleibend sein, so muss

$$\frac{\mathcal{E}}{N\mathcal{E}'} = \frac{r_a + r_m}{Nq S_m}$$

oder

$$\frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}'} = \frac{r_a + r_m}{q S_m} \dots \dots \dots \text{(II).}$$

Dies ist die gesuchte Bedingungsgleichung. Trifft diese Bedingung zu (es ist zu bemerken, dass die Menge der erforderlichen Reihenwindungen, wie bei der selbstregelnden Dynamomaschine, proportional dem inneren Widerstande der Maschine ist), so ist die Geschwindigkeit gleichbleibend und besitzt den Werth:

$$n = \frac{\mathcal{E}}{N\mathcal{E}'} = \frac{r_a + r_m}{Nq S_m} \dots \dots \dots \text{(III).}$$

Die erste dieser Beziehungen zeigt uns, dass die Geschwindigkeit, mit der die Maschine läuft, dieselbe ist, bei der sie als Stromerzeuger im offenen Kreise getrieben, eine elektromotorische Kraft gleich der der Stromquelle an den Hauptleitungen liefern würde. Läuft sie als unbelastete Triebmaschine, so müsste sie folglich so schnell laufen, dass ihr Ankerstrom auf ein Minimum herabgedrückt wird, was bei eben dieser Geschwindigkeit geschieht.

Wenn man den dauernden Theil des Magnetismus stark genug macht, so ist klar, dass die kritische Geschwindigkeit, d. h. diejenige, bei der die Maschine selbstregelnd ist, beliebig gering gemacht werden kann. Wenn die Belastung der Maschine erhöht wird, so muss der Ankerstrom verstärkt werden. Dieser stärkere Strom kann nicht vorhanden sein, wenn nicht in irgend einer Weise die elektromotorische Gegenkraft des Ankers vermindert wird. Soll die Geschwindigkeit dann aufrecht erhalten werden, so geschieht dies durch Ermässigung des Magnetismus, der infolge des verstärkten Stromes durch die entmagnetisirenden Wickelungen herabgedrückt wird.

Die mit  $q$  bezeichnete Grösse, die von der Durchlässigkeit des Eisens abhängt, müsste also zu einem Durchschnittswerth zwischen den beiden Grenzen, die sie bei der maximalen Belastung und bei der Belastung Null besitzt, angenommen werden; da bei gut entworfenen Maschinen die Widerstände im Ankerkreis sehr gering und der Wirkungsgrad sehr hoch ist, kann die entmagnetisirende Wirkung der Hauptstromwicklung selbst bei voller Belastung die

Magnetisirung nur um wenige Procente herabdrücken. Dazu wird vermöge der Rückwärtsverschiebung der Bürsten, welche zur Verhinderung der Funkenbildung nothwendig ist, der Anker selbst theilweise wie eine entmagnetisirende Hauptstromwicklung wirken und so eine Aenderung der Permeabilität ausgleichen.

Ist die Belastung am grössten, wenn z. B. die Maschine mit 80 Procent Wirkungsgrad läuft, so ist  $E$  80 Procent von  $\mathcal{E}$ , d. h.  $\mathcal{E}$  beträgt 80 Procent von  $\mathcal{E}'$ . In diesen Grenzen der Magnetisirung muss dann der Werth von  $q$  im Mittel gehalten werden. Es geht aus (III) hervor, dass, wenn die Maschine schon mit einer gegebenen Zahl Reihenwickelungen versehen ist, ein Werth  $\mathcal{E}$  ermittelt werden kann, für den die Bedingung der Selbstregelung noch erfüllt wird.

Beim Nebenschlussmotor kann obige Gleichung noch vereinfacht werden; es ist  $\mathcal{E} = i_s r_s$ , und  $\mathcal{E}' = q S_s i_s$ . Setzen wir diese Werthe in (II) ein, so erhalten wir

$$\frac{S_s}{S_m} = \frac{r_s}{r_a + r_m} \dots \dots \dots (IV).$$

Vorstehende Form ergibt die Regel von Ayrton und Perry für die Wickelung von selbstregelnden Triebmaschinen. Triebmaschinen, die in dem nach Gleichung (IV) angegebenen Verhältniss differential gewickelt sind, werden fast genau selbstregelnd. Einige ausgezeichnete Maschinen von Sprague werden nach dieser Regel gewickelt. Eine Eigenthümlichkeit der Wickelungsmethode ist folgende:

Die Maschine steht still und der Strom werde angelassen. Die vom Nebenschluss stammenden Ampere-Windungen sind gleich  $\mathcal{E} S_s / r_s$ , die von der Reihenwicklung herrührenden gleich  $\mathcal{E} S_m / r_a + r_m$ , und diese sind nach Gleichung (IV) einander gleich und von entgegengesetztem Vorzeichen.

Ueberhaupt sollte dann kein Magnetismus erregt werden. Verschiebt man die Bürsten etwas, so kommt die magnetisirende Neigung des Ankers zur Geltung; erhalten die Bürsten eine beträchtliche negative Verschiebung, so ergibt sich als Wirkung, dass der Feldmagnet in falschem Sinne magnetisirt wird und die Maschine deshalb auch verkehrt anläuft. Diesem Mangel kann man durch Ausschaltung der Reihenwicklung oder Umschaltung derselben abhelfen, bis die Maschine ihre Geschwindigkeit erhalten hat. Die letztere Massregel ist vorzuziehen, da das von der Reihenmaschine zugefügte Drehmoment von grossem Vortheil ist, wenn es sich um Ueberwindung des statischen Widerstandes beim Anlauf handelt.

Die Zahl der Nebenschlusswindungen sollte theoretisch offenbar so gross sein, dass die mit der gegebenen Geschwindigkeit bei offenem Kreise umgetriebene Maschine eine elektromotorische Kraft  $\mathcal{E}$  erzeugt.

Praktische Bestimmung der Nebenschluss- und Reihenwicklung<sup>1)</sup>.

Wie bei einem Stromerzeuger mit gemischter Wickelung lässt sich auch für Triebmaschinen die Wickelung durch einfache Versuche bestimmen.

Man benutzt dazu eine vorläufig umgelegte, besonders erregte Wickelung und einen Widerstand, der dem späteren Werthe  $r_m$  gleich ist und dem Ankerwiderstand zugefügt wird. Zunächst lässt man die Maschine ohne Belastung bei der geeigneten Spannung  $\mathcal{E}$  laufen und erregt die Wickelung, wobei diejenige Zahl von Ampere-Windungen beobachtet wird, die nothwendig ist, um die Geschwindigkeit auf den Werth  $n$  zu bringen. Die Zahl der Ampere-Windungen ist in diesem Falle gleich  $S_s i_s$ , wenn  $i_s$  die Stromstärke bedeutet, die aus wirthschaftlichen Gründen für den Nebenschluss anzuwenden ist. Dann lässt man die Maschine bei voller Belastung laufen und erregt den Feldmagnet so, dass die Geschwindigkeit  $n$  gleich bleibt. Hieraus und aus dem ersten Versuch lässt sich  $S_m$  berechnen.

Der Wirkungsgrad einer differential gewickelten Maschine kann nicht so gross als der einer nicht differential gewickelten Maschine sein, weil die bei ersterer zur Magnetisirung des Feldmagnetes aufgewendete Energie im Verhältniss zur erzeugten Magnetisirung grösser ist.

### Mechanische Charakteristiken von gemischt und differential gewickelten Triebmaschinen.

Es soll nunmehr die graphische Darstellung der Beziehungen zwischen Geschwindigkeit und Drehungsmoment bei Triebmaschinen, die mit gemischten Wickelungen versehen sind, betrachtet werden<sup>2)</sup>.

Die Curven, die sich auf Versorgung bei Gleichspannung beziehen, zeigt die Figur 337. Die Buchstaben  $S$  und  $Z$  beziehen sich auf Reihenwickelungen und Nebenschlusswickelungen. Die Gestalten der Curven für gemischte Wickelungen unterscheiden sich je nach den Verhältnissen der Wickelungssätze. Am wichtigsten ist die mit  $Z-S$  bezeichnete Wickelung, die wenige Reihenwickelungen

1) Diese Bestimmungsart weicht von derjenigen Anordnung, welche Ayrton und Perry in ihrer Abhandlung über Elektromotoren im Journ. Soc. Teleg. Eng., Mai 1883, angegeben haben, ab. Ihre Methode gründet sich darauf, dass an den Polen der Feldmagnete ein Raum frei gelassen ist, wo das Feld als constant angenommen ist.

2) Die Curven für Triebmaschinen mit gemischter Wickelung sind dem Werke von Frölich, Die dynamoelektrische Maschine, entnommen. Aehnliche Curven wurden auch von Rechniewski entwickelt, vergl. Séances de la Société de Physique, 1885, Seite 197.

besitzt, um den Abfall, welcher bei der reinen Nebenschlusswicklung stattfindet, auszugleichen. Bis zu einer gewissen Grenze ist die Geschwindigkeit fast gleichbleibend, das Drehungsmoment erreicht indessen dann sein Maximum.

Bei Versorgung mit gleichbleibendem Strome ist, wie die Figur 338 zeigt, die Differentialwicklung mit grossem Nebenschluss und kleiner Reihenwicklung die einzige, die annähernd eine gleichbleibende Geschwindigkeit erzielt. Denn ebenso wie beim Stromerzeuger für gleichbleibende Stromstärke, muss auch hier die Veränderung des Magnetismus durch einen sehr bedeutenden Bereich

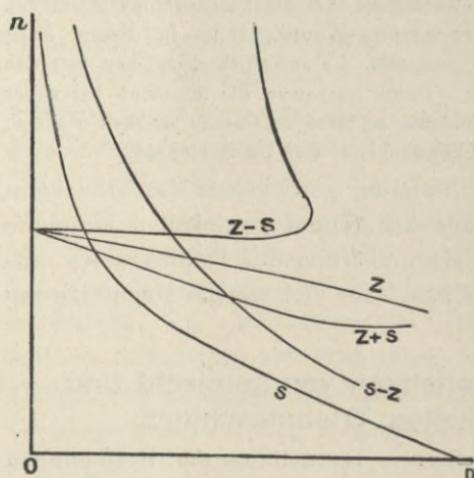


Fig. 337. Mechanische Charakteristiken bei constanter Spannung.

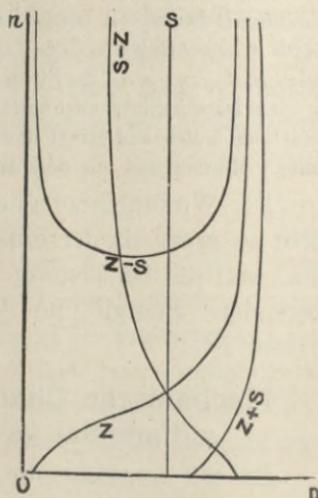


Fig. 338. Mechanische Charakteristiken bei constanter Stromstärke.

hindurch vor sich gehen, und man gelangt nicht zur Innehaltung des Mittelwerthes der magnetischen Durchlässigkeit. —

Eine sehr schöne graphische Methode zur Behandlung der Aufgabe der Selbstregelung von Triebmaschinen hat Picou in *La Lumière électrique*, Bd. 23, S. 114, 1887, veröffentlicht.

**Nebenschluss-Triebmaschine.** Mordey<sup>1)</sup> hat gefunden, dass bei einer sehr gut gebauten Nebenschlussmaschine, die aus den Hauptleitungen bei gleichbleibender Spannung versorgt wird, die Geschwindigkeit bei jeglicher Belastung die gleiche bleibt<sup>2)</sup>. Eine solche Maschine muss einen sehr geringen Ankerwiderstand und sehr grossen Widerstand im Nebenschluss besitzen; die Feldmagnete müssen

1) Vergl. *Phil. Mag.*, Januar 1886.

2) Es lässt sich dies aus den Gleichungen Seite 495 ersehen. Setzt man  $r_a + r_m = 0$ , so ergibt die Regelungsbedingung  $S = 0$ .

gegenüber dem Anker sehr kräftig sein, der Anker selbst muss gut geblättert und eingetheilt werden, so dass Wirbelströme und Selbstinduction auf das geringste Maass herabgedrückt werden.

Die geringe entmagnetisirende Wirkung des Ankers, die bei einer negativen Bürstenverschiebung eintritt, ersetzt thatsächlich die einer besonderen entmagnetisirenden Wickelung.

Die nachstehenden Ergebnisse einer Prüfung erweisen sich für alle Belastungen innerhalb der Arbeitsgrenzen bis auf 1,5 Procent gleichbleibend.

| Klemmen-<br>spannung | Stromstärke<br>Ampere | Leistung<br>P | Umläufe<br>in der Minute | Drehmoment<br>kgm |
|----------------------|-----------------------|---------------|--------------------------|-------------------|
| 68,4                 | 44                    | 1,1           | 1125                     | 0,71              |
| 68,4                 | 126                   | 7,4           | 1120                     | 4,57              |
| 68,4                 | 165,5                 | 10,36         | 1115                     | 6,68              |
| 68,4                 | 180                   | 11,14         | 1110                     | 7,26              |

Bei geringerer elektromotorischer Kraft regulirte sich dieselbe Maschine fast ebenso gut, aber mit geringerer Geschwindigkeit. Besonders wenn die Maschine wenig leistete, wurde beobachtet, dass die Geschwindigkeit durch die Abschwächung des Feldes angewachsen war.

### Andere Methoden zur Regelung von Triebmaschinen.

Mordey und Watson haben einen anderen Vorschlag gemacht. Sie legen zwei Wickelungen auf den Anker; für jede derselben ist ein besonderer Stromwender bestimmt. Die eine Wickelung — Hauptwickelung — bildet den gewöhnlichen Ankerkreis der Maschine und wird mit Strom aus der äusseren Stromquelle versehen, die den Umlauf des Ankers herbeiführt. Die zweite Wickelung — die regelnde Ankerwickelung — ist nur klein und über oder seitwärts der Hauptwickelung angeordnet. Diese Zusatzwickelung wird nicht mit den Hauptleitungen oder einer Stromquelle verbunden, sondern mit der Feldwickelung unter Zuhilfenahme eines besonderen Stromabgebers und von Bürsten. Man bemerkt, wie diese in dem Felde umlaufende Zusatzwickelung einen Stromerzeuger darstellt. Es tritt dann Folgendes ein: Entsteht aus Anlass einer Verminderung der Belastung eine Neigung zum Anwachsen der Geschwindigkeit, so sucht die Zusatzwickelung die Feldstärke zu vergrössern, indem den Feldwickelungen mehr Strom zugeführt wird; die entgegenwirkende elektromotorische Kraft der Maschine steigt dann an,

vermindert den aus den Hauptleitungen zugeführten Strombetrag und drückt die Geschwindigkeit auf ihren Regelbetrag herab.

Die Zunahme der Belastung sucht anderseits die Geschwindigkeit herabzudrücken; hiergegen wirkt die Verminderung des von der Zusatzwicklung herrührenden Stromes und dadurch das Nachlassen der entgegenwirkenden elektromotorischen Kraft der Maschine, was ein Anwachsen des aus den Hauptleitungen zugeführten Stromes zur Folge hat.

Man sieht, dass die vorgeschriebene Einrichtung keiner so grossen Aufwendung von Energie für die Felder als eine Differentialwicklung bedarf, auch nicht den Einwand zulässt, dass die Maschine in verkehrter Richtung anläuft. Anderseits hat man aber einen zweiten Stromabgeber nothwendig. Mit dieser Methode sind gute Ergebnisse erzielt worden.

Triebmaschinen für gleichbleibende Stromstärke lassen sich durch Anbringung eines veränderlichen magnetischen Nebenschlusses regeln, in umgekehrter Weise, wie dies von Trotter für Stromerzeuger angegeben worden ist. Verschiedene andere Methoden durch Aenderung des Magnetismus sind vorgeschlagen worden, wenige aber sind selbstthätig oder zuverlässig.

---

## Kapitel XXI.

### Neuere Formen von Triebmaschinen für Gleichstrom.

---

Beinahe jede gute neuere Dynamomaschine (mit unabhängiger Erregung, Nebenschlusswicklung oder gemischter Wickelung) lässt sich als Triebmaschine benutzen, wenn man ihr Strom von passender Spannung zuführt; man hat nur darauf zu achten, dass die Bürsten richtig eingestellt werden und die so benutzte Maschine eine solche ist, die bei der passenden Geschwindigkeit auch die passende Spannung liefert. Für den Entwurf von Triebmaschinen gelten die gleichen Grundsätze wie für den Entwurf von Stromerzeugern<sup>1)</sup>, denn die gleichen Eigenschaften: geringer innerer Widerstand, kräftige Feldmagnete und Ausschluss von Wirbelströmen, die bei einem Stromerzeuger erwünscht sind, sind auch bei der Herstellung einer Triebmaschine anzustreben. Es sei etwa beabsichtigt, eine Triebmaschine für 10 P zu bauen, die 500 Umläufe in der Minute bei 200 Volt Spannung liefert. Die Leistung entspricht 7360 Watt, bei 85 Procent nutzbarem Wirkungsgrad werden 8659 Watt zuzuführen sein. Wenn der elektrische Wirkungsgrad 90 Procent beträgt, so muss die Maschine 180 Volt elektromotorische Gegenkraft entwickeln können. Durch Division der 8659 Watt durch 180 Volt findet man 48,1 Ampere als diejenige Stromstärke, die sie bei der Regelbelastung aufnimmt. Baut man also eine Dynamomaschine mit kräftigem Feldmagnet, die 50 Ampere bei 180 Volt Spannung und 500 Umläufen in der Minute liefern kann, so entspricht diese Maschine den gestellten Bedingungen.

Snell hat folgende Regeln zur Bestimmung der Leistung angegeben, die mit Sicherheit und dauernd von Triebmaschinen entnommen werden kann:

---

1) Vergl. eine Abhandlung von Snell in *The Electrician*, Bd. 22, S. 313 und 403, 1889; auch *Journ. Inst. Electr. Engin.*, Bd. 20, 1891.

$$\begin{aligned} \text{Zweipoliger Ringanker} & \quad \frac{463}{10^7} l d^2 n \text{ kgm,} \\ \text{Zweipoliger Trommelanker} & \quad \frac{6945}{10^8} l d^2 n \text{ »} \end{aligned}$$

wenn  $l$  die Länge,  $d$  der Durchmesser des Ankers in Centimetern,  $n$  die Zahl der Umläufe in der Minute bedeutet.

Nach den oben gegebenen Erklärungen könnte es scheinen, als wenn jede Beschreibung von Triebmaschinen überflüssig wäre; da indessen gewisse besondere Formen für Triebmaschinen sich herausgebildet haben, so sollen diese hier beschrieben werden.

Unter den Triebmaschinen waren früher besondere Formen von Ayrton und Perry beliebt, welche einen festen äusseren Ringanker und einen inneren umlaufenden Magnet besaßen. Ein baulicher Mangel war der zu schwache Feldmagnet, so dass Funkengebung entstand. Obgleich sonst im Bau sehr gedrängt und bequem, kamen die Maschinen ausser Gebrauch. Die Maschinen waren in den ersten Ausgaben dieses Werkes abgebildet. Später wurden ausgezeichnete Formen von Reckenzaun, Immisch und Anderen angegeben, welche gleichfalls in den früheren Ausgaben dargestellt waren. Reckenzaun führte die nützliche Neuerung ein, die Reihenwicklung der Feldmagnete von Triebmaschinen für Zugbeförderung in der Weise herzustellen, dass auf jedem Schenkel zwei, in manchen Fällen auch drei Spulen angebracht wurden, die man neben- oder hintereinander schalten konnte, um die erregende Kraft zu verändern und beim Betriebe verschiedene Leistungen und Geschwindigkeiten zu erzielen, ohne zu künstlichen Widerständen greifen zu müssen, wodurch beim Anlaufen des Wagens sich ein grosses Drehungsmoment erreichen liess.

Die Triebmaschinen von Immisch gehörten in England zu den ersten, die sich durch vorzügliche mechanische Bauart auszeichneten.

Bei ihnen wurden Kohlenbürsten nach Figur 249 angewendet. Die Art, wie die Kernscheiben bei den grösseren Maschinen angetrieben wurden, zeigt Figur 224.

Alle grösseren Firmen, welche Gleichstrom-Dynamomaschinen bauen, liefern auch Triebmaschinen, in einzelnen Fällen auch in besonderen Mustern, wobei der einzige wesentliche Unterschied der ist, dass beim Motor gewöhnlich die Feldmagnete höher-gesättigt und verhältnissmässig kräftiger sind, als bei der gleich grossen Dynamomaschine. Wenn zwei Maschinen zusammen arbeiten als

Stromerzeuger und Triebmaschine, von denen Erstere mit constanter Geschwindigkeit angetrieben wird, wird die Andere nicht ebenfalls bei allen Belastungen mit constanter Geschwindigkeit laufen, wenn beide von ganz der gleichen Bauart und Grösse sind, denn die dem Motor gegebene Spannung fällt, sowie der Strom im äusseren Kreise steigt. Damit der Motor mit constanter Geschwindigkeit umlaufe, muss die Zahl der Ankerleiter eine geringere sein und in geradem Verhältniss zu dem gewünschten Nutzeffect stehen. Wenn z. B. der Nutzeffect der Uebertragung 85 Procent sein soll, muss der Anker der Triebmaschine nur 85 Procent der Leiterzahl haben, welche dieselbe Maschine als Stromerzeuger haben würde.

Triebmaschinen von Sprague. — Mehrere Firmen haben aus der Herstellung von Motoren eine Specialität gemacht. Unter den amerikanischen Ingenieuren trat schon früh Sprague mit mehreren Motorformen von ausgezeichnete Bauart hervor; viele Hunderte seiner Maschinen fanden in den Vereinigten Staaten Anwendung zum Betriebe von Aufzügen, Werkzeugmaschinen und dergl., bis seine Firma mit der Edison Co. verschmolz, worauf die Edison'sche zweipolige Maschinenform eingeführt wurde. Eine der »Manchester«-Dynamomaschine ähnliche Motorform zeigt Figur 339. Die Methode von Sprague, die Feldmagnete mit einer gemischten Differentialwicklung zu versehen, ist der im Jahre 1883 von Ayrton und Perry erfundenen gleichartig und gründet sich auf die Anwendung einer mit der Ankerwicklung hintereinander geschalteten Wicklung zur Entmagnetisirung und Schwächung des Feldes<sup>1)</sup>. Noch viele andere praktische Hilfsmittel und sinnreiche Anordnungen zur Regelung der Thätigkeit der Maschinen stammen von Sprague. Weitere Einzelheiten möge der Leser in den unten angegebenen Quellen nachlesen<sup>2)</sup>.

Crocker und Wheeler's Motoren. Eine andere amerikanische Firma, welche hervorragende Ergebnisse im Bau von Motoren aufzuweisen hat, ist die von Crocker und Wheeler in Ampere, N. Y.

Figur 340 giebt eine allgemeine Ansicht der zweipoligen Triebmaschine dieser Firma. Die Magnetschenkel sind in einem Stück aus Schmiedeeisen oder Stahlformguss hergestellt und fest in das

1) Vergl. Engl. Patente [1884] Nr. 15768 und [1885] Nr. 3524.

2) Vergl. Electr. World, October 1886; ebenso Abhandlung von Martin und Wetzler über „The electric motor“, 157—175. Electr. World, Bd. 14, S. 3, 1889; Bd. 15, S. 370, 1890; The Electrician, Bd. 24, S. 248, 1890.



Tabelle der Constructionsverhältnisse von Sprague'schen Motoren.

(Die Zahlen der ersten Spalte entsprechen den Zahlen in Fig. 339.)

Maasse in Centimetern.

| Pferdestärke der Motoren                                      | 1       | 2    | 3    | 5     | 10               | 15    | 20    | 25                | 35    | 50    | 75    |
|---------------------------------------------------------------|---------|------|------|-------|------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|
| Ganze Höhe . . . . .                                          | 1 29,8  | 35,2 | 39,2 | 45,1  | 52,4             | 58,1  | 64,1  | 71,1              | 86,0  | 97,2  | 122,2 |
| Höhe der Fussplatte . . . . .                                 | 2 6,0   | 7,0  | 7,6  | 8,9   | 10,2             | 10,8  | 11,4  | 13,3              | 19,1  | 22,0  | 22,9  |
| Länge der Fussplatte . . . . .                                | 3 49,5  | 57,5 | 67,9 | 73,0  | 80,6             | 95,2  | 101,6 | 116,2             | 145,7 | 163,8 | 185,7 |
| Breite der Fussplatte . . . . .                               | 4 14,6  | 17,1 | 18,4 | 20,3  | 22,5             | 23,5  | 26,7  | 31,1              | 34,3  | 37,5  | 48,3  |
| Höhe des Auflagers der Feldmagnetwicklung . . . . .           | 5 7,6   | 8,3  | 9,5  | 11,4  | 12,7             | 13,3  | 14,6  | 16,5              | 20,0  | 25,4  | 33,7  |
| Durchmesser des Auflagers der Feldmagnetwicklung . . . . .    | 6 10,2  | 12,4 | 14,0 | 14,9  | 19,1             | 22,0  | 23,5  | 26,4              | 33,3  | 37,5  | 44,4  |
| Länge des Kernes der Feldmagnetwicklung . . . . .             | 7 13,7  | 16,8 | 18,3 | 21,0  | 23,8             | 27,0  | 29,8  | 33,0              | 38,7  | 43,8  | 50,5  |
| Durchmesser des Kernes der Feldmagnetwicklung . . . . .       | 8 8,1   | 9,8  | 11,1 | 11,7  | 15,2             | 17,3  | 19,7  | 20,6              | 26,4  | 29,8  | 34,3  |
| Abstand der Mitten der Feldmagnetwicklung . . . . .           | 9 31,7  | 37,5 | 42,5 | 48,9  | 56,8             | 63,2  | 67,6  | 77,5              | 81,9  | 93,3  | 109,9 |
| Aeusserer Durchmesser der Feldmagnetwicklung . . . . .        | 10 16,2 | 17,1 | 20,3 | 23,2  | 26,0             | 30,5  | 32,4  | 36,2              | 38,7  | 43,8  | 51,4  |
| Höhe des Deckels . . . . .                                    | 11 7,6  | 10,2 | 11,4 | 12,7  | 15,9             | 17,8  | 19,7  | 21,6              | 24,8  | 27,9  | 35,1  |
| Breite des Deckels . . . . .                                  | 12 10,2 | 12,4 | 14,0 | 14,9  | 19,1             | 21,6  | 23,5  | 25,7              | 33,3  | 37,5  | 44,4  |
| Länge des Deckels . . . . .                                   | 13 41,9 | 49,2 | 56,5 | 63,5  | 75,9             | 84,8  | 91,1  | 103,2             | 116,5 | 130,8 | 154,3 |
| Länge der Polschuhe . . . . .                                 | 14 13,3 | 15,9 | 17,8 | 20,3  | 23,2             | 26,4  | 28,9  | 32,4              | 36,2  | 40,6  | 47,0  |
| Bohrung der Polschuhe . . . . .                               | 15 13,7 | 16,8 | 18,3 | 21,0  | 23,8             | 27,0  | 29,8  | 33,0              | 38,7  | 43,8  | 50,5  |
| Endstärke der Polschuhe . . . . .                             | 16 4,4  | 4,8  | 5,1  | 5,7   | 7,6              | 8,3   | 8,9   | 8,9               | 9,2   | 9,5   | 10,2  |
| Raum zwischen den Polspitzen . . . . .                        | 17 3,5  | 3,8  | 4,8  | 5,4   | 6,2              | 7,0   | 8,3   | 8,6               | 12,1  | 13,7  | 12,7  |
| Raum zwischen Lager und Polschuh am Commutatorende . . . . .  | 18 12,7 | 14,9 | 19,7 | 20,8  | 21,9             | 2,7   | 28,7  | 31,1              | 44,6  | 48,9  | 52,7  |
| Dasselbe Maass am Riemenscheibenende . . . . .                | 19 5,7  | 7,3  | 9,5  | 8,4   | 9,0              | 10,3  | 10,3  | 12,7              | 22,1  | 22,9  | 27,3  |
| Länge des Auflagers der Lagerböcke . . . . .                  | 20 6,0  | 6,0  | 7,6  | 8,3   | 8,6              | 9,5   | 11,4  | 12,7              | 14,0  | 15,2  | 17,8  |
| Breite des Auflagers der Lagerböcke . . . . .                 | 21 11,4 | 13,3 | 15,2 | 16,5  | 18,7             | 19,7  | 22,9  | 25,4              | 27,9  | 30,5  | 31,1  |
| Höhe der Lagerböcke . . . . .                                 | 22 6,8  | 8,4  | 9,1  | 10,5  | 11,9             | 13,5  | 14,9  | 16,5              | 19,4  | 21,9  | 28,6  |
| Länge der Lagerböcke . . . . .                                | 23 9,5  | 10,8 | 11,4 | 13,3  | 15,2             | 16,2  | 19,7  | 22,2              | 25,4  | 28,9  | 36,8  |
| Abstand zwischen den Lagerböcken . . . . .                    | 25 31,6 | 37,9 | 46,8 | 49,2  | 53,8             | 65,1  | 67,7  | 78,1              | 102,6 | 115,6 | 130,0 |
| Durchmesser der Riemenscheibe . . . . .                       | 33 10,5 | 12,7 | 15,2 | 20,3  | 22,9             | 25,4  | 27,9  | 30,5              | 40,6  | 50,8  | 61,0  |
| Breite der Riemenscheibe . . . . .                            | 34 6,3  | 7,6  | 8,9  | 10,2  | 15,2             | 17,8  | 20,3  | 26,7              | 30,5  | 30,5  | 33,0  |
| Nabenbreite der Riemenscheibe . . . . .                       | 35 5,7  | 7,0  | 7,6  | 7,6   | 9,5              | 12,1  | 13,3  | 15,2              | 22,9  | 22,9  | 22,9  |
| Abstand zwischen Motormitte und Riemenscheibenmitte . . . . . | 39 25,2 | 30,0 | 34,1 | 36,2  | 41,1             | 46,4  | 51,8  | 59,4              | 78,1  | 82,2  | 98,3  |
| Länge der Kernbolzen . . . . .                                | 44 28,3 | 33,3 | 37,1 | 41,9  | 48,9             | 54,9  | 60,0  | 64,8              | 33,0  | 37,5  | 53,3  |
| Durchmesser der Kernbolzen . . . . .                          | 45 1,6  | 1,9  | 2,2  | 2,5   | 2,9              | 3,2   | 3,2   | 3,2               | 2,5   | 4,1   | 4,4   |
| Durchmesser der Ankerkernscheiben . . . . .                   | — 12,1  | 14,8 | 16,0 | 18,1  | 20,6             | 24,8  | 27,3  | 30,0              | 35,9  | 40,6  | 47,0  |
| Durchmesser des Ankers . . . . .                              | — 13,3  | 16,5 | 17,9 | 20,6  | 23,5             | 26,7  | 29,5  | 32,7              | 38,3  | 43,3  | 49,8  |
| Zahl der Ankerleiter (bei 110 Volt) . . . . .                 | — 768   | 432  | 432  | 348   | —                | —     | —     | —                 | —     | —     | —     |
| Zahl der Ankerleiter (bei 220 Volt) . . . . .                 | — 1680  | 1248 | 900  | 696   | 576              | 352   | 320   | 320               | —     | —     | —     |
| Zahl der Ankerleiter (bei 44 Volt) . . . . .                  | — —     | —    | —    | —     | 1080             | 704   | 640   | 600               | 464   | 420   | 388   |
| Zahl der Stromwendertheile . . . . .                          | — 24    | 48   | 36   | 58    | { 48 }<br>{ 90 } | 80    | 80    | { 80 }<br>{ 100 } | 58    | 70    | 97    |
| Ø in den Kernscheiben . . . . .                               | — 3820  | 3770 | 4090 | 4040  | 4770             | 4720  | 4740  | 4240              | 8100  | 7030  | 7720  |
| Zahl der nutzbaren Kraftlinien dividirt durch 1000 . . . . .  | — 489   | 701  | 924  | 1228  | 1800             | 2413  | 2974  | 3274              | 8517  | 9353  | 13943 |
| Gesamtzahl der Ampere-Windungen . . . . .                     | — 5298  | 7746 | 8192 | 12043 | 11535            | 14814 | 17453 | 22475             | 28138 | 24973 | 31700 |
| Umdrehungen in der Minute . . . . .                           | — 1750  | 2000 | 1650 | 1550  | 1360             | 1500  | 1350  | 1350              | 675   | 665   | 485   |

selbstthätigen Einschaltvorrichtung versehen, welche aus einem Schalthebel mit Widerständen besteht und so angeordnet ist, dass

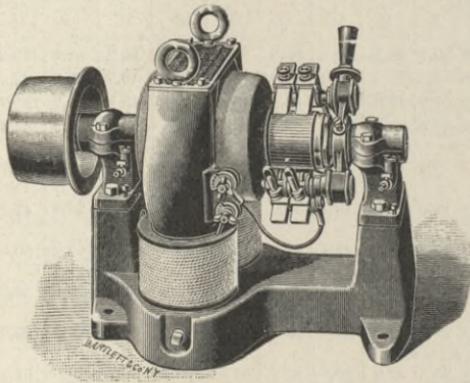


Fig. 340. Crocker-Wheeler'sche Triebmaschine.

zunächst der Feldmagnet erregt, dann der Anker eingeschaltet wird mit einem Widerstand, welcher nach und nach in dem Maasse als die Geschwindigkeit des Motors zunimmt, von dem sich weiter bewegenden Schalthebel ausgeschaltet wird. Bei Einschaltung in Bogenlicht-Stromkreise wird auf die Achse noch ein Centrifugalregulator aufgesetzt. Für Grössen bis zu 10 P wird die zweipolige Form verwendet, bei grösseren Maschinen dagegen eine vierpolige Form vorgezogen.

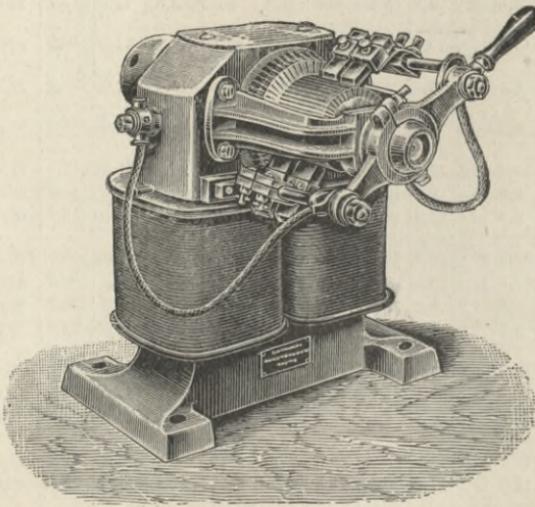


Fig. 341.

Triebmaschine der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft.

Wegen weiterer Angaben über diese Motoren müssen wir den Leser auf die technischen Zeitschriften verweisen<sup>1)</sup>.

Allgemeine Electricitäts-Gesellschaft. — Die typische Form bis zu 10 P ist in der Fig. 341 dargestellt. Für grössere Leistungen werden

die Maschinen vier- und sechspolig gebaut.

Die nachstehende Tabelle enthält einige Angaben über die gebräuchlichen Grössen.

1) Engineering, Bd. 44, S. 83, 1887; Electr. World, Bd. 9, S. 4, 9 und 203; Bd. 13, S. 309, 1889; Bd. 15, S. 114, 269 und 270, 1890; Bd. 17, S. 130, 191. Vergl. auch Crocker's Buch: „Practical Management of Dynamos and Motors“ und eine Reihe von Abhandlungen im Electr Engineer (N. Y.), 1891 und 1892.

|                                    |                |               |               |               |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|------|------|------|------|------|------|
| Leistung in P . .                  | $\frac{1}{16}$ | $\frac{1}{8}$ | $\frac{1}{4}$ | $\frac{1}{2}$ | 1    | 1,5  | 2,5  | 4    | 6    | 10   |
| Umdrehungen in<br>der Minute . . . | 1650           | 1250          | 2100          | 2000          | 1560 | 1450 | 1270 | 1100 | 1020 | 925  |
| Gewicht in kg . .                  | 30             | 40            | 50            | 75            | 120  | 220  | 350  | 390  | 550  | 900  |
| Ampere b. 105 Volt                 | 1,3            | 2,5           | 2,9           | 5,0           | 9,3  | 14,0 | 22,2 | 34,3 | 50,8 | 83,0 |

Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals Schuckert & Co., Nürnberg. — Die normalen Gleichstrom-Motoren der Firma Schuckert gleichen in ihrem Aufbau vollständig den

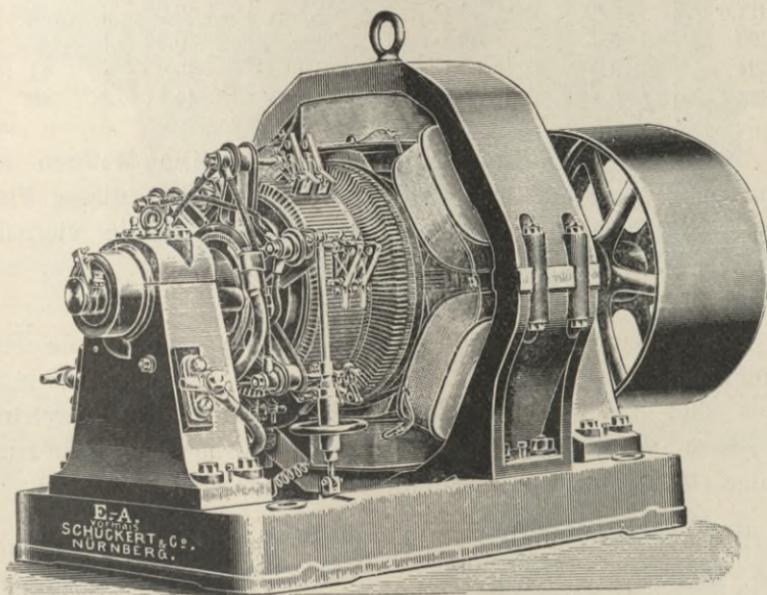


Fig. 342. Nebenschlussmotor von Schuckert.

Dynamomaschinen. Ausserdem werden aber auch Motoren gebaut, die eine weitgehende Geschwindigkeitsänderung bis zum Verhältniss 1:4 gestatten, ohne dass dabei ein bedeutender Abfall des Wirkungsgrades eintritt. Es wird dieses durch zweckmässige Gestaltung des Feldes zwischen Anker und Polschuhen und sorgfältige Dimensionirung erreicht. Eine Funkenbildung am Stromabgeber tritt hierbei nicht ein, und es wird auch keine Bürstenverschiebung nothwendig. Dieses Modell wird besonders häufig zum Antrieb von Krahnen, Papier- und Textilmaschinen verwendet. Fig. 342 zeigt einen Motor von 40 P, nachstehendes Bremsprotokoll giebt einen Ueberblick über die Grenzen der praktisch erreichten Regulirbarkeit.

## Bremsversuche an einem Nebenschluss-Motor A 100.

| Gesamtstrom<br>Ampere | Magnetstrom<br>Ampere | Umdrehungszahl <sup>1)</sup> | Verbrauch<br>Kilowatt | Leistung<br>P | Wirkungsgrad<br>Procent |
|-----------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|---------------|-------------------------|
| 308                   | 12                    | 156                          | 35,3                  | 41,8          | 87,5                    |
| 309,8                 | 7,75                  | 202                          | 34,7                  | 40,4          | 85,5                    |
| 311,5                 | 6,5                   | 254                          | 35,2                  | 40,3          | 84,2                    |
| 311,4                 | 5,4                   | 305                          | 35,2                  | 40,2          | 84,2                    |
| 312,6                 | 4,6                   | 350                          | 35,4                  | 40,2          | 83,8                    |
| 314                   | 4,05                  | 400                          | 35,5                  | 40,2          | 83,3                    |
| 317,6                 | 3,6                   | 455                          | 35,9                  | 40,2          | 82,5                    |
| 320                   | 3,3                   | 502                          | 36,2                  | 40,5          | 82,5                    |
| 324                   | 3,0                   | 550                          | 36,6                  | 40,2          | 81                      |
| 333,7                 | 2,7                   | 600                          | 37,0                  | 40,3          | 80                      |

Union Elektrizitäts-Gesellschaft. — Die Motoren sind nach denselben Grundsätzen wie die Stromerzeuger dieser Firma gebaut. Für Leistungen bis zu 40 P wird meist die vierpolige Form verwendet, für solche bis zu 150 P die sechspolige; noch grössere Maschinen werden achtpolig gebaut.

Für Leistungen bis zu 15 P wird häufig eine andere Form vorgezogen. Dieselbe ist im Princip von der gleichen Anordnung, jedoch sind die Lager an die Verschlussplatten des Polgehäuses angegossen, wodurch der Motor eine sehr geschlossene, fast kugelförmige Gestalt erhält.

Bergwerksmaschine von Goolden. Atkinson hat für diese Firma zur Anwendung in Bergwerken eine Maschine der einfachen zweipoligen Form mit besonderer Rücksicht auf Verwendung in Kohlenbergwerken erbaut<sup>2)</sup>. Die sich bewegenden Theile sind sämmtlich eingeschlossen, so dass die Herbeiführung einer Explosion durch Funken an den Bürsten ausgeschlossen wird. Wie aus der Fig. 343 ersichtlich ist, sind der Stromabgeber und die aus Kohle bestehenden Bürsten vollständig eingekapselt.

Sayer's Motor für Minenbetrieb. Ein vollständig eingekapselter Motor für Minenbetrieb mit feststehenden Bürsten und Ausgleichwickelungen nach Sayer's Plänen ist von Mavor und Coulson auf den Markt gebracht worden. Fig. 344 zeigt einen

1) Bei Entlastung der Maschinen (Lösung des Bremszaumes) erhöht sich die Umdrehungszahl nur um 4 bis 5 Procent.

2) Vergl. Electricity in Mining von S. P. Thompson, Seite 38.

Schnitt dieser Maschine und die Lage der Hilfspole  $P_2$ , deren Anwendung Seite 371 beschrieben wurde. Ein 30 Kilowatt-Motor von

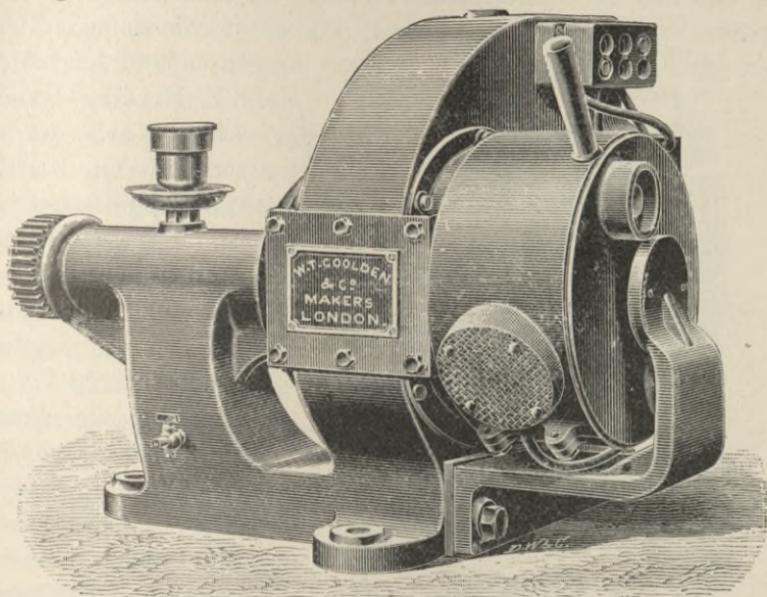


Fig. 343. Goolden's Bergwerksmaschine im Gehäuse.

700 Umdrehungen in der Minute wiegt 1690 kg. Die Kernscheiben sind mit 108 tiefen Schlitzten versehen, deren jeder vier Hauptleiter und drei Umkehrungsleiter enthält. Der Ankerkern hat eine Länge von 24,1 cm bei einem Durchmesser von 44,4 cm.

Eine neuere Form von Kapselmotoren stellt die Fig. 345 dar. Dieser von der Maschinenfabrik Oerlikon gebaute Motor ist für den Betrieb von Hebezeugen und für direkte Kupplung mit Werkzeugmaschinen bestimmt, er leistet 9 bis 12 P bei 800 Umdrehungen. Das kastenförmige Stahlgussgestell hat vier angegossene Pole, von denen aber nur zwei Spulen tragen.

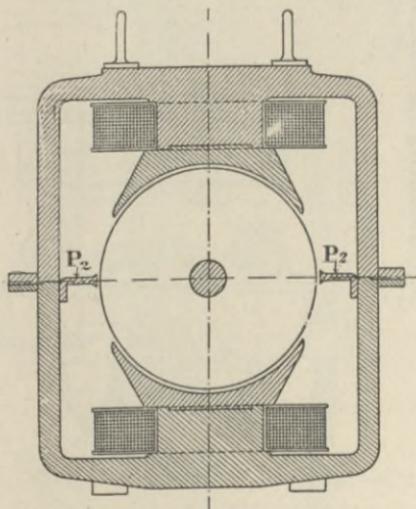


Fig. 344. Sayer's Bergwerksmaschine.

Für den Anker ist Ringwicklung gewählt, um für Reparaturen möglichste Zugänglichkeit zu schaffen.

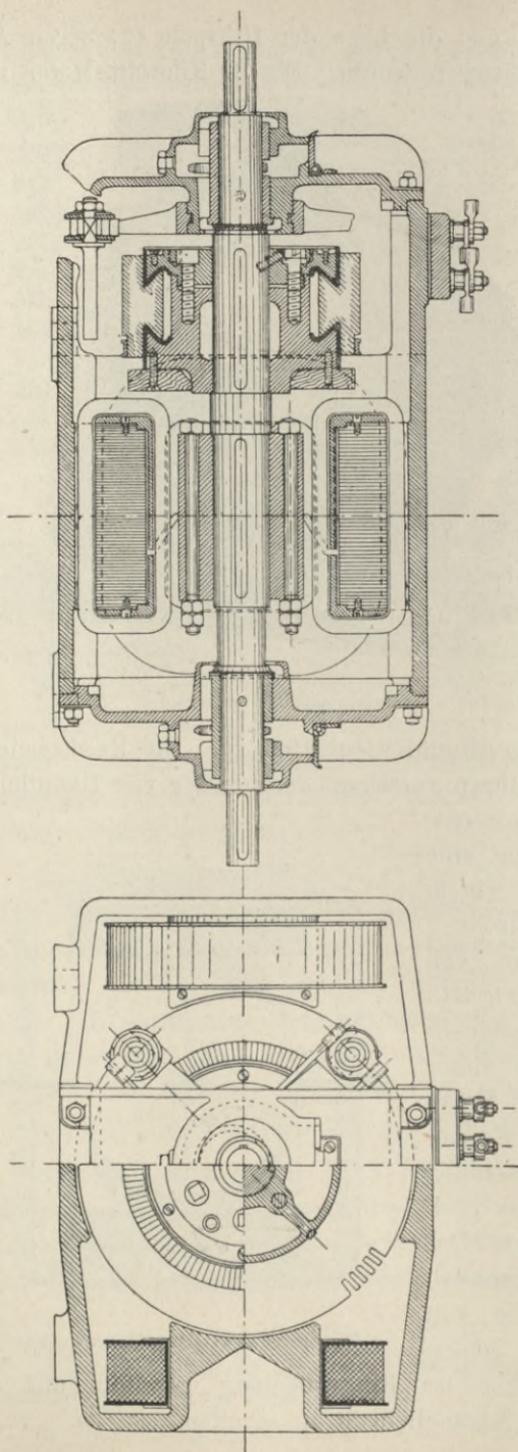


Fig. 345. Kapselmotor von Oerlikon für direkte Kuppelung mit Werkzeugmaschinen.

Figur 346 stellt einen wasserdicht eingeschlossenen Hauptstrommotor der Union

Elektricitäts-Gesellschaft dar, der besonders zum Betriebe von Kraneen bestimmt ist. Diese Motoren werden für 110, 220 und 500 Volt gebaut. Bei einem solchen Motor für 220 Volt beträgt bei 25 Ampere die Tourenzahl 400. Der Wirkungsgrad bei dieser Belastung ist 77,5 Procent, wobei die Leistung 5,8 P beträgt.

Elektrische Maschinen für Fahrzeuge. Maassgebende Gesichtspunkte für die Bauart sind hauptsächlich kräftige mechanische Verbindung der Ankertheile, geringe Geschwindigkeit mit oder ohne Anwendung eines Getriebes, sowie Widerstandsfähigkeit gegen Verschlechterung durch Einfluss von Wasser, Schlamm, Staub oder Ueberhitzung. Mit Rücksicht auf den starken Strom beim Anlaufen muss der Anker ein sehr grosses Drehmoment aushalten

können. Bei Strassenbahnen wird die Anwendung eines einfachen Getriebes vielfach beliebt, beim Eisenbahnbetrieb ist indessen die Einschaltung von Getrieben zur Herabminderung der Geschwindigkeit als ungünstig erkannt worden und die Verwendung von langsam laufenden direct wirkenden Motoren mehr in Aufnahme gekommen. Dies setzt indessen die Verwendung von Maschinen mit verhältnissmässig kräftigem Feldmagnet voraus. Die gewöhnliche Spannung beträgt 500 Volt. Für solchen Betrieb geeignete Stromerzeuger wurden auf Seite 392 und 404 beschrieben. Bei den Triebmaschinen liegt, abgesehen von den Schwierigkeiten, welche durch Feuchtigkeit, Schmutz und Stösse entstehen, die Hauptschwierigkeit darin, die richtige Bauart des Feldmagnets zu finden, welcher sehr kräftig und zugleich gedrungen sein muss. Eine schon frühe in den Vereinigten Staaten angewendete Form gleicht der Nr. 32 der Fig. 103, aber umgekehrt<sup>1)</sup>. Neuere Formen haben vier Pole mit sehr kurzen Kernen und einer Einrichtung, welche ermöglicht, den Jochrahmen aus zwei gegeneinander drehbaren Theilen herzustellen.

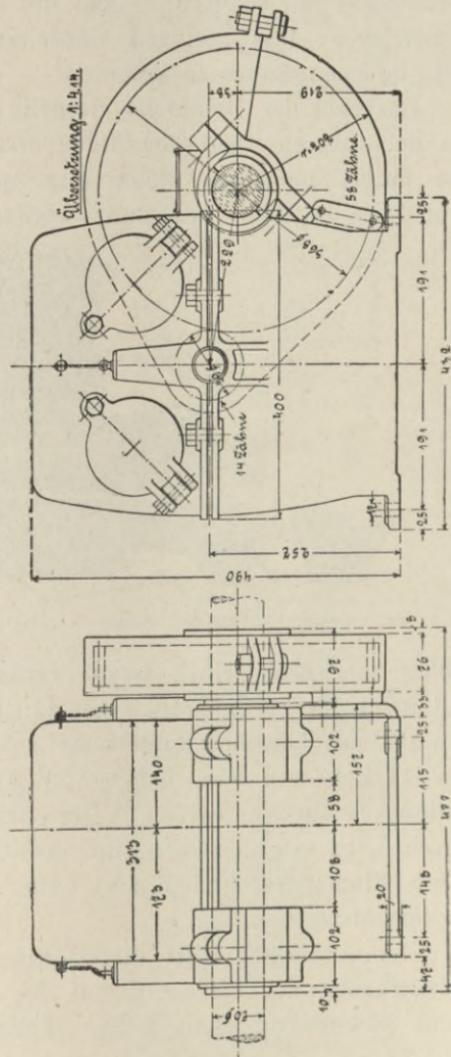


Fig. 346. Kapselmotor der Union.

Die Fig. 347 stellt einen von der Union Electricitäts-Gesellschaft für die Grosse Berliner Strassenbahn gebauten Strassenbahnmotor

1) Vergl. The Electric Railway, 1892, Aufsatz von Crosby und Bell (New York).

dar und gewährt einen Einblick in die Anordnung des Feldes und Ankers.

Bei der Construction des Motors kam es nicht allein auf die möglichst günstige Bestimmung der elektrischen und magnetischen Verhältnisse an, sondern es galt die Bedingungen hierfür mit den Forderungen eines geringen Gewichtes, sowie eines gedungenen und einfachen Baues zu vereinen.

Das Feld des Motors ist vierpolig; die Feldspulen werden, wie aus dem oberen Theil der Figur ersichtlich, durch Polvorsprünge und durch eine unter diesen angebrachte federnde Stahlplatte in ihrer Lage erhalten, und zwar werden zuerst die Spulen um die

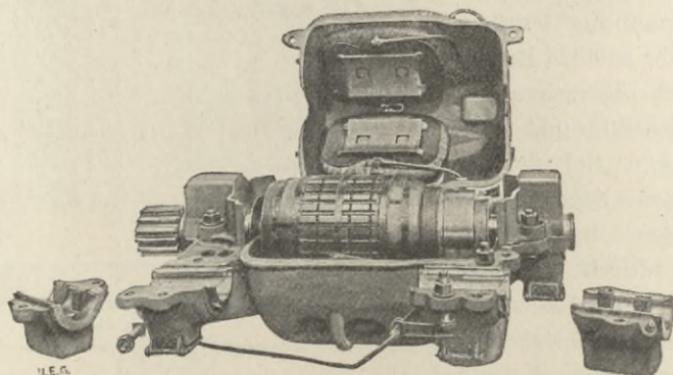


Fig. 347. Strassenbahnmotor der Union.

geblätternen Kerne gelegt, darauf werden die Stahlplatten angebracht und dann die Polvorsprünge mit Bolzen befestigt.

Der aus Lamellen aufgebaute Anker besitzt einen Durchmesser von 11 Zoll und eine Länge von 9 Zoll. An drei Stellen sind Lüftungskanäle vorgesehen. Der Ankerkern ist mit 29 Nuthen versehen, in jede derselben sind drei Spulen eingelegt, die zu einer festen Einheit verbunden sind. Die Anzahl der Commutatorstäbe ist dementsprechend 87.

Der Ankerkern sitzt direct auf der Welle des Motors. Die Uebertragung der Bewegung auf die Räder des Wagens geschieht durch Zahnradkuppelung. Ein übliches Uebersetzungsverhältniss ist 4,78.

Die Anker werden mit vier, fünf oder sechs Windungen für jede Ankerspule hergestellt. Die normale Belastung in diesen drei Fällen ist bezw. 46, 42 und 40 Ampere und die Leistung in Pferdekraften bezw. 24,64, 22,32 und 21,03, während sich hierbei der Wirkungsgrad bezw. auf 78,8, 78,2 und 77,4 Procent beläuft.

Das Gewicht des ganzen Motors ist 690 kg.

Fig. 348 zeigt einen Strassenbahnmotor der Firma Siemens & Halske, Aktiengesellschaft, und lässt zugleich die Art der Aufhängung erkennen. Diese Firma hat neuerdings Modelle für Kleinmotoren hergestellt, welche besonders für öffentliche Betriebe, wie Omnibus-, Post- und Droschkenbetriebe, bestimmt sind. Fig. 349 zeigt die Ansicht eines solchen Motors. Es war hier besonders auf eine möglichst grosse Betriebssicherheit bei geringem Gewicht Bedacht zu nehmen.

Die Motoren sind als vierpolige Doppelmotoren ausgebildet; die Fahrshalter haben Serienparallelschaltung und eine reichlich bemessene Anzahl Bremsstellungen mit Kurzschluss und Gegenstrombremsung, so dass die Wagen ohne mechanische Bremse zum vollständigen Stillstand gebracht werden können. Motoren und Schalter sind für drei Wagentypen konstruiert und in umstehender Tabelle zusammengestellt.

Motortype D 14/8 und D 11/10 werden ausserdem noch für 500/360 Volt gewickelt.

In Amerika haben besonders die Strassenbahnmotoren der Westinghouse-Gesellschaft Verbreitung gefunden. In der Tabelle

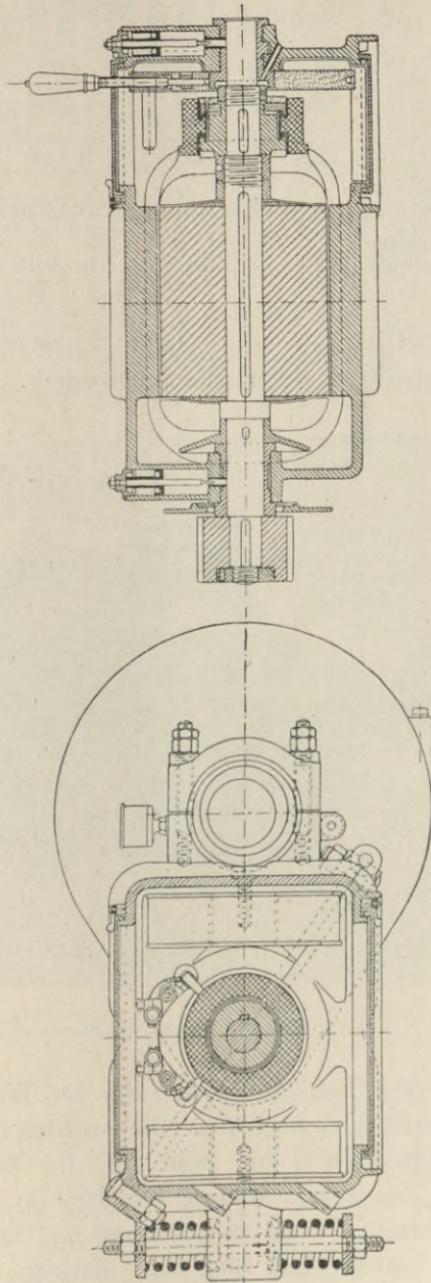


Fig. 348. Strassenbahnmotor von Siemens & Halske.

| Wagen                          |                      |                            | Motor                      |                                 |                  |                                        |         |
|--------------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|----------------------------------------|---------|
| Type                           | Gewicht<br>in Tonnen | Geschwindigkeit<br>km/Std. | Type<br>1 Doppel-<br>motor | Leistung<br>und<br>Drehungszahl | Spannung<br>Volt | Gewicht<br>des Doppel-<br>motors<br>kg |         |
| Omnibus . . .                  | 4,5 — 6              | 16 — 12                    | D 14/8                     | 2×5=10                          | 500              | 160 u 80                               | ca. 550 |
| Gepäck- u. Ge-<br>schäftswagen | 2,5 — 3,5            | 18 — 14                    | D 11/10                    | 2×3=6                           | 500              | 160 u. 80                              | „ 300   |
| Droschken u.<br>Sportwagen .   | 1 — 2                | 24 — 16                    | D 9/10                     | 2×2=4                           | 800              | 160 u 80                               | „ 200   |

auf Seite 515 sind einige Angaben über Versuche mit einem 30 pferdigen Motor zusammengestellt.

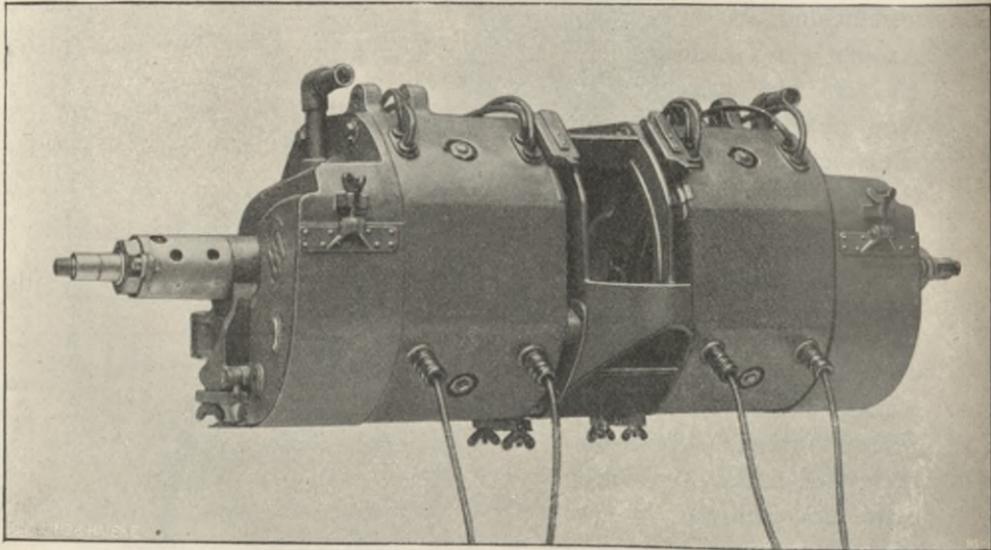


Fig. 349. Doppelmotor von Siemens & Halske für Selbstfahrer.

Der Bau grosser Motoren für Eisenbahnbetrieb ist erst in der Entwicklung begriffen. Die grössten bis jetzt gebauten elektrischen Locomotiven<sup>1)</sup> sind wohl für die Baltimore und Ohio-Eisenbahn von der General Electric Company in Schenectady entworfen. Jede Locomotive wiegt  $92\frac{1}{2}$  Tonnen und hat vier Motoren von je 400 P. Sie werden mit 600 Volt betrieben und geben bei einer Geschwindigkeit von 24 km in der Stunde bei einer Stromstärke von

1) Vergl. Engineering, 19. Juli 1895.

Versuche an einem 30 pferdigen Strassenbahnmotor von Westinghouse bei 450 Volt.

|                                                    |        |        |        |        |        |         |         |         |         |         |         |
|----------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Strom . . . . .                                    | 3 1/2  | 10     | 20     | 30     | 40     | 50      | 60      | 70      | 80      | 90      | 94      |
| Umdrehungen der Wagenachse . . . . .               | 479    | 236    | 145    | 118    | 99     | 85      | 72      | 61      | 50      | 39      | 35      |
| Drehungsmoment (netto in mkg) . . . . .            |        |        |        |        |        |         |         |         |         |         |         |
| des Ankers . . . . .                               | 0      | 4,0    | 13,2   | 25,3   | 38,8   | 53,5    | 68,4    | 70,6    | 101     | 119     | 126     |
| P gebremst . . . . .                               | 0      | 3,9    | 9,1    | 13,9   | 17,7   | 20,9    | 23,3    | 24,2    | 24,0    | 22,1    | 20,9    |
| P elektrisch zugeführt . . . . .                   | 2,05   | 6,0    | 12,05  | 18,1   | 24,15  | 30,2    | 36,2    | 42,25   | 48,27   | 54,29   | 56,7    |
| Elektrischer Wirkungsgrad . . . . .                | 98,5   | 96     | 91,5   | 86,8   | 81,3   | 76,2    | 70,5    | 63,0    | 54,5    | 45,0    | 40,5    |
| Mechanischer Wirkungsgrad . . . . .                | 0      | 65     | 75,7   | 77     | 74     | 69,2    | 63,6    | 57,4    | 50,2    | 41,5    | 36,8    |
| P im Kupfer verloren . . . . .                     | 0,028  | 0,24   | 1,05   | 2,43   | 4,45   | 7,24    | 10,62   | 15,77   | 21,99   | 29,58   | 32,6    |
| P im Eisen, den Lagern u. s. w. verloren . . . . . | 2,02   | 1,86   | 1,90   | 1,77   | 2,00   | 2,06    | 2,28    | 2,28    | 2,31    | 2,61    | 3,2     |
| AW für jeden Pol . . . . .                         | 626    | 1 790  | 3 580  | 5 370  | 7 160  | 8 950   | 10 990  | 12 530  | 14 320  | 16 110  | 16 825  |
| AW für den Zwischenraum . . . . .                  | 500    | 1 600  | 2 900  | 3 400  | 4 060  | 4 500   | 4 950   | 5 200   | 5 500   | 5 750   | 5 850   |
| W <sub>2</sub> im Zwischenraum . . . . .           | 15 000 | 30 000 | 46 200 | 54 000 | 60 600 | 66 000  | 72 000  | 76 200  | 80 400  | 84 000  | 85 200  |
| W <sub>2</sub> im Pol . . . . .                    | 14 400 | 28 800 | 44 400 | 51 600 | 60 200 | 63 000  | 69 000  | 72 600  | 76 800  | 79 200  | 81 600  |
| W <sub>2</sub> im Anker . . . . .                  | 15 600 | 31 200 | 48 600 | 56 400 | 63 000 | 69 000  | 75 600  | 79 200  | 84 000  | 87 600  | 88 800  |
| W <sub>2</sub> in den Ankerzähnen . . . . .        | 24 000 | 47 400 | 73 200 | 85 800 | 95 400 | 103 800 | 114 000 | 120 000 | 126 600 | 132 600 | 134 400 |

Die Längen der einzelnen Theile sind folgende: Anker, Länge 38,1 cm; Durchmesser 29,5 cm; Durchmesser der Bohrung 30,6 cm; Länge derselben 35,5; Kernscheiben mit 95 Schlitzten von 0,5 cm Breite und 2,5 cm Tiefe. Acht Drähte Nr. 11 der B. & S.-Drahtlehre (2,3 mm stark). Gesammte Fläche der Zähne 1810 qcm. Stromwender, 22,2 cm Durchmesser, 7,5 cm Breite Bürsten aus Kohle, 7 cm lang, 6 cm breit, 1 cm dick; Polfläche 484 qcm; Querschnitt der Polstücke 471 qcm. Querschnitt des Joches 53,3 cm mal 3,8 cm. Länge der Wege der Kraftlinien: im Anker 15,2 cm; in den Zähnen 5,1 cm; im Zwischenraum 1,1 cm; im Joch 63,5 cm. Querschnitte für die Kraftlinien sind vorhanden: im Anker 874 qcm; in den Zähnen 572 qcm; im Zwischenraum 903 qcm; im Joch (für die halbe Kraftlinienmenge) 472 qcm. Feldwicklung, 179 Windungen in jeder Rolle, wovon vier hintereinandergeschaltet, Nr. 6 der B. & S.-Drahtlehre (4,1 mm stark). Umsetzungsverhältniss 62 zu 18.

2700 Ampere eine Zugkraft von 21450 kg. Die sechspoligen Triebmaschinen sind zu je zwei hintereinander geschaltet.

Die Centralstation enthält vier zehnpolige 500 Kilowatt-Maschinen mit directem Antrieb, welche mit gemischter Wickelung für steigende Spannung von 600 bis 700 Volt versehen sind.

Triebmaschinen mit pulsirendem Gang. Die von Page, Hjorth u. A. verwendete alte Form, bei welcher an Stelle einer umlaufenden Bewegung eine auf- und niedergehende Bewegung erzielt wurde, ist in neuerer Zeit für die besonderen Zwecke des Hammer- oder Bohrerbetriebes wieder aufgenommen worden. Im Jahre 1879 stellte W. von Siemens<sup>1)</sup> eine Bohrmaschine für Bergwerkszwecke her, zu deren Betrieb ein gleichgerichteter Strom und ein Wechselstrom benutzt wurden, um ohne Stromwender eine auf- und niedergehende Bewegung zu erzielen. Diese Anordnung wurde später von Atkinson und Van de Poele wieder aufgenommen.

Im Jahre 1880 entwarf Deprez<sup>2)</sup> einen elektrischen Hammer zum Schmieden. Die Bewegung erfolgte mittels eines Taucherkolbens, der in einer cylindrischen Wickelung sich auf und ab bewegte. Die Wickelung war in Abtheilungen getheilt, in die der Strom nacheinander eintrat.

Triebmaschinen für Wechselstrom werden später behandelt.

---

1) D. R.-P. Nr. 9469 (vergl. Bd. 2, S. 389 der Arbeiten von Siemens).

2) La Lum. électr., Bd. 9, S. 44. 1883.

---

## Kapitel XXII.

### Die Gesetze des Wechselstromes.

---

Bei Wechselströmen erfolgen schnelle Umkehrungen des Stromes, die Ströme steigen und fallen nach Art von Wellen. Die Electricität schwingt in der Leitung in der That mit grosser Geschwindigkeit vorwärts und rückwärts, und zwar unter dem Einfluss einer sich in schnellem Wechsel umkehrenden elektromotorischen Kraft. Derartige Ströme sind als Wechselströme, oscillirende, periodische, undulirende und harmonische Ströme bezeichnet worden; der Verfasser würde die Bezeichnung Wellenströme als zweckmässiger vorziehen. Die Wechselströme unterscheiden sich in ihren Eigenschaften etwas von den gleichgerichteten Strömen. Sie werden nicht nur von dem Widerstande des Stromkreises, sondern auch von einer magnetischen Gegenwirkung, gewöhnlich Selbstinduction oder Inductanz genannt, beeinflusst. Letztere hat einen hindernden Einfluss auf den Wechselstrom, vermindert die Amplitude der Wellen, verzögert ihre Phase und verflacht sie im Allgemeinen. Wechselströme werden auch von der Capacität oder Condensatorwirkung des Stromkreises beeinflusst. Ein Condensator in einem elektrischen Stromkreis unterbricht gleichgerichtete Ströme vollständig; Wechselströme können ein- und austreten, als wenn der Condensator sie durchgehen liesse. Wegen dieser Eigenthümlichkeiten müssen einige Vorbemerkungen über Wechselströme gemacht werden.

Wenn eine Wickelung von passender Form sich wie in Fig. 350 zwischen den Polen eines Magnets um ihre Längsachse dreht, werden in ihr Wechselströme erregt, welche nach jeder halben Umdrehung Null werden und dann sich umkehren. In der Figur ist die Drahtwickelung so angenommen, dass der obere Theil sich nach dem Beschauer zu bewegt. In diesem Falle zeigen die Pfeile die Richtung der inducirten Ströme an, welche dem äusseren Stromkreis mittels zweier Contact- oder Schleifringe zugeführt

werden, die mit den Enden der Rolle in Verbindung stehen. In der gezeichneten Stellung wird der Strom dem links liegenden Ringe zugeführt; nach einer halben Umdrehung jedoch wird er nach dem rechtsliegenden Ringe fließen und von dem äusseren Kreise durch den linken zurückgeführt werden. Die Fig. 350 stellt

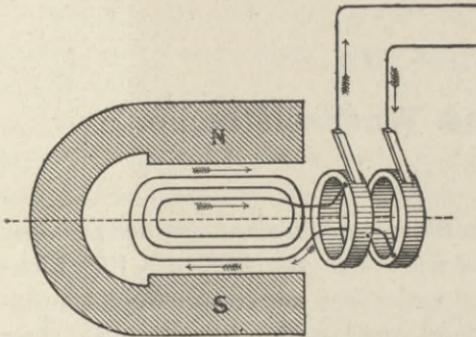


Fig. 350. Einfachste Wechselstrommaschine.

in Wirklichkeit eine einfache Form einer Wechselstrommaschine dar, welche einen sich umkehrenden Wechselstrom liefert und auch in der Praxis als Magnet-Inductor zum Anrufen im Fernsprechtbetriebe Verwendung findet. Diese einfache Wicklung liefert, indem sie bei der Drehung die Kraft-

linien des magnetischen Feldes schneidet, periodische elektromotorische Kräfte, welche bei jeder halben Umdrehung sich ändern und somit Wechselströme hervorrufen. Während jeder ganzen Umdrehung folgt einer elektromotorischen Kraft, welche zu einem

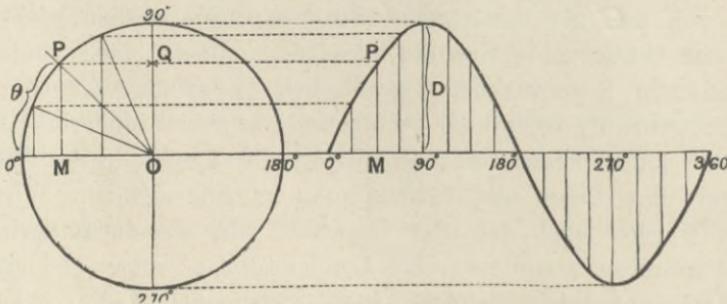


Fig. 351. Uhrdiagramm und Sinuscurve.

Maximum ansteigt und dann auf Null fällt, eine umgekehrte elektromotorische Kraft, welche gleichfalls zu einem Maximum anwächst und dann auf Null fällt. Die in Fig. 351 dargestellte wellenförmige Curve veranschaulicht dies. Die Höhenlinien der Curve über der Horizontalen stellen die augenblicklichen Werthe der elektromotorischen Kräfte dar; die unterhalb der Curve liegenden Ordinaten der zweiten Hälfte der Curve bezeichnen die umgekehrten elektromotorischen Kräfte, die den ersteren folgen. Ein derartiger vollständiger Kreislauf wird Periode, die Hälfte davon Wechsel genannt; die Zahl der in einer Secunde vollendeten Perioden heisst die Frequenz oder die

Wechselgeschwindigkeit  $n$  des Wechselstromes; die Wechselzahl ist das Doppelte der Frequenz. Bei zweipoligen Maschinen ist die Frequenz  $n$  gleich der Umdrehungszahl in der Secunde; bei vielpoligen Formen ist  $n$  im Verhältniss zu der Zahl der Polpaare grösser. Demgemäss werden bei einem achtpoligen Felde, bei welchem vier Nord- und vier Südpole abwechselnd um einen Mittelpunkt angeordnet sind, bei jeder Umdrehung vier vollständige Perioden durchlaufen. Macht die Maschine 15 Umdrehungen in der Secunde (also 900 in der Minute), so werden 60 Perioden in der Secunde vorhanden sein; die Wechselgeschwindigkeit beträgt also in diesem Falle 60. Bei Drehung in einem gleichförmigen Felde sind die erzeugten elektromotorischen Kräfte proportional dem Sinus des Winkels, welchen die Wickelung von der Lage quer zum Felde aus gerechnet zurückgelegt hat. Wenn in dieser Stellung die Zahl der durch die Wickelung tretenden magnetischen Linien mit  $\mathfrak{S}$ , und die Zahl der Drahtwindungen, welche  $\mathfrak{S}$  einschliessen, mit  $N$  bezeichnet werden, so wird nach Seite 162 der Werth der inducirten elektromotorischen Kraft zu irgend einer Zeit  $t$ , nach deren Verlauf die Schleife sich um den Winkel  $\omega = 2\pi n t$  aus ihrer Anfangslage gedreht hat, sein

$$E_{\omega} = \frac{2\pi n N \mathfrak{S} \sin \omega}{10^8},$$

oder, wenn wir  $\frac{2\pi n N \mathfrak{S}}{10^8}$  mit  $D$  bezeichnen,

$$E_{\omega} = D \sin \omega.$$

Bei ausgeführten Maschinen sind weder die Felder gleichmässig, noch die Wickelungen einfache Schleifen, daher wird die Form der Linie der elektromotorischen Kraft nicht eine reine Sinuslinie sein. Die Form der erzeugten Wellen wird von der Gestalt der Polflächen und der Form und Breite der Wickelungen abhängen. In den meisten Fällen wird aber die Annahme berechtigt sein, dass die erzeugten elektromotorischen Kräfte dem Sinusgesetze folgen, so dass der numerische Werth in jedem Augenblicke genügend genau durch die oben gegebene Formel ausgedrückt werden kann, worin  $D$  der Maximalwerth von  $E$  oder die Amplitude und  $\omega$  der Phasenwinkel ist.

Diagramme von Linien, die sich um einen Mittelpunkt drehen, finden bei der Erklärung von Wechselstromvorgängen häufige Anwendung<sup>1)</sup>; für die weitere Betrachtung ist daher die nachfolgende Erklärung

1) Diejenigen Leser, welche nicht mit den Aufgaben der einfach harmonischen Bewegungen vertraut sind, sollten hierüber eine moderne Abhandlung aus der theoretischen Mechanik lesen.

von Wichtigkeit. Betrachten wir einen Punkt  $P$ , der sich im Sinne des Uhrzeigers um einen Mittelpunkt dreht (Fig. 351). Wenn der Radius des Kreises als Einheit angesehen wird, wird  $PM$  der Sinus des von 0 Grad aus gemessenen Winkels  $\omega$  sein. Theilen wir den Kreis in eine beliebige Zahl gleicher Winkel und ziehen wir für jeden derselben die Sinuslinie, so geben uns die Endpunkte derselben, wenn wir sie wie in Fig. 351 in gleichen Abständen als Ordinaten auf eine gerade horizontale Linie abtragen, eine Sinuscurve.

Von dieser Curve machen wir folgenden Gebrauch. Wir wissen, dass der Werth der elektromotorischen Kraft mit der Zeit sich von einem Augenblicke zum andern ändert. Um ihren Werth in irgend einem Augenblicke zu bestimmen, betrachten wir die Zeit wie einen sich fortwährend vergrößernden Winkel; wir nehmen die Zahl der Secunden oder der Bruchtheile von Secunden, die von einem gewissen Zeitpunkte  $t_0$  ab (wo die elektromotorische Kraft gleich 0 war) verflossen ist, multipliciren sie mit  $2\pi n$  und sehen diesen Werth als Ausdruck eines in Radianen ausgedrückten Winkels an; dann giebt uns der Sinus dieses Winkels multiplicirt mit  $D$  die elektromotorische Kraft in Volt an, welche in dem bestimmten Zeitpunkte vorhanden ist. Der Punkt  $P$  stellt also bei seiner gleichmässigen Drehung um den Kreis in Fig. 351 die verfllossene Zeit dar. Wenn wir annehmen, dass die Drehung mit der Geschwindigkeit erfolgt, dass er  $2\pi n$  Radianen in einer Secunde durchläuft, so stellt das Loth  $PM$  (nach einem beliebigen Maassstab) die elektromotorische Kraft in einem bestimmten Augenblicke dar. Nehmen wir nun die Horizontale 0 Grad bis 360 Grad als Darstellung der Zeit (nach einem beliebigen passenden Maassstab), so ist klar, dass nach Verlauf der durch die Entfernung von 0 Grad bis  $M$  gemessenen Zeit die elektromotorische Kraft den Werth  $MP$  hat; in derselben Weise wird die elektromotorische Kraft in einem beliebigen anderen Zeitpunkte durch das Loth von demjenigen Punkte der Linie dargestellt, welcher dem betrachteten Zeitpunkte entspricht.

In der Fig. 351 entspricht ein Umlauf des Punktes  $P$  auf dem Kreise einer vollständigen Periode. Der Werth der elektromotorischen Kraft (der zwischen  $+D$  und  $-D$  schwankt) lässt sich in jedem Augenblicke durch eine auf die Horizontale gefällte Senkrechte darstellen. Der Punkt  $Q$  schwingt auf dem Durchmesser des Kreises, so wie der Punkt  $P$  umläuft. Wir können daher, auch ohne die Sinuslinie zu ziehen, bloss eine Linie  $OP$ , die nach irgend einem Maassstabe gleich  $D$  gezogen ist, um  $O$  als Mittelpunkt sich

drehen lassen; deren Projection  $OQ$  auf die Vertikale giebt in jedem Augenblicke den Werth der elektromotorischen Kraft an. Dieses Diagramm ist als Uhrdiagramm bekannt.

Die Ströme, welche aus diesen periodisch wechselnden elektromotorischen Kräften hervorgehen, sind ebenfalls periodisch wechselnd; sie nehmen zu bis zu einem Maximum, nehmen dann ab bis auf 0 und wachsen in entgegengesetztem Sinne. Wenn die elektromotorische Kraft 100 solcher Kreisläufe oder Cyklen in einer Secunde vollendet, thut das auch der Strom.

Diese Aenderungen der elektromotorischen Kraft lassen sich noch auf eine andere Weise darstellen, nämlich durch ein Diagramm ähnlich dem, welches Zeuner für Schiebersteuerungen construirte.

Es bedeute in der Fig. 352 der äussere Kreis den Umlaufskreis für  $P$ . Um jeden der beiden senkrecht stehenden Radien desselben werde ein innerer Kreis beschrieben. Dann entsprechen die Längen  $OQ$ , die von den inneren Kreisen abgeschnitten werden, den Werthen der Sinus. Dreht man ein Stück Papier mit einem radialen engen Schlitz über der Figur, so zeigen die beiden Kreise durch ihre Abschnitte  $OQ$  in den verschiedenen Lagen die veränderlichen elektromotorischen Kräfte an. Weiteres über die graphische Behandlung von Wechselströmen möge aus den Werken von Fleming<sup>1)</sup>, Blakesley<sup>2)</sup> und den Abhandlungen von Kapp<sup>3)</sup> ersehen werden.

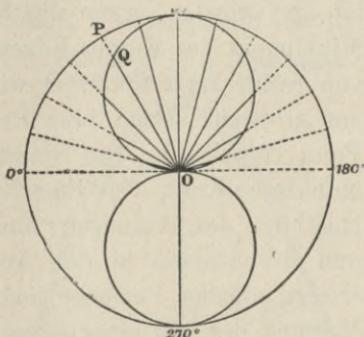


Fig 352. Polardiagramm einer Sinusfunction.

Bedell und Crehore<sup>4)</sup> widmen diesem Gegenstande ein ganzes Kapitel. Bei ausgeführten Maschinen, bei welchen weder das Feld gleichmässig, noch die Wicklungen aus einfachen Schleifen bestehen, wird das periodische Steigen und Fallen der elektromotorischen Kräfte nicht nothwendigerweise dem einfachen Sinusgesetz folgen. Die Form der erzeugten Wellen hängt von der Gestalt der Polflächen, sowie von der Form und Breite der Wicklungen

1) Fleming, The alternate Current Transformer, London, 1889.

2) Blakesley, Alternate Currents of Electricity, London, 1889.

3) Kapp, On alternate Current Machinery in den Proc. Inst. Civ. Engin., 1889. Theil III.

4) Bedell und Crehore, Alternating Currents, London, 1893.

ab. Man betrachte etwa eine Maschine, deren Feldmagnete aus einem doppelten Kranze entgegengesetzter Pole (wie in den Maschinen von Wilde, Siemens, Ferranti, Mordey) bestehen. Sind die Ankerwickelungen und Magnetkerne beide von runder Form und im Durchmesser gleich, so werden die Wickelungen, wenn sie sich den Polen der Kerne nähern, allmählich in das Feld eintreten, die Anzahl der von der Wickelung während gleicher Bewegungsabschnitte geschnittenen Kraftlinien wird allmählich zunehmen und ein Maximum erreichen, sobald die Achsen der Wickelung und des Kernes in einer Linie liegen. Von diesem Punkte ab erfolgt die Abnahme. Der Vorgang vollzieht sich beinahe nach dem Sinusgesetz. Die Geschwindigkeit, mit der die Kraftlinien geschnitten werden, ist am grössten, wenn die Kanten der Wickelung gegenüber dem Mittelpunkt des Kernes liegen. Sind indessen Wickelung und Kern von rechteckiger Form, so wird die Geschwindigkeit des Schneidens am grössten, sobald eine Kante der Wickelung an der Kante des Poles vorbeiläuft. Das Sinusgesetz gilt dann nicht für die elektromotorische Kraft. Zur Entscheidung, ob in einer gegebenen Dynamomaschine das Ansteigen und Fallen der elektromotorischen Kraft und des Stromes in den Ankerwickelungen nach dem Sinusgesetz erfolgt, müssen Versuche angestellt werden. Joubert benutzte zur Messung der von einer Siemens'schen Maschine gelieferten Ströme eine elektrometrische Methode; er nahm dabei mittels eines besonderen Stromabnehmers den Strom zu jeder beliebigen Phase ab und erhielt eine annähernde Sinuscurve<sup>1)</sup>.

---

1) Wegen neuerer Abänderungen dieser Methode vergl. Kapitel XXVI. In den letzten Jahren sind viele experimentelle Methoden zur Bestimmung der Form der Curve angegeben worden, welcher die Veränderung der wechselnden elektromotorischen Kraft und der Ströme folgt. Der Leser möge die von Ryan, Amer. Inst. Electr. Engin., 1888 und 1889 und Electrician, Bd. 24, S. 263, 1890, angegebenen Methoden nachsehen; ferner Bedell, Miller und Wagner, Amer. Inst. Electr. Engin., S. 500; Fleming, Electrician, Bd. 34, S. 460, 507, 1895. L. Duncan, ebendasselbst S. 698. Fleming's Methode ist zur Bestimmung der Form der Stromcurve in irgend einem Theile eines Stromkreises sehr brauchbar.

Im Herbst 1894 entstand in den Spalten der Electric World und des Electrician ein Streit, ob es von Vortheil wäre, wenn Wechselstrommaschinen eine Sinuslinie lieferten. Seitdem hat Fleming den Nachweis geliefert, dass Transformatoren mit einem entschieden höheren Wirkungsgrade arbeiteten, wenn sie durch eine Wechselstrommaschine mit einer spitzeren Curve betrieben wurden, als mit solchen, welche fast reine Sinuslinien für die elektromotorische Kraft lieferten. Andererseits scheint diese Form nicht erwünscht für Motorenbetrieb. Fest steht, dass die Form der Stromcurve nicht nur von der Bauart der Wechselstrommaschine,

Eine andere, auch für Gleichstrommaschinen angewendete Methode stammt von Mordey.

In der Fig. 353 sind vier Curven für eine halbe Periode dargestellt. Die eine bildet eine Sinuscurve, die anderen drei entstammen Wechselstrommaschinen und zeigen die nahe Uebereinstimmung mit einer wahren Sinuslinie. Die am meisten übereinstimmende rührt von einer Maschine von Mordey her, sie liegt fast in ihrer ganzen Ausdehnung innerhalb der Sinuscurve. Die Curven sind gewöhnlich mehr zugespitzt bei Maschinen, bei welchen die Wickelung zwischen eisernen Zähnen versenkt ist und welche eine grössere Ankergegenwirkung äussern. Bei den Stromerzeugern der Niagara-Kraftanlage sind sie dagegen mehr abgeflacht und breiter als die reinen Sinuscurven. Hiernach sind wir berechtigt, anzunehmen, dass die inducirte elektromotorische Kraft im Allgemeinen einem Sinusgesetz folgt.

Effective Spannung und Stromstärke. Spannungsmesser und Strommesser für Wechselstrom messen nicht die arithmetischen Durchschnittswerthe der Spannung und Stromstärke, sondern Grössen, die man effective Spannung und effective Stromstärke nennt. In dem Spannungsmesser von Cardew hängt die Erwärmung des

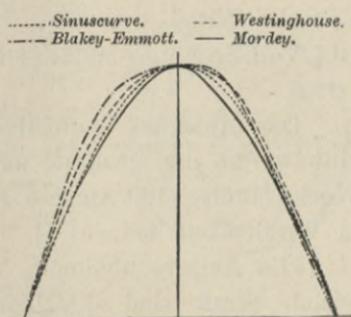


Fig. 353. Wechselstromcurven.

Drahtes von dem Quadrate der Stromstärke ab. In einem Elektrodynamometer hängt das Drehungsmoment in jedem Augenblick von dem Product der Stromstärken in den festen und den beweglichen Theilen ab; wird der Apparat als Strommesser benutzt, so hängt das Drehungsmoment demnach vom Quadrat der Stromstärke ab. Die Anziehung (oder Abstossung) ist bei elektrostatischen Spannungsmessern proportional dem Quadrate der Spannung. Die Ablesungen an diesen Instrumenten, wenn sie mit stetigen Strömen geacht sind, geben uns nicht die wahren Mittelwerthe, sondern die Quadratwurzeln aus den Mittelwerthen der Quadrate. Der Mittelwerth der

sondern auch von dem Einfluss der Capacität und der Selbstinduction abhängig ist. Das Vorhandensein von Transformatoren mit Eisenkernen und von Motoren im Stromkreise ändert die Curve; die Aenderung wird besonders auch von dem Sättigungsgrade abhängen, welchen die Eisenkerne bei jedem Kreislauf erfahren.

Eine Abhandlung von Barr, Beeton und Taylor im *Electr.*, Bd. 35, S. 257 und 286, ist noch von Wichtigkeit.

Quadrate des Sinus<sup>1)</sup> für einen Quadranten oder den ganzen Kreis ist  $= \frac{1}{2}$ , die Quadratwurzel aus dem mittleren Werth der Quadrate der Sinusfunction erhält man also durch Multiplication ihres Maximalwerthes mit  $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$ . Das arithmetische Mittel aus den Werthen des Sinus ist aber 0,637<sup>2)</sup>. Wenn also ein Wechselstrom dem Sinusgesetz folgt, wird er eine stärkere Erwärmung als ein stetiger Strom von der gleichen Durchschnittsstärke bewirken, und zwar im Verhältniss von 0,707 zu 0,637, d. h. etwa 1,1 mal stärkere Erwärmung.

Schaltet man einen Spannungsmesser von Cardew in einen Wechselstromkreis, in dem die Spannung zwischen + 100 und - 100 Volt schwankt, so zeigt er 70,7 Volt, obgleich das arithmetische Mittel nur 63,7 beträgt; bei stetigem Strom würden 70,7 Volt Spannung nothwendig sein, um die Ablesung 70,7 zu erhalten.

Der Ausdruck »effectiv« soll diese Quadratwurzel aus dem Mittelwerthe der Quadrate ausdrücken. Wenn ein Strommesser für Wechselströme 100 Ampere anzeigt, bedeutet dies, dass der Strom in Wirklichkeit bis auf + 141,4 Ampere ansteigt und dann auf - 141,4 Ampere abnimmt; aber die Wärmewirkung und die geleistete Kraft sind dieselben, wie bei einem Gleichstrom von 100 Ampere, daher wird ein solcher Wechselstrom als 100 effective Ampere stark bezeichnet. Nebenbei sei bemerkt, dass die effective elektromotorische Kraft einer für Wechselstrom eingerichteten Dynamomaschine 1,1 mal höher im Verhältniss zu einer gleichen und für Gleichstrom eingerichteten Maschine ist; oder 2,2 mal höher, wenn in beiden Fällen derselbe Draht zur Wickelung verwendet ist, die Ankerwicklung aber nur einen offenen Kreis bildet.

Der Unterschied zwischen effectiven und maximalen Werthen ist wichtig, da einige Wirkungen — z. B. die Neigung, die Isolation zu durchschlagen — nicht von den effectiven, sondern von den maximalen Werthen der Spannung abhängen. Wenn z. B. ein elektrostatischer Spannungsmesser 10000 Volt anzeigt, wird der

1) Beweis folgt auf Seite 529.

2) Oder genauer  $\frac{1}{\omega} \int_0^{\omega} \sin \omega d\omega = \frac{1 - \cos \omega}{\omega}$ , woraus, wenn  $\omega = \frac{\pi}{2}$  ist, der Durchschnittswerth  $= \frac{2}{\pi}$  ist.

Maximalwerth (unter der Voraussetzung, dass die Aenderung nach einem dem Sinusgesetz ähnlichen Gesetze erfolgt) 14142 Volt betragen. Ist die Curve spitzer als die Sinuscurve, so liegt das Maximum noch höher.

Anwendung des Uhrdiagramms. Im Uhrdiagramm werden Strom und Spannung, welche periodischem Wechsel unterliegen, dargestellt durch die Projection einer Geraden, die sich um einen Centralpunkt dreht, auf eine gegebene Linie; hier wird die Projection auf eine senkrechte Linie gewählt. Solche Diagramme werden beim Studiren der Wechselströme so häufig benutzt, dass mit einigen weiteren Worten darauf eingegangen werden muss.

Phasenunterschiede werden im Uhrdiagramm durch Unterschiede in der Winkelstellung dargestellt. Wenn z. B. zwei sich drehende

Zeiger,  $OV$  und  $OC$  (Fig. 354), mit der gleichen Geschwindigkeit umlaufen, aber stets einer um ein wenig hinter dem anderen, so erreichen sie nicht gleichzeitig ihren Scheitelwerth. Projiciren wir sie auf die Senkrechte, so sehen wir in dem Augenblick, wo  $OV$  sich so weit gedreht hat, dass der Drehungswinkel gleich  $\theta$  ist, die Projection die Grösse  $Ov$  besitzt; der andere Zeiger, welcher um einen Winkel  $\varphi = VOC$

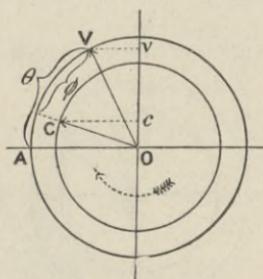


Fig. 354.

zurückbleibt, besitzt als Projection die Länge  $Oc$ . Wenn  $Ov$  seinen Scheitelwerth erreicht (d. h. wenn  $V$  an dem höchsten Punkt des Kreises ankommt), wird  $Oc$  noch immer zurück sein. Die Werthe der beiden Projectionen sind  $Ov = OV \sin \theta$  und  $Oc = OC \sin(\theta - \varphi)$ . Der Winkel  $\varphi$  ist der Phasenunterschied.

Um zwei verschiedene Wechselgrößen zu addiren, z. B. zwei elektromotorische Kräfte, welche die gleiche Periode haben, genügt es nicht, einfach ihre Zahlenwerthe zu addiren. Wenn z. B. in einem Stromkreis zwei Spulen in Reihe geschaltet sind, in deren einer eine elektromotorische Wechselkraft von 40 Volt, in deren anderer eine solche von 30 Volt erzeugt wird (während beide die gleiche Frequenz von beiläufig 100 Perioden in der Secunde besitzen), so ist die gesammte elektromotorische Kraft nur dann = 70 Volt, wenn die beiden elektromotorischen Kräfte zufällig genau gleiche Phase besitzen. Wenn irgend ein Phasenunterschied zwischen beiden besteht, so ist ihre Resultirende kleiner als 70 Volt, weil sie ihre Scheitelwerthe nicht zu gleicher Zeit erreichen. Um

den Werth zu ermitteln, den ihre Summe erreicht, müssen wir sie nach Art der Vektoren addiren, ein Verfahren, womit jeder Ingenieur von der gewöhnlichen Zusammensetzung von Kräften nach einem Parallelogramm her vertraut ist.

$OP$  und  $OQ$  (Fig. 355) mögen zwei elektromotorische Kräfte von gleicher Periode vorstellen, welche einen Phasenunterschied  $POQ = \varphi$  besitzen. Vervollständigen wir das Parallelogramm durch die Linie  $PR$  (gleich und parallel zu  $OQ$ ), so erhalten wir die Resultirende  $OR$ , welche die Grösse und Phase des resultirenden Radiusvector darstellt. Die Projection  $Or$  dieser Linie wird stets gleich sein der Summe der Projectionen  $Op$  und  $Oq$  der beiden Componenten. Nun ist nach einem bekannten geometrischen Satz  $OR = \sqrt{OP^2 + OQ^2 + 2OP \cdot OQ \cos \varphi}$ . Dies ist offenbar ein Maximum,

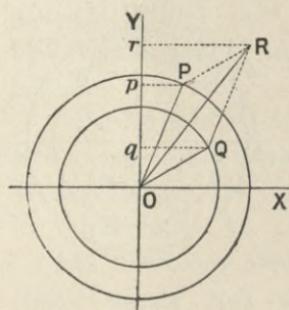


Fig. 355.

wenn  $\varphi = 0$  ist. Wenn im obigen Beispiel  $OP = 40$ ,  $OQ = 30$  und  $\varphi = 37$  Grad ist, so ergibt sich die Resultirende  $R$  zu 66,6. Wenn die beiden Componenten im Diagramm rechtwinklig zu einander stehen, so wird die eine ihren Scheitelwerth erzielen, wenn die andere durch Null geht; man sagt dann, sie stehen in Quadratur, oder sie halten eine Viertelperiode Phasenunterschied. Sind sie in

diesem Falle an Grösse einander gleich, so ist die Resultirende  $\sqrt{2}$  mal grösser als jede Componente. Z. B. beträgt die Resultirende von zwei elektromotorischen Wechselkräften gleicher Periode, die in Quadratur stehen und von denen jede 100 Volt beträgt, 141,4 Volt.

Producte periodischer Functionen. — Zwei periodische Functionen, z. B. zwei Ströme, oder ein Strom und eine Spannung, welche die gleiche Periode, aber ungleiche Amplituden und einen Phasenunterschied besitzen, mögen durch  $p = OP \cos \omega$  und  $q = OQ \cos \beta$  (vergl. Fig. 356) dargestellt werden;  $OP$  und  $OQ$  sind ihre Scheitelwerthe,  $\varphi$  ist ihr Phasenunterschied  $= \omega - \beta$ . Es soll der mittlere Werth des Productes  $pq$  gesucht werden.

Dieses Product wird selbst veränderlich sein, aber nicht wie eine Sinusfunction, und deshalb lässt es sich nicht als drehende Linie darstellen. Es wird in bestimmten Augenblicken — viermal in jeder Periode — Null sein, denn  $p$  erreicht zweimal die Null, und  $q$  desgleichen. Auch wird es negative Werthe besitzen, wenn

entweder  $p$  oder  $q$  negative Werthe hat. Sein mittlerer Werth wird der Mittelwerth aller Werthe des Productes während einer vollen Periode sein.

In dem Augenblick, den Fig. 356 zeigt, wird

$$pq = OP \cdot OQ \cdot \cos \omega \cdot \cos \beta$$

sein. Eine Viertelperiode später werden die beiden Geraden  $OP$  und  $OQ$  zur Achse  $OY$  gerade so stehen, wie in Fig. 356 zur Achse  $OX$ , und das (positive) Product wird alsdann sein

$$p'q' = OP \cdot OQ \cdot \sin \omega \cdot \sin \beta.$$

Der Mittelwerth aus beiden ist

$$\begin{aligned} \frac{pq + p'q'}{2} &= \frac{1}{2} OP \cdot OQ (\cos \omega \cdot \cos \beta + \sin \omega \cdot \sin \beta) \\ &= \frac{1}{2} OP \cdot OQ \cos (\omega - \beta) \\ &= \frac{1}{2} OP \cdot OQ \cos \varphi. \end{aligned}$$

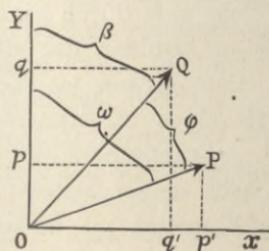


Fig. 356.

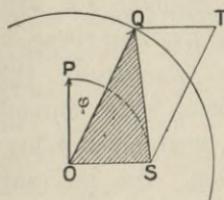


Fig. 357.

Dieser Werth ist offenbar unabhängig von der augenblicklichen Grösse von  $\beta$  oder  $\theta$ ; d. h. der Mittelwerth des Productes hat um den ganzen Kreisumfang herum, je für eine Lage und die dazu Senkrechte den gleichen Werth. Demnach ist dieser Werth der gesuchte mittlere Werth des Productes.

Eine geometrische Construction zur Erläuterung des Gesagten zeigt Fig. 357.  $OP$  und  $OQ$  sind die Scheitelwerthe der beiden periodischen Functionen, deren Phasenunterschied  $POQ = \varphi$  ist. Wir drehen eine von beiden Geraden, hier  $OP$ , durch einen rechten Winkel, so dass sie in die Lage  $OS$  kommt, vervollständigen das Parallelogramm  $OQTS$  und zeichnen das Dreieck  $OQS$ . Die Fläche des Parallelogramms ist  $OP \cdot OQ \cos \varphi$  und die des Dreiecks  $\frac{1}{2} OP \cdot OQ \cos \varphi$  und stellt demnach den mittleren Werth des Productes dar.

Noch eine weitere Folgerung ist von Nutzen. Wenn  $p$  und  $q$  gleich gross sind und keinen Phasenunterschied haben, so erhalten

wir den mittleren Werth des Quadrates einer periodischen Function, indem wir  $OP = OQ$  und  $\varphi = 0$  setzen, so dass  $\cos \varphi = 1$  ist. Wir erhalten dann den mittleren Werth von  $p^2 = \frac{1}{2} \overline{OP^2}$ , oder in anderen Worten, der Mittelwerth des Quadrates des Sinus ist  $\frac{1}{2}$ .

Wirkungen der Selbstinduction. — Bei der Betrachtung eines Wechselstromkreises dürfen wir die Stromstärke nicht einfach der elektromotorischen Kraft direct und dem Widerstand des Stromkreises umgekehrt proportional setzen. Sie hängt auch von der Zahl der magnetischen Linien ab, welche vom Strom selbst erzeugt werden, und von der Wechselgeschwindigkeit (Frequenz). Denn es wird sich zeigen, dass diese Linien, welche von dem anwachsenden Strome erzeugt werden und sich durch den Stromkreis schlingen, in letzterem eine elektromotorische Kraft erzeugen, die der von aussen wirkenden Kraft entgegengesetzt ist, so lange die Menge der Kraftlinien wächst. Je grösser die magnetische Durchlässigkeit des Weges für die magnetischen Linien, welche sich durch irgend einen Theil des Stromkreises schlingen, und je häufiger der Stromkreis um diesen Kraftlinienweg herumführt, desto grösser ist die elektromotorische Gegenkraft. Diese Fähigkeit eines Stromkreises, wenn er von einem Strom durchflossen wird, magnetische Linien zu umschliessen, nennt man seine Inductanz oder seinen Selbstinductions-Coëfficienten. Um uns auf bestimmte Einheiten zu beziehen, betrachten wir einen einfachen ringförmigen Stromkreis von solchen Abmessungen und solcher Anordnung der verwendeten Stoffe (Luft oder Eisen) in seiner Umgebung, dass die gesammte Kraftlinienmenge, die ihn durchdringt, wenn in ihm der Strom 1 Ampere fliesst, gleich  $10^8$  ist. Wir wissen, wenn die Kraftlinienmenge  $10^8$  in der Zeit von genau 1 Secunde gleichförmig von Null aus anwächst, dass dann eine elektromotorische Kraft von genau 1 Volt im Stromkreis inducirt wird.

Es ist nun klar, wenn in unserem Stromkreis zu Anfang kein Strom floss und der letztere nun gleichmässig anwächst, so dass er am Ende der ersten Secunde den Werth 1 Ampere erreicht, dass dann während des Anwachsens des Stromes und der magnetischen Linien eine elektromotorische Gegenkraft von genau 1 Volt dem Strome entgegenwirkt, und dass man eine elektromotorische Kraft von mindestens 1 Volt in der Stromrichtung braucht, um den Strom gegen die elektromotorische Gegenkraft zu unterhalten.

Soll der Strom in der Secunde bis auf 2 Ampere gleichmässig anwachsen, so müssen wir 2 Volt aufwenden (und etwas mehr, um

den Strom durch den Widerstand zu treiben), weil die Geschwindigkeit, mit der die magnetischen Linien wachsen zweimal so gross ist.

Ein Stromkreis von solcher Beschaffenheit besitzt einen Selbstinductions-Coëfficienten von 1 Henry. Das Henry ist die Einheit der Inductanz; es ist die Inductanz eines Kreises, welcher im Ganzen  $10^8$  magnetische Linien umschliesst, wenn der Strom 1 Ampere hindurchfliesst. Gewöhnlich bezeichnet man mit dem Buchstaben  $L$  die Zahl der Henry in dem Selbstinductions-Coëfficienten eines Kreises.

Wenn der beschriebene Strom nicht mehr ein einfacher Ring, sondern zweimal um denselben magnetischen Weg gewunden ist, so wird  $L$  gleich 4; denn die Ampere-Windungen sind nun bei 1 Ampere gleich 2, also die magnetischen Linien  $2 \cdot 10^8$ ; diese würden in jeder der beiden Windungen 2 Volt erzeugen, wenn sie in einer Secunde gleichmässig entstehen, also in beiden Windungen zusammen 4 Volt. Die Selbstinduction eines Stromkreises ist demnach proportional dem Quadrate der Windungszahl, und umgekehrt, proportional der Reluctanz des magnetischen Weges, welcher durch den elektrischen Kreis hindurchtritt. Oder im Zeichen

$$L = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{N^2}{\rho},$$

worin  $N$  die Windungszahl und  $\rho$  die gesammte Reluctanz des magnetischen Pfades bedeuten.

Wenn wir  $L$  mit der Geschwindigkeit multipliciren, mit der sich der Strom ändert, so erhalten wir die elektromotorische Gegenkraft, welche von der Selbstinduction herrührt. Hierzu addiren wir das Product aus Strom und Widerstand und erhalten die gesammte äussere elektromotorische Kraft, oder in Zeichen

$$E = L \cdot \frac{dJ}{dt} + JR.$$

Diese Gleichung gilt für jede beliebige Aenderung von  $E$ . Um das Gesetz zu finden, nach dem sich der Strom mit der Zeit ändert, müssen wir den Werth von  $E$  als Function der Zeit einsetzen und die Differentialgleichung lösen;  $L$  und  $R$  sind constant.

Wenn z. B.  $E = D \cdot \sin \omega t$  ist, so haben wir

$$D \sin \omega t = L \cdot \frac{dJ}{dt} + RJ$$

und die Lösung dieser Gleichung ergibt für  $J$  als Function von  $t$ :

$$J = \frac{D \sin \left( \omega t - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \cdot \frac{\omega L}{R} \right)}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}.$$

Hieraus ersehen wir, dass auch der Strom, ebenso wie die elektromotorische Kraft, einem Sinusgesetz folgt, und wir erkennen, dass der Scheitelwerth des Stromes sein wird

$$\frac{D}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

gegenüber  $D/R$ , dem Werth, der beim Fehlen der Selbstinduction eintreten würde. Ferner sagt uns die Formel, dass die Zeitpunkte, zu denen der Strom seinen Scheitelwerth erreicht, später eintreten, als die Zeitpunkte, in denen die elektromotorische Kraft den Scheitelwerth annimmt. Wollen wir also die Curven  $E$  der

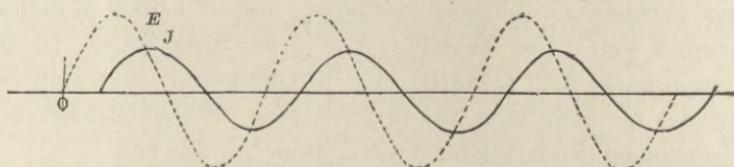


Fig. 358. Stromcurve, in der Phase etwas gegen die Spannungcurve verzögert.

elektromotorischen Kraft und  $J$  des Stromes zusammen aufzeichnen, so würden sie wie in Fig. 358 erscheinen. Die längs der Wagerechten von  $O$  aus gemessenen Entfernungen stellen die Zeit vor. Die Stromwellen, welche durch die ausgezogene Linie angegeben werden, sind in der Zeit hinter den Wellen der Spannung zurück. Vergleichen wir hiermit das auf Seite 518 unter Bezug auf Fig. 351 Gesagte, so kann die Wagerechte als die Darstellung eines fortwährend wachsenden Winkels dienen, und wenn wir ein Uhrdiagramm zeichnen, um die Beziehung zwischen Spannung und Strom darzustellen, so wird dies wie Fig. 3— aussehen, wo  $OV$  die Spannung,  $OC$  der Strom ist. Der Vector  $OC$  bleibt hinter  $OV$  zurück; der Winkel ihres Phasenunterschiedes ist  $\varphi$ . Dieser Winkel erscheint in unserer Formel als  $\operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\omega L}{R}$ ; in anderen Worten ist

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}.$$

Die Beziehungen zwischen einer elektromotorischen Wechselkraft und dem von ihr im Stromkreis erzeugten Strome kann leichter

verfolgt werden, wenn wir nicht mit der elektromotorischen Kraft beginnen und den Strom ableiten, sondern den Strom als gegeben ansehen und die elektromotorische Kraft suchen, die nothwendig ist, um jenen zu erzeugen. Dies lässt sich geometrisch leicht ausführen. Nehmen wir an, ein Wechselstrom von (effectiv)  $J$  Ampere fliesse mit einer Frequenz von  $n$  Perioden in der Secunde durch einen Strom von der Inductanz  $L$ ; dann ist die elektromotorische Gegenkraft (d. i. die elektromotorische Kraft, welche durch Zu- und Abnahme der vom Strom erzeugten magnetischen Linien entsteht)  $2\pi n L J$  Volt (effectiv)<sup>1)</sup>.

Wenn z. B.  $L = 0,002$  Henry,  $n = 50$  Perioden in der Secunde und  $J = 40$  Ampere, so haben wir eine rückwirkende elektromotorische Kraft von 25,1 Volt. Wenn wir nun 40 Ampere effectiv nicht nur durch den Widerstand von 1,5 Ohm, sondern auch gegen diese Rückwirkung treiben wollen, müssen wir mehr als 60 Volt aufwenden. Aber wir kommen mit weniger als  $60 + 25,1$  Volt aus, wenn die Rückwirkung nicht in gleichem Tritte mit dem Strome ist. Das Ohm'sche Gesetz lässt sich hier nicht mehr anwenden. Um die erforderliche Spannung zu finden, müssen wir zur Geometrie unsere Zuflucht nehmen.

Geometrische Darstellung des Gesetzes der Wechselströme. — Wir zeichnen in Fig. 359 die Wellenlinie  $Oabd$ , welche der Spannung entspricht, die nöthig wäre, um den Strom durch den Widerstand zu treiben, wenn keine Inductanz vorhanden wäre. Die Ordinate  $aA$  soll als Maassstab für 60 gelten. Wir nennen dies die Stromcurve. Nun zeichnen wir die Curve  $-\omega L J$ , welche die zur Ueberwindung der inductorischen Rückwirkung nöthige Spannung darstellt. Hierin steht  $\omega$  für  $2\pi n$ . Die Ordinate bei  $O$  ist 25,1, und die Curve ist um  $\frac{1}{4}$  Periode rückwärts verschoben. Denn wenn der Strom am schnellsten ansteigt, wie bei  $O$ , so ist die Wirkung der Selbstinduction am grössten. Nun setzen wir die beiden Curven

1) Dies berechnet man wie folgt: Auf Seite 529 wird gezeigt, dass die elektromotorische Gegenkraft erhalten wird, wenn wir  $L$  mit der Geschwindigkeit multipliciren, mit der sich der Strom ändert. Nun ändert sich hier der Strom nach dem Gesetz  $J_0 \sin 2\pi n t$ , worin  $J_0$  der Scheitelwerth des Stromes ist. Die Geschwindigkeit der Aenderung dieses Ausdruckes ist  $2\pi n J_0 \cos 2\pi n t$ . Die elektromotorische Gegenkraft folgt daher dem Gesetze  $2\pi n L J_0 \cos 2\pi n t$  und der effective Werth hiervon ist  $2\pi n L J$ . Es ist zu bemerken, dass die Gegenkraft einem Cosinusgesetz folgt, wenn der Strom nach dem Sinusgesetz verläuft, und dass in Folge dessen zwischen ihnen ein Phasenunterschied von 90 Grad herrscht.

zusammen, indem wir die Ordinaten addiren, und erhalten die punktirte Linie, deren Höchstwerth bei  $E$  liegt; dies ist die Curve der Spannung, die auf den Stromkreis wirken muss, um den Strom hervorzubringen. Man sieht, dass der Strom seinen Höchstwerth ein wenig später als die Spannung den ihrigen erreicht; der Strom

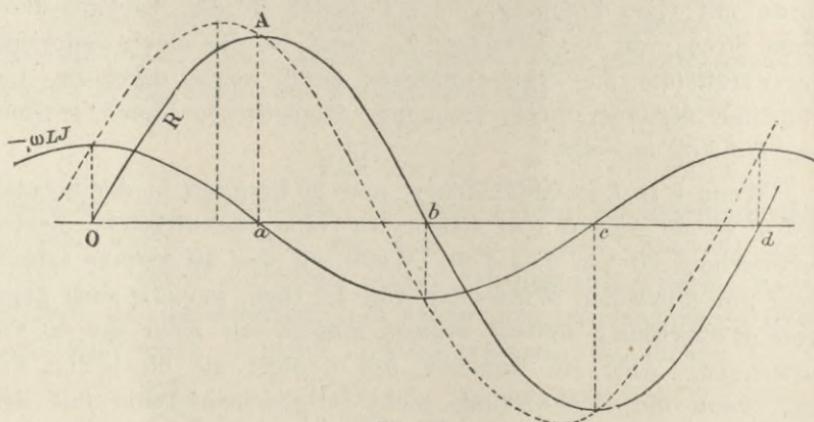


Fig. 359.

ist in der Phase gegen die Spannung verzögert. Wenn  $Od$  die Zeit einer vollen Periode ist, so bedeutet die Länge  $ea$  die Zeit zwischen den Augenblicken, in denen Strom und Spannung ihre höchsten

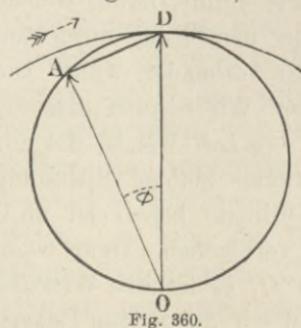


Fig. 360.

Werthe erreichen. Fig. 360 stellt denselben Vorgang, wie in Fig. 354 im Polardiagramm dar. Die Länge  $OA$  bedeutet die Arbeitsspannung  $RJ$  ( $R =$  Widerstand), während die Länge  $AD$ , die zu  $OA$  senkrecht steht, die elektromotorische Kraft der Selbstinduction  $\omega LJ$  darstellt. Indem wir diese nach dem Parallelogramm der Kräfte zusammensetzen, erhalten wir die Länge  $OD$ , welche die wirkende elektromotorische

Kraft angiebt. Lässt man die Zeichnung um  $O$  als Mittelpunkt sich drehen und projicirt dabei die drei Strecken auf eine senkrechte Linie, so erhält man die zusammengehörigen Augenblickswerthe der drei Grössen. Der Winkel  $AOD$  oder  $\varphi$ , um den der Strom hinter der wirkenden Spannung zurückbleibt, heisst der Verzögerungswinkel. Wenn die Inductanz oder die Frequenz noch so gross wird, so kann der Winkel  $\varphi$  niemals grösser als 90 Grad werden. Wenn  $OA = 60$  und  $AD = 25,1$  ist, so wird  $OD = 65$  Volt.

In Zeichen ausgedrückt muss die wirkende Spannung so gross sein, dass

$$E^2 = (RJ)^2 + (\omega LJ)^2,$$

woraus die Gleichung  $J = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \dots \dots \dots$  (I).

Der Nenner des Bruches auf der rechten Seite der letzten Gleichung heisst gewöhnlich Impedanz<sup>1)</sup> oder scheinbarer Widerstand.

Er besteht aus zwei Theilen, nämlich dem Widerstand  $R$  und der Reactanz  $\omega L$ , welche von der Selbstinduction herrührt; aber diese beiden Theile addiren sich nicht einfach, um die Impedanz zu bilden. Jede wird ins Quadrat erhoben, die Quadrate werden addirt, und aus der Summe wird die Quadratwurzel gezogen. Vergleichen wir den vorigen Ausdruck mit dem Gesetz für Gleichstrom, nämlich:

$$J = \frac{E}{R},$$

so sehen wir, dass die Wirkung der Inductanz darin besteht, das Verhalten des Stromkreises zu ändern; er wirkt jetzt so, als ob sein Widerstand von  $R$  auf  $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$  vergrößert worden wäre. Thatsächlich richtet sich der Wechselstrom nicht nach dem Widerstand, sondern nach der Impedanz des Stromkreises.

Die Gleichung giebt uns die Stärke des Stromes, aber nicht seine Phase. Aus den Fig. 361 und 362 sieht man, dass die Tangente des Verzögerungswinkels

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega LJ}{RJ} = \frac{\omega L}{R}$$

ist. Der Strom wird so verzögert, als wenn sein Phasenwinkel nicht  $\vartheta$ , sondern  $\vartheta - \varphi$  wäre, so dass die Gleichung der Augenblickswerthe von  $J$ , wenn  $E = D \sin \vartheta$ , lautet

$$J = \frac{D \sin (\vartheta - \varphi)}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \dots \dots \dots$$
 (II).

---

1) Der Ausdruck Impedanz bedeutet allgemeiner das Verhältniss der wirkenden elektromotorischen Kraft zu dem Strome, welchen sie in einem Leiter hervorruft (vergl. Lodge's Modern Views, Seite 398); die obige Gleichung stellt also nur einen einzelnen Fall dar. Bei Gleichstrom ist demnach die Impedanz einfach der Widerstand. Bei veränderlichen Strömen setzt sie sich zusammen aus Widerstand, Inductanz und (wenn der Stromkreis elektrostatische Capacität hat) Permittanz in verschieden grossem Maasse, je nach der Form der Aenderung. Bei wirklichen periodischen Strömen, die dem Sinusgesetze folgen, ist die Impedanz gleich der Quadratwurzel aus der Summe der Quadrate des Widerstandes und der Inductanz. Bei Strömen, welche sich rascher ändern, wird die Impedanz mehr von der Selbstinduction und weniger von dem Widerstande abhängen.

Dies ist die Maxwell'sche Gleichung<sup>1)</sup> für periodische Ströme, die durch Inductanz verzögert werden. Da die Messinstrumente die Phase nicht berücksichtigen, sondern die effectiven Werthe angeben, so ist die zuerst mitgetheilte einfachere Form gewöhnlich ausreichend.

Die Beziehung zwischen Widerstand und Impedanz wird leicht aus dem Dreieck, Fig. 362, erhalten; denn der Winkel  $\varphi$  giebt uns die Beziehungen:

$$\sin \varphi = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}, \quad \cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}.$$

Wenn wir es vorziehen, können wir für die Impedanz im Nenner der beiden ersten Ausdrücke ihren Werth  $R/\cos \varphi$  einsetzen.

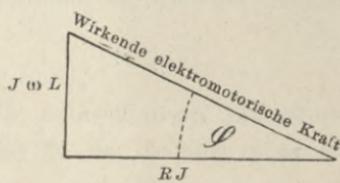


Fig. 361.

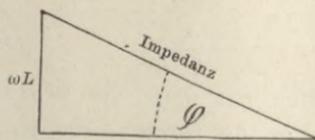


Fig. 362.

Die obigen Gleichungen gelten sowohl für Scheitel-, wie für effective Werthe. Z. B. können wir schreiben:

$$J_{max} = \frac{E_{max}}{\text{Impedanz}} \quad \text{oder} \quad J_{max} = \frac{E_{max}}{\text{Widerstand}} \cdot \cos \varphi$$

und

$$J_{eff} = \frac{E_{eff}}{\text{Impedanz}} \quad \text{oder} \quad J_{eff} = \frac{E_{eff}}{\text{Widerstand}} \cdot \cos \varphi.$$

Das Uhrdiagramm mit den sich drehenden Graden kann sowohl mit Scheitel-, wie mit effectiven Werthen gezeichnet werden.

Wirkung der Capacität. Wenn eine elektromotorische Kraft auf einen Condensator wirkt, so fließt der Strom ein und aus, indem er den Condensator in abwechselnder Richtung ladet. Während der Strom einerseits ein-, andererseits ausfließt, ladet sich das Dielectricum und sucht sich selbst zu entladen, indem es eine elektromotorische Gegenkraft entwickelt. Seine Gegenspannung wächst ebenso, wie die Ladung ansteigt. Eine mechanische Analogie bietet eine Feder, welche man spannt; während sie gespannt wird, äussert sie eine Gegenkraft, welche proportional der Spannung ist, der die Feder unterworfen wird. Wird die Feder einer periodischen Kraft ausgesetzt, so sucht die Elasticität der Feder die Rückwärtsbewegung zu beschleunigen. In der gleichen Weise sucht die

1) Der analytische Beweis wird später am Ende dieses Kapitels gegeben.

elektrische Elasticität eines Condensators den Rückfluss des Stromes zu beschleunigen.

Die Wirkung der Capacität im Wechselstromkreise besteht darin, dem Strome in der Phase eine Voreilung zu erteilen; denn der Condensator wirkt auf den Strom zurück, indem er ihn zurücktreibt, nicht wie im Falle der Selbstinduction, wo der Strom gewissermassen in die Länge gezogen wird. Beim Studium dieser Vorgänge muss man stets genau unterscheiden, zwischen dem Fall einer in Reihe eingeschalteten Capacität und dem Fall, wo die Capacität neben einem Zweig des Stromkreises liegt. Das Obengesagte bezieht sich auf in Reihe geschaltete Capacität, d. h. der Leiter des Stromkreises ist thatsächlich durchgeschnitten und seine Enden sind an

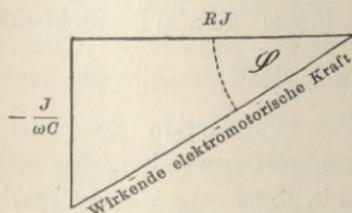


Fig. 363.

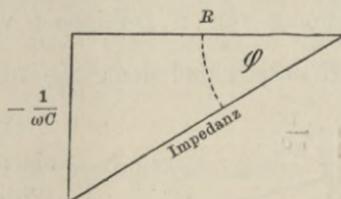


Fig. 364.

die Pole eines Condensators gelegt worden, so dass kein Strom fließen kann, ausser dem Ladungs- und Entladungsstrom des Condensators. Schalten wir die Capacität einem Theil des Stromkreises parallel, und betrachten wir nun die Vorgänge in diesem Theil, wenn an seinen Enden eine gegebene Wechselkraft wirkt, so hat die Capacität gar keine Wirkung. Wenn aber die Spannung an einem anderen Theil des Stromkreises gegeben ist, so wird die Aufgabe verwickelter und erfordert die Kenntniss der Impedanzen der verschiedenen Theile des Stromkreises. Kehren wir zum einfachen Stromkreise mit einem Condensator in Reihe zurück, so sehen wir, dass der Condensator um so stärker zurückwirkt, je kleiner er ist. Die Reactanz wird deshalb in der Form  $-\frac{1}{\omega C}$  geschrieben; sie ist negativ und umgekehrt proportional zu  $C$  (der Capacität in Farad) und zu  $\omega$ ; der Winkel  $\varphi$  wird dann aus der Gleichung

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{1}{\omega} CR$$

bestimmt. Die Impedanz ist

$$\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$$

Fig. 363 und 364 zeigen die in diesem Falle anzuwendende Construction.

Wenn sowohl Inductanz als Capacität vorhanden sind, so ist

$$\operatorname{tg} \varphi = \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) R;$$

die Reactanz ist  $\omega L - \frac{1}{\omega C},$

die Impedanz

$$\sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

Dies wird durch Fig. 365 erläutert, wo das Dreieck zur Bestimmung von  $\varphi$  gezeichnet wird, indem man  $\omega L$  rechtwinkelig an  $R$  ansetzt und dann  $\frac{1}{\omega C}$  von  $\omega L$  abzieht.

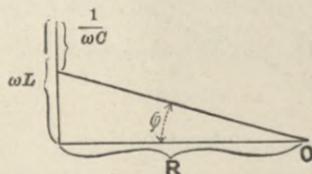


Fig. 365.

Dieselbe Construction lässt sich auf einen Stromkreis anwenden, der mehrere Widerstände, Inductanzen und Capacitäten enthält.

Da Capacität und Inductanz entgegengesetzte Wirkung haben, können sie zur gegenseitigen Ausgleichung benutzt werden. Sie heben sich genau auf, wenn  $L = \frac{1}{\omega^2 C}$ ; in diesem Falle besitzt der Stromkreis scheinbar keine Inductanz, und die Ströme befolgen einfach das Ohm'sche Gesetz.

Man sieht, dass in einem Stromkreise von geringem Widerstande, aber grosser Reactanz der Strom fast allein von der letzteren abhängt. Denn wenn  $\omega (= 2\pi n)$  z. B. = 1000 und  $L = 10$  Henry ist, während  $R$  nur 1 Ohm beträgt, so ist der Antheil des Widerstandes an der Impedanz zu vernachlässigen, und die Formel lautet:

$$J = \frac{E}{\omega L}.$$

Wenn der magnetische Weg, der sich durch den Stromkreis schlingt, kein Eisen enthielte, so würde der Strom um fast 90 Grad nacheilen. Besteht aber der magnetische Kreis hauptsächlich aus Eisen, so fliesst ausser dem Strom, den unsere Gleichung darstellt, noch ein anderer Strom, der mit der Spannung in Phase ist, und der den Verlust im Eisen (durch Hysteresis und Wirbelströme)

bestreitet. Praktisch finden wir also, dass der Gesamtstrom um weniger als 90 Grad nacheilt.

Man gebraucht die Formel, um Wechselstrom-Magnete zu berechnen. Denn ihr scheinbarer Widerstand rührt fast ganz von der Inductanz her.

Selbstinductionsspulen mit grosser Inductanz und kleinen Widerstand werden manchmal zur Abschwächung eines Wechselstromes gebraucht und werden Drosselspulen oder Impedanzspulen genannt.

Wird der Strom in einen Condensator von kleiner Capacität (z. B.  $C = 0,1$  Mikrofarad,  $\frac{1}{\omega C} = 10\,000$ ) geleitet, so wird der Strom, der in den Condensator und herausfliesst, nur durch die Capacität desselben Condensators und durch die Wechselgeschwindigkeit bestimmt, aber nicht durch den Widerstand, und erhält den Werth:

$$J = E \omega C.$$

Seine Phase wird eine Voreilung von fast 90 Grad haben.

Eine Capacität, welche quer zum Stromkreis wirkt, z. B. wenn ein Condensator mit den beiden Hauptleitungen verbunden ist, hat die Wirkung, die Stromstärke in der Leitung von der Dynamomaschine bis zu den Punkten, wo der Condensator angelegt ist, zu erhöhen, und damit zugleich die effectiven Spannungen dieser Punkte. Auf diese Weise beeinflusst er zugleich die Spannung in der übrigen Anlage. Bei gegebenen Werthen der Frequenz, des Widerstandes und der Selbstinduction giebt es einen besonderen Werth der Capacität, welcher Strom und Spannung durch eine Art Resonanzwirkung ausserordentlich stark erhöht. Diese verschiedenen Condensatorwirkungen sind von verschiedenen Schriftstellern untersucht worden. Eine sehr klare Auseinandersetzung darüber giebt Fleming<sup>1)</sup>, der auch die in der Deptford Anlage an den Ferranti'schen Kabeln beobachteten Erscheinungen berücksichtigt.

Mittlere Leistung. — Die Leistung kann hier nicht, wie bei Gleichstrom, direct durch einfache Multiplication der Spannung mit dem Strom erhalten werden; denn wenn eine Phasendifferenz vorhanden ist, sind die so berechneten scheinbaren Watt immer grösser als die wirklichen Watt. Wir sahen auf Seite 527, dass der mittlere Werth des Products zweier periodischer Functionen gleich ist dem

1) Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 20, S. 362. 1891.

halben Product ihrer Scheitelwerthe, multiplicirt mit dem Cosinus ihrer Phasendifferenz, oder

$$\begin{aligned} \text{Mittlere Leistung (wirkliche Watt)} &= \frac{1}{2} E_{max} \cdot i_{max} \cdot \cos \varphi \\ &= \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{i_{max}}{\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi \\ &= E_{eff} \cdot i_{eff} \cdot \cos \varphi. \end{aligned}$$

Nun kann man das Product  $E_{eff} \cdot \cos \varphi$  betrachten als denjenigen Theil der Spannung, der mit dem Strome gleiche Phase hat, also gleich  $i_{eff} \cdot R$  ist. Daher können wir die mittlere Leistung (wirkliche Watt) auch ausdrücken durch  $i_{eff}^2 \cdot R$ . Das heisst: Wenn der Widerstand des Stromkreises inductionslos ist, wie ein Lampen- oder ein Wasserwiderstand, so werden die wirklich im Stromkreise verbrauchten Watt in der gewöhnlichen Weise durch  $i^2 R$  ausgedrückt. Es giebt aber noch eine andere Art, den Vorgang zu betrachten, nämlich die folgende.

#### Arbeitsloser Strom.

Wenn eine grosse Phasendifferenz zwischen Spannung und Stromstärke (entweder eine Verzögerung infolge der Selbstinduction oder eine Voreilung infolge der Capacität) herrscht, so ist die Zahl der wirklichen Watt viel kleiner als der scheinbare Werth, den man durch Multiplication der effectiven Ampere mit den effectiven Volt erhalten würde. Wie wir erörtert haben, muss dies Product noch mit dem Cosinus des Verzögerungs- (oder Voreilungs-) Winkels multiplicirt werden. Man kann nun das Product  $E_{eff} \cdot i_{eff} \cdot \cos \varphi$  entweder als das Product der effectiven Ampere mit dem wirksamen Theil der effectiven Volt, oder als das Product der effectiven Volt mit dem wirksamen Theil der effectiven Ampere ansehen. Ebenso wie man eine Kraft in zwei zu einander rechtwinkelig stehende Componenten zerlegen kann, so lässt sich jeder Wechselstrom in zwei Stromcomponenten zerlegen, die um 90 Grad in der Phase verschieden sind.  $i$  lässt sich in zwei Theile zerlegen;  $i \cos \varphi$  stimmt in der Phase mit der Spannung überein, und  $i \sin \varphi$  ist um 90 Grad verschieden, in Quadratur mit der Spannung. Diese zwei Stromtheile kann man als den Arbeitsstrom und den arbeitslosen Strom bezeichnen.

In der Figur 366 stellt  $OE$  den wirksamen Theil der elektromotorischen Kraft  $OA$  dar. Ein Theil von  $OE$ , der durch Division von  $OE$  durch  $R$  (vergl. folgende Seite) gefunden wird, stellt den Strom  $i$

dar. Die eine Componente  $OW$ , die mit  $OA$  in der Phase übereinstimmt, ist der Arbeitsstrom, und der Theil  $OU$  (90 Grad von  $OA$ ) ist der arbeitslose Strom.

Wenn nun aus irgend einer Ursache der Verzögerungswinkel  $\varphi$  gross ist, so wird der arbeitslose Theil des Stromes ebenfalls gross. Wenn z. B. Umsetzungsapparate mit offenem secundären Kreise eingeschaltet werden, so ist der Strom in der primären Wicklung unter dem Einfluss der Selbstinduction nahezu um 90 Grad von der Spannung verschieden und würde ganz arbeitslos sein, wenn nicht in den Eisenkernen Hysteresis oder Wirbelströme wirkten.

Wenn z. B. ein Strom von 100 Ampere effectiv um 14 Grad hinter der Spannung verzögert ist, kann derselbe zerlegt werden in einen Arbeitsstrom von 97,03 Ampere effectiv und einen arbeitslosen Strom von 24,2 Ampere effectiv.

#### Leistungsfactor.

Hiernach können wir  $\cos \varphi$  als den Leistungsfactor bezeichnen, da die scheinbare Leistung stets mit ihm multiplicirt werden muss, um die wirkliche Leistung zu erhalten. Ist z. B. ein Strom um 30 Grad hinter der Spannung verzögert, so würde ein Strom von 50 Ampere bei 1200 Volt Spannung nicht 60 Kilowatt, sondern nur  $60 \times 0,866 = 52$  Kilowatt leisten, da  $\cos \varphi = 0,866$  ist. Um 60 Kilowatt effectiv zu bekommen, müssten  $50 : 0,866 = 57,7$  Ampere verfügbar sein. Es muss also überall, wo Selbstinduction vorhanden ist, den Motoren ein stärkerer Strom zugeführt werden, als sonst erforderlich wäre.

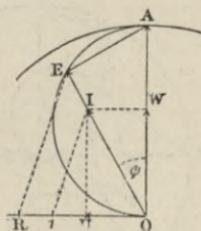


Fig. 366.

#### Messung von Wechselströmen.

Die obigen Darlegungen zeigen, dass die Messung von Wechselströmen mit grosser Sorgfalt ausgeführt werden muss. Wenn zwischen Strom und Spannung keine Phasendifferenz besteht, sind die scheinbaren Watt gleich den wirklichen; in diesem Falle kann die Messung mit Strom- und Spannungsmessern bewirkt werden<sup>1)</sup>. Ist dagegen eine Phasendifferenz vorhanden, muss zur Messung ein passender

1) Wer mit diesem Gegenstande nicht vertraut ist, sollte die Abhandlungen von Blakesley oder von Fleming durchsehen. Die Drei-Dynamometer-Methoden von Blakesley und von Ayrton und ähnliche sind alle brauchbar. Fleming hat auf Grund vieler Erfahrungen die einfache Wattmesser-Methode bevorzugt; vergl. Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 21, S. 594. 1892.

Leistungsmesser gebraucht werden; die gewöhnliche Ausführungsform dieser Apparate ist ein Elektrodynamometer, welches so gebaut ist, dass der grosse Widerstand desselben selbstinductionslos ist.

Zahlenbeispiel. Es sei eine elektromotorische Kraft von 65 (effectiven) Volt und mit 50 Perioden in der Secunde gegeben. Der Widerstand des Kreises betrage 1,5 Ohm, der Coëfficient der Selbstinduction 0,002 Henry. Gesucht wird die Verzögerung, der Strom und die mittlere Leistung.

Um die Verzögerung zu finden, müssen wir zunächst die Inductanz  $2\pi nL$  bestimmen und diese durch den Widerstand dividiren, dann ist:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi nL}{R} = \frac{2 \cdot 3,1416 \cdot 50 \cdot 0,002}{1,5} = 0,419.$$

Daraus  $\varphi = 22$  Grad  $44'$  und  $\cos \varphi = 0,9223$ . Wir können auch  $\cos \varphi$  direct bestimmen aus der Formel

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + 4\pi^2 n^2 L^2}}$$

Multiplircirt man  $\cos \varphi$  mit 65 Volt, so giebt dies 59,65 oder rund 60 als die wirksamen effectiven Volt, und dividirt durch den Widerstand 1,5 Ohm effective Ampere als Stromstärke. Die mittlere Leistung ist  $65 \cdot 40 \cdot 0,9223 = 2400$  Watt.

In der Fig. 367 ist dies geometrisch dargestellt.

$OA$  bedeute die effective Kraft  $E$  gleich 65 Volt nach einem beliebigen Maassstab. Mit  $OA$  als Radius wird ein Kreis beschrieben, ebenso ein Kreis über  $OA$  als Durchmesser. Rechtwinkelig zu  $OA$  wird  $OB$  gelegt. Auf  $OB$  wird der Widerstand  $R$  abgetragen,  $O1$  bedeute 1 Ohm. Nach demselben Maassstab trägt man  $OS = RF = 2\pi nL = 0,628$  ab. Der Punkt  $O$  wird mit  $F$  verbunden.  $ROF$  ist dann der Verzögerungswinkel. Man zieht nun  $EO$  rechtwinkelig zu  $OF$ .  $EOA$  ist ebenfalls = dem Verzögerungswinkel, und  $EO$  stellt die wirksamen effectiven Volt dar,  $AE$  die gegenelektromotorische Kraft der Selbstinduction.  $E$  wird mit  $R$  verbunden und durch den Punkt 1 zu  $ER$  eine Parallele gezogen, dann stellt  $CO$  die Stromstärke dar. Da  $OB$  gleich  $OA$  ist, so ist die Fläche  $BOC = \frac{1}{2} OA \cdot OC \cdot \cos AOC = \frac{1}{2}$  der mittleren Leistung (vergl. Seite 527).

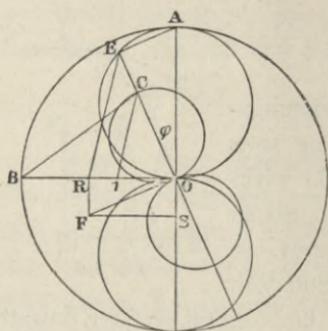


Fig. 367.

Es lässt sich nun auch erörtern, weshalb es wünschenswerth ist, dass die Inductionscurven von Wechselstrommaschinen die Sinusform besitzen, und weshalb bedeutende Abweichungen nicht erwünscht sind. Nach dem Satze von Fourier lässt sich jede zusammengesetzte periodische Function in eine Reihe einfacher periodischer Functionen, die in Amplitude und Phase verschieden sind, zerlegen, die aber sämmtlich zu einer harmonischen Reihe gehören, deren Wechsel ein genaues Vielfaches eines einzelnen Wechsels der Grundform sind. Jede zusammengesetzte Wellencurve kann man aus Sinuscurven entstanden denken. So lässt sich z. B. die in Fig. 368 gezeichnete starke Curve aus den beiden punktirten Sinuscurven construirt denken, von denen die eine den dreifachen Wechsel der andern besitzt.

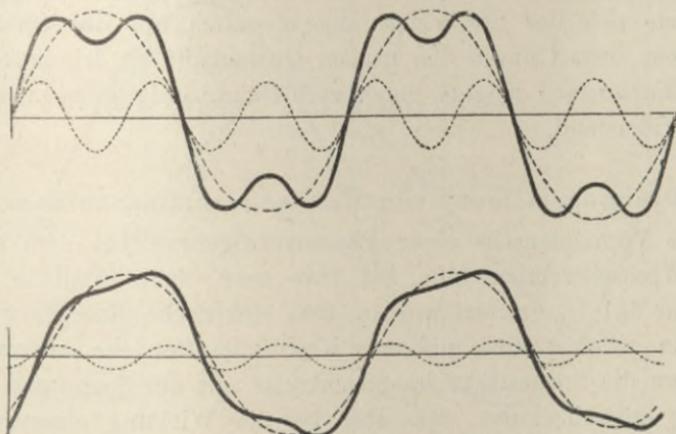


Fig. 368 und 369.

Die zusammengesetzte Curve möge den Gang der elektromotorischen Kraft einer Wechselstrommaschine mit besonders gestalteten Polen darstellen. Wie wird sich dann die Curve der wirksamen elektromotorischen Kraft (oder des Stromes) unter dem Einflusse der Selbstinduction darstellen? Die Amplitude wird nahezu im Verhältniss zur Wechselzahl vermindert. Die zweite Welle mit dreifacher Wechselzahl der Grundwelle wird deshalb auch fast in gleich hohem Verhältniss mehr herabgedrückt als die Grundwelle<sup>1)</sup>.

Die Fig. 369 zeigt die beiden Wellen mit einer Verzögerung von 41 Grad, die Amplituden der Grundwelle sind bis zu 0,75, die der kleinen Welle bis zu 0,35 herabgemindert, aus beiden Wellen folgt die gezeichnete resultirende Welle. Die Selbstinduction sucht

1) Vergl. die Untersuchung von Ayrton und Perry im Journ. Electr. Engin. Bd. 18, S. 300. 1889.

ersichtlich die Welle und alle Theile, die nicht der Sinusform entsprechen, zu verflachen. Deshalb werden solche Wechselstrommaschinen, die Inductionscurven von wirklicher Sinusform liefern, weniger als andere beeinflusst, und besitzen eine grössere Wirksamkeit.

Hohe Wechselzahlen. Wechselströme von sehr hoher Periode, etwa 10000 bis 20000 in der Secunde, sind von Spottiswoode<sup>1)</sup> und neuerdings von Tesla<sup>2)</sup>, der verschiedene sehr bemerkenswerthe Wirkungen erhalten hat, beobachtet worden.

Eine der verwendeten Wechselstrommaschinen hatte die Form einer Maschine von Mordey und besass an jeder Seite zahlreiche polare Vorsprünge, eine andere Maschine hatte die Form eines Inductionsapparates. Unter der Einwirkung der hohen Wechselzahl verbreitete sich der Strom fast ausschliesslich auf der Oberfläche der Leiter, anstatt durch den ganzen Querschnitt zu dringen; sogar gerade Kupferstäbe zeigten einen verhältnissmässig grossen scheinbaren Widerstand.

#### Drehungsmoment von Wechselstrommaschinen.

Das Vorhandensein einer Phasenverzögerung bei dem Strome einer Wechselstrommaschine hat eine sehr eigenthümliche Folge. Auf Seite 461 ist erörtert worden, dass elektrische Energie von der Maschine geliefert wird und man Kraft zum Betriebe aufzuwenden hat, wenn die Stromstärke im Stromkreise mit der Spannung in der Richtung übereinstimmt, dass aber bei der Wirkung einer elektromotorischen Gegenkraft elektrische Energie in mechanische umgesetzt wird und beim Umtriebe hilft. Das eine findet beim Stromerzeuger, das zweite bei der Triebmaschine statt.

Man erwäge nun, dass beim Betriebe einer Wechselstrommaschine der Strom hinter der Spannung zurückbleibt, wie aus der Fig. 370 zu ersehen ist. Es wird einleuchten, dass infolge dessen der Strom in einzelnen Zeitpunkten gegen die Spannung anstatt in derselben Richtung wirkt. Jede volle Periode  $OX$  können wir in vier Theile zerlegen; in den Abtheilungen II und IV stimmen Strom und Spannung in der Richtung überein, indem beide Grössen entweder positiv oder negativ sind, in den Abtheilungen I und III sind die Richtungen entgegengesetzt, der zurückgebliebene Strom hat sein

1) Proc. Royal Soc., Bd. 23, S. 455.

2) American Inst. Electr. Engin., Mai 1891. Vergl. Electric World, Bd. 16. 1891 und The Electrician, Bd. 26, S. 549. 1891.

Vorzeichen noch nicht gewechselt. Während der Perioden II und IV, in denen Uebereinstimmung herrscht, verhält sich die Maschine wie ein Stromerzeuger und muss getrieben werden, da die Ströme im Anker ein Gegenmoment hervorbringen. Während der Perioden I und III dagegen wirkt die Maschine wie eine Triebmaschine, sie sucht selbst ihren Umlauf zu fördern und das Drehungsmoment zu vergrössern. Die Ankerleiter unterliegen daher einer Wirkung, die zwischen Ziehen und Gezogenwerden abwechselt; sie leisten Widerstand, während sie umgetrieben werden, und unterstützen dann wieder den Umtrieb. Jedes erfolgt je zweimal in jeder Periode.

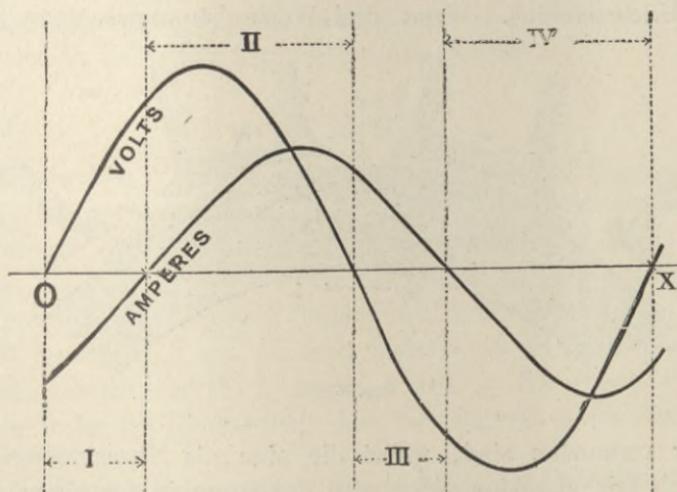


Fig. 370. Wirkung einer Phasenverzögerung des Stromes.

Wenn nur eine geringe Verzögerung vorhanden ist, so wird auch nur eine geringe treibende Thätigkeit der Leiter entwickelt, bei grosser Verzögerung wächst aber diese Thätigkeit je nach der Dauer der Periodentheile I und III. Beträgt die Verzögerung genau ein Viertel einer Periode, so sind beide Wirkungen einander gleich. Wenn infolge von Capacität der Strom in der Phase verschoben wird, so herrscht ebenso in einzelnen Periodentheilen eine treibende Wirkung. Dies lässt sich noch in anderer Weise betrachten. Die elektromotorischen Kräfte wechseln das Zeichen, wenn die Leiter aus einem magnetischen Felde in das andere eintreten (vergl. Fig. 371) und in letzterem die Kraftlinien in entgegengesetzter Richtung verlaufen. Besitzt der Strom dieselbe Phase wie die elektromotorische Kraft, so sucht er die ihn erzeugende Bewegung zu hemmen, und kehrt sich um, wenn der Leiter in das Feld bei *aa* gelangt. Bleibt

er in der Phase zurück, so unterstützt er, nachdem die Leiter von einem Feld in das andere getreten sind, die Bewegung bis zu der Zeit, wo der Strom bei *bb* umgekehrt ist.

Hieraus folgt, wenn eine Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung vorhanden ist, dass die wirkliche Leistung im Stromkreise gleich ist dem Unterschiede zwischen der Leistung, welche während der Perioden II und IV verbraucht wird, und der Leistung, welche während I und III geleistet wird. Wenn die Phasendifferenz geringer als 90 Grad ist, wirkt die Maschine im Ganzen genommen als Stromerzeuger, wenn der Unterschied grösser als 90 Grad ist, wirkt sie als Triebmaschine. Wenn zwei Wechselstrommaschinen hinter-

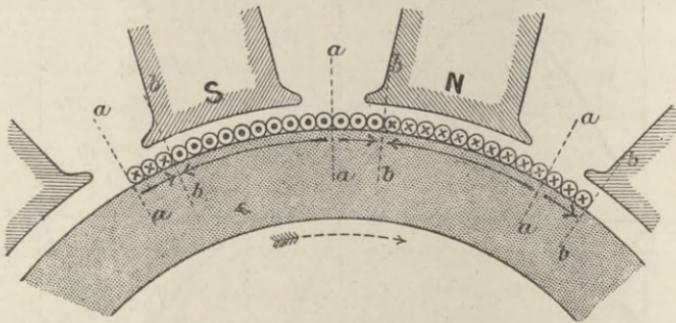


Fig. 371.

einander verbunden sind, wobei die eine als Stromerzeuger, die andere als Triebmaschine wirkt, wird der Strom in der einen nahezu in Phase mit der elektromotorischen Kraft sein, bei der andern aber fast genau entgegengesetzt.

Diese Untersuchung wird im Kapitel XXIV weiter fortgeführt werden.

### Analytische Behandlung der Grundgleichungen von Wechselströmen.

Es befinde sich eine Schleife mit *N* Windungen unter einem Winkel  $\vartheta$  (von der Anfangslage aus gemessen, wie in der Fig. 110, wo die Schleife quer zur Richtung des Feldes steht). Dann schliesst die Schleife nicht mehr die gesammte Menge der im Felde vorhandenen Kraftlinien ein. Lassen wir die Selbstinduction ausser Betracht, so ist

$$\mathcal{E}_1 = N_2 \mathcal{E} \cos \vartheta \dots \dots \dots (I),$$

wenn  $\mathcal{E}_1$  die Menge der wirklich von der Schleife eingeschlossenen Kraftlinien bedeutet.

Wir müssen nun noch die Menge der Kraftlinien in Betracht ziehen, welche durch die Selbstinduction des Stromkreises erzeugt werden <sup>1)</sup>.

Wenn ein Strom  $i$  in einem Stromkreise entsteht, welcher die Inductanz oder den Selbstinductionscoefficienten  $L$  hat, so wird die ganze Selbstinduction des Stromkreises gleich  $Li$  sein; das Product  $Li$  stellt also den von der Selbstinduction der Windungen herrührenden Betrag der eingeschlossenen Kraftlinien dar.

Der Gesamtbetrag der Kraftlinien ist also

$$\mathfrak{S}_1 = N\mathfrak{S} \cos \vartheta + Li \dots \dots \dots \text{(II).}$$

Jede Aenderung von  $\mathfrak{S}_1$  inducirt eine elektromotorische Kraft, und zu jedem Zeitpunkt hat letztere den Werth:

$$E = - \frac{d\mathfrak{S}_1}{dt} \dots \dots \dots \text{(III).}$$

Das negative Vorzeichen drückt hier aus, dass ein Anwachsen von  $\mathfrak{S}_1$  eine entgegengesetzte oder negative elektromotorische Kraft hervorbringt. Jede Aenderung von  $\mathfrak{S}_1$ , welcher Quelle sie entstammen möge, bringt stets elektromotorische Kraft hervor.

Wenn wir die Gegenwirkungen des Ankers einstweilen ausser Betracht lassen, sind die einzigen Grössen, deren Aenderungen zu den Aenderungen von  $\mathfrak{S}_1$  beitragen,  $\vartheta$  und  $i$ . Der Winkel  $\vartheta$  ändert sich von 0 bis  $2\pi$  (Radianten), d. h. von 0 Grad rechts herum bis

1) Neumann's Untersuchungen über die Wirkung der Selbstinduction eines Stromkreises in Bezug auf eine periodische elektromotorische Kraft wurden 1845 veröffentlicht, jedoch sind Selbstinductionserscheinungen schon früher von Henry und Faraday untersucht worden.

Andere mathematische Untersuchungen von Wechselströmen sind von Weber in seinen Elektrodynamischen Maassbestimmungen veröffentlicht worden; ferner auch von den folgenden Forschern:

Koosen, Pogg. Ann., Bd. 87, S. 386. 1852.

Le Roux, Ann. Chim. Phys. (3), Bd. 50, S. 463. 1857.

Clerk Maxwell, Phil. Trans. 1865. S. 473.

F. Kohlrausch, Pogg. Ann., Bd. 148, S. 143. 1873.

Jamin und Richard, Ann. Chim. Phys. (4), Bd. 17, S. 276. 1869.

Joubert, Ann. de l'École Normale Supérieure, Bd. 10. 1881; und Journ. de Phys. s. II, Bd. 2, S. 293. 1883.

Lord Raleigh, Phil. Mag., Mai 1886. S. 375.

Hopkinson, Lecture at Inst. Civ. Engineers (on Electric Lighting). 1883.

„ Journ. Soc. Telegr. Engineers, Bd. 13.

„ Proc. Roy. Soc., Februar 1887.

Auszüge aus den wichtigeren dieser Abhandlungen findet man in Fleming's Buch über Wechselstromtransformatoren.

zu 360 Grad, sein Cosinus schwankt zwischen 1 und  $-1$ . Die Stromstärke  $i$  ändert sich demnach von einem bestimmten Höchstbetrage  $+i_{max}$  bis zu einem gleichen negativen Höchstbetrage  $-i_{max}$ . Wir wollen sämtliche Aenderungen der übrigen Grössen ausser Acht lassen, weil solche für die Praxis nur geringe Wichtigkeit haben. Wir erhalten nun:

$$E_t = -\frac{d\mathcal{E}_1}{dt} = -\frac{d(N\mathcal{E} \cos \vartheta + Li)}{dt}.$$

Die Zeit, die zur Drehung der Ankerschleife um den Winkel  $\vartheta$  erforderlich war — kleiner Bruchtheil einer Secunde — sei  $t$ , und  $T$  die Zeit für eine Umdrehung, so dass, wenn  $n$  Umläufe in der Secunde<sup>1)</sup> stattfinden,  $T = \frac{1}{n}$  Secunde ist. Der Winkel  $\vartheta$  bildet den  $\frac{t}{T}$  Theil einer ganzen Umdrehung, und der in Radianen ausgedrückte Winkel ist

$$\vartheta = 2\pi \frac{t}{T} = 2\pi n t = \omega t,$$

wo  $\omega$  gleich  $2\pi n$  gesetzt ist;  $\omega$  heisst die Pulsation.

Setzt man diesen Werth ein und führt die Differentiation aus, so wird:

$$E_t = 2\pi n N\mathcal{E} \sin \omega t - L \frac{di}{dt} \dots \dots \dots \text{(IV).}$$

Diese Gleichung zeigt, dass bei offenem Stromkreise, wenn kein Strom vorhanden sein kann, auch keine Selbstinduction entstehen kann. Das negative Vorzeichen deutet zugleich an, dass der der Selbstinduction entstammende Theil der elektromotorischen Kraft dem anderen Theile entgegenwirkt. Wir wissen nun, dass derjenige Theil der elektromotorischen Kraft, welcher erforderlich ist, damit der Strom  $i$  durch den Widerstand des Kreises getrieben wird, einfach nach dem Ohm'schen Gesetz berechnet werden kann. Wenn nun der aus Formel (IV) gefundene Werth  $E_t$  die wirkliche elektromotorische Kraft nach Abzug aller Gegenwirkungen bedeutet, so können wir setzen:  $E_t = Ri_t$  oder, wenn wir  $D$  für  $2\pi n N\mathcal{E}$  setzen, ergiebt sich

$$Ri_t = D \sin \vartheta - L \frac{di}{dt}$$

1) In vielpoligen Maschinen ist die Periodenzahl im Verhältniss zur Zahl der Polpaare grösser als die Zahl der Umläufe. Der Werth  $n$  bedeutet dann die Periodenzahl.

Diese Differentialgleichung ist von der Form:

$$ay + b \frac{dy}{dx} = \sin cx,$$

und deren Lösung ergibt:

$$i_t = \frac{D \cos \varphi \cdot \sin (\vartheta - \varphi)}{R} + C e^{-\frac{R}{L} t} \dots \dots \dots (V),$$

wenn  $\varphi$  den Winkel der Verzögerung bedeutet und einen solchen Werth besitzt, dass  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{2 \pi n L}{R}$

ist. In der Gleichung (V) bedeutet  $C$  die Integrationsconstante und  $e$  die Basis des natürlichen Logarithmensystems. Das diese Grössen enthaltende zweite Glied der Gleichung (V) kann unberücksichtigt bleiben, weil es sich nur auf den veränderlichen Zustand während des ersten Angehens des Stromes bezieht und mit zunehmender Zeit ausfällt. Der Inductionsstromstoss, welcher zuweilen entsteht, wenn ein Strom plötzlich geschlossen oder geöffnet wird, ist von dieser Art. Im Allgemeinen kann der Exponentialausdruck vernachlässigt werden.

Die Gleichung für den Strom zur Zeit  $t$  lautet demnach:

$$i_t = \frac{D \cos \varphi \cdot \sin (\vartheta - \varphi)}{R} \dots \dots \dots (VI).$$

Vergleicht man diesen Werth mit dem Werth für  $i$ , wenn keine Selbstinduction vorhanden ist,

$$i = \frac{D \sin \vartheta}{R},$$

so ergibt sich, dass zwar der Strom auch durch eine Sinusfunction dargestellt wird, diese sich aber auf den Winkel  $\vartheta - \varphi$  bezieht, d. h. die Stromwellen bleiben hinter denen der elektromotorischen Kraft zurück. Die Amplitude der Stromstärke wird ebenfalls vermindert, da das Verhältniss so ist, als wenn die elektromotorische Kraft  $D$  sich in  $D \cos \varphi$  verändert hat. Oder mit andern Worten, die wirksame elektromotorische Kraft ist gleich demjenigen Theile der gesammten elektromotorischen Kraft, welcher durch die Linie des verzögerten Stromes bestimmt wird. Setzen wir für  $\cos \varphi$  seinen Werth  $\frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$  ein, so bringen wir dadurch die

Gleichung (VI) auf die Form

$$i_t = \frac{D \sin (\vartheta - \varphi)}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \dots \dots \dots (VII).$$

Dies ist dieselbe Gleichung, die wir schon früher auf geometrischem Wege erlangt hatten.

Um die Gleichungen für den Fall zu bestimmen, dass ein Stromkreis nur Capacität und Widerstand besitzt, brauchen wir einfach nur zu berechnen, welche gesammte elektromotorische Kraft erforderlich ist, um den Strom durch den Widerstand zu treiben und gleichzeitig den Condensator zu laden. Nehmen wir an, es sei  $i = i_0 \sin \vartheta$ . Ist die Capacität des Condensators  $K$  (Farad) und seine Ladung in irgend einem Zeitpunkte gleich  $q$ , dann ist  $\frac{q}{K}$  sein Potential und die in jenem Augenblicke erforderliche elektromotorische Kraft

$$Ri + \frac{q}{K} = E.$$

Nun ist aber

$$q = \int idt = -\frac{1}{\omega} i_0 \cos \vartheta, \text{ worin } \vartheta = \omega t = 2\pi n t$$

ist. Setzen wir diesen Werth ein, so erhalten wir

$$Ri_0 \sin \vartheta - \frac{1}{\omega K} i_0 \cos \vartheta = E.$$

Dividiren wir beide Seiten der Gleichung durch

$$\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 K^2}}$$

und setzen

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{1}{R \omega K},$$

woraus folgt

$$\sin \varphi = -\frac{1}{\omega K} \cdot \frac{1}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 K^2}}}$$

und

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 K^2}}}$$

Dann wird die obige Gleichung

$$i_0 (\cos \varphi \sin \vartheta - \sin \varphi \cos \vartheta) = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 K^2}}},$$

oder

$$i_0 \sin (\vartheta - \varphi) = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 K^2}}}.$$

Diese Gleichung zeigt, dass die Spannung hinter dem Strom in der Phase zurückbleibt, oder dass der Strom in der Phase voraneilt.

Mittlere Leistung. Die mittlere Leistung wird erhalten, wenn man die Leistung während einer Periode integrirt und durch die Periode dividirt; sie kann also ausgedrückt werden durch

$$\frac{1}{T} \int_0^T E i dt = \frac{1}{T} \int_0^T R i^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{E^2}{R} dt.$$

Wenn wir die für den Strom gefundene Gleichung (VII) ins Quadrat erheben und für das Quadrat des Sinus seinen Mittelwerth,  $\frac{1}{2}$ , setzen, sodann mit  $R$  multipliciren, so erhalten wir als mittlere Leistung (in Watt)

$$P = \frac{2\pi^2 N^2 \mathcal{E}^2 R}{R^2 + 4\pi^2 n^2 L^2}$$

Dieser Ausdruck wird nach einer bekannten algebraischen Regel ein Maximum bei veränderlichem  $R$ , wenn die beiden Ausdrücke im Nenner einander gleich sind, oder der Widerstand gleich der Selbstinduction wird. Dann ist der Verzögerungswinkel gleich 45 Grad. Obwohl nun dies die Bedingung für den grössten Wirkungsgrad ist, ist doch die Regelung unter diesen Umständen schlecht. Hier ist es besser, eine Maschine für kleinere Ströme anzuwenden, welche keine so grosse Verzögerung hervorbringen.

Oberflächenwirkung. Wenn die Frequenz gross ist, hat der Wechselstrom die Neigung, sich ungleich über den Querschnitt des Leiters zu vertheilen, indem er am stärksten durch die an der Oberfläche liegenden Theile fliesst. Aus diesem Grunde ist vorgeschlagen worden, hohle oder flache Leiter statt massiver runder Drähte zu verwenden. Indessen tritt bei einer Frequenz von nicht über 100 Perioden in der Secunde diese Neigung nicht so stark hervor und kann bei Kupferleitern unter 1 cm Durchmesser vernachlässigt werden. Wenn aber die Frequenz höher oder der Leiter stärker ist, mag die Wirkung dieser Neigung nach den folgenden von Prof. J. J. Thomson<sup>1)</sup> berechneten Beispielen beurtheilt werden.

Bei einem Kupferleiter, auf welchen eine elektromotorische Kraft von 100 Wechseln in der Secunde wirkt, wird der Maximalstrom in einer Tiefe von 1 cm nur ungefähr 0,208 mal so gross sein, wie der an der Oberfläche; in einer Tiefe von 2 cm nur

1) Elements of the Mathematical Theory of Electricity and Magnetism (Cambridge University Press).

0,043 mal, und bei 4 cm weniger als den 500. Theil des Werthes an der Oberfläche betragen.

Wenn die elektromotorische Kraft 1 Million Wechsel in der Secunde macht, ist die Stromstärke in einer Tiefe von 1 mm weniger als  $\frac{1}{600000000}$  des Oberflächenstromes.

Ist der Leiter von Eisen, so ist der Unterschied noch bemerkenswerther. Nehmen wir eine Durchlässigkeit von 1000 und eine Frequenz von 100 in der Secunde, so ist der Strom in der Tiefe von 1 mm nur der 0,13. Theil des Oberflächenwerthes; bei 5 mm Tiefe ist er weniger als  $\frac{1}{20000}$  der Stromstärke an der Oberfläche.

---

## Kapitel XXIII.

### Wechselstrommaschinen.

---

Die Wechselstrommaschinen kann man in drei Klassen eintheilen:

- I. Maschinen mit feststehendem Feldmagnet und umlaufendem Anker.
- II. Maschinen mit umlaufendem Feldmagnet und feststehendem Anker.
- III. Maschinen, in denen beide Theile feststehen und der Betrag der magnetischen Induction aus dem Ankertheil in dem Feldmagnettheil durch den Umlauf geeigneter Eisenstücke — Inductoren genannt — verändert oder in abwechselnde Richtung gebracht wird.

Wechselstrommaschinen lassen sich auch unterscheiden, je nachdem sie einphasigen oder mehrphasigen Strom liefern, ihre Wicklungen also so angeordnet sind, dass alle Ströme gleichzeitig steigen und fallen, oder aber, dass zwei, drei oder mehr Stromkreise vorhanden sind, in welchen die Stromphasen verschieden sind.

Die Frequenz oder Wechselgeschwindigkeit beträgt in der Praxis 40 bis 100, zuweilen auch noch mehr Perioden in der Secunde; jede Maschine muss bei ihrer geeigneten Periodenzahl arbeiten.

Der zur Bezeichnung der Umlaufzahl in der Secunde in den Formeln für Gleichstrommaschinen benutzte Buchstabe  $n$  wird auch für die Periodenzahl in den Formeln für Wechselstrommaschinen verwendet, denn diese Bezeichnung entspricht der Zahl der vollständigen Perioden, die in Dynamomaschinen mit nur einem Polpaar vorkommen. Bei Bogenlichtmaschinen ist eine geringere Frequenz als 40 unpraktisch, für Maschinen zum Betriebe von Motoren kann die Wechselzahl ohne Nachtheil kleiner genommen werden. Je höher die Wechselzahl, um so kleiner können die Umformer genommen werden; eine sehr hohe Frequenz bietet aber Schwierigkeiten, weil der Spannungsabfall im Hauptkreise dadurch vermehrt wird. Mit

Rücksicht darauf, dass beim Wechselstrombetrieb so viele Wechsel in der Secunde nothwendig sind, und da mechanische Verhältnisse sehr hohe Geschwindigkeiten ausschliessen, so stellt man solche Maschinen mit vielen Polen her, und zwar mit einer beträchtlichen Anzahl von abwechselnder Polarität, die symmetrisch um einen gemeinsamen Mittelpunkt angeordnet werden. Die Zahl der symmetrischen Pole bei den verschiedenen Maschinenarten wechselt von 12 bis 48 und noch darüber hinaus.

Die Anker können Ringform, Trommelform, Polform oder Scheibenform besitzen; in allen Fällen unterscheidet sich die Gruppierung der Wickelungen von der für Gleichstrommaschinen angewendeten Art. Ist der Feldmagnet vielpolig, so wird in einer Wickelungsabtheilung, die an einem Nordpol vorbeiläuft, ein Strom inducirt, der demjenigen entgegengesetzt gerichtet ist, welcher in demselben Augenblick in einer Abtheilung inducirt wird, die an einem Südpol vorbeiläuft. Deshalb müssen in einem Ringanker für Wechselstrom die aufeinander folgenden Abtheilungen so gewickelt oder miteinander verbunden sein, dass sie abwechselnd rechts- und linksgängig sind. In Wechselstrom-Trommelankern überdecken sich die Abtheilungen nicht wie in solchen für Gleichstrom, auch bei Scheibenankern für Wechselstrom findet dies nicht statt.

Ringanker. Diese Form wurde 1878 fast gleichzeitig von Gramme<sup>1)</sup> und von Wilde<sup>2)</sup> erfunden. Der Unterschied zwischen den Maschinen besteht darin, dass Gramme den Feldmagnet innerhalb eines grossen feststehenden Ringes, Wilde den Ringanker innerhalb einer Reihe von Feldmagnetpolen, die nach innen gegen den Ring gerichtet sind, umlaufen lässt (vergl. Fig. 101, Nr. 28). Falls Ringanker bei dieser Maschinenart benutzt werden sollen, so dürfen sie nicht in derselben Art wie für Gleichstrommaschinen gewickelt werden. Wenn die aufeinander folgenden Windungen der Reihe nach verbunden werden sollen, so müssen sie, wie in der Fig. 372 angegeben, gewickelt werden — abwechselnd nach rechts und links.

Sind sämmtliche Abtheilungen rechts gewickelt, so werden sie nach der Angabe in der Fig. 373 verbunden, denn wenn eine Spule unter einem Nordpole hinläuft, so ist die in derselben inducirte

---

1) Engl. Patent [1878] Nr. 953.

2) Engl. Patent [1878] Nr. 1228.

elektromotorische Kraft derjenigen entgegengesetzt gerichtet, die in der benachbarten unter einem Südpole hinlaufenden Spule inducirt wird. Wenn ein Gramme'scher Ring in der gewöhnlichen Weise an zwei an den Enden eines Durchmessers liegenden Punkten mit den Schleifringen verbunden ist, so wird er bei der Drehung in einem zweipoligen Felde Wechselstrom erzeugen. In einem vielpoligen Felde dagegen muss er auch vielpolige Verbindungsstücke haben, welche von den Schleifringen abwechselnd nach solchen Punkten gehen, welche die gleiche Lage zu den Polspitzen einnehmen. In diesem in der Fig. 375 dargestellten Falle sind die verschiedenen Theile des Ringes parallel zu einander geschaltet.

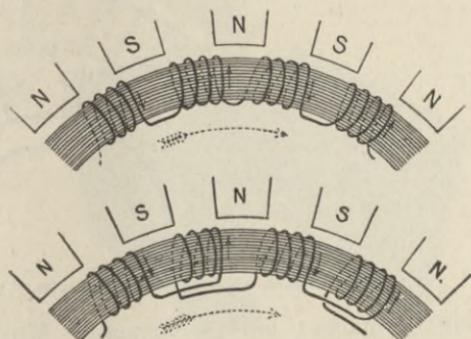


Fig. 372 und 373. Ringanker mit Reihenwicklung für Wechselstrommaschinen.

Die Fig. 376 zeigt das Schema einer Wechselstrommaschine von Gramme. Die Zahl der Abtheilungen ist gleich der vierfachen Polzahl; die Wickelung kann zur Speisung von vier besonderen Stromkreisen geschaltet werden. Es ist klar, dass die umlaufenden Pole nacheinander an den je vier benachbarten Wickelungen vorbeigehen, so dass die vier erzeugten Wechselströme in der Phase verschieden sind. Diese Maschine war in Wirklichkeit eine Mehrphasenstrommaschine. Eine andere, für eine Beleuchtungsanlage vermittelst Jablochkoff'scher Kerzen entworfene Form der Gramme'schen Wechselstrommaschine besass vier getrennte Stromkreise, welche um 45 Grad in der Phase von einander verschieden waren.

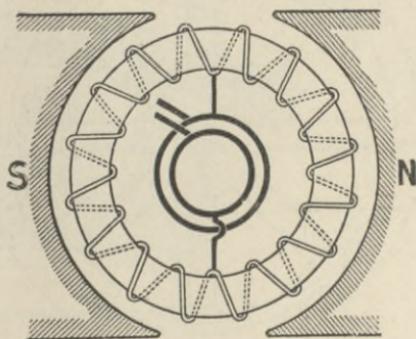


Fig. 374. Einfache zweipolige Wechselstrommaschine mit Ringanker.

Eine Wechselstrommaschine von De Meritens mit Ringanker und stählernem Dauermagnete war um das Jahr 1879 sehr beliebt. Ein Ringanker mit äusserem Feldmagnete wurde von Scott und Mountain verwendet.

In einer in den früheren Ausgaben dieses Werkes dargestellten Wechselstrommaschine von Kapp liegt der Ring zwischen einem doppelten Kranz von Feldmagnetpolen. Kennedy verwendet einen scheibenförmigen Ring zwischen abwechselnd gestellten Polen in

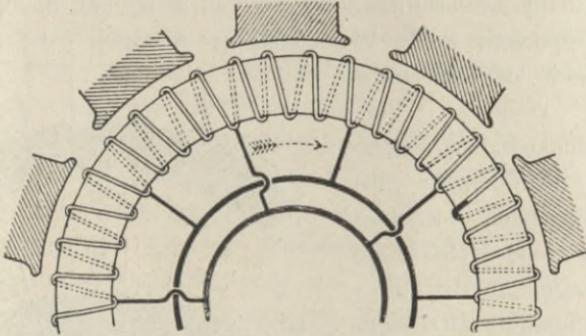


Fig. 375. Ringanker mit parallelgeschalteter Wicklung für Wechselstrommaschinen.

einem Magnet mit Eisenmantel; Mordey hat eine Maschinenform mit zwei Ringen nach Pacinotti angegeben, der eine Ring ist als Anker geblättert, der andere als Feldmagnet dienende ist nicht geblättert.

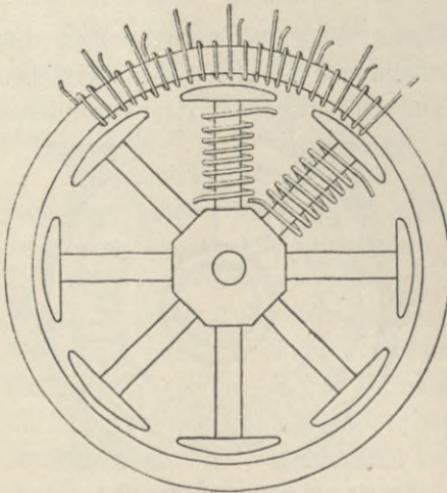


Fig. 376. Wechselstrommaschine von Gramme.

Die Leiter können, soweit ihre wirksame Länge in Frage kommt, bei Trommelankern ebenso zweckmässig angeordnet werden, wie wenn man sie um einen Ringkern wickelt. Wie aus der Fig. 377, die schematisch eine Maschine von Westinghouse darstellt, ersichtlich ist, liegen die Wicklungen an der Aussenseite eines Trommelkernes; die Abtheilungen werden einzeln auf besondere Gestelle gewickelt, von diesen abgenommen und auf die Oberfläche des Kernes gelegt; die Enden werden über die Endscheiben des Kernes hinweg nach abwärts gebogen und sicher festgelegt.

Bei den neueren Westinghouse'schen Maschinen werden die Wicklungen in tiefe Schlitze der Ankerkerne eingebettet. Grosse Anker werden aus einzelnen Theilen zusammengesetzt, deren einer

Trommelanker. Die Leiter können, soweit ihre wirksame Länge in Frage kommt, bei Trommelankern ebenso zweckmässig angeordnet werden, wie wenn man sie um einen Ringkern wickelt. Wie aus der Fig. 377, die schematisch eine Maschine von Westinghouse darstellt, ersichtlich ist, liegen die Wicklungen an der Aussenseite eines Trommelkernes; die Ab-

in Fig. 378 dargestellt ist. Dieselben bestehen aus dünnen ausgestanzten Flusseisenblechen, welche so miteinander verbolzt sind, dass sie Kernstücke bilden ähnlich den grösseren in der Fig. 216 dargestellten Kernen. Da die Verbindungsstelle der Kernstücke in die Mitte eines Zahnes fällt, wird der Widerstand des magnetischen Kreises durch diese Theilung des Ankerkernes nicht beeinflusst.

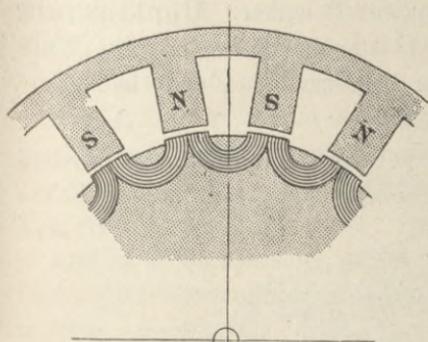


Fig. 377. Aeltere Form der Wechselstrommaschine von Westinghouse.

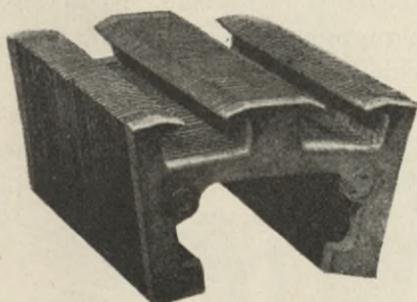


Fig. 378. Ankerkernteil einer Maschine von Westinghouse.

Die auf Formstücken aufgewundenen Wicklungen sind zuerst hinlänglich weit, dass sie über die vorstehenden Theile der Zähne geschoben werden können. Wenn sie an ihre Stelle gebracht sind,

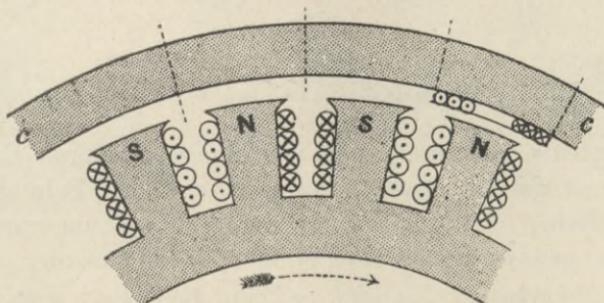


Fig. 379. Aeltere Form der Wechselstrommaschine von Elwell-Parker

werden sie zusammengedrückt, bis sie die Schlitze ganz ausfüllen, so dass sie von den Zähnen festgehalten werden und nicht abfliegen können. Diese Bauart ist auch in der Fig. 401 dargestellt, welche noch die Holzkeile zeigt, die der Länge nach eingetrieben werden, um das Ganze zu einer festen Masse zu vereinigen.

Die Fig. 379 zeigt einen inneren umlaufenden Feldmagnet und als Anker einen äusseren Cylinder, der aus segmentförmigen Platten besteht. An der inneren Fläche des Cylinders sind die Ankerwicklungen befestigt.

Diese Bauart unterscheidet sich von der in Fig. 380 dargestellten Form von Zipernowsky nicht wesentlich. Die Kerne der Feldmagnete bestehen aus **U**-förmig ausgestanzten Theilen, während die Ankerkerne kurze **T**-förmige Theile bilden, die einzeln abgenommen werden können.

Wir verlassen nunmehr die Maschinen mit Trommelanker und erwähnen noch kurz die Maschinen mit Polanker. Hopkinson's Wechselstrommaschine, die in Fig. 411 dargestellt ist, ist eine Umkehrung dieser Maschinenart, insofern bei derselben der feststehende Feldmagnet aussen liegt.

**Scheibenanker.** In diesen Wechselstrommaschinen werden die Ankerspulen am Umfange einer Scheibe angeordnet. Die Feld-

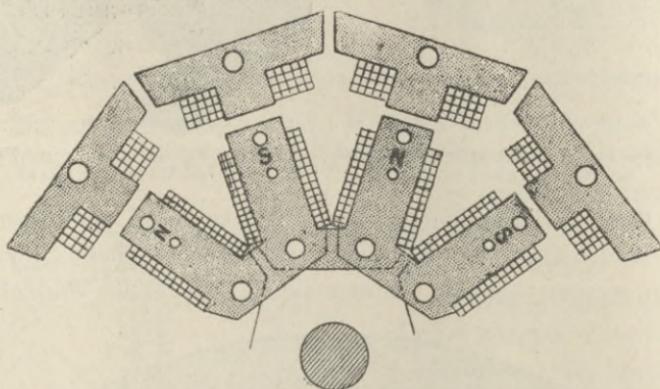


Fig. 380. Wechselstrommaschine von Ganz-Zipernowsky.

magnete bestehen aus zwei festen Spulenkränzen, deren Eisenkerne so angeordnet werden, dass entgegengesetzte freie Pole gegenüber liegen. Zwischen den letzteren ist genügender Raum zum Umlauf des Ankers gelassen (vergl. Fig. 383). Die aufeinander folgenden Pole sind abwechselnd N- und S-Pole, gegenüber dem Nordpole des einen Kranzes steht ein Südpole des zweiten Kranzes. Diese Erläuterung passt auf die Magnete der Wechselstrommaschinen von Wilde und Siemens, sowie von Ferranti. Die Grundlage der Einrichtung wird am besten aus der Fig. 381 ersichtlich, die eine allgemeine Ansicht der Anordnung darstellt.

Da die Kraftlinien in entgegengesetzter Richtung zwischen den festliegenden Spulen verlaufen (abwechselnd mit  $N-S$  und  $S-N$  bezeichnet), so müssen Ströme wechselnder Richtung die umlaufenden Spulen durchfließen, und da die aufeinander folgenden Ankerspulen abwechselnd von Strömen entgegengesetzter Richtung durchflossen

werden, so muss man die Spulen derartig miteinander verbinden, dass die Ströme nicht gegeneinander wirken. Die Art der Verbindung ist aus den Fig. 381 und 384 zu erkennen.

Siemens' Wechselstrommaschinen, die aus dem Jahre 1878 herrühren, verwirklichen dieses System durch einen dünnen Scheibenanker, aufgebaut aus flachen Wicklungen. Die Maschine von Ferranti enthält eine ähnliche Anordnung, die Kupferspulen befinden sich auf einer dünnen Scheibe (vergl. die Fig. 382 und 383).

**Stromabgeber.** Zur Abnahme des Stromes einer Wechselstrommaschine bedarf es nur einfacher Hilfsmittel. Steht der Anker fest, so sind lediglich Klemmen erforderlich. Bei umlaufenden Ankern werden gleitende Verbindungen nothwendig. Die gewöhnliche Methode der Stromabnahme geht aus der Fig. 384 hervor. Zwei ungetheilte isolirte Metallringe bilden die Klemmen der Ankerwicklung und gleiten unter anliegenden Bürsten fort.

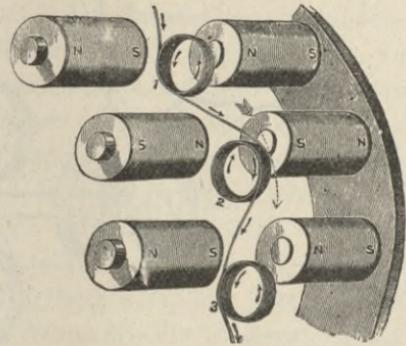


Fig. 381. Prinzip der Wechselstrommaschinen mit Scheibenanker.

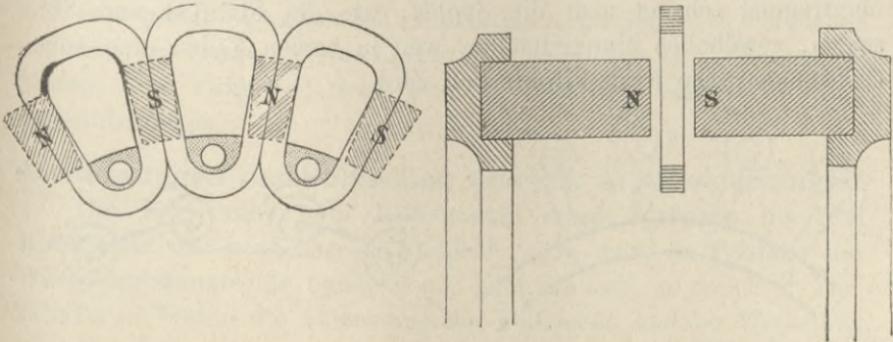


Fig. 382 und 383. Ferranti's Wechselstrommaschine.

Bei hohen Spannungen müssen die beiden Ringe so angeordnet werden, dass durch keinen Zufall eine gleichzeitige Berührung beider möglich ist. Man versieht ferner jeden Ring zweckmässig mit zwei Bürsten, um unter allen Umständen einen sichern Contact zu erhalten. Bei Maschinen mit feststehendem Anker genügen schmalere Contactringe zur Hinleitung des die umlaufenden Feldmagnete erregenden Stromes. Die besonderen Stromabgeber von Ferranti werden später beschrieben.

Schaltung der Ankerwicklung. Je nach dem beabsichtigten Zwecke lässt sich die Schaltung der Ankerspulen in Wechselstrommaschinen in verschiedener Weise ausführen. Für niedrige Spannung werden die Spulen, wie aus der Fig. 385 ersichtlich ist, zur Verminderung des innern Widerstandes nebeneinander geschaltet. Bei Verwendung entfernter Umsetzungsapparate und zur Kraft-

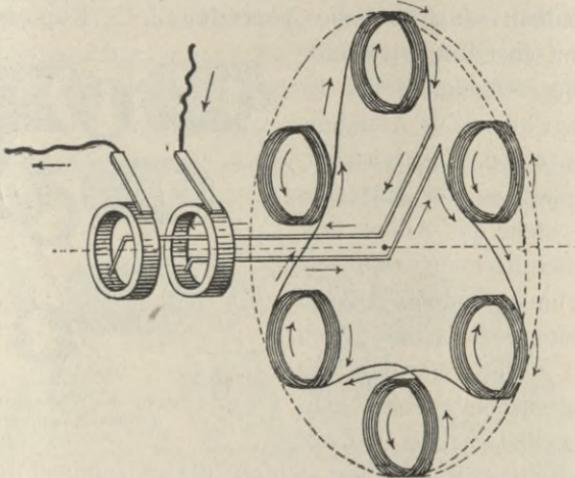


Fig. 384. Schleifringe einer Wechselstrommaschine.

übertragung schaltet man die Spulen, wie die Fig. 384 und 386 zeigen, gewöhnlich hintereinander, weil in beiden Fällen eine hohe elektromotorische Kraft erforderlich wird.

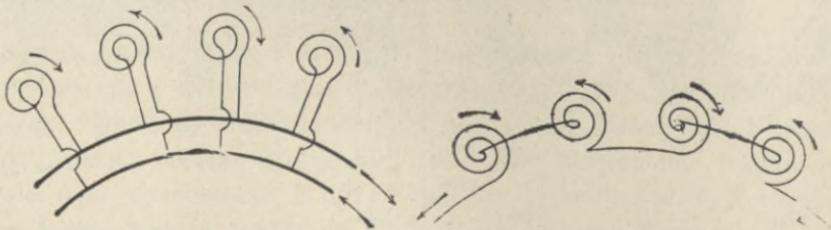


Fig. 385 und 386. Schaltungsarten für die Ankerspulen einer Wechselstrommaschine.

Vergleich zwischen Gleichstrom- und Wechselstromwicklung. — Wir sahen früher bei der Betrachtung der Ringwickelungen, wie ein System von parallel geschalteten Abtheilungen dadurch erreicht werden konnte, dass man die Wickelung in passenden Zwischenräumen miteinander verband. Ganz ähnliche Betrachtungen stellten wir bei der Trommelwicklung an. Es kann z. B. ein zehnpoliger Anker mit 360 Leitern als eine in sich zurückkehrende Schleifenwicklung aufgewickelt werden, indem man an dem einen

Ende der Trommel die einzelnen Leiter so nach vorwärts verbindet, dass Nr. 1 mit Nr. 39, Nr. 2 mit Nr. 40 u. s. w. aneinandergeschaltet sind. Am anderen Trommelende wird nach rückwärts verbunden, also dass zwischen zwei aneinandergeschalteten Leitern 35 andere liegen; also Nr. 1 mit Nr. 325, Nr. 2 mit Nr. 326 u. s. w. Dies würde die passende Schaltung bei Gleichstrommaschinen mit einem 180 theiligen Stromwender sein. Wenden wir dagegen keinen Stromwender an, führen aber zehn Verbindungsstücke in gleichmässigen Abständen an zwei Schleifringe, wie es Fig. 375 zeigt, so haben wir einen Anker für eine Wechselstrommaschine. Statt die Schleifenwicklung anzuwenden, können wir die 360 Leiter auch in zehn Abtheilungen zu je 36 gruppieren, sie, wie in Fig. 377, gegenüber einem Pole vereinigen und sodann die zehn Abtheilungen parallel schalten. Wir werden später betrachten, welche Wirkung die Vereinigung der Leiter um Polpunkte herum hat, da sie verschieden ist von derjenigen der Vertheilungswicklung, bei welcher die Leiter gleichmässig vertheilt sind. Wenn wir die Wellenwicklung anwenden wollten, würde die Zahl 360 der Leiter nicht für eine zehnpolige Maschine passen. Wir müssten dann 358 wählen und die Verbindungen so machen, dass zwischen ihnen abwechselnd 35 und 37 Leiter lägen. Da hierbei die Wickelung in Reihe mit nur zwei parallel geschalteten Stromkreisen geschaltet ist, brauchen wir auch nur zwei Verbindungsstücke nach den Schleifringen zu führen, und zwar von zwei Punkten, welche diametral einander gegenüberliegen.

### **Abmessungen der Polflächen und der Ankerwickelungen.**

Die Entfernung vom Mittelpunkte eines Nordpoles bis zum Mittelpunkt des benachbarten Südpoles kann man als Polstand der Wechselstrommaschine bezeichnen. Es fragt sich, in welchem Verhältniss am besten die Abmessung der Polflächen und der Wickelung zum Polstand gewählt werden. Kapp hat diese Frage erörtert<sup>1)</sup>; sie schliesst zwei weitere Fragen ein und zwar: 1. in welchem Verhältniss steht die Spannung zu der Breite der Polstücke und Wickelungen; 2. welche Abmessungen ergeben die grösste Wirksamkeit für den Betrieb. Sind die Polstücke zu breit, so dass sie sich fast berühren, so besteht nicht nur eine erhebliche magnetische Zerstreuung, sondern die Wickelungen werden auch zu sehr zusammengedrängt. Offenbar würde jede Wickelung am stärksten

1) Proc. Inst. Civ. Engin., Bd. 97, 1889, Theil III.

wirken, wenn sie vermöge ihrer Grösse bei dem Vorübergang an einem Pol die gesammte Kraftlinienmenge einschliessen könnte. Ist die Wickelung kleiner, so trägt sie auch weniger zur Spannung bei, ist sie grösser, so nimmt sie mehr Raum in Anspruch. Deshalb macht man gewöhnlich die Weite der inneren Oeffnung der Spulen nur etwas kleiner als die Polbreite, die äussere Weite wird dem Polstand gleich hergestellt.

Vergleicht man die Fig. 377 und 379, so ergibt sich, dass in den beiden ersten die innere Weite etwas geringer und in der dritten etwas grösser als die Weite der Polflächen ist, während die doppelte Kupferbreite in den Wickelungen etwa gleich der Polbreite ist.

Nach den früheren Erläuterungen S. 44 lässt sich die durchschnittliche elektromotorische Kraft einer Gleichstrommaschine ausdrücken durch die Gleichung:  $E = 10^{-8} n N \mathcal{S}$ ,

worin  $n$  die Zahl der Umdrehungen in der Secunde,  $N$  die Zahl der um den Anker herum liegenden Leiter und  $\mathcal{S}$  die Induction bezeichnen.

Diese Gleichung kann man auch auf Wechselstrommaschinen anwenden, wenn  $\mathcal{S}$  die magnetische Strömung eines Poles und  $p$  die Zahl der Polpaare bedeutet, womit  $\mathcal{S}$  zu multipliciren ist. Ausserdem ist noch ein Coëfficient  $K$  hinzuzufügen.

Demnach erhält man:  $E$  (effective Spannung)  $= 10^{-8} K p n N \mathcal{S}$ .

Erfolgen die Schwankungen nach einer Sinuscurve, so dass die effective Spannung 1,1 mal grösser als die Durchschnittsspannung ist (vergl. Seite 524) und sind alle Wickelungen hintereinander (anstatt in zwei Parallelkreisen) verbunden, so erlangt  $K$  den Werth 2,2. Der Werth von  $K^1$  ist von Kapp für verschiedene Polbreiten und Spulenbreiten berechnet worden. Dabei haben sich folgende Zahlen ergeben:

| Polbreite                                | Gesammte Breite des Kupfers in der Wickelung                                   | $K$   |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Dem Polstand gleich.                     | Dem Polstand gleich (die ganze Oberfläche bedeckend)                           | 1,160 |
| Dem Polstand gleich.                     | Dem halben Polstand gleich (die halbe Oberfläche bedeckend)                    | 1,635 |
| Dem halben Polstand gleich.              | Dem Polstand gleich (die ganze Oberfläche bedeckend)                           | 1,635 |
| Dem halben Polstand gleich.              | Dem halben Polstand gleich (die halbe Oberfläche bedeckend)                    | 2,300 |
| Dem dritten Theil des Polstandes gleich. | Dem dritten Theil des Polstandes gleich (ein Drittel der Oberfläche bedeckend) | 2,830 |

1) Vergl. auch Brousson: „The Determination of the E. M. F. of Alternators“, Electr. World, Bd. 26, S. 236, 1895.

Wäre keine Ausbreitung des magnetischen Feldes vorhanden, so würde das an vierter Stelle bezeichnete Verhältniss das beste sein und am nächsten dem Sinusgesetz entsprechen. Bei einem glatten Kern wie in den Figuren 377 oder 379 ist die nutzbare Breite der Spulen diejenige, die gerade zwischen den Polrändern Platz findet. Die Leistung einer Maschine, die eine bestimmte Kupferstärke in dem Zwischenraum besitzt, ist proportional der Anzahl der Drähte und der Breite der Polfläche, also dem Product der beiden Breiten; die Summe derselben würde, wenn keine Ausbreitung bestände, gleich dem Polstand sein. Die Leistung würde deshalb ein Maximum sein, wenn die Spulenbreite und Polbreite je die Hälfte des Polstandes betrüge. Elihu Thomson hat indessen durch Versuche gefunden, dass mit Rücksicht auf die Verzerrung des magnetischen Feldes beim Betriebe der Maschine es von Vortheil ist, wenn die Kupferbreite grösser als die Polbreite

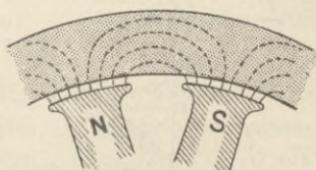


Fig. 387.

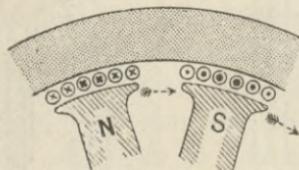


Fig. 388.

gemacht wird. Dies wird durch Verminderung der Oeffnung der Spulen auf etwas weniger als die Hälfte der Breite der Polfläche erreicht.

Untersuchen wir genauer, welche Wirkung die Breite der Windungen in den Ankerspulen hat. Betrachten wir einen vielpoligen sich drehenden Feldmagnet, wie er in Fig. 387 dargestellt ist. Wir wollen annehmen, durch die Form der Polstücke werde eine solche Vertheilung des magnetischen Feldes in dem Zwischenraume zwischen den Polen und dem Ankerkern hervorgebracht, dass die Curve der in irgend einem in dem Zwischenraume liegenden Leiter inducirten elektromotorischen Kraft eine regelmässige und glatte Wellenform hat. Wir wollen in der Figur die Querschnitte der Leiter, in welchen elektromotorische Kräfte aufwärts, also auf den Leser zu gerichtet sind, mit einem Punkte, diejenigen, in welchen die elektromotorische Kraft entgegengesetzt gerichtet ist, mit einem Kreuz versehen. Dann ist klar, dass eine aufwärts gerichtete elektromotorische Kraft in denjenigen Leitern inducirt wird, gegen welche der Südpol sich auf der rechten Seite bewegt. Das Umgekehrte findet statt bei den Leitern, an welchen ein Nordpol vorbeigeht. Aber diese elektro-

motorischen Kräfte werden untereinander nicht in dem gleichen Augenblicke gleich sein: sie werden am grössten sein in denjenigen Leitern, welche sich in der wirksamsten Lage befinden, d. h. bei denjenigen, welche in dem Augenblicke durch das stärkste Feld gehen. In jedem Leiter wird ein gleicher Kreislauf der Inductionswirkung stattfinden, aber es ist klar, dass sie ihr Maximum einer nach dem Anderen erreichen. Der Bequemlichkeit halber wollen wir annehmen, dass dieses Maximum in jedem Leiter dann eintritt, wenn dieser die Polmitte passirt. Nehmen wir nun noch an (was gewöhnlich bei der Ausführung der Fall ist), dass eine Anzahl der Leiter zu einer Spule hintereinander geschaltet ist, wie in Fig. 389, so werden sich ihre elektromotorischen Kräfte addiren. Wenn wir eine Ansicht der Spule wie in Fig. 389 nehmen, welche so gedacht

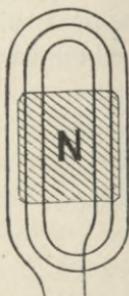


Fig. 389.

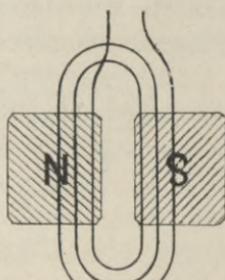


Fig. 390.

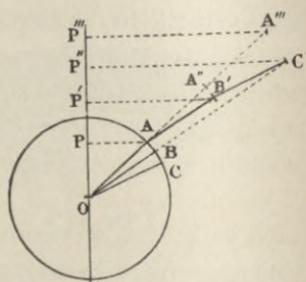


Fig. 391.

ist, dass die Pole, wenn wir auf sie hinblicken, sich von rechts nach links bewegen, werden wir dies noch besser verstehen. Im nächsten Augenblicke wird der Nordpol in die in Fig. 390 gezeichnete Stellung gelangen. Die Figur zeigt, dass wir keinen Vortheil davon haben können, wenn die inneren Windungen der Spule viel näher zusammenrücken als die Breite der Polfläche beträgt, denn in diesem Augenblicke sind die elektromotorischen Kräfte der Spulenhälften einander entgegengesetzt gerichtet. Aber die wirksame elektromotorische Kraft, welche durch eine Spule von einer gegebenen Windungszahl erzeugt werden kann, würde grösser sein, wenn alle Windungen von der gleichen Grösse sein könnten, wodurch sie alle gleichzeitig ihr Maximum erreichen würden.

Um diesen Punkt noch etwas besser zu erläutern, wollen wir ein Polar- oder Uhrdiagramm verwenden. Wir nehmen an, der höchste Werth der elektromotorischen Kraft, der in einem Leiter erzeugt wird, werde durch den Radius Vector  $OA$  dargestellt. Dann stellt die Projection von  $OA$  auf die senkrechte Linie  $OP$  den Werth

der elektromotorischen Kraft dar in dem Augenblick, wann der Winkel  $AOP$  die Phase der Induction angiebt, die gerade stattfindet. Zwei andere Leiter mögen ein wenig über jenen hinaus liegen, so dass ihre elektromotorischen Kräfte durch  $OB$  und  $OC$  dargestellt werden.

Wir untersuchen nun, welche Wirkung hervorgebracht wird, wenn wir alle Leiter in Reihe schalten. Wenden wir die Regeln für die Zusammensetzung gerichteter Grössen an, so finden wir die Resultirende, indem wir von  $A$  aus die Linie  $AB'$  gleich und parallel zu  $OB$  und von  $B'$  die Linie  $B'C'$  gleich und parallel  $OC$  ziehen. Dann ist  $OC'$  die Resultirende, und ihre Projection  $OP''$  auf die senkrechte Linie giebt den augenblicklichen Werth der vereinigten elektromotorischen Kräfte der drei Leiter. Lügen sie alle genau aufeinander in  $A$ , so dass kein Phasenunterschied zwischen den elektromotorischen Kräften bestehen könnte, so würde die Resultirende  $OA'''$  sein, und dies würde, auf die Senkrechte projectirt,  $OP'''$  als den augenblicklichen Werth ergeben.

Ein Weg zur zahlenmässigen Behandlung der Aufgabe mag nützlich sein. Wir nehmen an, jeder Leiter erzeugte eine elektromotorische Kraft, deren effectiver Werth 1 Volt beträgt. Drei solcher Leiter, welche in Reihe geschaltet sind, können nur dann als gesammte elektromotorische Kraft 3 Volt liefern, wenn sie so genau übereinander liegen, dass sie ihren höchsten Werth der elektromotorischen Kraft zur gleichen Zeit erreichen. Jede Ausbreitung der Spulen muss den Werth der resultirenden elektromotorischen Kraft herabdrücken.

Es ist deshalb der Mühe werth, einen Breitencoefficient für eine Spule von bestimmter Winkelbreite zu berechnen.

Wir wollen mit  $\phi$  den Phasenunterschied bezeichnen, der zwischen der Mitte der Spule und ihrem äussersten Leiter auf jeder Seite besteht. Wenn die Maschine einen zweipoligen Magnet hat, so ist  $\phi$  einfach die Hälfte der Winkelbreite (in Radianen), die von der Spule eingenommen wird. Bei vielpoligen Maschinen mit  $p$  Polpaaren ist der Winkel  $\phi$  gleich dem  $p$ -fachen der halben Winkelbreite (wie sie an der Maschine gemessen wird). Oder, wenn die Breite der Spule, längs des Umfanges gemessen, mit  $b$  bezeichnet wird und der Durchmesser der Maschine  $d$  ist, so wird der Winkel  $\phi$  des Phasenunterschiedes, der der halben Spulenbreite entspricht,  $= bp/d$ . Nun wird der Mittelwerth der effectiven elektromotorischen Kraft in allen Leitern innerhalb der Winkelbreite  $\phi$  durch die Formel

$$\frac{1}{\phi} \int_0^{\phi} e \cdot \cos \gamma \cdot d\gamma$$

angegeben, worin  $e$  der effective Werth der elektromotorischen Kraft in einem beliebigen Leiter und  $\gamma$  der Winkel des Phasenunterschiedes zwischen der elektromotorischen Kraft dieses Leiters und derjenigen im mittleren Leiter der Spule ist.

Wenn wir denjenigen Theil dieses Ausdruckes, der von  $\phi$  abhängt, als Breitencoefficient bezeichnen und durch  $q$  darstellen, so erhalten wir durch Ausführung der Integration

$$q = \frac{\sin \phi}{\phi}.$$

Um einige Zahlenwerthe zu geben, mag aus der späteren Darstellung des Aufbaues der Maschinen etwas vorausgenommen werden. Z. B. in einem Ring, mit vier Spulen, jede von einem Quadranten Breite (wie in einigen Zweiphasen-Motoren, z. B. den später beschriebenen Tesla-Motoren), ist

$$\phi = 45 \text{ Grad} = 0,785 \text{ Radiant}; q = 0,90.$$

Für einen Ring mit drei Spulen, jede 120 Grad breit,

$$\phi = 60 \text{ Grad} = 1,09 \text{ Radiant}; q = 0,82.$$

Für einen Ring mit sechs Spulen, jede 60 Grad breit,

$$\phi = 30 \text{ Grad} = 0,523 \text{ Radiant}; q = 0,95.$$

Als Beispiel wollen wir einen vielpoligen Zweiphasen-Stromerzeuger betrachten, dessen Ankerdrähte durch Löcher in den Ankerscheiben geführt sind, und der von einem Nordpol zum nächsten Nordpol zwölf gleichmässig gebohrte Löcher besitzt. In diesem Falle gehören sechs Leiter zur einen, sechs zur anderen Phase, und jede Gruppe besteht aus drei Leitern mit gleichgerichteter elektromotorischer Kraft und drei Leitern der entgegengesetzt gerichteten elektromotorischen Kraft. Drei solche Leiter nehmen  $\frac{1}{4}$  der ganzen Breite ein oder sind gleichwerthig mit 90 Grad auf dem Kreise. Da aber die Leiter in Bohrungen angebracht sind, so ist der effective Abstand zwischen den beiden äussersten der drei Leiter 60 Grad, die Hälfte davon 30 Grad, also  $q = 0,95$ .

Es haben vielfache Erörterungen darüber stattgefunden, ob Anker mit Eisenkernen zu versehen seien oder nicht. In dünnen Scheibenankern sind Eisenkerne bestimmt nicht zulässig, weil sie unvermeidlich gegen die Polflächen stossen würden.

Bei hoher Wechselzahl wird der durch Hysteresis in Maschinen mit Eisenkernen eintretende Verlust bedenklich, falls nicht die Magnetisirung geringer als 7000 Linien für das Quadratcentimeter

beträgt. Sogar dann noch ist der Verlust nicht zu vernachlässigen. Andererseits tritt wieder mehr Verlust durch Wirbelströme<sup>1)</sup> in dem Kupfer von Maschinen ein, die keine Eisenkerne besitzen.

### Erregung der Feldmagnete.

Die Feldmagnete der älteren Maschinen waren entweder Dauermagnete aus Stahl oder besonders erregte Elektromagnete. Gegen das Jahr 1869 begann man die Selbsterregung anzuwenden. Zu diesem Zwecke wurde Strom aus einer oder aus mehreren Spulen, die von den übrigen getrennt waren, entnommen und zu einem Stromwender geleitet, der durch Richten der Ströme diese zur Erregung der Feldmagnete geeignet machte. Diese Anordnung ist bei den »Composite«-Wechselstrommaschinen der Thomson-Houston (General Electric) Co. und denjenigen von Ganz getroffen; Letzterer erreichte dabei auch die Wirkung der zusammengesetzten Wickelung, indem er die Feldmagnete mit einem gleichgerichteten Strome erregte, welchen er mittelst eines kleinen Umformers dem Hauptstrom entnahm, und der daher diesem stets proportional war. Derartige gleichrichtende Stromwender haben im Allgemeinen die in Fig. 392 dargestellte Form. Der Apparat besteht aus zwei zahnartig ausgeschnittenen Metallcylindern, deren Zähne ineinandergreifen; die Cylinder sind voneinander isolirt. Von dem einen führt eine Verbindung zum Anfange der für die Erregung benutzten Ankerspulen, der zweite ist mit dem Ende der Spulen verbunden.

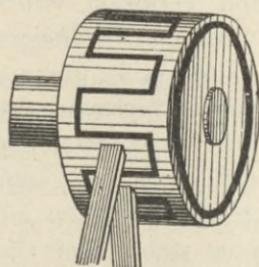


Fig. 392. Gleichrichter für selbsterregende Wechselstrommaschinen.

Die beiden Bürsten stehen so, dass sie stets gegen verschiedene Zähne des Stromwenders anliegen. Man kann auch einen gewöhnlichen Stromwender benutzen, der soviel Stäbe hat, als Pole vorhanden sind; die Stäbe werden dann abwechselnd zu zwei Sätzen verbunden. Wenn die Feldmagnete mit dünnem Draht bewickelt sind, so kann ein solcher Stromwender bei Niederspannungsmaschinen dazu benutzt werden, einen Theil des Hauptstromes gleichzurichten; man erhält dann eine selbsterregende Maschine. In der Regel versteht man aber jede Wechselstrommaschine mit einer kleinen Zusatzmaschine für Gleichstrom — der Erregermaschine.

1) Vergl. die Bemerkungen von Elihu Thomson zu Kapp's Abhandlung.

In bequemer Weise wird die Stromstärke oder Spannung einer Wechselstrommaschine durch Einschaltung eines veränderlichen Widerstandes in den Erregerkreis geändert; der Widerstand wird mit der Hand oder durch eine selbstthätig wirkende Vorrichtung geregelt (vergl. Kap. XXIX). Diese Methode lässt sich bei besonders erregten ebenso wie bei selbsterregenden Maschinen anwenden. Bei Benutzung besonderer Erregermaschinen kann man die Leistung der Wechselstrommaschine durch Aenderung des Widerstandes im Erregerkreise der Erregermaschine reguliren.

Sollen bei gleichbleibender Spannung Glühlampen durch eine Wechselstrommaschine betrieben werden, und zwar entweder unmittelbar bei niedriger Spannung oder unter Zuhilfenahme von Umsetzungsapparaten bei hoher Spannung, so stellt man die Maschine mit geringem Widerstand im Anker her. Maschinen mit einem niedrigen Coëfficienten der Selbstinduction würden sich beinahe selbst regeln, wenn nicht der entmagnetisirende Einfluss der Ankerströme vorhanden wäre. Wenn das Feld nicht steif ist (Seite 369), oder wenn Eisen im Anker ist, oder auch die durch die Zahl der auf einen Pol entfallenden Amperewindungen gemessene Ankergegenwirkung zu gross ist, wird die Maschine bei voller Belastung eine viel stärkere Erregung brauchen als beim Leerlauf. Selbst bei den grössten Maschinen sollten deshalb nicht mehr als 3000 Amperewindungen für jeden Pol vorhanden sein. Diejenigen Anker, bei welchen die Windungen tief zwischen grosse Eisenzähne eingebettet sind, haben sowohl grossen Selbstinductionsabfall als auch grosse entmagnetisirende Wirkung bei voller Belastung. Bei Wechselstrommaschinen für Motorenbetrieb sollte man nur Anker mit geringer Inductionswirkung wählen.

Will man bei gleichbleibender Stromstärke Lampen in Reihenschaltung betreiben, so wird eine etwas andere Maschinenform mit beträchtlicher Selbstinduction im Anker erforderlich.

Diese wird dadurch erreicht, dass man die Ankerwickelungen nicht aussen auf die Kerne legt, sondern tief in dieselben einbettet oder auf lange Kernplatten wickelt, um grosse magnetische Trägheit hervorzurufen.

Die entmagnetisirende Wirkung des Ankerstromes<sup>1)</sup> tritt am meisten hervor, wenn die Feldmagnete schwach erregt werden. In der weiter unten beschriebenen Victoria-Maschine von Mordey ist der Feldmagnet so kräftig, dass die Verminderung der elektromotorischen

---

1) Vergl. *Esson in Electrical Review*, Bd. 18, S. 248, März 1886.

Kraft aus genannter Ursache bei voller Stromstärke weniger als 3 Procent beträgt, der Abfall der Charakteristik ist deshalb sehr gering.

Die entmagnetisirende Wirkung ist indessen von dem Phasenunterschied der Ströme abhängig. Ist weder Voreilung noch Verzögerung der Phase vorhanden, giebt es auch keine entmagnetisirende Wirkung, sondern höchstens ein verzerrtes Feld (vergl. Seite 72). Wenn die Ströme in der Phase zurückbleiben, suchen sie zu entmagnetisiren; wenn sie voreilen, wirken sie günstig auf die Magnetisirung des Feldes.

Swinburne hat ebenfalls Untersuchungen über die Gegenwirkungen des Ankers angestellt <sup>1)</sup>.

Einige Belastungscurven für eine Wechselstrommaschine sind von Kapp (loc. cit.) gegeben und sind zu vergleichen mit Fig. 261.

### Führung der Ankerwickelungen.

Bei ausgeführten Maschinen werden viele Ankerleiter verwendet, welche um den Anker symmetrisch angeordnet und durch Verbindungsdrähte oder Stücke zusammengeschaltet werden müssen. Bei einem Ringanker gehen die Verbindungsdrähte durch den Innenraum des Ringkernes. Bei Trommel- und Scheibenankern, bei denen die Wickelung gänzlich auf dem äusseren Mantel des Kernes liegt, giebt es zwei verschiedene Arten des Verfahrens, die wir als Schleifenwickelung und als Wellenwickelung bezeichnen <sup>2)</sup>.

Der Unterschied der beiden Arten ist folgender. Da in einem Leiter, der vor einem Nordpol vorübergeht, eine elektromotorische Kraft von bestimmter Richtung, in einem anderen Leiter, der vor einem Südpol vorübergeht, eine elektromotorische Kraft von entgegengesetzter Richtung inducirt wird, so ist klar, dass jeder Leiter in einer dieser Gruppen mit einem anderen, in einer nahezu correspondirenden Lage in einer anderen Gruppe befindlichen verbunden werden muss, so dass der Strom im einen Leiter herab, im anderen hinauf fliesst, je nach der Richtung der elektromotorischen Kräfte. Also muss der Leiter, der vor einem Nordpol hinab geführt wird, mit einem zweiten verbunden werden, der vor einem Südpol sich aufwärts bewegt; dies kann man offenbar in zweierlei Weise

1) Journ. Inst. Electric. Engin., Bd. 20, S. 173. 1891.

2) In den früheren Auflagen dieses Werkes ist die Bezeichnung „einfache“ und „doppelte Wellenwickelung“ benutzt worden. Es erscheint aber besser, eine Bezeichnung zu wählen, welche die Art der Drahtführung fasslicher beschreibt (vergl. Seite 238).

ausführen, indem die Wickelung entweder in Schleifen zurückgreift oder im Zickzack (in Wellen) fortläuft.

Die Wellenwicklung wurde 1881 von Lord Kelvin und gleichzeitig unabhängig davon von Ferranti ersonnen. Sie bietet aber Schwierigkeiten bei hoher Spannung, insofern die Isolation zwischen den einzelnen Wellen nur schwer dauernd gut zu halten ist. Bei einigen Wechselstrommaschinen — einschliesslich derjenigen von Mordey und Ferranti — sind die Spulen nicht alle hintereinander,

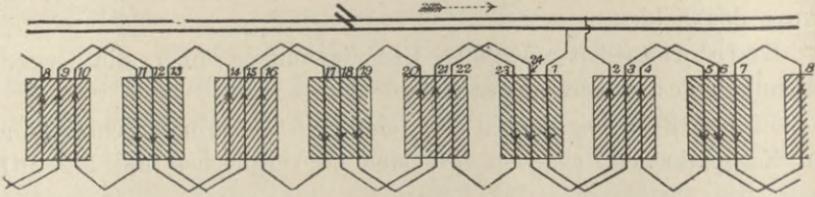


Fig. 393. Schleifenwicklung.

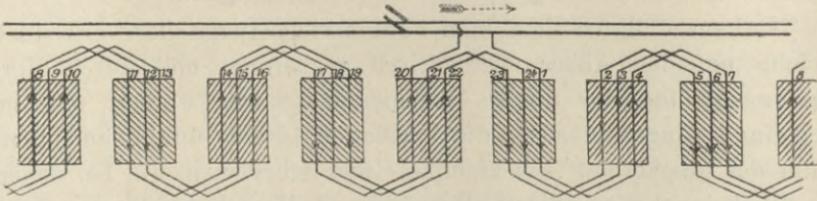


Fig. 394. Wellenwicklung.

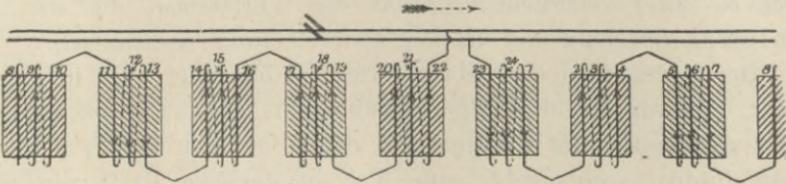


Fig. 395. Ringwicklung.

sondern in zwei Kreisen parallel geschaltet; diese Construction hat die Wirkung, dass die Punkte, welche die grösste Potentialdifferenz haben, weit auseinander liegen.

Fig. 393 und 394 zeigen den Unterschied zwischen Schleifen- und Wellenwicklung bei Wechselstrommaschinen. Fig. 393 stellt einen achtpoligen Wechselstromerzeuger mit Schleifenwicklung dar, worin jedes »Element« oder Satz von Schleifen die Breite des Polabstandes, d. i. des Abstandes von Mitte zu Mitte zweier benachbarter Pole einnimmt. Es sind nur 24 Leiter gezeichnet worden; zu bemerken ist, dass die aufeinanderfolgenden Schleifen links und rechts drehen. Fig. 394 zeigt denselben Wechselstromerzeuger mit Wellenwicklung.

Die elektromotorische Kraft der beiden Maschinen würde genau dieselbe sein; die Wahl zwischen den beiden Arten der Drahtverbindung ist lediglich eine Frage der Bequemlichkeit in der mechanischen Construction und der Kosten. Eine Ringwicklung, welche die gleiche Zahl wirksamer Leiter braucht, zeigt Fig. 395. In jedem Falle muss Anfang und Ende der Wickelung mit zwei Schleifringen verbunden werden, welche in diesen abgewickelten Zeichnungen als zwei parallele Linien erscheinen.

Mehrphasige Wechselstrommaschinen. Der Nachtheil zu breiter Spulen, welcher Seite 563 besprochen wurde, wurde zuerst von Gramme experimentell nachgewiesen, und zwar an der in Fig. 376 dargestellten Maschine. Je näher die Windungen in irgend einer Gruppe zusammengedrängt wurden, um so wirksamer fand er sie. Hätte er auf dem Anker nur acht schmale Spulen, jede einem Pole gegenüber angebracht, so würde viel Wickelungsraum verloren worden sein. Daher füllte Gramme diesen Raum mit anderen Spulen aus. Die Maschine erhielt dadurch viermal so viel Wickelungsabtheilungen als Pole, und hätte so geschaltet werden können, dass sie vier getrennte Stromkreise speiste.

Es ist klar, dass die Pole bei ihrem Umlaufe vor den vier nebeneinanderliegenden Abtheilungen nacheinander vorbeikommen, so dass die vier erzeugten Wechselströme sich in der Phase unterscheiden müssen. Gramme wusste oder erkannte, dass man nicht alle Spulen vereinigen durfte; er verband nur diejenigen miteinander, die in irgend einem Augenblicke gleichzeitig den Polen gegenüberstanden.

So entstanden vier getrennte Kreise, jeder aus acht hintereinander geschalteten Spulen. Und diese vier getrennten Wickelungen wurden auf vier gänzlich getrennte Stromkreise geschaltet, von denen jeder eine Anzahl Jablochhoff'scher Kerzen mit Strom versorgte. Gramme's Wechselstrommaschine war ohne Frage ein mehrphasiger Stromerzeuger; aber es ist keinerlei Anzeichen dafür vorhanden, dass der Erbauer dieser Maschine irgend wann daran dachte, die Ströme verschiedener Phase zu irgend einer nützlichen Wirkung zu vereinigen, oder dass er nur wusste, dass sie vereinigt werden konnten. Im Gegentheil, er hielt die Stromkreise stets getrennt, weil die Ströme darin ungleiche Phase hatten.

Niemand dachte zu jener Zeit daran, Ströme von verschiedener Phase zu vereinigen und dadurch ein Drehfeld zu erzeugen.

Nebenbei bemerkt, wird bei jeder Art von Wechselstrommaschinen unthätiger Wickelungsraum zwischen den Spulengruppen vorhanden sein, wenn sie für Einphasenstrom vortheilhaft gewickelt sind.

Wenn wir dem Anker so viele Wickelungsgruppen geben, als Pole vorhanden sind, haben wir eine Einphasenstrommaschine. Nehmen wir die Zahl der Spulen doppelt oder dreifach so gross als die Zahl der Magnetfelder, so bekommen wir eine Zweiphasen-, bezw. Dreiphasenstrommaschine.

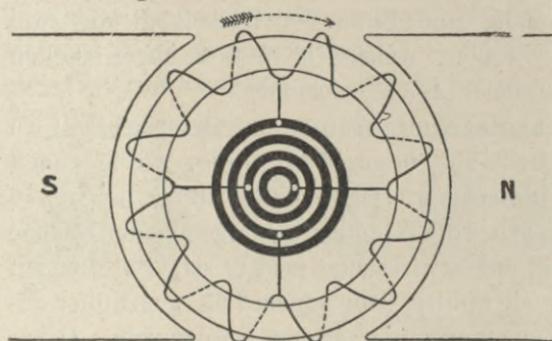


Fig. 396. Bradley's zweipoliger Stromerzeuger.

Eine Zweiphasen-Wechselstrommaschine wurde 1887 von Bradley entworfen, bei welcher in einem zwei-poligen Felde ein Ring an vier Punkten mit vier Schleifringen verbunden war (Fig. 396). Bei der Drehung des Ringes streben die

elektromotorischen Kräfte stets gegen den höchsten Punkt. Man kann daher dieser Maschine zwei getrennte Wechselströme entnehmen, beide werden aber, wie in Fig. 397 zu sehen ist, um  $\frac{1}{4}$  Periode voneinander abweichen — sie werden in »Quadratur« sein.

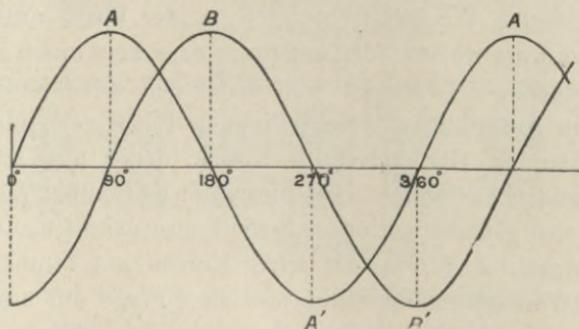


Fig. 397. Zwei Wechselströme mit einer Viertelperiode Phasenunterschied.

Eine dreiphasige Wechselstrommaschine können wir erhalten, wenn wir den Ring an drei um 120 Grad auseinanderliegenden Punkten mit drei Schleifringen verbinden. In der That versah Gramme einige seiner Maschinen mit drei voneinander unabhängigen Spulengruppen. Wir würden dann drei Ströme in drei aufeinanderfolgenden Phasen erhalten. Wenn wir diese wie in Fig. 398 anordnen, können wir die Spulen *A* zusammen in einen Kreis schalten (die Spulen sind abwechselnd links und rechts gewickelt oder verbunden); die Spulen *B* werden ähnlich zu einem zweiten

Kreis geschaltet, die Spulen *C* bilden den dritten Kreis. Es erhellt, dass in jedem dieser Kreise die elektromotorischen Kräfte in regelmässiger Folge steigen und fallen, und dass die elektromotorische Kraft in *B* erst dann ihren höchsten Werth erreicht, wenn die in *A* den ihrigen überschritten hat und im Abnehmen begriffen ist. Die Unterschiede in der Phase kann man durch die drei Curven der Fig. 399 darstellen.

Da der Winkelraum um die Maschine von einem Nordpol zum nächsten Nordpol einer ganzen Periode (vergl. Seite 518) oder einem vollen Umlaufe von 360 Grad auf dem Kreise der Fig. 351 entspricht, so sehen wir, dass die drei Ströme sich um

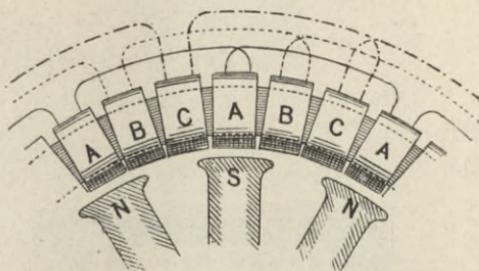


Fig. 398. Dreiphasiger Stromerzeuger.

60 Grad in der Phase unterscheiden. Wenn wir für jeden der drei Kreise eine besondere Hin- und Rückleitung brauchen, so müssen wir nicht weniger als sechs Drähte nach dem dreiphasigen Motor führen, den wir speisen wollen. Wenn wir aber die Spulen

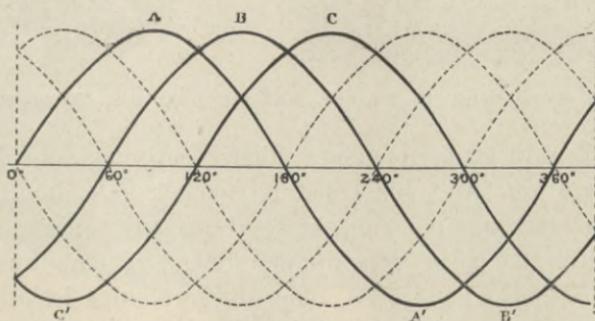


Fig. 399. Dreiphasenstrom mit je 60 Grad Phasenunterschied.

in geeigneter Weise, die wir noch kennen lernen werden, anordnen, so wird dieser Aufwand überflüssig, und man kann die Zahl der Drähte auf vier und sogar auf drei vermindern. Lassen wir die Benutzung der Erde als Rückleitung zu, so können wir die Zahl der erforderlichen Leitungsdrähte noch weiter auf zwei vermindern.

Die Anwendung einer Mehrphasenwicklung bietet nun nicht nur gewisse Vortheile für den Betrieb von Motoren; sie hat auch eine Ersparnis an den Herstellungskosten zur Folge. Indem wir einen zweiten Satz von Stromkreisen auf einen sonst unthätigen

Raum des Kernes aufwickeln, verdoppeln wir die Leistung der Maschine. Sie erfordert dann die doppelte Kraft zum Antrieb, giebt aber auch die doppelte elektrische Leistung. Sie kostet aber bei Weitem nicht das Doppelte, nimmt auch nicht mehr Raum ein. Görges stellte fest, dass eine dreiphasige Maschine eine Leistung gab, welche 2,73 mal so gross war als dieselbe Maschine mit einem Gleichstromanker lieferte.

### Bau der Wechselstrommaschinen.

Obwohl einige ausgezeichnete Wechselstrommaschinen von Siemens, Ferranti, Mordey und Crompton nach dem Muster der Maschinen mit dünner Scheibe gebaut sind, werden gegenwärtig

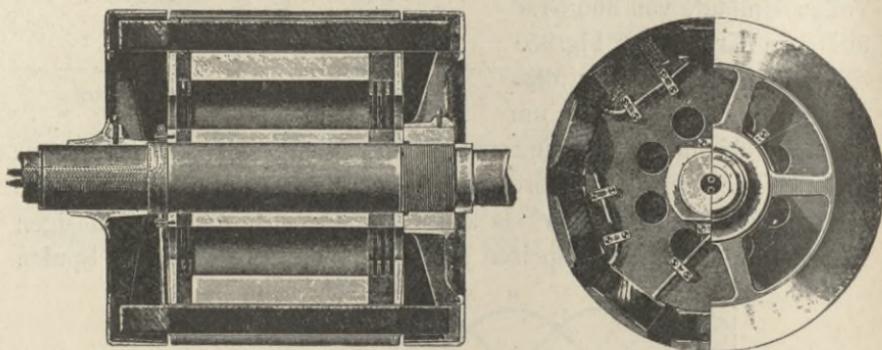


Fig. 400 und 401. Schnitt durch den Anker der Westinghouse'schen Wechselstrommaschine.

doch von allen Elektrikern andere Muster bevorzugt, sobald es sich um Maschinen von grösserer Leistung handelt. Da die Ankerleiter abwechselnd starken Anziehungskräften ausgesetzt sind, so ist es eine schwierige Aufgabe, den dünnen Scheiben eine ausreichende mechanische Festigkeit zu geben, ohne die sorgfältige Isolation ausser Acht zu lassen oder aber Constructionen anzuwenden, welche zu Wärmeverlusten durch Wirbelströme Veranlassung geben. Aus diesem Grunde wendet die Mehrzahl der Constructeure eiserne Kernscheiben beim Bau ihrer Anker an; hierbei werden fast allgemein die Wickelungen versenkt, ganz einerlei, ob der Anker sich dreht oder stillsteht.

Die von der Westinghouse-Gesellschaft gebrauchten Kernscheibenmuster sind im Allgemeinen den in Fig. 213 bis 215 dargestellten ähnlich. Für Wechselstrommaschinen werden solche mit wenigen aber starken Zähnen gewählt. Fig. 400 und 401 zeigen die Bauart der Anker. Die Spulen sind über besonderen Formen gewickelt und an der

ihnen zukommenden Stelle befestigt; sie werden durch hölzerne Keilstücke noch weiter gesichert. Bei den grössten Maschinen sind

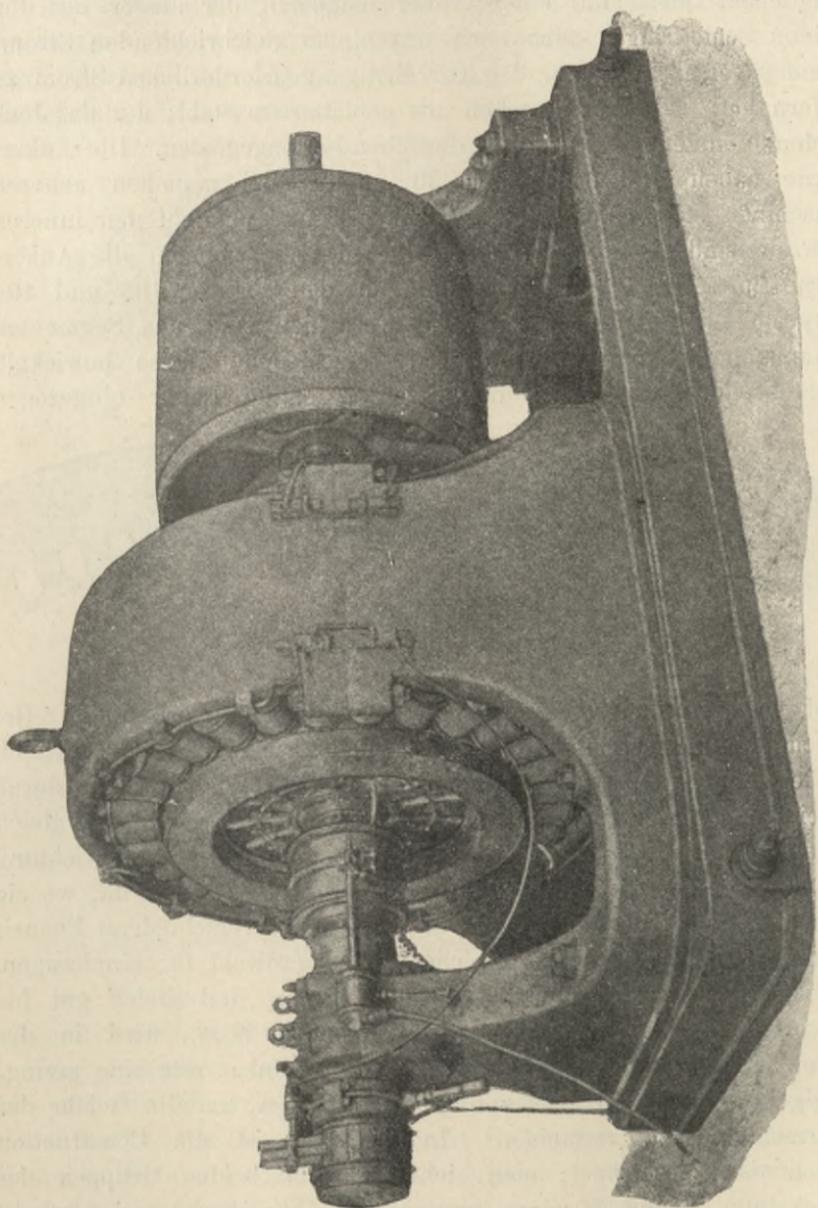


Fig. 402. Westinghouse'sche Wechselstrommaschine für 450 Kilowatt.

die Ankerkerne aus einzelnen Abtheilungen zusammengesetzt, die aus gestanzten Eisenblechen aufgereiht sind; eine solche Abtheilung zeigt Fig. 378. Die Fig. 402 giebt die Ansicht einer Wechselstrom-

maschine für 450 Kilowatt der von der Westinghouse-Gesellschaft bevorzugten Form, bei welcher 30 schmale radialstehende Pole von länglichem Querschnitt einen Anker umgeben, der ausser mit den beiden Schleifringen auch noch mit einem gleichrichtenden Stromwender versehen ist, der den zur Erregung erforderlichen Strom zu liefern hat. Die Pole bestehen aus geblätterttem Stahl; der das Joch bildende äussere Kranz ist um dieselben herumgegossen. Die Ankerkerne haben dementsprechend 30 Zähne. Bei manchen neueren Maschinen steht indessen der Anker fest und umgiebt den inneren sich drehenden Feldmagnet. In diesem Falle nehmen die Ankerkerne im Allgemeinen die beiden in den Figuren 403 und 404 dargestellten Formen an. Solche Kernringe sind aus Segmenten zusammengesetzt und werden auf verschiedene Weise bewickelt. Für Niederspannungsmaschinen werden starke Leiter eingezogen

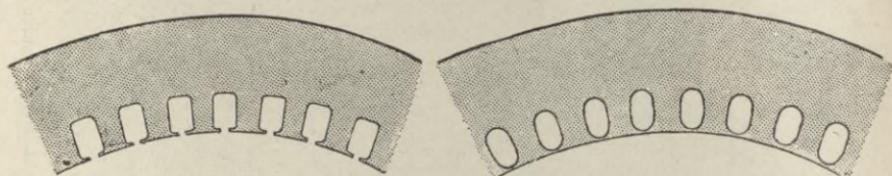


Fig. 403 und 404. Bleche für Ankerkerne.

und nach Art der Wellenwicklung miteinander verbunden. Bei Hochspannungsmaschinen ist die Schleifenwicklung mehr beliebt, wobei eine Anzahl von Windungen Schleifen bilden, welche durch zwei Löcher gehen, deren Abstand von einander ungefähr gleich dem Polstand ist. Brown hat in praktischer Weise die Einrichtung so getroffen, dass die Endverbindungen dieser Schleifen da, wo sie aus dem Kerne austreten, in zwei Gruppen in verschiedene Ebenen führen. Die Construction, welche sich ebensowohl für einphasigen, als auch für zwei- und dreiphasigen Strom, und gleich gut für Motoren wie für Stromerzeuger verwenden lässt, wird in der Tafel XXI dargestellt. Sie betrifft zwar scheinbar nur eine geringfügige Einzelheit, ist aber von grossem Nutzen, um die Gefahr der Kurzschlüsse zu vermeiden. In Fig. 405 ist die Construction schematisch gezeichnet; man sieht, wie die beiden Gruppen der Wicklung *A* und *B* eines zweiphasigen Stromerzeugers vertheilt werden, wobei jede Schleife zwei nebeneinander liegende Bohrungen benutzt. Dies bietet einige Vorteile gegenüber der Verwendung einzelner Bohrungen von grösserem Querschnitt, welche den magne-

tischen Kreis stärker beeinflussen und stärkere Erhitzung der Polstücke des Feldmagnetes herbeiführen würden.

Fig. 406 zeigt, wie nach dieser Methode die Wicklung eines dreiphasigen Stromerzeugers angeordnet wird, so dass die Verbindungsdrähte der Spulen gleichfalls in zwei Ebenen geführt werden können.

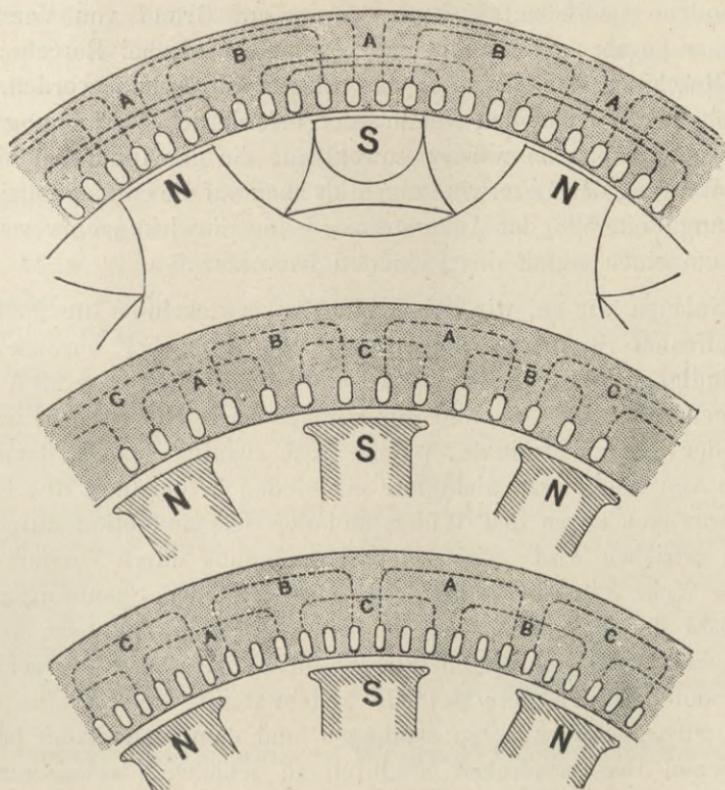


Fig. 405, 406 und 407. Schaltung der Wicklungen in mehrphasigen Maschinen.

Die Windungen von *A* werden natürlich in Reihe verbunden, obgleich sie sich abwechselnd in der inneren und der äusseren Stellung befinden; ebenso die Gruppen *B* und *C*. Fig. 407 stellt dar, wie der Ankerring für einen dreiphasigen Stromerzeuger oder Motor auszunutzen ist, wenn nicht alle Bohrungen für die Wicklung dienen. Diese Anordnung wurde verwendet, um die Herstellung eigener Blechscheiben für den dreiphasigen Anker zu umgehen. Die magnetischen Rückwirkungen sind geringer, wenn die nicht benutzten Bohrungen in den Zwischenräumen der bewickelten bleiben, als wenn der Ring an diesen Stellen nicht durchbohrt würde.

Beim Entwurf von Wechselstrommaschinen sind im Allgemeinen dieselben Grundsätze zu befolgen, welche für die Herstellung von Gleichstrommaschinen zu beachten sind; jedoch ist mit Rücksicht auf die grössere Zahl der Umkehrungen des Magnetismus in der Secunde eine geringere magnetische Dichte — etwa 6000 bis 7000 — in dem geblättern Ankereisen vorzusehen. Der in den Grundgleichungen vorhandene Coëfficient  $K$  kann, da er auf Grund von Versuchen an einer gegebenen Maschinenart bestimmt wird, bei Berechnungen von Maschinen ähnlicher Art als bekannt angesehen werden. Bei Berechnung der für den Feldmagnet erforderlichen Erregung muss Rücksicht genommen werden sowohl auf die der Induction hinderliche Wirkung der Ankerwindungen als auch auf die entmagnetisirende Wirkung (Seite 528) der Ankerströme; beide Einwirkungen vereinigen sich, um einen Abfall der Induction hervorzurufen.

Nehmen wir an, wir haben eine Ankerwicklung für 2000 Volt bei offenem Stromkreise berechnet, und zwar bei normaler Geschwindigkeit und normalem Felde, wobei der volle Strom 20 Ampere betragen soll. Es muss nun ein Versuch angestellt werden, um die Zahl der Volt zu ermitteln, welche noch zuzufügen sind, damit der Strom von 20 Ampere nicht nur gegen den Widerstand des Feldes, sondern auch gegen den Widerstand der Selbstinduction durch den Kreis getrieben wird. Eine solche Bestimmung durch Versuch kann in der Weise gemacht werden, dass man mit einem Spannungsmesser die Zahl der Volt misst, die bei der gegebenen Frequenz wirklich gebraucht wird, um diesen Strom durch den Anker zu schicken. Eine andere und bessere Methode besteht darin, die Maschine durch einen Strommesser kurz zu schliessen und dann den Strom bei der gegebenen Geschwindigkeit hindurch zu schicken, wobei zunächst die Feldmagnete ohne Erregung bleiben; dann wird die Erregung allmählich gesteigert, bis der normale Strom erreicht ist. Nun öffnet man den Stromkreis und misst die Spannung, welche der Anker bei dieser Erregung liefert. Wenn in dieser Weise die gegenelektromotorische Kraft des Ankers bestimmt ist, muss noch die hinzuzufügende Erregung berechnet werden. Hat der eben geschilderte Versuch ergeben, dass die gegenelektromotorische Kraft des Ankers 880 Volt beträgt, so muss, da dieselbe sich in Quadratur mit der wirklichen elektromotorischen Kraft von 2000 Volt befindet, die inducirte elektromotorische Kraft bei voller Belastung mindestens

$$\sqrt{880^2 + 2000^2} = 2184 \text{ Volt}$$

betragen. Auf diese Spannung muss die Erregung bei voller Belastung nach den in Kapitel VI und VII gegebenen Grundsätzen über den magnetischen Kreis berechnet werden. Ein Beispiel einer Berechnung einer Wechselstrommaschine von Kapp war in der vorigen Ausgabe dieses Werkes enthalten.

**Asynchrone Stromerzeuger.** Von mehreren Forschern — worunter C. E. L. Brown und die Ingenieure der General Electric Company in Schenectady, New York — wurde gefunden, dass asynchrone Motoren, sowohl ein- als mehrphasige, als Stromerzeuger dienen können, wenn sie mit einer etwas höheren Geschwindigkeit, als dem Synchronismus entspricht, getrieben werden. Aber es ist unmöglich, einen Stromkreis mit nur einer solchen Maschine (als Stromerzeuger) zu speisen — sie ist nicht selbsterregend. Es muss schon ein Wechselstrom oder mehrphasiger Strom an die Klemmen oder an die Hauptleitungen geliefert werden. Wahrscheinlich würde man mit Vortheil in solchen Centralen, wo die Belastung oft sehr plötzliche Steigerungen aufweist, einen oder mehrere asynchrone Stromerzeuger neben anderen Wechselstrommaschinen aufstellen; die asynchrone Maschine kann man mit einer dem Synchronismus nahen Geschwindigkeit als unbelasteten Motor laufen lassen, bis er gebraucht wird. Man erhöht nun lediglich die Geschwindigkeit seiner Triebmaschine (ohne auf den Synchronismus zu warten); er beginnt als Stromerzeuger zu arbeiten, und die Wellen seiner elektromotorischen Kraft kommen in vollkommenen Synchronismus mit denen des Stromkreises, ohne dass er selbst die gleiche Geschwindigkeit besitzt, wie die anderen Stromerzeuger.

### **Beschreibung einiger Wechselstrommaschinen.**

#### **Maschinen der Aktiengesellschaft Elektrizitätswerke vormals O. L. Kummer & Co.**

Ein für directe Kuppelung und niedrige Umdrehungszahl bestimmtes Modell  $\gamma$  ist in Fig. 408 dargestellt.

Bei diesen Maschinen ist der Anker der feststehende, die Feldmagnete der rotirende Theil.

Auf der Welle, die in Lagern mit doppelter Ringschmierung ruht, ist das zugleich als Schwungrad ausgebildete mehrarmige Polrad befestigt, auf dem die mit einem Flansch versehenen Feldmagnetkerne aufgeschraubt und verbolzt werden. Die Kerne sind aus Stahlguss hergestellt und mit Polschuhen versehen, welche zum Festhalten der Spulen dienen. Um der Entstehung von Wirbelströmen

vorzubeugen, sind die Kerne durch kreuzweise geführte Schlitzte untertheilt.

Das Ankergehäuse besteht aus zwei gusseisernen Rädern, die auf grossen, an den Lagerböcken angegossenen Naben sitzen und mit Schrauben befestigt sind. Zwischen diesen beiden Rädern befindet sich der in eine Anzahl rahnenförmiger Segmente zerlegte Anker. Der Ankerkern besteht aus isolirten Blechen aus weichem Eisen und besitzt geschlitzte Nuthen.

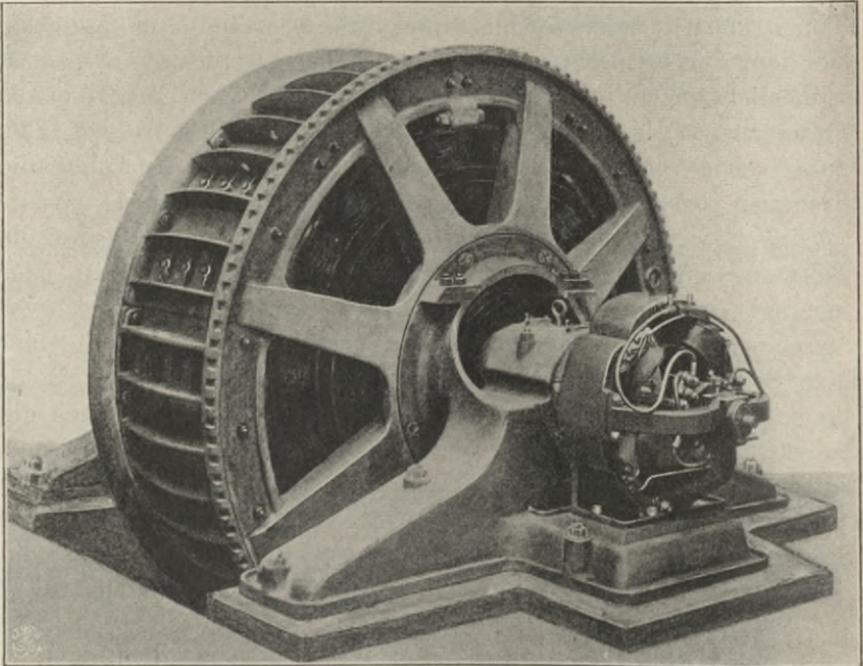


Fig. 408. Wechselstrommaschine Modell 7 von Kummer.

Die Stromabnahme vom Anker erfolgt durch Schleifkontakte besonderer Art: An dem am tiefsten gelegenen Ankersegment sind flache, vorn und hinten keilförmig verlaufende Kupferstücke befestigt, welche sich zwischen die fest gelagerten Stromzuführungsfedern einpressen und unter allen Umständen in gesicherten Kontakt mit diesen gelangen müssen.

Durch diese Anordnung wird die Montage, sowie die Ausführung etwaiger Reparaturen insofern sehr erheblich vereinfacht, als die einzelnen Segmente nach Lösen der Klemmschrauben leicht ausgewechselt werden können. Was namentlich den letztgenannten

Punkt anbelangt, so sind die Segmente der oberen Hälfte ohne weiteres zugänglich; sollte dagegen das Auswechseln eines unterhalb gelegenen Segmentes — einige Segmente können immer leicht vorrätig gehalten werden — nöthig sein, so werden nur die Verbindungsschrauben zwischen Nabe und Rad gelöst, worauf der Anker in jede beliebige und zum Auswechseln bequeme Lage gedreht werden kann.

Die Aus- und Einschaltung der Stromableitungskabel bei einer solchen Drehung des Ankers geschieht einfach dadurch, dass die an dem untersten Segment befindlichen keilförmig gestalteten Kontakte aus den starken Stromzuführungsfedern herausgezogen oder in diese hineingedrückt werden, ohne dass Schrauben oder sonstige Verbindungen zu lösen oder festzuziehen wären. Die Zuleitungskabel können bei dieser Anordnung bis zum Schaltbrett ganz unterirdisch verlegt werden, was im Fall hoher Spannung — die Maschinen werden gegenwärtig bis zu 5000 Volt gebaut — sehr erwünscht ist.

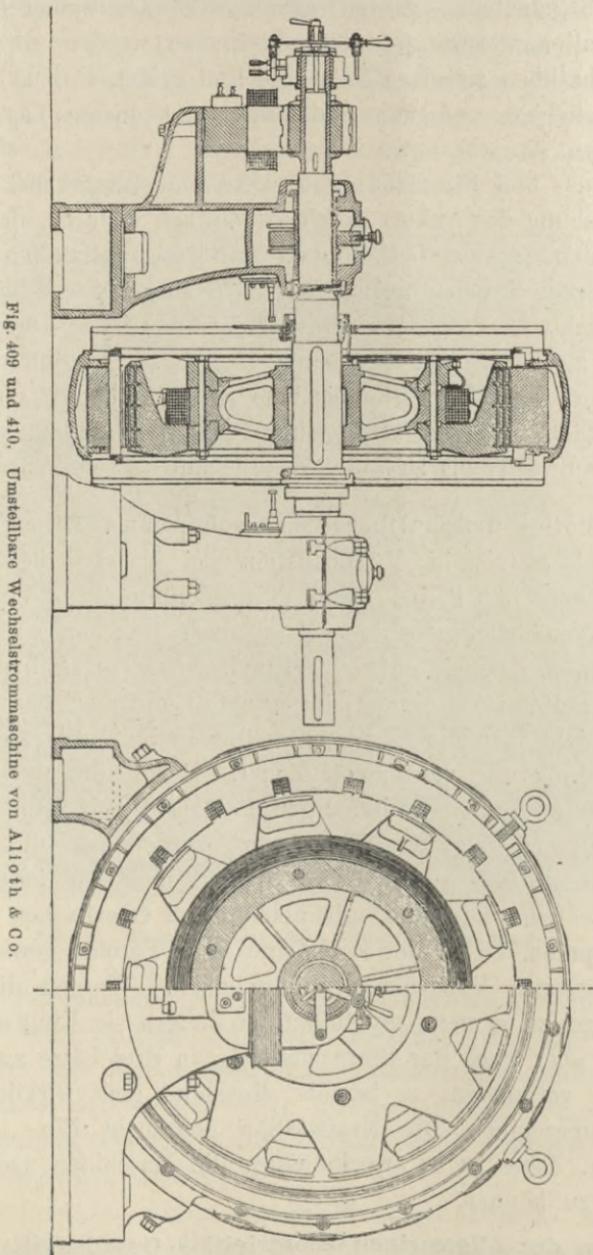
#### **Alioth's umschaltbare Wechselstrommaschinen.**

Alioth & Co. in Münchenstein bei Basel haben mehrere Maschinen von 300 P bei 4000 Volt Spannung für eine Kraftstation in Neufchâtel gebaut, welche nach Belieben so geschaltet werden können, dass sie entweder Einphasen- oder Dreiphasenstrom liefern. Fig. 409 stellt einen Längenschnitt einer solchen Maschine dar; links sieht man die Erregermaschine und die Einzelheiten der mit Selbstschmierung versehenen Lager. Der Feldmagnet hat, wie aus Fig. 410 zu erkennen ist, neun Polpaare und kann in einen solchen mit sechs Polpaaren umgeändert werden, falls die Maschine Dreiphasenstrom liefern soll. Die Spitzen der Pole bestehen aus weichem Stahlguss und sind mit geblättern Oberflächen versehen. Die Ankerspulen, 18 an der Zahl, sind über Formen gewickelt und über die eisernen Vorsprünge aufgeschoben. Werden die Spulen in zwei Sätze zu je neun geschaltet, so liefern sie Einphasenstrom, werden sie aber nach der Sternschaltung in drei Sätze zu je sechs miteinander verbunden, so ist die Maschine eine wirkliche Dreiphasenstrommaschine. Die Kraftstation gebraucht Ein- und Dreiphasenstrom, daher ist es zweckmässig, die Maschinen nach Bedarf umschalten zu können.

#### **Maschinen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft Berlin.**

Diese Gesellschaft hat das Dreiphasensystem nach den Entwürfen von v. Dolivo-Dobrowolsky besonders ausgebildet. Fig. 411 stellt

eine Maschine von 89 Kilowatt dar, mit festen äusseren Polen und einem drehbaren Anker mit versenkter Schleifenwicklung.



Tafel XVII stellt ein neueres Modell einer Drehstrommaschine für hohe Spannung mit direkt gekuppelter Erregermaschine dar. Die

inducirte Wickelung ist im Eisenkern des feststehenden Gehäuses in Löchern gelagert und durch die Form des Gehäuses vor äusserer Beschädigung geschützt. Das Magnetfeld ist rotirend angeordnet. Durch Keilverbindungen werden die Polhörner mit Spulen auf dem Inductorrade befestigt und können leicht abgenommen und ausgewechselt werden, ohne dass ein Verschieben oder Auseinandernehmen des Gehäuses erforderlich wäre. Der Erregerstrom wird

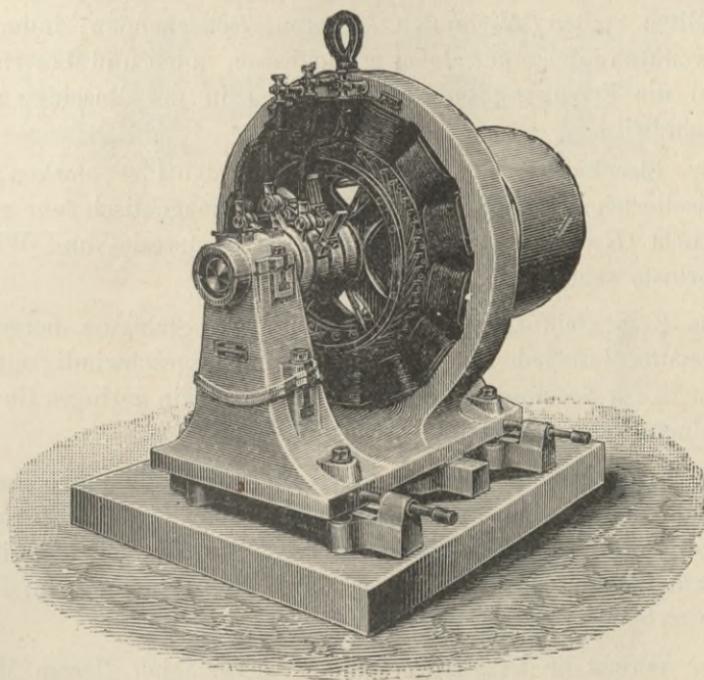


Fig. 411. Dreiphasen-Wechselstrommaschine der Allgemeinen  
Elektricitäts-Gesellschaft.

durch schleifende Kontakte den Magnetspulen zugeführt. Das Gehäuse wird mittels Stellschrauben auf der Grundplatte befestigt, hierdurch wird ein genaues Ein- und Nachstellen ermöglicht. Dieses Modell wird für Maschinen von etwa 50 P bis zu den grössten Leistungen verwendet; zur Zeit werden Maschinen von 4000 P gebaut, welche für die Berliner Elektrizitätswerke bestimmt sind. Beim Entwurf dieses Modelles wurde die grösste Sorgfalt darauf verwendet, einen möglichst geringen Spannungsabfall zu erzielen, da die Maschinen hauptsächlich zum Speisen von Netzen dienen sollen, an welche Motoren angeschlossen sind.

**Berliner Maschinenbau-Aktiengesellschaft vormals  
L. Schwartzkopf, Berlin.**

Die in Fig. 412 dargestellte Konstruktion von Dreh- und Wechselstrommaschinen, sogen. Wechselpoltype, Modell DW, wird normal bis zu einer Leistung von 84 Kilowatt, bei maximal 600 Umdrehungen in der Minute für Drehstrom gebaut.

Hervorzuheben ist die leichte Einführung der mittels Schablonen hergestellten Spulen (**W**) in den äusseren, feststehenden, inducirten Theil, wodurch infolge der dabei erreichbaren, guten und dauerhaften Isolation die Erzeugung hoher Spannungen in der Maschine selbst ermöglicht wird.

Der Eisenblechkranz des Ankers, aus 0,5 mm starken, mit Papier isolierten Blechen zusammengesetzt, ist magnetisch sehr gering beansprucht ( $B = 4000$  bis  $5000$ ), so dass Hysteresis- und Wirbelstromverluste sehr gering sind.

Das Klauenfeld (*MN*) ist aus massivem Stahlguss hergestellt und gestattet infolgedessen eine hohe Umfangsgeschwindigkeit (bis zu 35 m in der Secunde), so dass die Maschinen ein geringes Gewicht mit kleinen Aussenabmessungen verbinden.

Die Erregerspule selbst erfordert gegenüber allen Wechselpoltypen, die ebenso viele Spulen als Pole haben, für die Erzeugung derselben Ampere-Windungszahl sehr wenig Kupfer, da die mittlere Länge einer Windung sehr klein ist, und die Wickelung die Kraftlinien für beliebig viele Polpaare erzeugt.

Der Verlust in der Erregerspule ist deshalb bei diesem Modell (für gleiche Amperewindung gerechnet) sehr gering, und da die Eisenverluste durch gut gewählte Polformen ebenfalls sehr klein sind, so ist infolgedessen der Wirkungsgrad der Maschinen ein verhältnismässig hoher. Bei einer Maschine von 67 Kilowatt — 5000 Volt — und 500 Umdrehungen wurde z. B. ein Wirkungsgrad von 92 Procent erreicht.

Erwähnenswerth für die praktische Bedeutung der Verwendung einer Erregerspule ist noch ein Umstand, der von Werth sein kann, jedoch bisher in der Praxis meist übersehen wurde. Stellt man nämlich den Spulenkasten der Erregerspule aus einem gut leitenden Metall her, so kann dieser bei Einphasen-Wechselstrommaschinen eine gute Schirmwirkung ausüben und das Lamelliren der Pole bei geeigneter Ankerwicklung überflüssig machen.

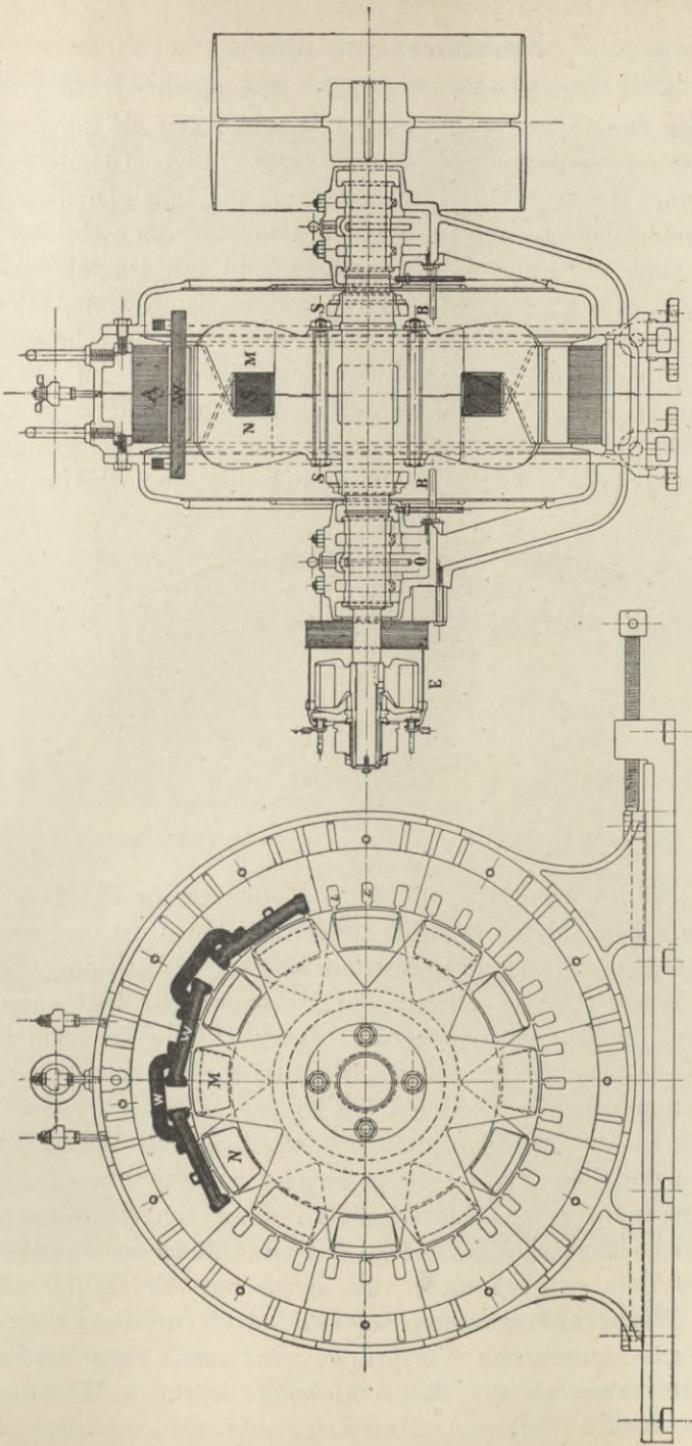


Fig. 412. Drehstrommaschine der Berliner Maschinenbau - Aktiengesellschaft vormals L. Schwartzkopff.

### Maschinen von Brown.

Seit 1891 hat Brown besonders Maschinen mit senkrechter Anordnung der Achse gebaut, welche er seiner Zeit als Constructeur der Oerlikon-Gesellschaft eingeführt hatte. Fig. 413 stellt eine Ansicht einer Maschine der »Schirm«gattung dar, mit sich drehenden inneren Feldmagneten, welche an einem Radkranz mit sechs Speichen befestigt sind. Die äusseren Kernringe sind mit Durchbohrungen versehen, wie in der Fig. 425, durch welche bei Niederspannungsmaschinen starke Kupferleiter gesteckt werden, welche sehr oft, wie bei den Gleichstrom-Trommelankern von Brown, im Zickzack untereinander verbunden werden. Die Wickelung mit zwei Lagen eignet sich für diese Maschinen recht gut. Bei Hochspannungsmaschinen sind die Spulen in Schleifenwickelung, je nach Umständen

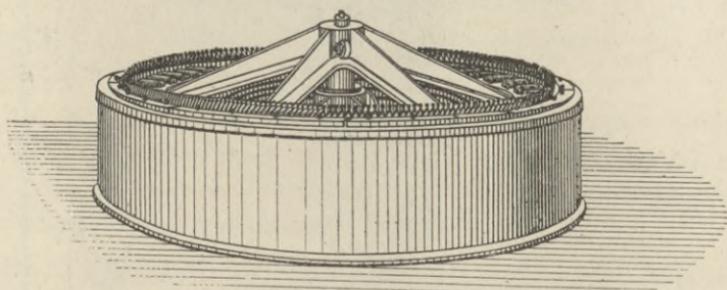


Fig. 413. Brown's Wechselstrommaschine von der »Schirm«gattung.

entweder ähnlich der Skizze in Fig. 405 oder der in Fig. 406, aufgewunden. Eine grosse Anzahl dieser Maschinen ist gegenwärtig im Betrieb. Eine dieser Drehstrom-Maschinen hat einige Jahre hindurch ausgezeichnete Dienste in Schönenwerth bei Aarau in der Schweiz gethan; sie lieferte dort Strom für die Triebmaschinen einer grossen Schuhfabrik. Neuerdings ist in der Stadt Aarau eine Centralstation errichtet worden, welche die Wasserkraft des Aarflusses durch Turbinen ausnutzt; in derselben sind Wechselstrommaschinen derselben Art als Stromerzeuger aufgestellt worden.

Später hat Brown eine besondere Form von sich drehenden Feldmagneten angenommen, welche mit einer Reihe radial auswärtsgerichteter Pole versehen sind, von denen nur die Hälfte mit erregenden Wickelungen versehen ist, während die unbewickelten Pole nur einfache gusseiserne Vorsprünge sind und einen grösseren Querschnitt haben als die zwischen ihnen liegenden Wickelungen tragenden runden Polkerne. Brown glaubt, dass bei Maschinen,

welche für Motorenbetrieb bestimmt sind, der Feldmagnet weniger den Gegenwirkungen des Ankers unterworfen sein darf, als es bei

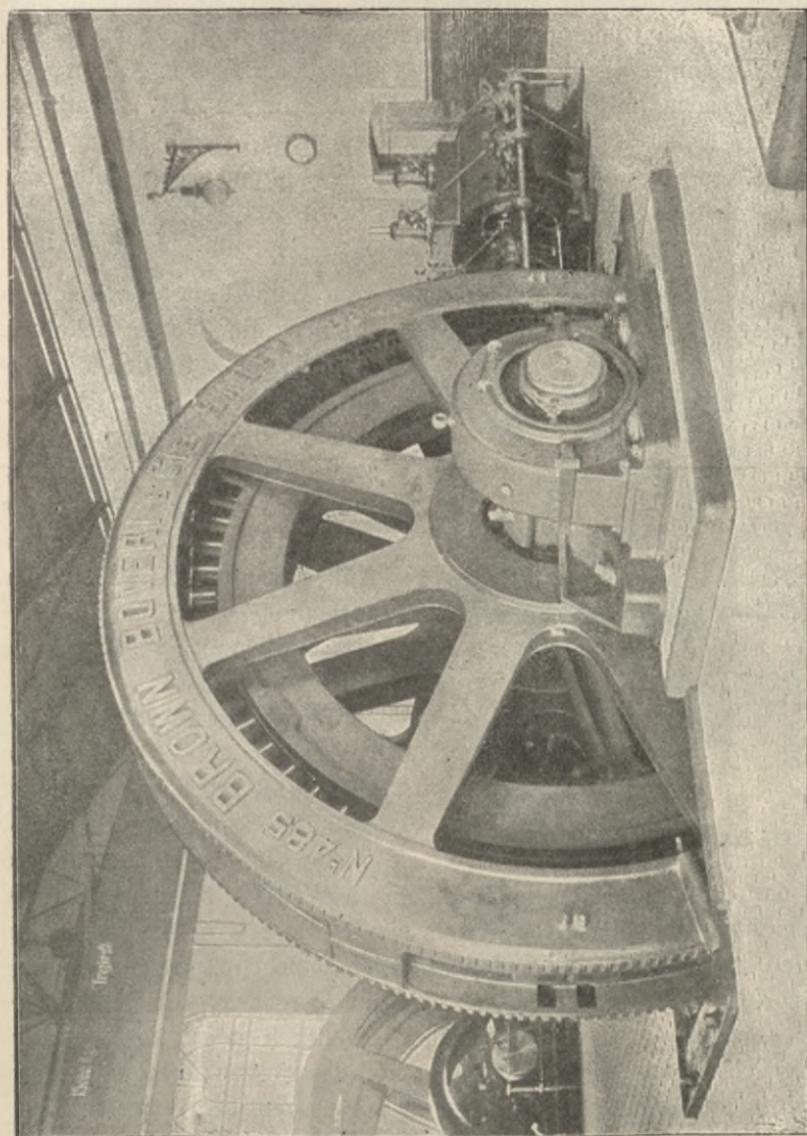


Fig. 414. Einphasige Wechselstrommaschine in Frankfurt.

den in Fig. 425 dargestellten in Lauffen zur Verwendung gelangten Maschinen der Fall ist.

Für die Centrale in Frankfurt a. M. baute Brown fünf Wechselstrommaschinen von je 550 Kilowatt, welche 85 Umdrehungen in

der Minute machen. Bei diesen Maschinen (Fig. 414) sind die vorstehenden Pole des sich drehenden Feldmagnets jeder besonders gewickelt, die Erregung wird von einer vierpoligen, am Ende der Welle sitzenden Gleichstromdynamomaschine bewirkt. Neu ist bei diesen Maschinen die Bauart des feststehenden äusseren Ankers, der wie ein Schwungrad aussen mit Zähnen versehen ist, vermittelt deren der Anker langsam gedreht werden kann, so dass jeder Theil leicht in die für eine Besichtigung und Reinigung bequemste Lage gebracht werden kann.

#### Maschinen von Ferranti.

Ferranti suchte den gleichzeitig von Lord Kelvin gemachten Vorschlag zu verwirklichen, für die Spulen die Wellenwicklung

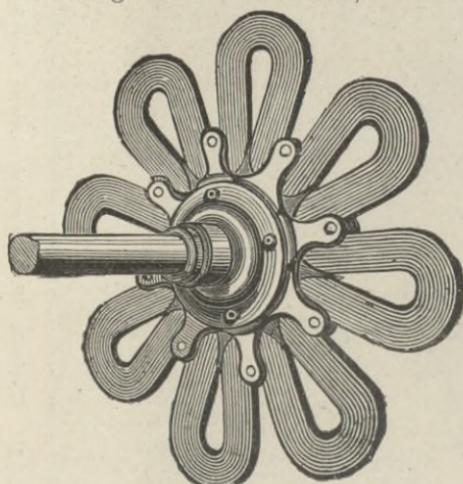


Fig. 415. Anker von Ferranti (1882).

anzuwenden. In den bis dahin gebauten Maschinen<sup>1)</sup> bestanden die Feldmagnete aus zwei Kränzen abwechselnder Pole, wie in den Maschinen von Wilde und Siemens; der Anker war aus Kupferstreifen zusammengesetzt, welche in eine wellenförmige Sternform gebogen waren.

Wie aus der Fig. 415 hervorgeht, bestand der Anker aus acht im Zickzack angeordneten Schleifen, auf jeder Seite befanden sich 16 Magnetpole, so dass der Strom, welcher hinter einem Nordpol radial auswärts floss, hinter einem Südpol radial einwärts sich bewegte. Die Kupferstreifen wurden mit zwischenliegender Isolationsschicht ohne Verwendung eines Kernes in vielen Lagen übereinandergelegt, die Theile des Sternes waren durch isolirte Bolzen, die durch sternartige Messingplatten griffen, festgehalten. Der Vortheil des zickzackförmigen Ankers sollte in der Stärke und Einfachheit der Bauart begründet sein.

Bei den späteren Maschinen von Ferranti ist die zickzackförmige Wickelung ganz aufgegeben worden; die Spulen werden besonders gewickelt und dann zu einer Scheibe vereinigt. Diese Bauart wird aus den nachstehenden Figuren ersichtlich. Jede

1) Vergl. Engl. Patent [1883] Nr. 3702 und [1887] Nr. 702.

Spule wird auf einen steifen Kern gewickelt, der aus fächerartig zusammengelegten Messingstreifen besteht. Die Streifen sind durch Asbest voneinander isolirt und an dem einen Ende unter sich und

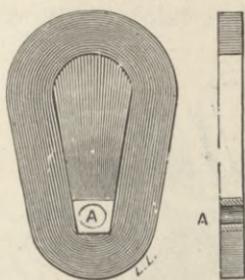


Fig. 416. Einzelne Spule des Ankers von Ferranti.

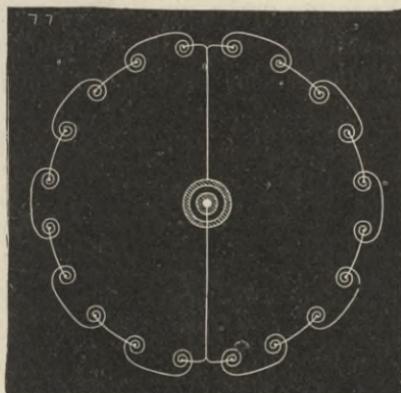


Fig. 417. Verbindungen im Anker von Ferranti.

mit einem Messingstück verbunden, das die Bohrung *A* besitzt (Fig. 416). Das innere Ende der Wickelung ist mit dem Messingstück verlöthet. Der Kupferstreifen der Wickelung ist zur Erzielung grosser Steifigkeit leicht gewellt, ein Streifen von dünner vulkanisirter Fiber ist zwischengewickelt. Die Spulen werden zu je zwei in Spulenhalter aus Messing (*D* in Fig. 418) eingesetzt, durch Zwischenlagen aus Glimmer und Fiber isolirt und mittels Bolzen festgelegt. Durch ein Stück Fiber (*H*) sind die beiden Spulen in jedem Halter mechanisch und elektrisch voneinander isolirt, der Halter bildet indessen eine metallische Verbindung zwischen beiden Spulen vermöge des durch *A* greifenden Bolzens. Ein Strom, der vom äussern Ende einer Spule zum innern Ende fliesst, muss also in der zweiten umgekehrte Richtung besitzen. Das äussere Ende jeder Spule ist mit dem äusseren Ende der im benachbarten Halter

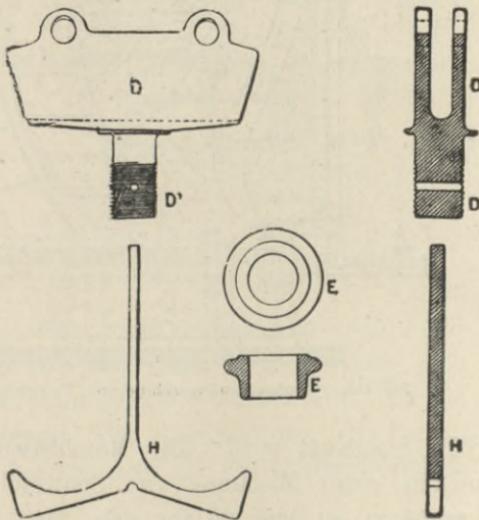


Fig. 418. Einzelheiten des Ankers von Ferranti.

der Halter bildet indessen eine metallische Verbindung zwischen beiden Spulen vermöge des durch *A* greifenden Bolzens. Ein Strom, der vom äussern Ende einer Spule zum innern Ende fliesst, muss also in der zweiten umgekehrte Richtung besitzen. Das äussere Ende jeder Spule ist mit dem äusseren Ende der im benachbarten Halter

zunächst liegenden verbunden. Die Halter müssen demnach isolirt und doch mechanisch recht fest gehalten werden. Sie sind mit einem runden Ansatz  $D'$  versehen, der durch eine Porzellanbuchse  $E$  greift. Das Ende des durch die Buchse geschützten Ansatzes  $D'$  greift durch einen starken Ring. In Oeffnungen des letzteren sind metallene Füße eingelassen, in die das Ende von  $D'$  ragt und durch einen

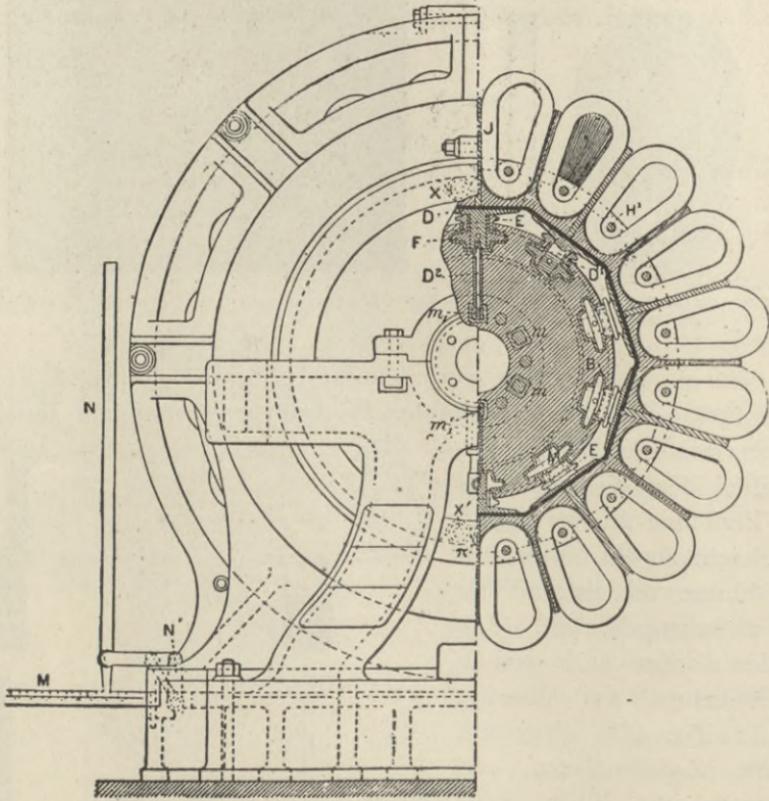


Fig. 419. Wechselstrommaschine von Ferranti (225 Kilowatt). Maassstab 1:20.

Stift festgelegt wird. Die Metallfüsse sind in den Ringöffnungen mittels einer Mischung von Schwefel und gepulvertem Glas fest vergossen, so dass sie von dem Ring isolirt sind.

Auf jeder Seite eines Spulenhalters ragt ein kleiner schmaler Flügel vor, der die Lüftung befördert. In allen grösseren Maschinen sind die Spulen, wie aus der Fig. 417 ersichtlich ist, in zwei Reihen gruppirt, die nebeneinander geschaltet sind. Diese Gruppierung wird dadurch möglich, dass sämtliche Spulen der einen Kreishälfte rechtsgängig, der anderen linksgängig angeordnet werden, und zwar

aus dem Grunde, um diejenigen Spulen, welche den grössten Spannungsunterschied zeigen, recht weit auseinander zu halten.

Zwei Kupferstäbe führen von den Ansätzen zweier gegenüberliegender Spulenhalter zu den Sammelringen.

Die Fig. 419 bezieht sich auf eine Maschine für 225 Kilowatt und liefert die Ansicht einer Hälfte des Ankers und des Feldmagnetes. Hieraus ersieht man, wie der kupferne Verbinder  $D^2$  von dem Spulenhalter  $D$  zu  $m_1$  führt und ein Bolzen ihn mit einem der drei Arme

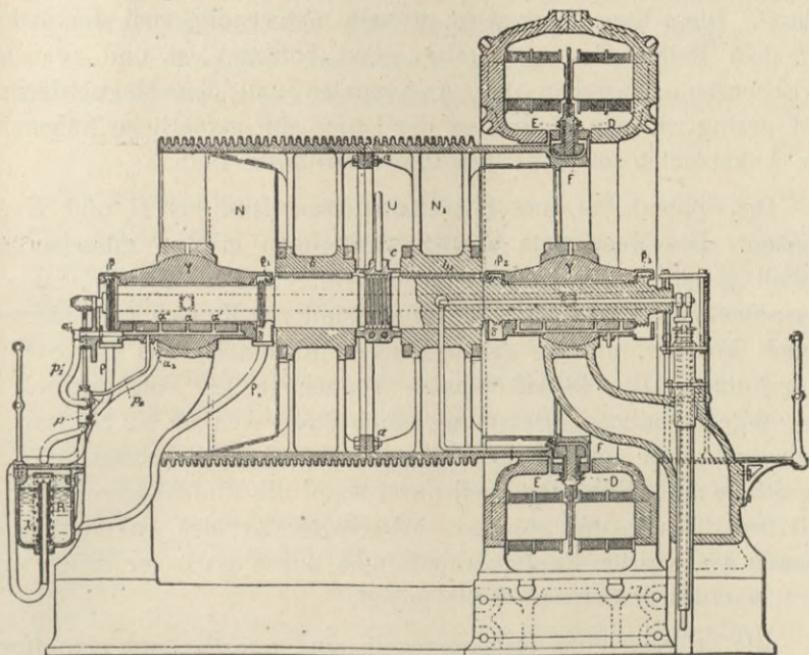


Fig. 420. Wechselstrommaschine von Ferranti (1000 Kilowatt). Maassstab 1:72.

des Sammelapparates vereinigt. Man sieht ferner, dass der Feldmagnet aus zwei Theilen aufgebaut ist; jeder derselben lässt sich mittels eines Hebels  $N$  und einer Zahnstange  $M$  verschieben, um den Anker zum Zweck einer Reinigung oder Ausbesserung freizulegen. Der Durchmesser des Ankers beträgt 1,67 m, die Geschwindigkeit 350 Umläufe in der Minute.

Die Fig. 420 stellt im Maassstab 1:72 eine Maschine von 1000 Kilowatt dar; von dieser Art werden mehrere in der Station zu Deptfort verwendet. Diese Maschinen liefern 100 Ampere bei 10000 Volt und 120 Umläufen in der Minute und werden von den Dampfmaschinen mittels Seilübertragung angetrieben. Die Riemen-scheibe besitzt Nuthen für 27 Seile, hat einen Durchmesser von

etwa 3 m und eine noch grössere Länge. Sie besteht aus zwei Theilen  $N$  und  $N_1$ , die bei  $a$  durch Bolzen vereinigt sind; sie ist zwischen zwei Lagern  $\gamma$  auf der Welle befestigt. Die Wellzapfen haben eine ungewöhnliche Länge, die Lager laufen auf kugelförmigen Pfannen. Durch Stossringe an den Enden der Welle wird die Hin- und Herbewegung derselben verhindert. Die genaue Einstellung der Seilscheibe auf der Welle lässt sich durch einen centralen Schraubenring  $e$ , der mittels einer Handhabe  $U$  gedreht wird, herbeiführen. Diese Einstellung wird deshalb nothwendig, weil der Anker auf dem Reifen  $F$  der Scheibe selbst befestigt ist und, da der Zwischenraum zwischen den Ankerspulen und den Magnetflächen sehr gering ist, jede Abnutzung der Lager eine gefährliche Näherung der Ankerspulen an die Polfläche herbeiführen kann.

Die Spulenhalter und Porzellanbuchsen sind bei  $D$  und  $E$  zu ersehen. Die Magnetpole werden von einem grossen gusseisernen Gestell gehalten. In jedem Kranze befinden sich 48 Pole von abwechselnder Polarität. Die Polflächen sind mit Kappen aus dünnem Ebonit bedeckt, um sie gegen Funkenentladungen aus den Spulen zu schützen. Die 48 Ankerspulen können je 420 Volt entwickeln und ohne schädliche Erwärmung einen Strom von 50 bis 55 Ampere aushalten. Der mittlere Durchmesser des Ankers beträgt 4,57 m die Stärke am arbeitenden Theil nur 1,9 cm, die Umfangsgeschwindigkeit fast 30 m in der Secunde. Wegen der Art des Ankerantriebes müssen die isolirten Kupferverbindungen durch das Lager treten und sind in einen Kanal der Welle gelegt.

Die grössten Vorsichtsmaassregeln sind getroffen, um eine durch Ueberhitzung der Lager eintretende Betriebsstörung zu vermeiden. Es ist deshalb ein doppelter Umlauf von Wasser und Oel eingerichtet. Auf dem dem Sammelapparat entgegengesetzten Ende der Welle treibt ein Excenter eine Oelpumpe  $p$ , die das Oel durch ein Filter aus dem Behälter  $R$  pumpt und es unter Druck in die Oelgänge  $a$  zu dem Lager treibt, von wo es wieder zum Behälter zurückfliesst.

Die neuesten von Ferranti für die Centrale in Portsmouth entworfenen Wechselstrommaschinen<sup>1)</sup> sind in ihrer Bauart gänzlich abweichend von den eben beschriebenen, sie nähern sich mehr den in Fig. 414 dargestellten Maschinen von Brown.

---

1) Electrician, Bd. 33, S. 157. 1894.

Eine ganz neue Anlage ist von Ferranti in Southport<sup>1)</sup> errichtet, wo drei Maschinen mit feststehendem Anker und einem mit drehbarem Anker aufgestellt sind. Letztere leistet 286 Ampere bei 2100 Volt und 214 Umdrehungen in der Minute. Die Periodenzahl beträgt 50 in der Secunde. Der Anker hat 28 Wickelungen, deren Kerne aus abwechselnd geschichteten Lagen von Messing und Asbeststreifen aufgebaut sind. Zu beiden Seiten des Ankers sind mit 9,5 mm Zwischenraum 28 Pole angeordnet, die in Löchern des gusseisernen Joches befestigt sind, das einen Theil des massiven Rahmens bildet. Zur Verhinderung des Funkenüberschlagens vom Anker zu den Polen sind die Oberflächen der Letzteren mit Kappen aus Mikanit versehen.

#### Maschine von Ganz & Co.

Nach den Entwürfen von Zipernowski<sup>2)</sup> sind von dieser Firma verschiedene Modelle hergestellt worden, deren allgemeine Grundlage bereits auf Seite 556 beschrieben wurde. Die Firma Helios stellte 1891 in Frankfurt a. M. eine grosse Maschine von Ganz<sup>3)</sup> aus; dieselbe leistete 400 Kilowatt und lieferte 200 Ampere bei 2000 Volt und 125 Umläufen in der Minute. Der Anker bestand aus 40 T-förmigen Stücken (vergl. Fig. 380), die mit Wickelungen umgeben waren, von denen jede 100 Volt lieferte, die Spulen waren in zwei Reihen zu je 20 geschaltet. Der umlaufende Feldmagnet besass 299,2 cm im Durchmesser und 38 cm Breite. Der elektrische Wirkungsgrad betrug 95,6 Procent, der mechanische 91,5 Procent. In der Centralstation zu Rom<sup>4)</sup> sind vier derartige Maschinen für je 320 Kilowatt Leistung aufgestellt; sie werden unmittelbar durch besondere Verbunddampfmaschinen von je 500 P mit 125 Umläufen in der Minute betrieben. Der umlaufende Feldmagnet besitzt 40 radiale Pole aus massivem Eisen, der Durchmesser beträgt über 2,7 m. Der innere Durchmesser des Ringgestelles für den Anker beträgt etwa 2,9 m; der Kern besteht aus Eisenblech und Papier. Von den 40 Spulen liefert jede 50 Volt, sämtliche Spulen sind hintereinander geschaltet. Sie können 200 Ampere Strom leiten, da der Draht 6 mm Durchmesser besitzt. Die Spulen der Feldmagnete sind auf rechteckige gespaltene Formen aus Zink gewickelt, die etwa

1) Electrical World and Eng., Bd. 36, S. 524. 1900.

2) Centralblatt für Elektrot., Bd. 12, S. 554. 1889.

3) Beschrieben von Esson und abgebildet in Electrical Review, Bd. 29, S. 503. 1891.

4) Beschrieben von Fleming im Electrician, Bd. 25, S. 317. 1890.

38 cm hoch und 51 cm breit sind; am äusseren Ende sind die Windungen zahlreicher. In jeder Spule der Ankerwickelungen befinden sich 30 Windungen auf Rahmen aus vulkanisierter Fiber; die Rahmen sind 48 cm lang, 25,4 cm breit und 5,1 cm tief; sie werden durch Gestelle aus Bronze festgehalten.

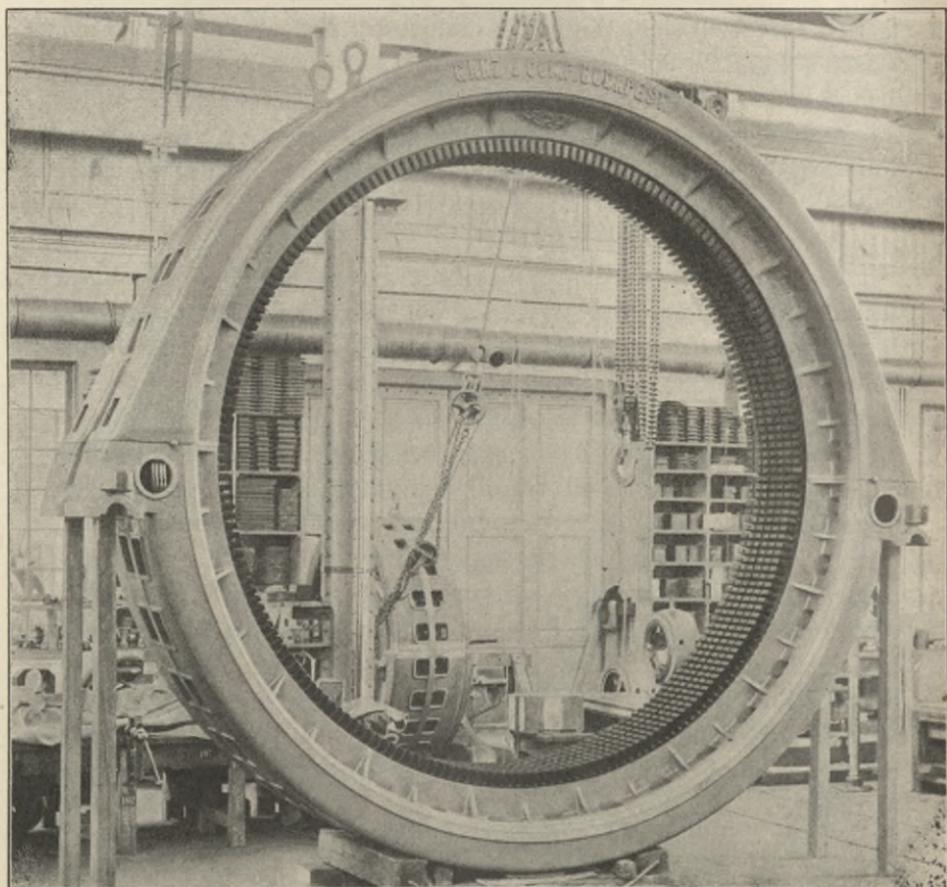


Fig. 421. Induktionsmantel einer Drehstrommaschine für die Fernleitung Tivoli—Rom.

Dieses Modell ist bis 1897 unverändert gebaut worden. Seit diesem Jahre wird für ein- und mehrphasige Stromerzeuger eine Form gebaut, bei welcher ein feststehender, aus ringsegmentförmigen Blechen zusammengesetzter und mit ausreichenden Ventilationsöffnungen versehener Induktionsmantel Verwendung findet, in dessen mehr oder weniger geöffneten Aussparungen die inducirte Bewickelung durch Papier- oder Mikanit röhren isolirt gewickelt wird.

Jedem Magnetpol entsprechen sechs bis neun und mehr solcher Rinnen. Das rotirende Magnetrad ist sternförmig, besitzt runde massive Magnetkerne aus Stahl mit angeschraubten viereckigen Polschuhen und ist mit einer Bewickelung aus hochkantig zu Spiralen gebogenen blanken Kupferstreifen versehen, welche voneinander durch Glanzpapier isolirt sind.

Diese Maschinen werden mit angebauter mehrpoliger Erregermaschine construirt, deren Anker ausserhalb des einen Hauptlagers fliegend auf der Welle befestigt ist.

Solche Stromerzeuger wurden unter Anderem für die Erweiterung der Fernleitungsanlage Tivoli—Rom geliefert. Diese Maschinen, deren Inductionsmanntel in Fig. 421 dargestellt ist, leisten 3500 Kilowatt bei 10000 Volt Spannung, die Polzahl beträgt 24, der Durchmesser des Magnetrades 4 m, die Zahl der Umdrehungen 210 in der Minute, das Gewicht 83 Tonnen.

Die Maschinen liefern Dreiphasenstrom und sind mit Turbinen direct gekuppelt.

#### **Maschine der General Electric Company.**

Die Wechselstrommaschinen von Thomson-Houston mit äusserem feststehenden Feldmagnet und innerem sich drehenden Anker waren in den früheren Ausgaben dieses Werkes beschrieben, wo auch eine bildliche Darstellung der dabei verwendeten »gemischten« Art der Erregung gegeben war. Es waren Maschinen mit grosser Umdrehungszahl und 133 Perioden in der Secunde. Mehrere Maschinen dieser Art von 500 Kilowatt Leistung und 100 Perioden in der Secunde sind neuerdings für die Beleuchtungscentrale der City in London geliefert worden, wo sie durch Willans'sche Dreikurbelmaschinen mit dreifacher Expansion unmittelbar angetrieben werden. Dieselbe Gesellschaft hat auch eine Maschine mit niedriger Frequenz unter der Bezeichnung »monocyclisches« System<sup>1)</sup> entworfen, welche einen unsymmetrischen dreiphasigen Strom liefert; der dritte Stromkreis soll nur zum Betriebe von selbstanlaufenden Motoren dienen.

#### **Maschine von Gordon.**

Gordon's Wechselstrommaschine war in den ersten Auflagen dieses Werkes beschrieben und bildlich dargestellt. Sie hat die doppelte Zahl von Spulen im feststehenden Anker als in dem sich

1) Electrical World, Bd. 25, S. 182.

drehenden Feldmagneten; es sind deren 32 an jeder Seite des scheibenförmigen Feldmagnets, also 64 im Ganzen vorhanden, während sich 64 Spulen auf jeder Seite des Ankers, also 128 im Ganzen, befinden. Letztere haben längere Form, sind auf Kesselblechstücken aufgewickelt und in Form eines spitzen V gebogen. An diesen Stücken sitzen Wangen von durchlöcherem Neusilber als Flantschen<sup>1)</sup>. Durch diese Anordnung der Spulen in zwei Sätzen erhält man zwei verschiedene Ströme, die in der Phase um  $\frac{1}{4}$  Periode gegeneinander verschoben sind. Die Station in Paddington, welche 1883 von Gordon eingerichtet wurde, war die erste zweiphasige Anlage dieser Art.

#### **Maschinen des Helios, Elektrizitäts-Aktiengesellschaft, Köln.**

Die Gesellschaft »Helios« hat sich zuerst in Deutschland mit dem Bau grosser Schwungradmaschinen für Wechsel- und Drehstrom befasst. Die besonderen Vorzüge dieser Maschinengattung liegen in der Einfachheit des Aufbaues und in der Uebersichtlichkeit der stromerzeugenden Elemente. Die Maschinen lassen sich ohne besondere Schwierigkeiten für die grössten Leistungen herstellen und ermöglichen hierdurch die Verwendung einer einzigen grossen Kraftmaschine zum Antrieb, wodurch der Gesamtwirkungsgrad ein relativ hoher wird.

Die Tafel XVI giebt eine der für die Centrale Petersburg gebauten Maschinen in der Ansicht und im Schnitte wieder. Die Einzelheiten der Construction sind ohne weiteres klar. Anker und Feldmagnete bestehen aus je 72 Kernen, von denen jeder mit einer Spule versehen ist; in Folge dieser Anordnung lässt sich die Auswechselung eines einzelnen Gliedes im Fall einer Reparatur leicht ermöglichen. Das die Erregermagnete tragende Schwungrad der Dampfmaschine kann zu diesem Zwecke durch seitliche Bewegung des festen Ankerringes freigelegt werden. Die Maschine leistet bei 85 Umdrehungen in der Minute und 3000 Volt Spannung normal 220, maximal 250 Ampere. Der Anker der Erregermaschine ist mit der Hauptwelle direct gekuppelt.

In der Centrale Petersburg sind gegenwärtig sieben dieser Maschinen in Betrieb, vier etwas kleinere versorgen die Stadt Köln mit elektrischer Energie. Für die Erweiterung der Petersburger

1) Vergl. Gordon's Practical Treatise on Electric Lighting (1884), S. 162.

Anlage wird gegenwärtig eine Maschine von 2000 P Leistung ausgeführt.

### Maschine von Hopkinson.

Diese Maschine besitzt feststehende vielpolige Magnete, deren Flächenbreite über  $\frac{3}{4}$  des Polstandes beträgt. Die Ankerdrähte sind

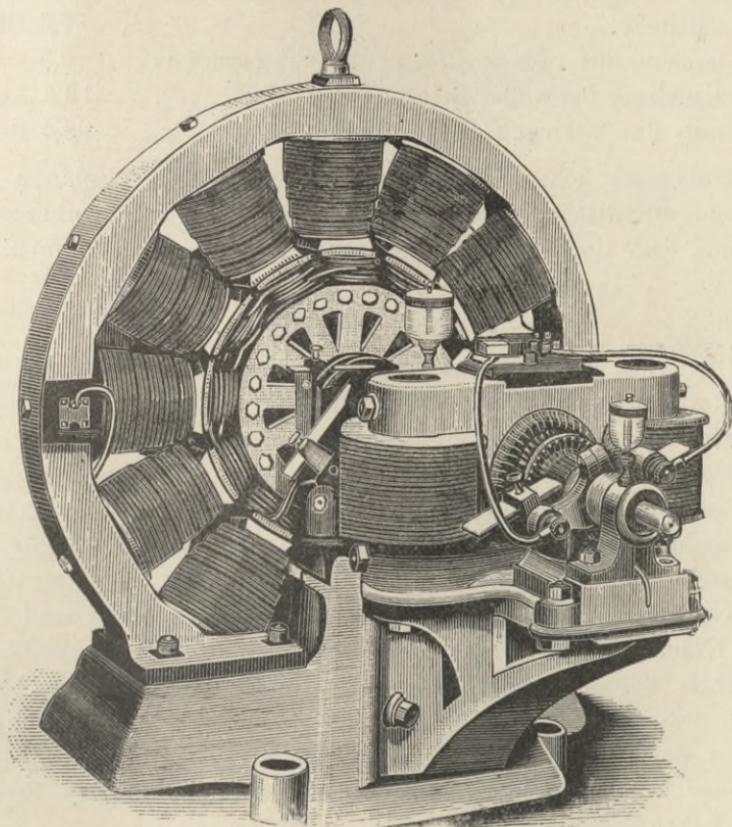


Fig. 422. Wechselstrommaschine von Hopkinson (Mather und Platt).

auf kurze polförmige Vorsprünge aus geblätterttem Eisen aufgewickelt. Die Maschine ist in der Fig. 422 dargestellt. Die Erregermaschine ist auf einer Console montirt, ihr Anker ist auf der Achse der Wechselstrommaschine befestigt.

Der Umstand, dass der magnetische Kreis fast ununterbrochen in Eisen verläuft und die Bauart eine ausserordentlich hohe Geschwindigkeit zulässt, verursacht einen sehr hohen Wirkungsgrad. Nachstehend folgen einige Angaben über Maschinen dieser

Bauart, welche von Mather und Platt für die Centrale in Salford geliefert wurden.

|                                                                 |                          |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Zahl der Pole . . . . .                                         | 20,                      |
| Umdrehungen in der Minute . . . . .                             | 450,                     |
| Leistung . . . . .                                              | 40 Ampere bei 3000 Volt, |
| Widerstand aller Feldmagnetspulen in Reihe geschaltet . . . . . | 7,4 Ohm,                 |
| Widerstand der Ankerwicklung in Reihe geschaltet . . . . .      | 0,8 »                    |
| Erregerstrom bei voller Belastung . . . . .                     | 10 Amp.,                 |
| Hieraus das elektrische Güteverhältniss . . . . .               | 98,4 Proc.               |

Trotz ihrer hohen Selbstinduction können diese Maschinen auch parallel geschaltet arbeiten; sie haben eine so starke Ankergegenwirkung, dass sie ohne Gefahr kurzgeschlossen werden können.

#### Maschine von Kapp.

Die vielpoligen Wechselstrommaschinen mit Ringanker von Kapp waren ausführlich in den früheren Auflagen dieses Buches beschrieben; ebenfalls waren maassstäbliche Zeichnungen einer 60 Kilowattmaschine, welche in den Werken zu Oerlikon gebaut war, gegeben. Neuerdings hat Kapp für Johnson und Phillips eine andere Wechselstrommaschine entworfen, welche in Fig. 423 dargestellt ist. Der Ankerkern besteht aus einzeln zu entfernenden Segmenten, die aus gestanzten Blechen zusammengesetzt sind. Um jedes Kernstück ist in die an den Enden vorgesehenen Einkerbungen ein Theil der Ankerwicklung aufgewunden. Der Anker hat in Folge dessen sehr beträchtliche Selbstinduction. Der Feldmagnet ist von derselben Art wie bei den später noch zu beschreibenden Laufener Wechselstrommaschinen, die bloss eine einzige Erreger- spule haben.

#### Maschinen von Gebr. Körting.

Diese Maschinen haben alle ein rotirendes Magnetfeld und einen feststehenden Anker. Der Letztere besteht aus gestanzten Eisenblechen, das Magnetgestell aus Stahlguss. Die Erregermaschine ist bei Generatoren bis 25 Kilowatt durch Riemen mit der Maschine verbunden, bei den grösseren Modellen sitzt sie auf der verlängerten Welle des Generators. Die Periodenzahl für Wechsel- und Drehstrom ist normal 50 in der Secunde. Zum Parallel- und Auseinanderschalten mehrerer Maschinen wird die Körting'sche Schwung-

radbremse, ein vor dem Schwungrade der Antriebmaschine angebrachter, vom Schaltbrett aus regulirbarer Elektromagnet, verwendet.

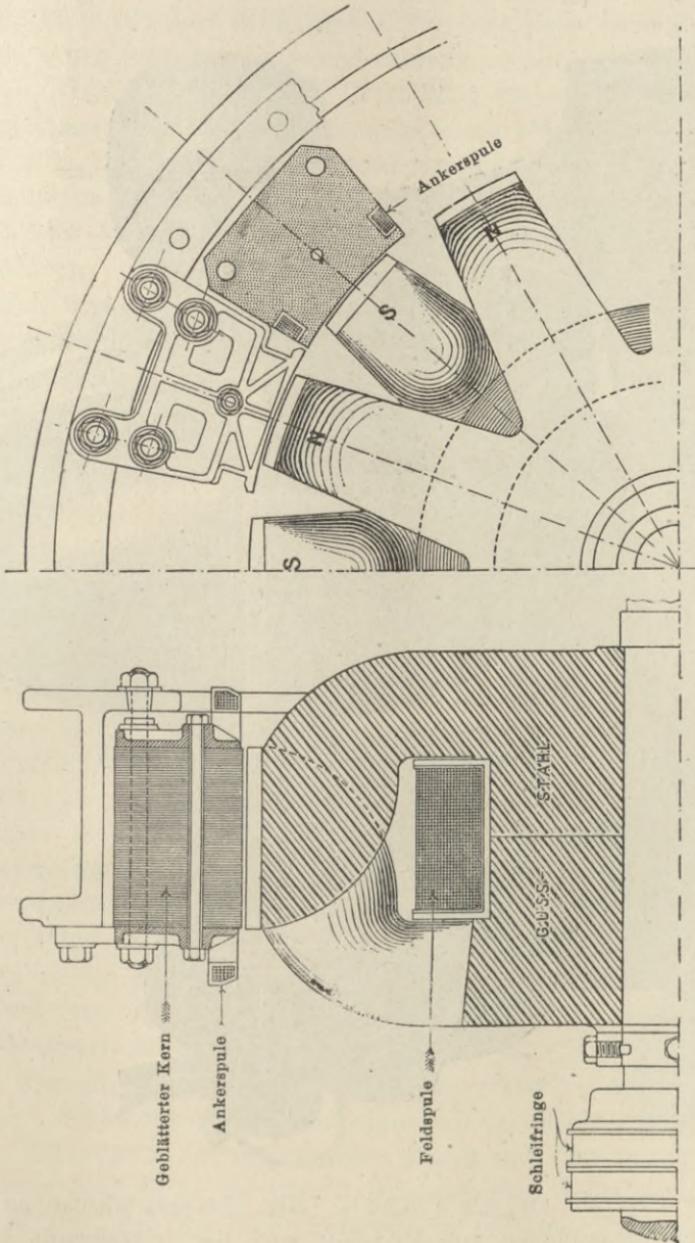


Fig. 433. Kapp'sche Wechselstrommaschine.

#### Maschine von Mordey.

Von der Brush-Electrical Engineering Co. in London wurden schon im Jahre 1888 von Mordey entworfene Maschinen hergestellt,

deren eigenartige Bauart aus Fig. 424 zu ersehen ist. Tafel XII zeigt eine Maschine von 200 Kilowatt, deren mehrere in der

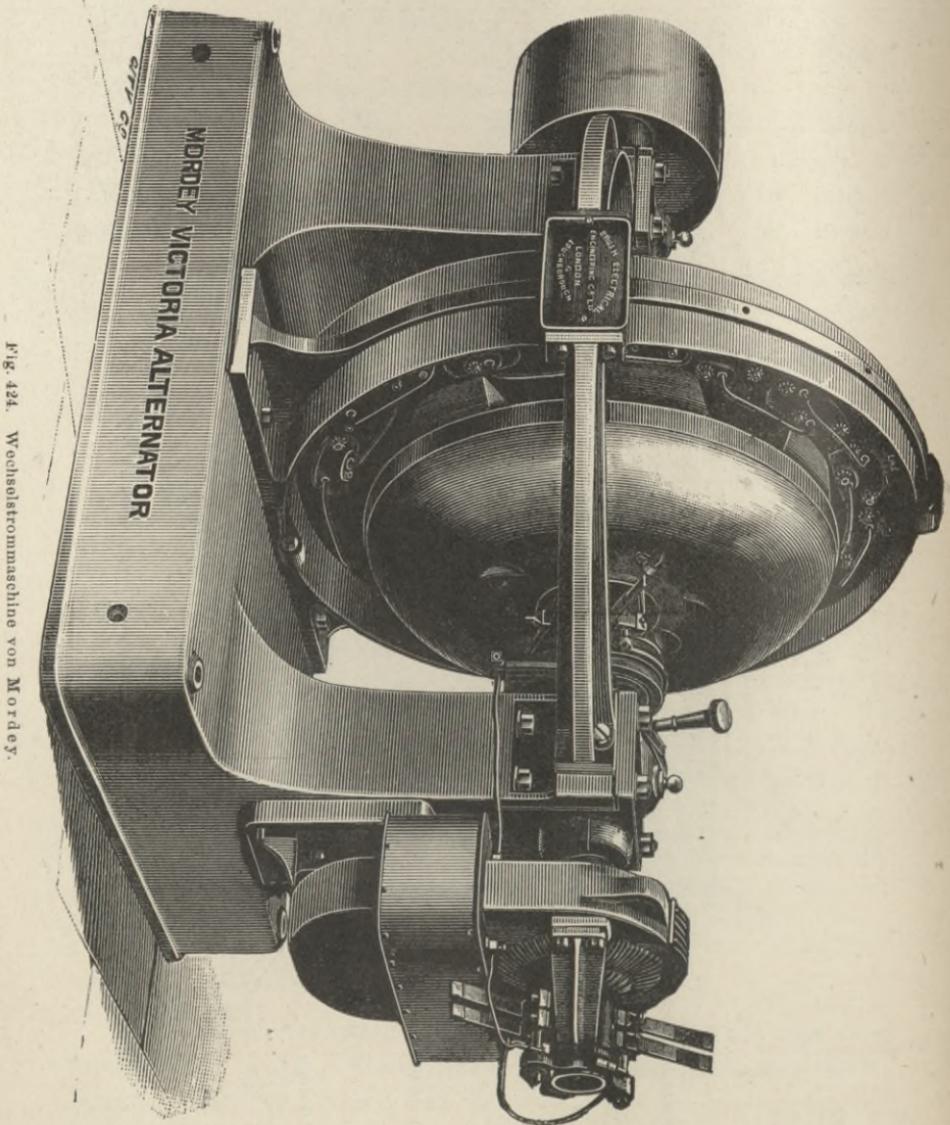


Fig. 424. Wechselstrommaschine von Mordey.

Leicester-Centrale aufgestellt sind<sup>1)</sup>. Das Charakteristische an den Wechselstrommaschinen von Mordey sind der feststehende Anker

1) The Engineer, Bd. 80, S. 57. 1895. Die Figuren auf Tafel XII sind dieser Abhandlung entnommen.

in Form einer dünnen Scheibe, und der massive, sich drehende Feldmagnet. In dem Letzteren sind, obwohl zwei Polkränze vorhanden sind, zwischen denen der Anker liegt, doch sämtliche Pole auf der einen Seite Nordpole und sämtliche auf der anderen Seite Südpole. Deshalb findet keine Umkehrung des magnetischen Feldes in den Ankerspulen statt, es verändert sich lediglich die Zahl der durch jede Spule hindurchtretenden Kraftlinien von Null bis zum Maximum und umgekehrt. Das Ergebniss dieser Anordnung ist eine wesentliche Vereinfachung der Hilfsmittel zur Magnetisirung der Feldmagnete. Eine einzige Wickelung, die einen in der Mitte liegenden Eisencylinder umgiebt, genügt zur Magnetisirung der Pole. Es ist thatsächlich nur ein magnetischer Kreis vorhanden, der sich in Einzelkreise spaltet. Die Bauart des Feldmagnetes ist folgende:

Ein Cylinderring aus Stahlguss, durch den die Welle hindurchführt, bildet den Kern und wird von der erregenden Wickelung umgeben. Auf den Enden dieses Kernes sind zwei Gussstücke fest aufgeschraubt (Tafel XII, Fig. 3); jedes von diesen besitzt eine Anzahl gekrümmter Ansätze (9 in kleineren, bis zu 60 in grösseren Maschinen), die nach innen gegeneinander vorragen, so dass der schmale Zwischenraum zwischen ihnen zur Aufnahme des Ankers gerade ausreicht. Der Feldmagnet läuft auf der Welle um, die erregende Wickelung wird von einer besonderen kleinen Maschine mittels zweier Contactringe mit Strom versehen (in der Fig. 424 sind diese rechts an der Welle sichtbar). Die erregende Spule braucht sich zwar nicht mitzudrehen; aus mechanischen Gründen hielt man es jedoch bei der ersten Maschine für zweckmässig, die Spule auf den Kern des Feldmagnetes zu wickeln. Der festliegende Anker hat Wickelungen aus Kupferstreifen, die mit Streifen von dünner Fiber auf Porzellankerne gelegt sind. Die einzelnen Spulen werden mittels Haltern aus Neusilber, die mit Glimmer und Fiber bekleidet und in Ebonit eingelegt sind, an einem leichten aber starken Gestell festgeklammert. Die Enden jeder Wickelung führen durch Porzellanisolatoren und sind entsprechend miteinander verbunden. Sämtliche Klemmvorrichtungen aus Metall befinden sich an der Aussenseite des magnetischen Feldes und sind so angeordnet, dass man jede Spule in kurzer Zeit entfernen kann, ohne einen anderen Theil der Maschine abnehmen zu müssen. Weil der Anker feststeht, so sind die Spulen keiner Centrifugalkraft ausgesetzt und brauchen daher nur mit ihrer Befestigung dem tangential wirkenden Zuge Widerstand zu leisten. Der umlaufende Feldmagnet bildet ein

gutes Schwungrad und gleicht in der That Schwankungen aus, die dem Gange der Antriebsmaschine entstammen.

Die elektromotorische Kraft beträgt 1 Volt für je 21,6 cm Leiterlänge. Da der Widerstand und die Gegenwirkungen des Ankers sehr gering sind, ist die Maschine eine beinahe selbstregelnde, ein Umstand, der bei Parallelschaltung und beim Betrieb von Motoren von Bedeutung ist.

Wegen der ausgezeichneten Lüftung, die diesen Maschinen eigen, wird die Stromdichte nicht durch die Gefahr einer Ueberhitzung beschränkt, sondern nur durch Erwägungen über den Wirkungsgrad und die Selbstregelung. Die Stromstärke beträgt bei voller Belastung nicht weniger als etwa 5 Ampere für das Quadratmillimeter. Ein Verlust durch Hysteresis findet nicht statt, da Ankerkerne nicht vorhanden sind. Die andern Verluste im Anker sind durch sorgfältige Ausführung der Einzelheiten auf ein sehr geringes Maass gebracht. Die Wirbelströme sind in dem Kupferband zwar vorhanden, aber wegen dessen geringer Stärke ausserordentlich schwach. Die Spulenhalter sind ausserdem von Neusilber. Der hohe spezifische Widerstand des Neusilbers ermässigt die Verluste durch Wirbelströme auf  $\frac{1}{16}$  bis  $\frac{1}{20}$  der Verluste, die bei Verwendung von Messing eintreten würden. Der Verlust ist überhaupt fast ganz auf den Werth  $i^2r$  beschränkt. Dies wird durch die Thatsache bestätigt, dass eine 75 Kilowatt-Maschine, welche bei offenem Stromkreise getrieben, aber für volle Spannung erregt wird, nur 3 P braucht, und der Anker ganz kühl bleibt. Es ist eine auffällige Thatsache, dass bei diesen Maschinen die von der Reibung, der Hysteresis und den Wirbelströmen herrührenden Verluste, obwohl schon mässig bei geringer Belastung, bei voller Belastung nicht nur verhältnissmässig, sondern auch absolut genommen geringer sind. Maschinen, welche bei niedrigen Belastungen grosse Verluste zeigen, sind zum Betriebe von Centralen als unökonomisch wenig geeignet.

Fig. 1 der Tafel XII zeigt einen End-Aufriss, z. Th. im Schnitt; Fig. 2 eine Seitenansicht; Fig. 3 einen Schnitt durch einen Theil des Feldmagnets, in grösserem Maassstabe; Fig. 4 und 5 ebenfalls in grösserem Maassstabe die Seiten- und Endansicht einer Ankerspule. Der Anker steht fest und besteht aus 120 Spulen, die an mit Ebonit isolirten Klemmvorrichtungen aus Neusilber befestigt sind (Fig. 4 und 5); mit dem Ankerring sind Letztere durch Bolzen verbunden, die durch geschlitzte Löcher an den Seiten des Ringes hindurchtreten (Fig. 5).

Die Ankerwicklung ist aus dünnen Kupferblechstreifen hergestellt, welche mit passender Isolation um einen Kern aus Schiefer gewickelt werden. Durch den Schieferkern ist eine Anzahl kleiner geschlitzter Löcher gebohrt; durch diese Löcher gehen Bänder aus stark gegerbten Schnüren, welche unter Druck um die vorher mit einer dünnen Lage von Glimmer und Pausleinwand bedeckten Spulen gelegt werden, um den Uebergang von Funken von den Spulen zur Erde oder auf die Pole zu hindern. Sie umgeben strahlenförmig einen Ring aus Bronze, welcher an einen in vier Abtheilungen getheilten gusseisernen Rahmen geschraubt ist; zwei dieser Abtheilungen befinden sich unter der Fussbodenfläche. Jede Abtheilung ist mittels Zapfen an gusseisernen Endbalken befestigt und kann jederzeit bequem um diese Zapfen gedreht werden, wenn eine Besichtigung oder Ausbesserung der Spulen stattfinden soll.

Der Feldmagnet besteht aus schweren Stahlgussstücken mit 60 Paar als Pole dienenden Vorsprüngen. Er wird erregt von einer centralen Spule, welche mit zwei auf der Achse sitzenden Schleifringen aus Bronze verbunden ist. Die Feldwicklung ist eine ringförmige Spule, welche unmittelbar auf den ringförmigen gussstählernen Kern aufgewunden ist; die Wicklung ist in zwei Theile getrennt, so dass ein radialer ganz durchlaufender Zwischenraum entsteht. Eine grössere Zahl von kegelförmigen radialen Luftzwischenräumen gestattet zum Zweck einer guten Lüftung und Kühlung ein freies Zuströmen der Luft aus dem hohlen Kern durch die Feldwicklung hindurch und über den Anker, welcher in dem Luftzwischenraum zwischen den Polstücken steht. Wie man sieht, besteht der Magnet aus zwei Wangen, welche durch Bolzen und kreisförmige Ringe mit den inneren Flantschen des Kernes verbunden sind. Bei den kleineren Maschinen sind diese Wangen aus Gussstahl, und zwar besteht jede Wange aus einem Stück, bei der gezeichneten, sowie allen grösseren Maschinen überhaupt, besteht jede Wange aus zwei Theilen. Der Ankerring ist in vier Theile getheilt, die an den Enden der Maschine nahe an dem horizontalen Durchmesser durch Gelenke miteinander verbunden sind. Diese Anordnung erlaubt, irgend einen der vier Theile mit leichter Mühe zum Zwecke einer Untersuchung, Reinigung oder Ausbesserung bei Seite zu drehen. In Fig. 1 ist der eine Quadrant in der seitwärtsgedrehten Lage dargestellt. Alle Ankerwicklungen sind zugänglich, ohne dass ein Theil der Maschine entfernt werden müsste, da zwischen den nebeneinander liegenden Polen auf jeder Seite ein Zwischenraum gelassen

ist, der grösser als die Breite einer Ankerspule ist. Die Schmierung geschieht durch eine kleine Ölpumpe nach Art des Roots'schen Gebläses, welche in Fig. 1 und 2 an der Seite zu sehen ist. Diese Maschinen arbeiten mit 96 Umdrehungen in der Minute, sie haben eine Leistung von 100 Ampere bei 2000 Volt.

Wie gering die Gegenwirkung des Ankers ist, lässt sich daraus ersehen, dass, wenn die Erregung constant gehalten wird, die Steigerung der Spannung von voller Belastung bis zum unbelasteten Zustande nur 7 Procent beträgt.

Eine Anzahl von Wechselstrommaschinen von 750 Kilowatt wurden von der Brush Co. nach Mordey's Angaben für die Beleuchtungsstation der City in London gebaut.

Mordey hat eine grössere Zahl verschiedener Formen angegeben<sup>1)</sup>, die sich alle durch Einfachheit des magnetischen Kreises und gleichbleibende Polarität des Ankers auszeichnen. Einige ähnliche Formen hat sich Main<sup>2)</sup> patentiren lassen.

#### Maschinen der Oerlikon-Gesellschaft.

1890 bis 1891 baute diese Gesellschaft nach Brown's Plänen die Drehstrommaschinen für Lauffen am Neckar. Sie waren dazu bestimmt, für die Stadt Heilbronn 10 km weit den Strom zu liefern, wurden aber zunächst zu der berühmten historischen Kraftübertragung von Lauffen nach Frankfurt — 175 km Entfernung — gelegentlich der Frankfurter Ausstellung benutzt. Obwohl sie von verticalen Turbinenwellen betrieben werden sollten, wurden sie doch mit horizontalen Achsen gebaut, so dass eine Umsetzung vermittelst Zahnrädern nothwendig war.

Sie besitzen drehbare Innenpole und einen umgebenden Anker mit einer im Zickzack angeordneten Wickelung aus Leitern, die durch Löcher in den Ringscheiben des Ankerkernes gehen.

Fig. 425 zeigt eine allgemeine Ansicht, aus welcher der Aufbau der Maschine zu erkennen ist. Die Maschine erzeugt drei Ströme, jeden von 1400 Ampere bei ungefähr 50 Volt

1) Engl. Patent [1887] Nr. 8262.

2) Engl. Patent [1887] Nr. 15858 und 16032. Die Einrichtung, Feldmagnete mit einer grösseren Zahl von Polstücken als von erregenden Wickelungen zu verwenden, wurde schon früher von Holmes angewendet (Engl. Patent [1868] Nr. 2060), neuerdings auch von J. und E. Hopkinson. Eine andere, 1883 in Wien ausgestellte Maschine von Klimenko hatte einen feststehenden Anker mit Eisenkern zwischen den Polen eines sich drehenden Feldmagnets mit vielfachen Polstücken.

Spannung; sie verbraucht 300 P, wenn sie mit 150 Umdrehungen in der Minute läuft. Der äussere Durchmesser des Ankers beträgt 189,4 cm, der innere 176,4. Die ganze Breite des Ringkernes, parallel zur Achse gemessen, beträgt 38 cm. Am inneren Umfang des Ringkernes befinden sich 96 kreisrunde Löcher von 33 mm Durchmesser in Abständen von 60 mm. Jedes Loch ist mit einer Asbeströhre ausgekleidet, und durch jedes ist ein Kupferstab

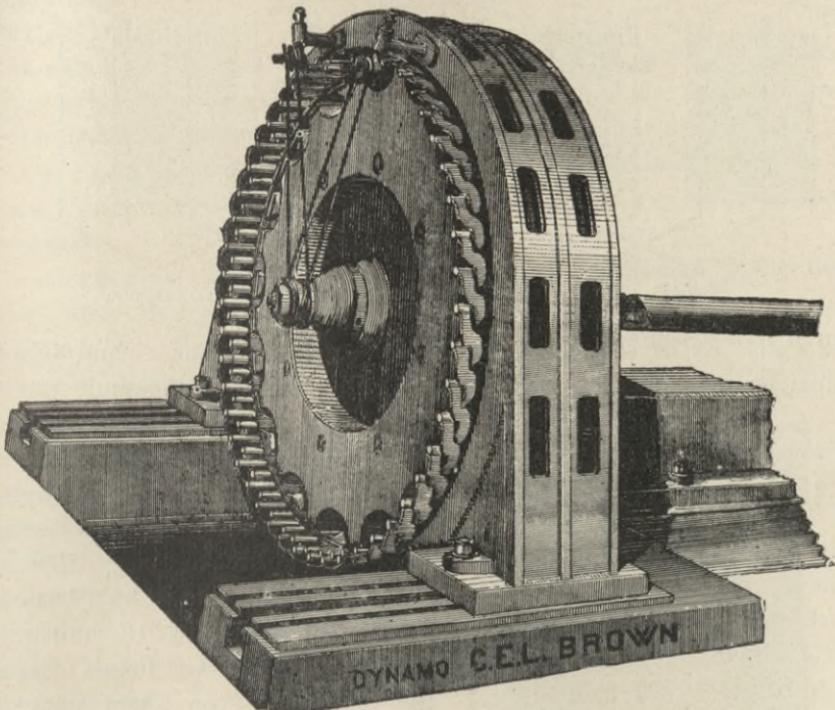


Fig. 425. Dreiphasen-Wechselstrommaschine der Lauffener Kraftübertragung.

von 29 mm Stärke gesteckt. Der Ankerkern ist aus gestanzten Ringsegmenten aufgebaut, welche von einem starken gusseisernen Rahmen zusammengehalten werden. Die Wicklung wird in drei voneinander unabhängigen Zickzackwindungen von je 32 Leitern geführt, nach folgendem Schema:

|          |                          |        |
|----------|--------------------------|--------|
| Satz A : | 1, 4, 7, 10 . . . . .    | 91,94, |
| » B :    | 95, 92, 89, 86 . . . . . | 5,2,   |
| » C :    | 93, 90, 87, 84 . . . . . | 3,96.  |

Die Enden von Nr. 94, 2, 96 sind zu einer gemeinsamen Verbindung *J* geführt, während Nr. 1, 95 und 93 getrennt mit drei

äusseren Klemmen verbunden sind. Dies bildet eine »Sternschaltung«; die allgemeine Anordnung der Wickelung ist in Fig. 426 dargestellt.

Der Luftzwischenraum zwischen dem Ankerring und den Polflächen des Feldmagnetes beträgt 6 mm. Dieser Feldmagnet hat

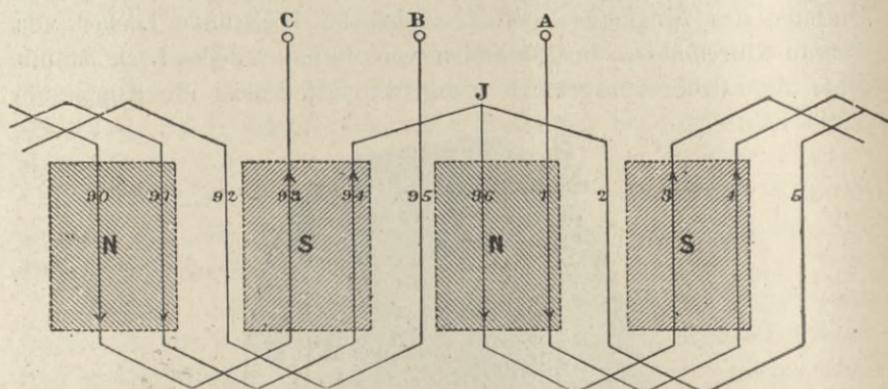


Fig. 426. Wickelungsdiagramm der Lauffener Wechselstrommaschine.

32 Pole. Er ist sehr stark und einfach gebaut, indem er nur einen einzigen magnetischen Kreis besitzt. Die Magnetisierungsspule ist in

einer Nuth auf dem Umfang einer Art Riemenscheibe aus Gusseisen gewickelt, und es sind zwei stählerne Ränder aufgeschraubt, von denen jeder 16 Polstücke oder Hörner trägt. Jede Polfläche ist  $36 \times 16$  qcm gross. Die Nuth ist 18 cm breit und 9 cm tief; es liegen darin 496 Windungen von 5 mm starkem Kupferdraht.

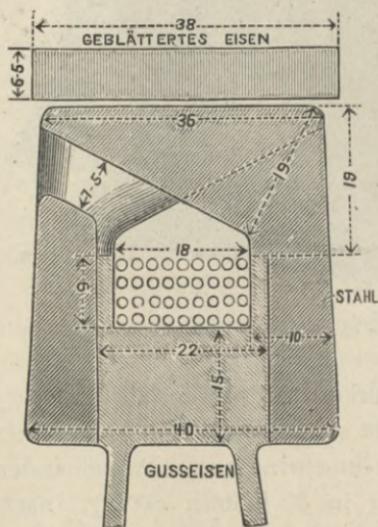


Fig. 427. Schnitt durch den Feldmagnet.

Fig. 427 gibt einen Querschnitt durch den Feldmagnet und zeigt, wie die Polhörner nach innen über die Erregerspule vorspringen, so dass die Nordpole zwischen den Südpolen erscheinen.

Diese Anordnung vermindert die Kosten der Herstellung und der Felderregung auf ein Minimum; bei offenem Stromkreis werden nur 100 Watt für die Magnetisierung verbraucht,  $\frac{1}{20}$  Procent der ganzen Leistungsfähigkeit; und bei voller Leistung, wenn die Rückwirkung des Ankerstromes am stärksten ist,

beträgt die Magnetisirung noch immer weit weniger als 1 Procent. Bei voller Geschwindigkeit und normaler Spannung beträgt der Verlust durch Reibung und Hysteresis 3600 Watt oder weniger als 1,7 Procent der höchsten Leistung. Der Verlust durch den Ankerwiderstand beträgt bei voller Leistung 3500 Watt. Dies ergibt zusammen etwa 4 Procent Gesamtverlust und einen Wirkungsgrad von über 95 Procent. Die Erhitzung ist ganz unmerklich, weil keine Wirbelströme in den Metallmassen auftreten. Das Gewicht beträgt 4,6 Tonnen. Da 16 Polpaare vorhanden sind und die Maschine mit 150 Umdrehungen in der Minute läuft, so ist die Wechselgeschwindigkeit 40 Perioden in der Secunde. Die elektromotorische Kraft, welche in jeder der drei Wickelungen inducirt wird, gemessen zwischen dem gemeinsamen Verbindungspunkt *J* und einer äusseren Klemme, kann bis auf 55 Volt gesteigert werden.

Denselben Entwurf legte die Oerlikon-Gesellschaft beim Bau der drei Maschinen, welche zur Kraftversorgung ihres eigenen Werkes von Hochfelden aus, 24 km entfernt, bestimmt waren, zu Grunde, nur ist dort die Anordnung vertikal, da die Anker unmittelbar von Turbinen angetrieben werden.

Die Maschinenfabrik Oerlikon baut neuerdings Wechselstrommaschinen mit Wechselfolen und rotirenden Magnetspulen in 20 normalen Grössen mit Leistungen von 10 Kilowatt bei 1000 Touren bis 1300 Kilowatt bei 75 Touren. Bei den Maschinen mit höherer Tourenzahl wird das Magnetrad aus einem Blechkranz mit geraden glatten Polzacken gebildet, der auf einem gusseisernen Radstern befestigt ist. Die Polzacken besitzen keine Polschuhe oder vorspringende Lappen (vergl. Fig. 428), so dass die Magnetspulen leicht aufgesetzt und abgestreift werden können. Diese Spulen werden durch eiserne oder bronzene Platten gehalten, welche zwischen zwei Polzacken durch Schraubenbolzen mit dem Radkörper verbunden sind. Eine andere Spulenbefestigung besteht aus eisernen Reifen mit **L**-förmigem Profil, welche in Einkerbungen auf beiden Längsseiten der Polzacken eingeschoben werden.

Die Spulen werden bei den kleineren Typen aus rundem Kupferdraht gewickelt, bei den grösseren Typen aus hochkantig abgebogenem Kupferband mit Asbestzwischenlagen hergestellt.

Der Ankerkranz hat offene Nuthen. Die Spulen werden in Schablonen fertig gewickelt und nach besonderem Verfahren mit geschlossenen, nahtlosen Mikanitröhren umgeben. Die Spulen werden

in die offenen Nuthen der Anker ohne Pressung eingelegt und mit Fiberkeilen, die seitwärts in Einkerbungen der Nuth eingreifen, gehalten.

Bei den »Schwungradmaschinen« werden die aus Blech zusammengenieteten, mit Polschuhen und einem schwalbenschwanzartigen Fuss versehenen Polkerne auf den Schwungring mit Keilen befestigt, die durch Schraubenbolzen zwischen die Füße je zweier Polkerne gepresst werden. Nach Lösen der Schraubenbolzen kann

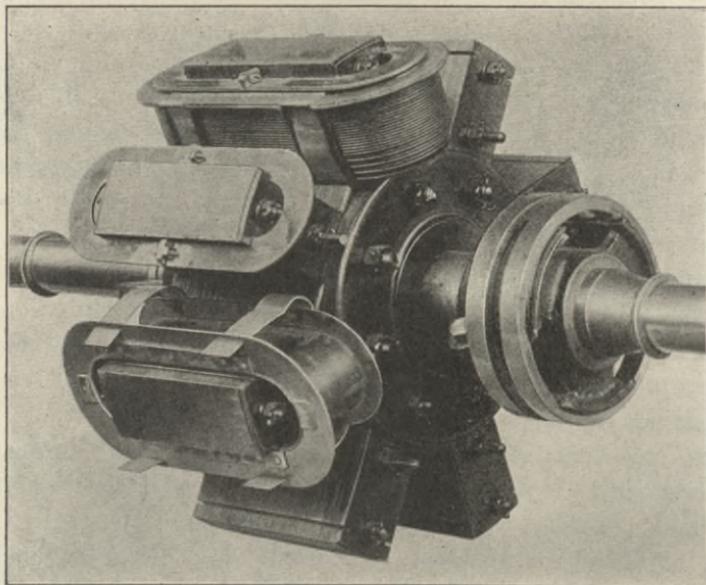


Fig. 428. Feldmagnet einer neueren Wechselstrommaschine von Oerlikon.

jeder Polkern mit seiner Spule zwischen den Keilen in axialer Richtung abgeschoben und die Spule abgestreift werden.

Bei einer anderen Construction von Schwungradmaschinen werden die Pole mit ihren Spulen im Innern des Schwungringes angeordnet, so dass sie ausserhalb der feststehenden Anker rotiren. Das Magnetsystem ist aus einem Blechkranz mit nach innen vorstehenden glatten Polzacken ohne Polschuhe gebildet, auf welche die Spulen aufgeschoben und durch Blechplatten gehalten werden, die zwischen zwei Polzacken in seitliche Einkerbungen eingepasst sind. Der Blechkranz besteht aus Segmenten, die durch Pressringe in dem Schwungrad gehalten werden.

Der Wirkungsgrad beträgt bei voller Belastung bei den normalen Typen über 100 P über 93 Procent und bei halber Belastung über

89 Procent. Der Spannungsabfall bei Motorenbelastung mit einem Leistungsfactor 0,8 beträgt etwa 25 Procent. Die Temperaturerhöhung steigt in keinem Fall über 35 Grad C. über die umgebende Luft.

#### Maschinen von Parson.

Parson hat Maschinen von zwei- oder vierpoliger Form entworfen, die bis zu 10000 Umdrehungen in der Minute machen und besonders dazu bestimmt sind, mit den Dampfturbinen<sup>1)</sup> von hoher Umdrehungszahl desselben Erfinders gekuppelt zu werden. Diese Verbindung hat neuerdings vielfach Beachtung gefunden, weil sie einen guten Wirkungsgrad besitzt, wenig Raum zur Aufstellung verlangt und auch fast frei von mechanischen Erschütterungen ist. Sie ist daher verschiedentlich angewendet worden, u. A. besteht eine ganz neue Anlage mit 1000 Kilowatt-Maschinen in Elberfeld<sup>2)</sup>.

Tafel XV giebt eine maassstäbliche Zeichnung einer Turbinenmaschine für 350 Kilowatt von derselben Bauart, welche von der Metropolitan Electric Supply Co. in ihrer Centrale in Manchester Square, London, angewendet wird. Der Anker besteht aus geblätterttem Eisen, die Kernscheiben haben einen äusseren Durchmesser von 45,7 cm. Es sind 60 Löcher im Kreise aussen herum angeordnet, von denen 40 Leiter enthalten. Es sind daher eigentlich nur zwei Spulen von je zehn Windungen vorhanden; doch ist die Umdrehungszahl so gross, dass eine Spannung von 1000 Volt erzeugt wird. Die Maschine hat vier Pole; eine Geschwindigkeit von 3000 Umdrehungen in der Minute giebt also 100 Perioden in der Secunde. Die Steuerung der Maschine geschieht in folgender Weise. Der Dampf wird in die Turbine stossweise durch das periodische Oeffnen und Schliessen eines Doppelsitzventiles eingelassen, und zwar wird das Ventil nach je 15 Umdrehungen einmal geöffnet. Die Dauer jedes Stosses wird beeinflusst durch ein Solenoid, welches im Nebenschluss zu der Feldmagnetwicklung liegt. Die Feldmagnete werden durch eine kleine, auf der Hauptwelle sitzende Gleichstrommaschine erregt, deren Klemmenspannung ein Maass für die Umdrehungsgeschwindigkeit ist. Der Regulator, welcher auf Tafel XV oben auf den Magneten steht, bewegt einen langen Hebel, an dessen anderem Ende die Stange des Steuerventils

1) Electrician, Bd. 20, S. 103. 1887; und Proc. Inst. Civ. Eng., Bd. 96. Februar 1889. Ferner Elektr. Review (New York) vom 26. Dezember 1900.

2) Eingehende Prüfungsergebnisse dieser Anlage in The Electrician vom 11. Januar 1901.

angreift. Er ist mit Haupt- und mit Nebenschlusswicklung versehen, damit er im Stande ist, die Geschwindigkeit bei starker Belastung so zu steigern, dass die Spannung gleichmässig bleibt. Bei voller Belastung erfolgen die Stösse des Dampfes so rasch aufeinander, dass fast ein ununterbrochener Dampfstrahl auf die Turbine wirkt und das Ventil sich nur in einzelnen Momenten oder auch gar nicht schliesst. Die Leistung dieses Reglers ist ausserordentlich zufriedenstellend. Der Dampfverbrauch ist nur 11,3 kg auf die Kilowattstunde bei voller Belastung; bei Anwendung von Ueberhitzung kann der Verbrauch noch weiter vermindert werden. Das ganze Gewicht der Maschine einschliesslich Turbine, Erreger und Fussplatte beträgt nur 12,2 Tonnen. Das Kupfer im Anker wiegt ungefähr 26 kg.

**Maschinen der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals  
Schuckert & Co., Nürnberg.**

Für kleine Leistungen bis zu 28,5 Kilowatt Mehrphasenleistung, bzw. 19 Kilowatt Einphasenleistung wird das in Fig. 429 dargestellte

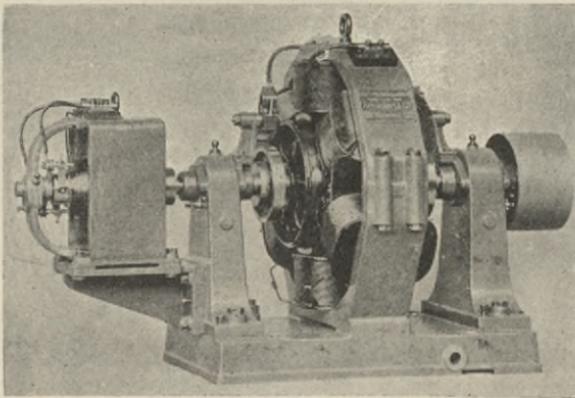


Fig. 429. Kleine Wechselstrommaschine Modell WA.

Modell WA gebaut. Bei den Maschinen für höhere Leistungen umschliesst ein feststehendes Gusseisengehäuse den aus Eisenblechsegmenten mit zwischengelegten Papierlagen aufgebauten Ankerring, durch dessen mit starker Isolierhülle ausgekleideten Löcher die Wicklung geführt ist.

Der umlaufende Theil oder das mit Gleichstrom gespeiste inducirende Magnetsystem besteht in allen Theilen (einschliesslich Arme und Nabe) aus Stahlguss (nicht Gusseisen) und kommt je nach der Grösse der Maschine in zweierlei Formen zur Ausführung.

Die erste Form bis zu etwa  $3\frac{1}{2}$  m Ankerdurchmesser ist auf Tafel XIII dargestellt. Sie besitzt ein zweitheiliges Magnetsystem aus massivem Stahlguss (Fig. 430), das zwischen seinen in die Polhörner auslaufenden Hälften die einzige Erregerspule aufnimmt. Da die abwechselnd von beiden Seiten übergreifenden Polvorsprünge die Magnetspule einhüllen, ist jede mechanische Verletzung der Kupferwicklung

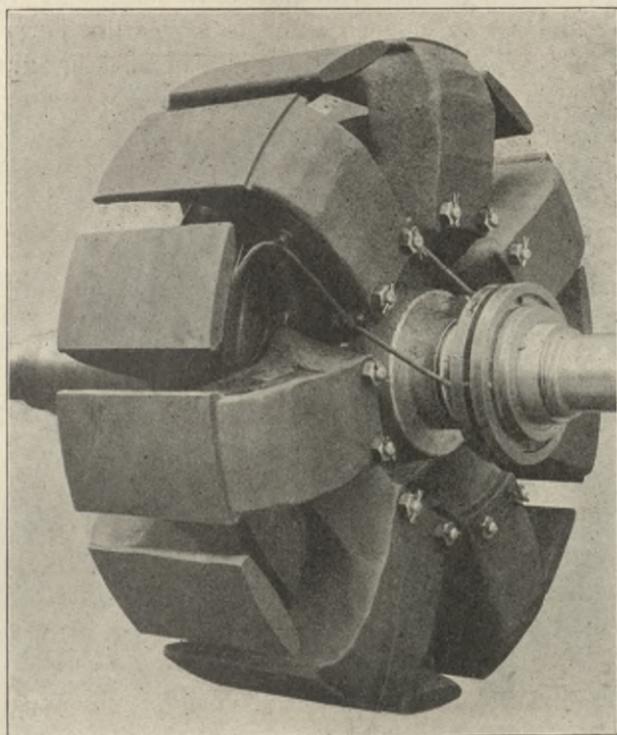


Fig. 430. Zweitheiliges Magnetråd (Klauenfeld).

so gut wie ausgeschlossen. Diese Form des Einspulenmagnetes ermöglicht die günstigste Materialausnutzung und den geringsten Aufwand an Kupfer und damit Erregerenergie, vereinigt also einen hohen Wirkungsgrad der Maschinen mit ausserordentlich geschützter Bauart.

Die ausschliessliche Verwendung von Stahlguss zu den Magneträdern gestattet ohne jede Gefährdung selbst auf bedeutende Umfangsgeschwindigkeiten gehen zu können, da die Wirkung der Centrifugalkräfte weder von Schraubenverbindungen noch sonstigen Constructionselementen, sondern lediglich von der inneren Festigkeit des Stahlgussstückes selbst aufgenommen wird.

Die Magnetspule besteht aus einem Spulengehäuse, welches aus Hartbronze in einem Stück gegossen ist. In dasselbe ist unter Benutzung eines Bindemittels der Kupferdraht derart eingewickelt, dass nach dem Erhärten des ersteren die ganze Magnetspule sich wie ein massives Gussstück verhält.

In Folge der günstigen Lagerung der Magnetspule inmitten des umlaufenden Theiles gewinnt man auch eine ausgiebige Ventilation dieser selbst und hat es in der Hand, die eigenartige Form der Polvorsprünge in beliebigem Maasse zur Ventilation, d. h. zur Kühlung des feststehenden Theiles heranziehen zu können.

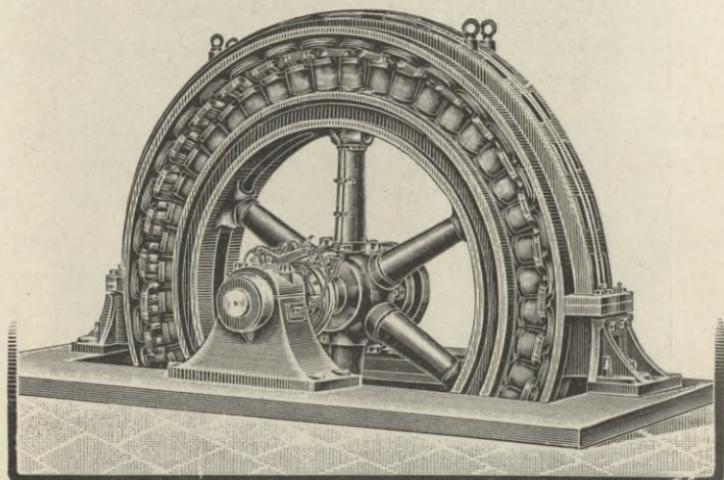


Fig. 431. Schwungradmaschine der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals Schuckert & Co.

Die zweite Ausführungsform des Magnetsystemes ist in Fig. 431 dargestellt, sie findet Anwendung bei Maschinen von über  $3\frac{1}{2}$  m Ankerdurchmesser, im Allgemeinen also bei Maschinen von grosser Leistung und kleiner Umdrehungszahl, da es der heutigen Gusstechnik noch Schwierigkeiten macht, so grosse Stahlgusskörper im Ganzen herzustellen.

Hierbei sind auf den Umfang eines schwungradartigen Stahlgussrades die einzelbewickelten Magnetpole mittels kräftiger Schrauben aufgesetzt. Damit im Betriebe die Schrauben sich nicht lösen, sind sie sämmtlich einzeln gesichert. Jeder solche Polkern trägt auf einem aus Hartbronze gegossenen Spulenkasten die aus Façonkupfer unter Druck sorgfältig gewickelte Spule.

Durch diese Bauart gewinnt man den für grosse Maschinen sehr zu schätzenden Vortheil, dass man nach Lösung zweier Halte-

schrauben vorkommenden Falls jeden einzelnen Polkern ohne irgend welche weitere Demontage an der Maschine seitlich herausnehmen kann.

### Maschinen von Siemens.

Schon im Jahre 1878 stellten Siemens und Halske Wechselstrommaschinen nach den Entwürfen von v. Hefner-Alteneck her. Diese Maschinen (Fig. 432) besaßen Scheibenanker, die Spulen waren

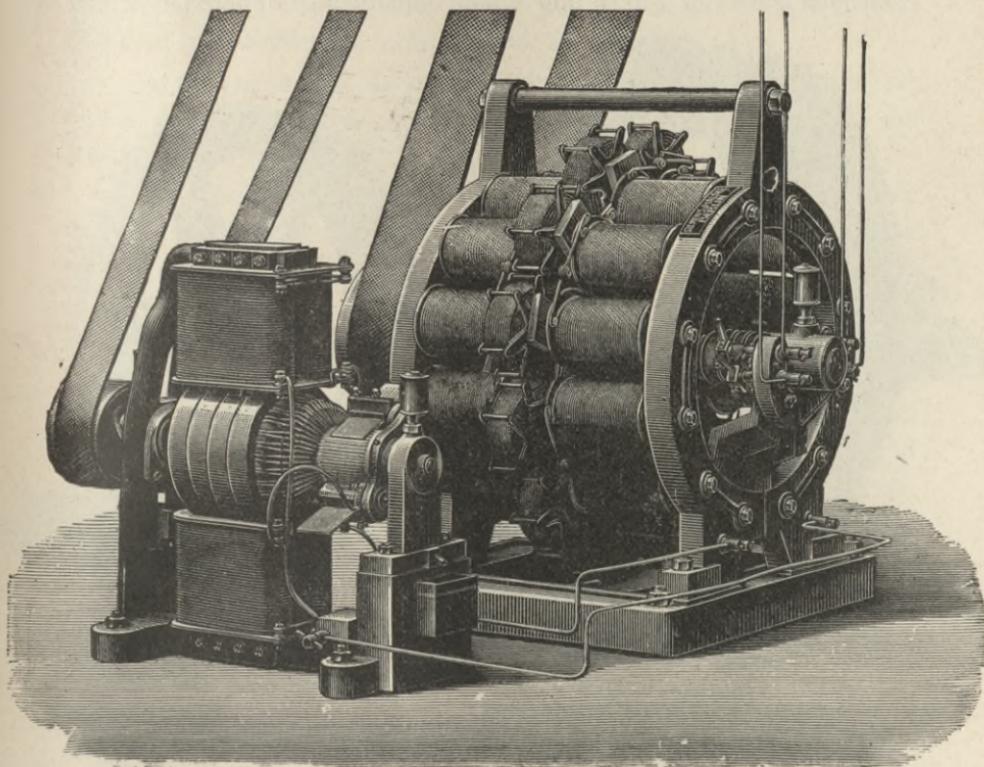


Fig. 432. Siemens'sche Wechselstrommaschine mit besonderem Erreger.

gewöhnlich ohne Verwendung von Eisen auf hölzerne Kerne gewickelt. Kupferne Bänder, die durch Streifen von vulkanisirter Fiber voneinander isolirt waren, wurden für die Spulen verwendet, die Verbindungen erfolgten unter Verwendung von Silberloth. Bei einigen Maschinenformen wurden die einzelnen Spulen von durchlöcherten Neusilberscheiben abgeschlossen. Sollen Ströme von grosser Stärke, aber geringerer elektromotorischer Kraft verwendet werden, so schaltet man die Spulen nebeneinander. Die grosse, zu Frankfurt im Jahre 1891 aufgestellt gewesene Maschine für 350 Kilowatt

ist aus der Fig. 433 ersichtlich. Der Feldmagnet besteht aus 60 Spulen mit geblättern Kernen, die auf dem Kranze eines Schwungrades befestigt sind; der Durchmesser des Rades beträgt 3,7 m, der Anker ring besitzt 4,6 m äusseren Durchmesser. Mit 100 Umläufen in der Minute liefert die Maschine 165 Ampere bei 2000 Volt Spannung.

Eine neuere Form, Modell R (Tafel XVIII), besitzt einen feststehenden äusseren Anker und einen umlaufenden inneren Polstern.

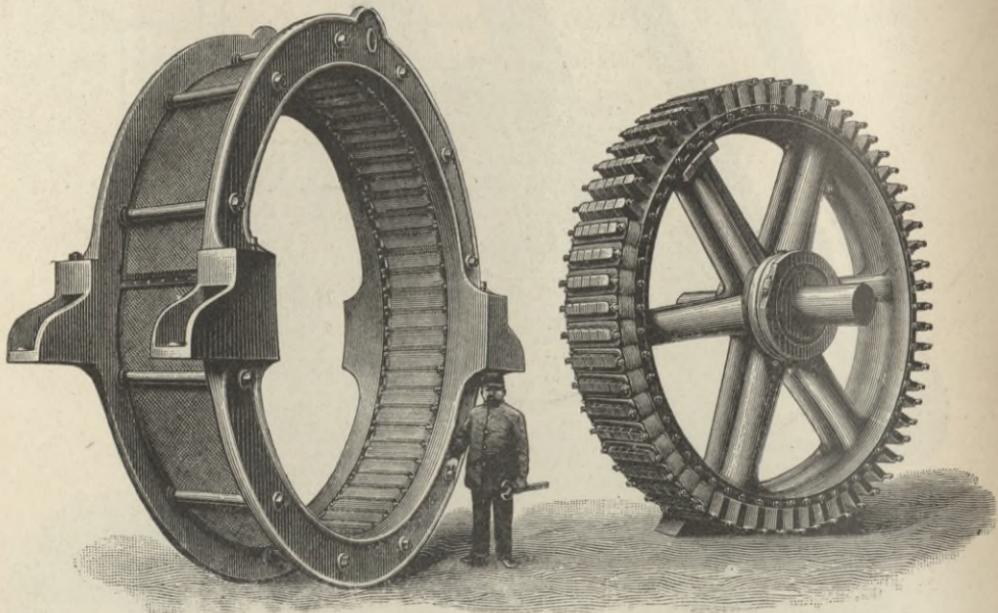


Fig. 433. Wechselstrommaschine von Siemens und Halske (1891).

Der magnetisch wirksame Theil des Ankers ist aus Eisenblechen mit Papier-Isolation zusammengesetzt und bildet einen Hohlcyliner, auf dessen innerer Fläche theilweise geschlossene oder völlig offene Nuthen angeordnet sind.

Die Feldmagnete sind ebenfalls aus Blechstücken hergestellt. Die Polstücke hängen entweder mit dem Kranz zusammen, indem geeignete Bleche nach Art einer Galle'schen Kette zu einem zusammenhängenden Ganzen von 'grosser Festigkeit zusammengesetzt werden, oder sie sind an einen gusseisernen Ring, der das Joch darstellt, angeschraubt. Bei der dargestellten Maschine beträgt das Schwungmoment des Feldmagnetes  $GD^2 = 620000 \text{ kgm}^2$ .

Die Ankerwicklung besteht, je nach Grösse und Spannung der Maschine, aus Kupferstäben, Kupferlitze oder Kupferdraht.

Sie ist vom Eisenkörper durch Micanitrohre sorgfältig isolirt. Die drei Wicklungsabtheilungen für die drei Phasen von Drehstrommaschinen werden gewöhnlich in Sternschaltung verkettet.

Die offenen Nuthen ermöglichen, die Ankerwicklung in Schablonen herzustellen und als fertige Spulen in die Nuthen einzulegen. Etwa schadhaft gewordene Wicklungsabtheilungen können somit schnell ausgewechselt werden. Die magnetische Dichte in den Zähnen des Ankereisens beträgt etwa 11000 Kraftlinien, die im Kranz etwa 5500, in den Schenkeln etwa 14000.

Das Schenkeleisen ist in Abständen mit Schlitzkanälen versehen, durch die beim Umlauf ein kräftiger Luftstrom geht, wodurch die Maschine gut gelüftet wird.

Die Polklemmen der Maschine werden bei höheren Spannungen in isolirende Buchsen eingeschlossen und mit Kappen versehen, so dass jede Berührung blanker Leitungstheile unmöglich gemacht wird.

Die Erregermaschine, gewöhnlich eine Reihenschlussmaschine, wird vielfach, besonders bei grossen Maschinen, mit der Hauptmaschine auf gleiche Welle gesetzt.

Die Drehstrommaschinen werden gewöhnlich für 50 Perioden in der Secunde gebaut, weil sich bei dieser Periodenzahl Licht- und Kraftbetrieb am günstigsten gestaltet. Selbstinduction und Trägheitsmoment der Maschinen werden so gewählt, dass die Maschinen ohne Anstand parallel arbeiten.

Diese Drehstrom- und Wechselstrommaschinen lassen sich ohne Aenderung der Ausführung auch als synchrone Dreh- und Wechselstrommotoren verwenden.

#### **Maschinen der Union Elektrizitäts-Gesellschaft.**

Dieselben werden ausschliesslich mit äusserem feststehenden Anker gebaut. Die Polkerne des erregenden Feldes bestehen aus Lamellen von weichem Eisen und sind durch schwalbenschwanzförmige Ansätze oder bei geringer Tourenzahl durch starke Schraubenbolzen auf dem gussstählernen Radkranz befestigt. Das ganze System wird von einem gusseisernen Stern getragen. Bei kleineren Maschinen gelangen Feldspulen mit mehreren Drahtlagen übereinander zur Verwendung. Die Feldspulen der grossen Generatoren bestehen aus einer einzigen Lage von hochkantig gewundenem Kupferband, so dass die obere Fläche jeder Windung der kühlenden Wirkung der Luft ausgesetzt ist. Bei der Drehung des Feldes kann

die Luft auch durch die Oeffnungen zwischen den Ankerlamellen gelangen, so dass die Temperaturzunahme bei zehnstündigem Betrieb unter Vollbelastung 40 Grad C. nicht übersteigt. Die grossen Typen werden für Spannungen bis zu 15000 Volt und für Leistungen bis zu 2000 Kilowatt gebaut. Die normale Periodenzahl ist 50 in der Secunde.

Die Fig. 434 stellt den Feldkörper eines Dreiphasen-Stromerzeugers von 750 Kilowatt Leistung dar, der für directen Antrieb durch eine 1000 pferdige Hochofen-Gaskraftmaschine gebaut ist und

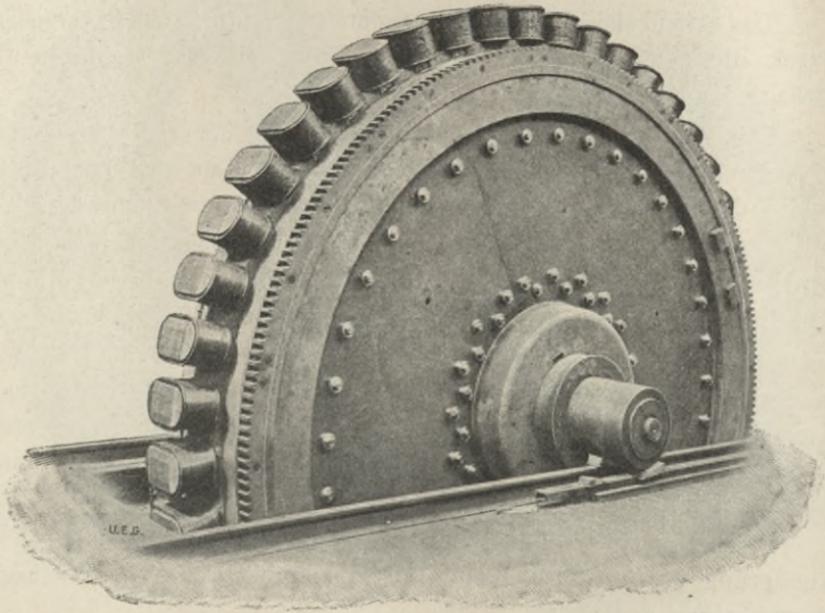


Fig. 434. Feldkörper einer Drehstrommaschine der Union Electricitäts-Gesellschaft.

zur Carbiderzeugung dienen soll. Bei der hohen hierfür erforderlichen Stromstärke ist die Spannung nur gering, 60 Volt.

Der zugleich als Schwungrad der Gaskraftmaschine dienende Feldkörper hat ein Gewicht von 47700 kg, das Product  $GD^2$  aus Gewicht und Quadrat des Durchmessers ist 678000  $\text{kgm}^2$ .

Wegen der enormen Beanspruchung durch die Centrifugalkraft ist bei der Construction besonders auf eine ausserordentlich feste Verbindung der einzelnen Elemente geachtet worden. Aus der Nabe wachsen sechs Speichen heraus, vor denen auf beiden Seiten eine Platte sitzt. Die Nabe mit den Speichen und die beiden Platten bilden ein einziges Gussstück. Auf die an der Nabe sitzenden Platten ist eine mächtige eiserne Gussplatte von 20 mm Dicke geschraubt,

welche dann mit dem Schwungrad ebenfalls durch Schrauben verbunden ist. Diese eisernen Gusscheiben, deren jede, wie die Fig. 434 erkennen lässt, aus zwei Hälften besteht, sind somit die eigentlichen Träger des Schwungrades, die Speichen dienen nur zum Aufbau und zur Centrirung des Schwungrades. Auch dieser besteht aus zwei Hälften, deren Verbindung durch Keile in der Figur angedeutet ist. Die lamellirten Polkerne sind in schwalbenschwanzförmige Einschnitte des Schwungrades eingeschoben. Die Spulen sind hintereinander geschaltet und aus Kupferband gewickelt; sie sind durch Messingplatten gesichert.

#### **Maschinen der Westinghouse-Gesellschaft.**

Diese Maschinen sind bereits im Allgemeinen (S. 572) beschrieben. Auf der Ausstellung in Chicago 1893 waren einige grosse zweiphasige Wechselstrommaschinen ausgestellt. Sie glichen im Aufbau der Fig. 402, waren aber wirkliche Doppelmaschinen, da sie zwei gleiche Feldmagnete nebeneinander besaßen, jeden mit 36 Polen versehen, und zwei gleiche Anker auf derselben Welle. Aber die Anker waren gegeneinander versetzt; d. h. sie waren so auf der Achse befestigt, dass der eine dem andern um einen Winkel vorauseilte, welcher gleich war der halben Winkelweite zwischen einem Nordpol und einem Südpol. Durch einfaches Verschieben des zweiten Ankers hätte dieselbe Maschine als einphasige Wechselstrommaschine dienen können. In diesem Falle bietet die Anwendung eines zweiphasigen Systems keinerlei Ersparniss, weder an Raum, noch an Material. Diese Maschinen leisteten 750 Kilowatt bei 200 Umdrehungen in der Minute, sie hatten eine Frequenz von 60 Perioden in der Secunde. Bei den neueren Mehrphasenmaschinen<sup>1)</sup> hat die Westinghouse-Gesellschaft die Seite 559 erwähnte »Vertheilungs«-Wicklung für den Anker benutzt. Sie baute auch die später zu beschreibenden Maschinen der Niagara-Kraftstation.

#### **Die Wechselstrommaschinen für den Niagara.**

Als der Plan zur Ausnutzung der Wasserkraft des Niagara bestimmtere Gestalt gewann, forderte die Cataract Construction Company mehrere Fabriken in Europa und Amerika auf, Vorschläge einzureichen. Die Maschinen sollten 5000 P leisten können und von Turbinen angetrieben werden, die 250 Umdrehungen in

1) *Electrical World*, Bd. 25, S. 713 und 745. 1895.

der Minute machten. Manche dieser Vorschläge waren ganz vorzüglich; aber aus verschiedenen Gründen (hauptsächlich wegen constructiver Schwierigkeiten, die durch die Grösse und Geschwindigkeit der Maschinen entstanden) wurden Prof. Forbes und Coleman Sellers angewiesen, genauere Zeichnungen der von ihnen vorgeschlagenen Stromerzeuger vorzulegen. Prof. Forbes wählte einen

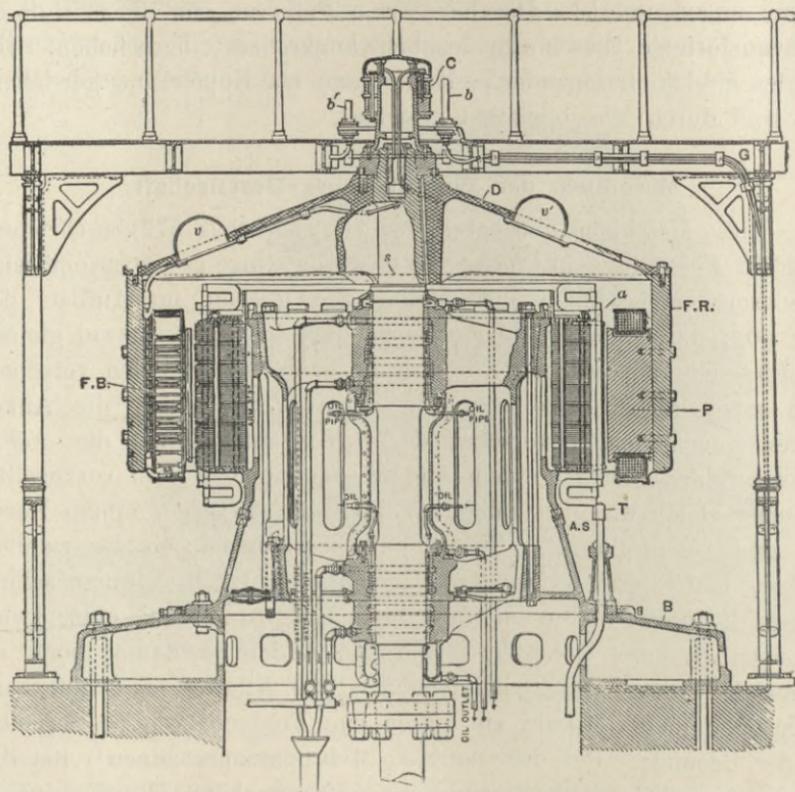
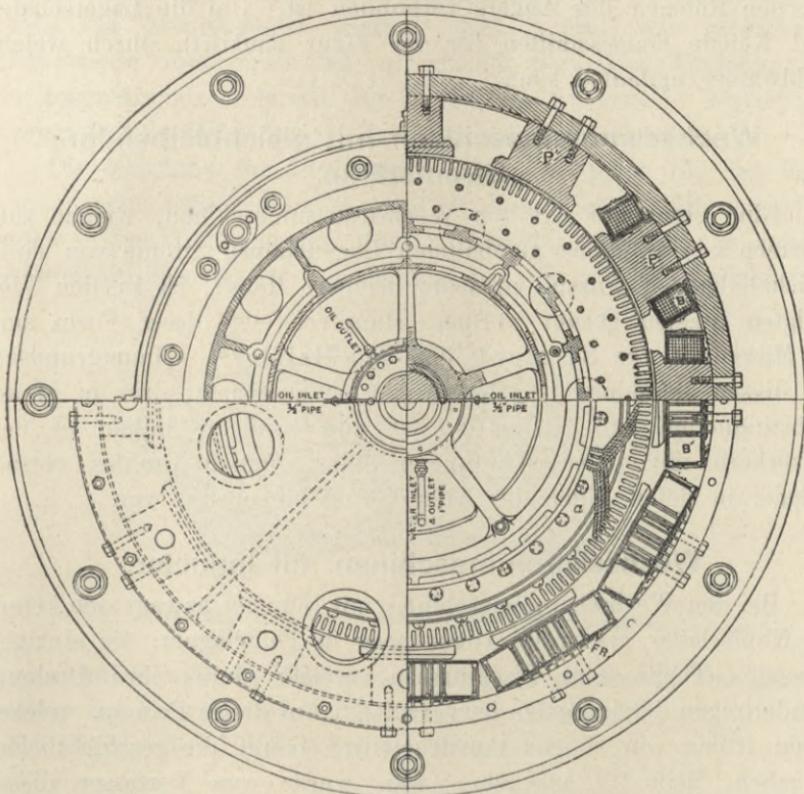


Fig. 435. Senkrechter Schnitt durch einen zweiphasigen Stromerzeuger von 5000 P der Kraftstation am Niagara. Maassstab 1:50.

äusseren drehbaren Feldmagnet der Schirmgattung mit nach innen vorspringenden Polen, die an einem stählernen Ringe sassen; diese Anordnung besitzt sowohl grosse Festigkeit als auch die Vortheile eines schweren Schwungrades. Zuerst legte er Zeichnungen vor für eine zweiphasige achtpolige Maschine mit der niedrigen Geschwindigkeit von  $16\frac{2}{3}$  Perioden in der Secunde. Nachdem die Westinghouse-Gesellschaft als Lieferer erwählt war, entschied man sich für eine Wechselgeschwindigkeit von 25 und eine Spannung von 2000 Volt. Die Zeichnungen, welche Forbes ver-

öffentliche<sup>1)</sup>, beziehen sich auf den älteren Entwurf und bieten gewisse Schwierigkeiten in der Construction, welche vermieden wurden, als man sich entschied, die Spannung auf 2000 Volt festzusetzen.

Wie die Maschinen wirklich ausgeführt sind, ist aus den Fig. 435 und 436 zu ersehen.



Quadrant links unten: Ansicht von oben, nachdem der Stromabgeber entfernt worden; rechts unten: dasselbe, nachdem der kegelförmige Träger entfernt worden; rechts oben: Schnitt durch Anker und Feldmagnet; links oben: Schnitt durch das Fussgestell.

Fig. 436. Grundriss des zweiphasigen Stromerzeugers von 5000 P der Kraftstation am Niagara.

Fig. 435 gibt einen Schnitt durch die fertig aufgestellte Niagara-Maschine. Der äussere drehbare Feldmagnet besteht aus einem ohne Schweissung hergestellten geschmiedeten Nickelstahlringe, an den zwölf nach innen vorspringende Polkerne aus Gusseisen angeschraubt sind. Er ist an der senkrechten Achse mittels eines sechsarmigen Speichenrades befestigt. Zur Aufnahme der Kupferleiter

1) Journal of the Institution of Electrical Engineers, November 1893; und Elektrot. Zeitschr. 1894. S. 248.

dienen 187 Nuthen in der äusseren Fläche des Ankerkernes. In jeder Nuth liegen zwei Kupferbarren von rechteckigem Querschnitt,  $32 \times 8$  mm stark, die Ecken sind leicht abgerundet. Die Art der Verbindung der Barren untereinander ist aus den Zeichnungen zu erkennen, ebenso die Art, wie das geblätterte Eisen mit dem gusseisernen Rahmen des Ankers verbunden ist. Um die Lagerschalen sind Kanäle eingeschnitten (in der Figur punktirt), durch welche Kühlwasser umlaufen kann.

### **Wechselstrommaschinen mit gleichbleibender Stromstärke.**

Eine besondere Art von Wechselstrommaschinen, welche zum Betriebe von in Reihe geschalteten Bogenlampen Ströme von einer gleichbleibenden Anzahl virtueller Ampere liefert, ist in den Vereinigten Staaten gebaut worden; Hauptvertreter dieser Form sind die Maschinen von Stanley<sup>1)</sup> und von Heisler<sup>2)</sup>. Hauptgrundsatz bei diesen Maschinen ist, den Anker so zu bauen, dass er grosse Selbstinduction hat. Stanley hat dies erreicht, indem er den Ankerkern mit vielen Windungen eines dünnen Drahtes versah, welcher in tiefen Rillen des Ankerkernes eingebettet war.

### **Wechselstrommaschinen mit Inductor.**

Bei den Wechselstrommaschinen mit Inductor bewegt sich keiner der Kupferleiter, weder im Anker noch im Feldmagnet; die einzigen bewegten Theile sind Eisenmassen, welche durch ihre Drehung Aenderungen der Induction hervorrufen. Auf dieses Princip, welches schon früher von einigen Constructeuren (vergl. die geschichtlichen Angaben, Seite 10) angegeben war, wurde vom Verfasser dieses Buches im Jahre 1883<sup>3)</sup> wieder aufmerksam gemacht. In den letzten Jahren hat die Ausbildung dieser Maschinengattung viele Fortschritte gemacht.

#### **Kingdon's Wechselstrommaschine.**

Bei dieser Maschine ist das Inductionsprincip in folgender Weise ausgeführt.

1) Electr. World, Bd. 15, S. 45 und Bd. 16, S. 339; ferner The Electrician, Bd. 24, S. 623; Bd. 25, S. 145 und Bd. 26, S. 20.

2) Electr. Review, Bd. 25, S. 207. 1889.

3) Diese Einrichtung wurde in der Patentschrift Nr. 1639 des Jahres 1883 näher beschrieben und führte zu Kingdon's Maschinenform; vergl. Electr. Review, Bd. 22, S. 178. 1888.

Ein mit einer grossen Zahl nach innen vorragender Pole versehener Ring ist ganz aus Blättern von weichem Eisen hergestellt. Die abwechselnden Pole *A* sind, wie Fig. 437 zeigt, mit Wickelungen versehen und dienen als Ankertheile, während die zwischen ihnen liegenden Theile *F* mit andern Wickelungen belegt sind, die als Theile des Feldmagnetes wirken. Ein inneres, aus geblätterten Eisenmassen bestehendes Rad ruft schnelle periodische Umkehrungen der magnetischen Polarität der Kerne des Ankertheils hervor und erzeugt in den Wickelungen des letzteren Wechselströme.

Die Maschine für 50 Kilowatt besitzt 16 Spulen für den Feldmagnet oder primäre Spulen, und 16 Ankerspulen oder secundäre Spulen. Das Inductionsrad trägt 16 Inductionsblöcke von solcher Abmessung, dass sie der Ausdehnung von zwei aufeinander folgenden

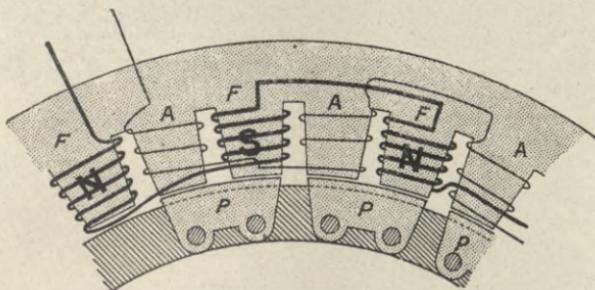


Fig. 437. Kingdon's Inductor-Wechselstrommaschine.

Spulen auf den Polen des äusseren Ringes entspricht. Der Durchmesser des Rades beträgt 134,7 cm, die Breite 30,5 cm, die Geschwindigkeit 350 Umläufe in der Minute.

#### Maschinen von Stanley-Kelly.

Die Stanley-Kelly Co. in Pittsfield, Massachusetts, hat einen Zweiphasen-Stromerzeuger zu hoher Vollendung gebracht, welcher sich drehende Inductoren aus Gussstahl mit geblätterten Polvorsprüngen besitzt. Der Ankertheil gleicht genau dem feststehenden Theil der später im Kapitel XXV beschriebenen Stanley-Kellyschen Triebmaschine.

#### Brown's dreiphasiger Inductor-Stromerzeuger.

Diese Maschine soll die Forderung einer hohen Umdrehungszahl mit einer niedrigen Wechselzahl vereinigen. Der Inductor besteht einfach aus einer Gussstahlmasse, welche auf jeder Seite vier Arme trägt, die durch die magnetisirende Kraft einer zwischen

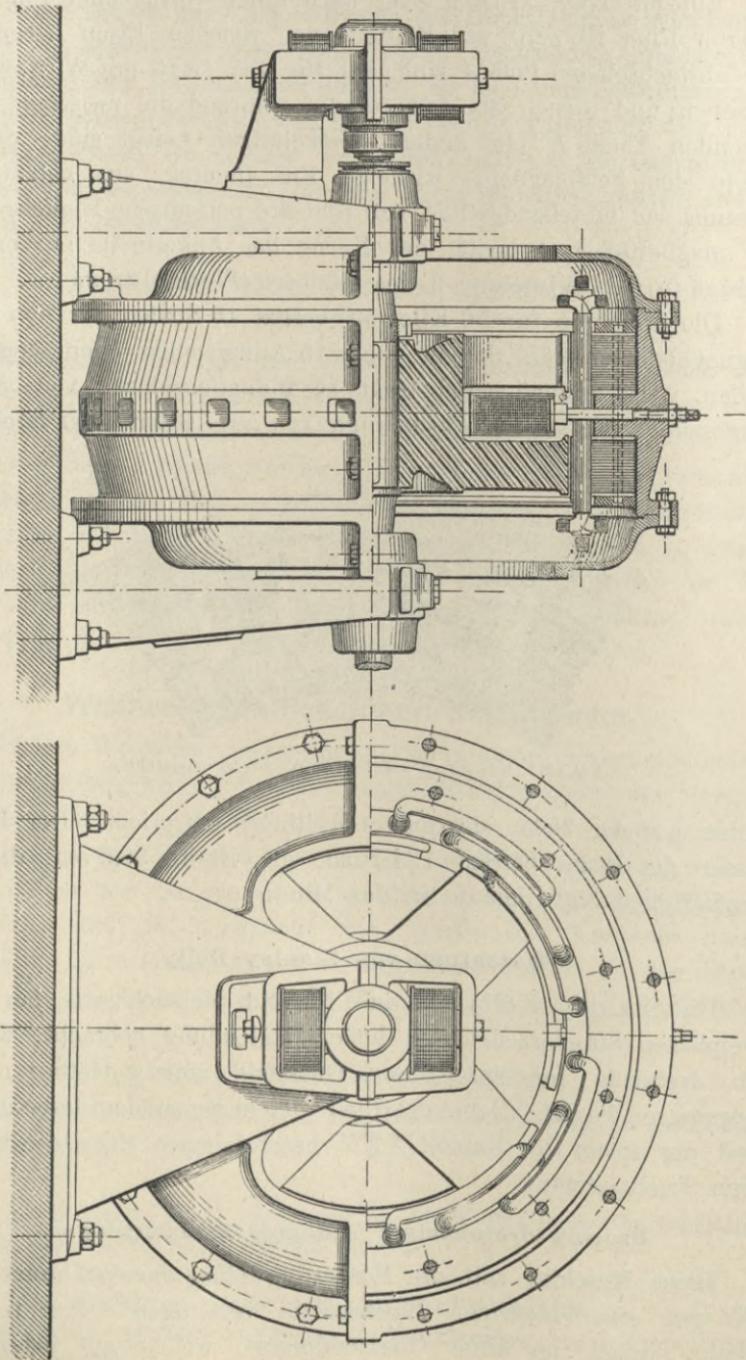


Fig. 438. Brown's dreiphasiger Inductor-Stromerzeuger, 150 P., 600 Umdrehungen, 5300 Volt. Maassstab 1 : 20.

ihnen liegenden feststehenden Spule entgegengesetzte Polarität annehmen. Wie Fig. 438 zeigt, sind diese Arme bestimmt, abwechselnd auf die Spulen eines feststehenden Ankers zu wirken, der seine Wickelung in Löchern enthält, die an dem inneren Umfang der

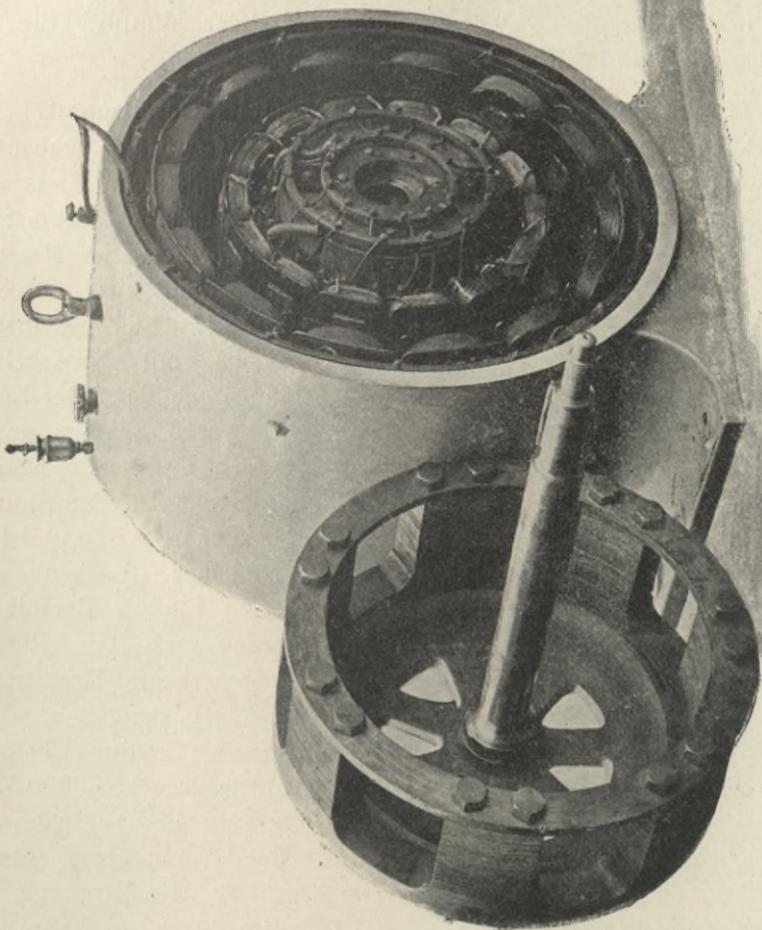


Fig. 439. Wechselstrommaschine von Pyke und Harris.

beiden in einem äusseren Eisenrahmen aufgebauten Kernscheibensätze sich befinden.

#### Maschine von Pyke und Harris.

Diese gedrungene Form, welche für kleine Maschinen sehr beliebt geworden ist, stellt Fig. 439 dar. Die primäre oder magnetisierende Rolle ist eine innenliegende Spirale, welche in einer Ebene

rechtwinklig zur Achse aufgewickelt ist. Sie umgiebt einen centralen Pol und wird ihrerseits von einem äusseren Eisenmantel umgeben. Zwei geblätterte Ringe, mit gezahnten Vorsprüngen versehen, tragen zwei Sätze der secundären oder Ankerwickelungsspulen, wie aus der Figur zu erkennen. Auf der Achse ist ein sich drehender Träger befestigt, welcher die geblätterten Inductormassen trägt. Der massive Theil des Feldmagnets ist als Lager ausgebildet. Die Maschine für 6 Kilowatt läuft mit 740 Umdrehungen in der Minute. Sie ist 53,3 cm hoch und wiegt 350 kg.

#### Maschinen der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft.

Bei den nach den Entwürfen von Dobrowolsky gebauten Inductormaschinen<sup>1)</sup> dieser Firma wird der magnetische Kreis aus

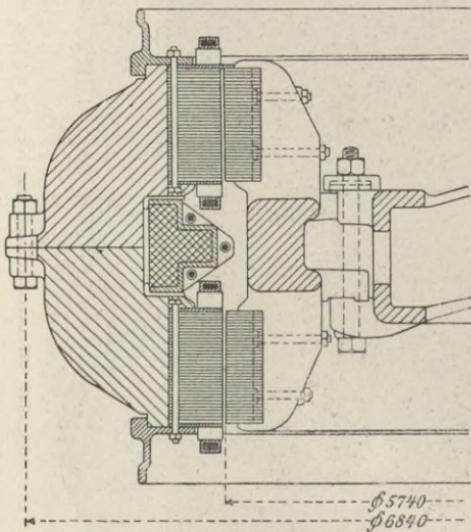


Fig. 440. Schnitt durch die Maschine Fig. 441.

einem äusseren Eisenmantel mit innenliegender Magnet-spule und zwei Ankerkernringen aus gestanzten Blechen mit bewickelten Zähnen gebildet. Der Kreis wird vervollständigt durch die Joche des sich drehenden Inductors. Die Anordnung ist aus den Fig. 440 und 441 zu ersehen, die eine der grossen für die Kraftübertragungswerke in Rheinfelden erbaute Drehstrommaschinen darstellen. Die normale Leistung beträgt 61,5 Ampere bei 3900 Volt für jede Phase (Spannung

zum neutralen Punkt), also 720 Kilowatt. Der Wirkungsgrad beträgt 92 Procent einschliesslich des Energiebetrages für die Erregung.

Die Inductorwelle wird von zwei Lagern geführt, sie ist mittels angeschweisster Flanschenkuppelung an die senkrechte Turbinenwelle angeschlossen. Das Gewicht der umlaufenden Theile (Turbinenräder, Wellen und Inductorrad), insgesamt 55 000 kg, wird von der ringförmigen Flanschfläche des unteren Halslagers aufgenommen. Zur Verminderung der Reibung wird in eine Ringnuth zwischen die

1) Elektrot. Zeitschr. 1895. S. 95.

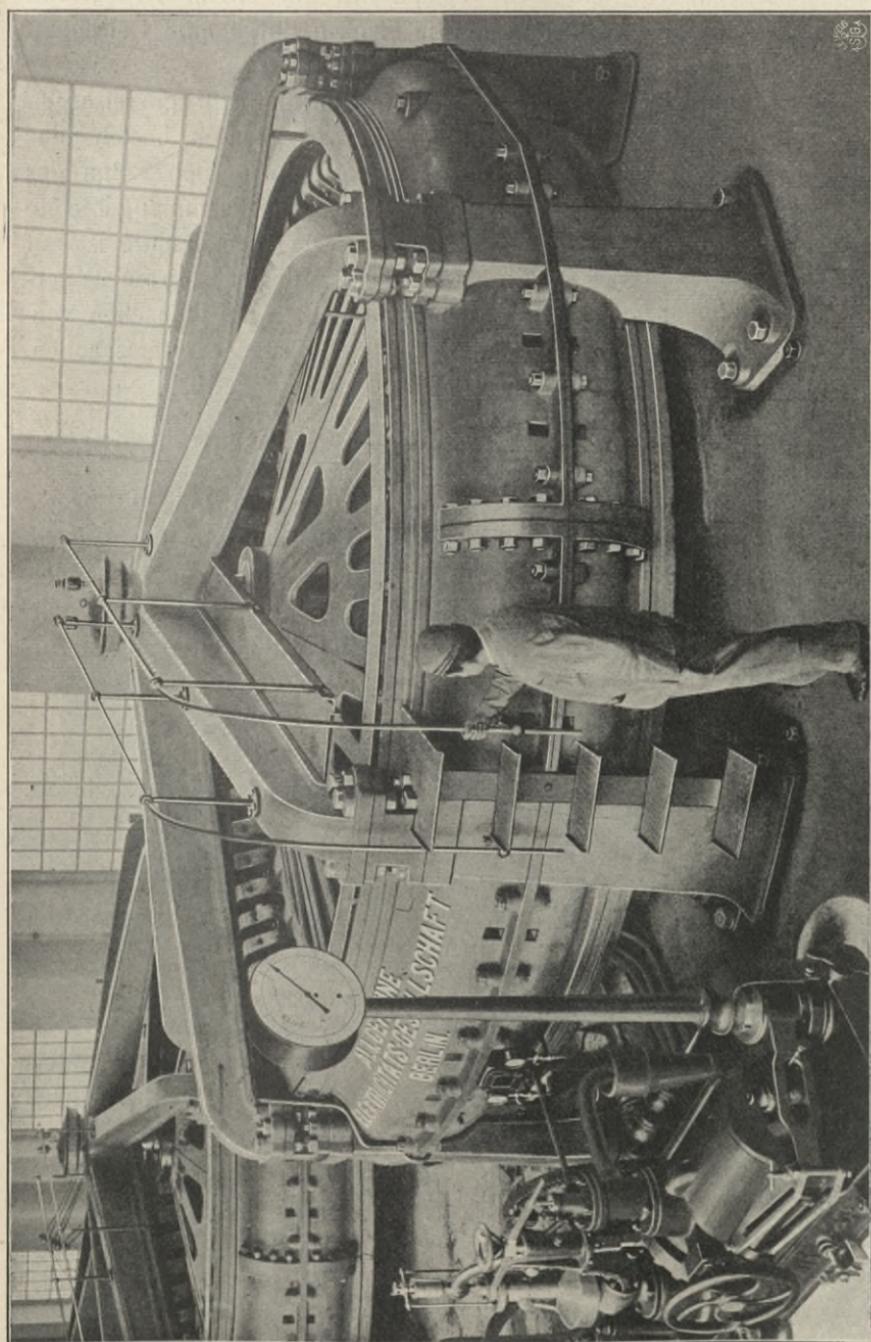


Fig. 441. Drehstromerzeuger (Inductortypus) der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft.

beiden aufeinander gleitenden Flächen Oel mit einem Druck von 25 Atmosphären gepresst, so dass die Flächen durch eine Oelschicht voneinander getrennt sind.

Das Inductorrad besteht aus einem fünftheiligen gusseisernen Armkreuz, an dessen Umfang ein aus fünf Segmenten bestehender Kranz aus Stahlguss befestigt ist, dessen 55 Joche den Polen des Gehäuses gegenüberstehen und an ihren Enden zusammengenietete Packete aus dünnen Eisenblechen tragen. Die Erregerspule ist auf einen bronzenen Körper gewickelt. Die mit Mikanit isolirten Ankerspulen, 165 für jeden Ring, werden auf die über die Flanschen vorragenden Zacken der Ankerbleche in fertigem Zustande aufgeschoben, so dass ein leichtes Auswechseln möglich ist.

**Maschinen der Berliner Maschinenbau-Aktiengesellschaft  
vormals L. Schwartzkopff.**

Die Firma baut grössere Maschinen (über 84 Kilowatt) nur als Inductormaschinen, um die Schwierigkeiten, welche die gute mechanische Befestigung und Isolation einer an der Drehbewegung theilnehmenden Erregerspule bietet, zu umgehen. Zur Erzielung einer geringeren Streuung greifen die Pole des Inductors nicht klauenförmig ineinander; vielmehr gestatten die auf beiden Seiten des Inductors gegeneinander versetzten radialen Polhörner die feste Aufhängung einer oder zweier Erregerspulen. Der Anker ist ebenso aufgebaut wie der der Maschine Fig. 412, jedoch sind die Ankerspulen auf Schablonen gewickelt.

**Maschinen der Maschinenfabrik Oerlikon.**

Die Firma baut seit dem Jahre 1896 Wechselstrommaschinen nach dem Inductor-Typus in 18 Grössen, mit Leistungen von 10 Kilowatt bei 1000 Touren, bis 800 Kilowatt bei 500 Touren und 1300 Kilowatt bei 75 Touren.

Das Magnetrad ist ein vollkommen glatter Cylinder aus Grauguss, auf welchen in zwei Reihen die Polhörner aus Blech mittels Keilen und Schrauben aufgesetzt sind, so dass jedes Polhorn nach Lösen der Schrauben seitlich abgestreift werden kann (Fig. 443).

Der Anker besteht aus zwei Blechringen mit offenen Nuthen. In die nackten Nuthen jedes Ringes werden die ausserhalb der Maschinen in Schablonen fertig gewickelten und durch geschlossene nahtlose Mikanithülsen isolirten Spulen eingelegt und durch Fieberkeile gehalten, welche seitlich in Einkerbungen der Nuthe eingreifen. Die Spulen sind auf der Innenseite der Blechringe abwechselnd nach oben und unten abgebogen. Jede Spule kann, ohne dass die Maschine

auseinander genommen wird, entfernt und durch eine neue ersetzt werden, nachdem ein Polhorn von der Trommel abgestreift ist.

In den Gusseyylinder des Gehäuses zwischen die beiden Ankerkränze ist die Erregerspule eingesetzt, welche in der Regel aus

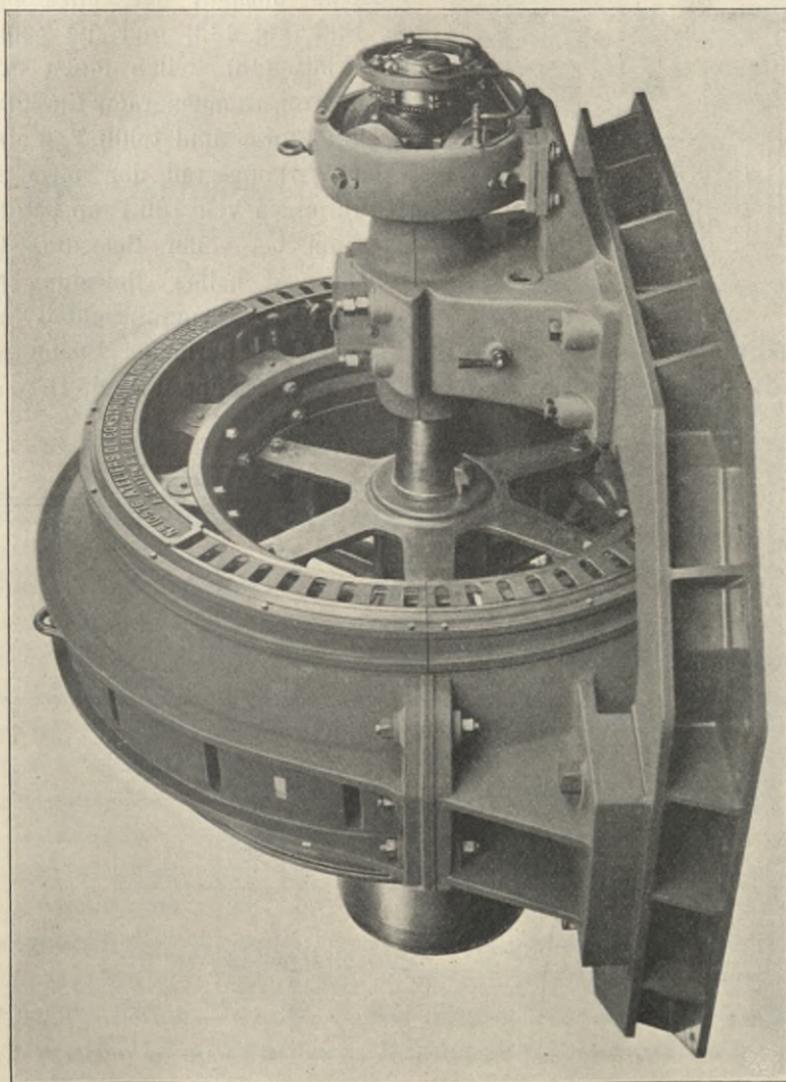


Fig. 442 Inductormaschine von Oerlikon.

einem nackten, mit Asbestzwischenlagen aufgerolltem Kupferband besteht. Die Wicklung füllt den Platz zwischen den Spulen der beiden Seiten einerseits und zwischen den beiden Reihen Polhörner des Magnetrades andererseits aus.

Der Gussmantel, welcher die beiden Blechkränze vereinigt, ist mit Ventilationsöffnungen versehen, durch welche der von den rotirenden Polhörnern erzeugte Luftzug, nachdem er die Wicklung der Feldspule umspült hat, entweicht. Das Bild (Fig. 442) und die Zeichnung (Fig. 443) stellen einen derartigen Drehstromgenerator für 800 P bei 250 Touren und 8000 Volt dar.

Der Wirkungsgrad der normalen Ausführungen von 100 P an beträgt im Mittel bei voller Belastung 93 Procent, bei halber Belastung 89 Procent, der Spannungsabfall bei inductiver Belastung 20 bis 30 Procent der normalen Spannung. Die Erwärmung steigt in keinem Theil der Maschine über 35 Grad C.

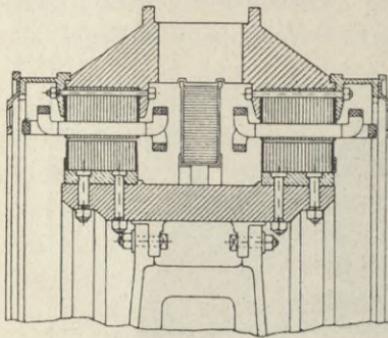


Fig. 443. Schnitt durch die Maschine Fig. 442.

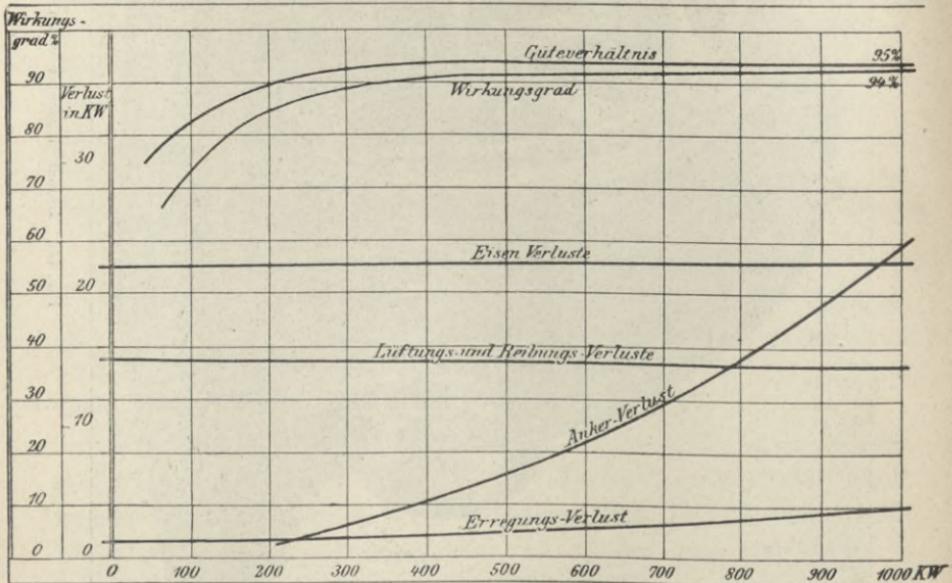


Fig. 444. Diagramme eines Drehstromerzengers für 1000 Kilowatt von Oerlikon.

über die Aussentemperatur. Die für die Erregung erforderliche Energie beträgt 1 bis 0,5 Procent der normalen Leistung.

Die Curven (Fig. 444) stellen die Resultate sorgfältiger Indicirversuche im Electricitätswerke Zürich an einem Drehstromerzeuger von 1000 Kilowatt bei 100 Touren dar.

## Kapitel XXIV.

### Zusammenschaltung von Wechselstrommaschinen. Synchron laufende Triebmaschinen.

Wenn zwei Wechselstrommaschinen in einem Stromkreise liegen, wie in Fig. 445, so sind sie parallel geschaltet, wenn wir sie als Theile des Lampenkreises betrachten; sie sind dagegen in Reihenschaltung, wenn wir nur den Maschinenkreis als vorhanden ansehen und den Lampenkreis weglassen; die eine Maschine treibt dann die andere. Viele Betrachtungen, welche für den Betrieb von zwei Maschinen gelten, die als Triebmaschine und als Stromerzeuger wirken, sind auch bei parallel geschalteten Maschinen gültig; wir werden daher diese beiden Fälle bis zu einem bestimmten Punkte gemeinsam behandeln. Wir wollen zu-

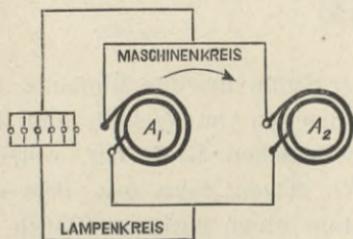


Fig. 445.

nächst nur den Maschinenkreis allein betrachten, und in demselben eine bestimmte Richtung, beispielsweise wie in Fig. 443 die Bewegung im Sinne des Uhrzeigers, als die positive Richtung der elektromotorischen Kraft und des Stromes bezeichnen. Wir müssen hier ganz besonders darauf hinweisen, wie wichtig bei allen Wechselstromaufgaben die klare Bestimmung ist, was als positiv und was als negativ zu verstehen ist, da die Vernachlässigung dieser Vorsicht in vielen Fällen die äusserste Verwirrung und Zweideutigkeit zur Folge hat.

Die einfachste Auffassung zweier in Reihe geschalteter Wechselstrommaschinen ist die eines geschlossenen Leiters  $abcd$  (Fig. 446), in dessen Nähe an verschiedenen Punkten zwei Magnete rotiren, so dass deren Kraftlinien den Leiter schneiden. Der Theil  $ab$  kann

als mittlerer Leiter einer Wechselstromspule, der Magnet als Feldmagnet einer Wechselstrommaschine angesehen werden; dessen Lage zum mittleren Leiter einer seiner Spulen wird durch den Winkel  $\Theta$  in Fig. 446 dargestellt. Alle Phasenverhältnisse der Magnetstellung, der elektromotorischen Kraft und des Stromes können aus dieser Figur ersehen werden; die ganze Theorie der Synchronmotoren (so weit sie zur Zeit bekannt ist) kann aus ihr mit Hilfe weniger graphischer Darstellungen abgeleitet werden.

Zunächst nehmen wir den Fall, dass der Magnet  $A_1$  allein sich dreht. Die von ihm inducirte elektromotorische Kraft wird sich nach dem Gesetz

$$e_1 = E_1 \cos \Theta$$

ändern und lässt sich durch die Verticalprojection einer um  $O$  sich im Sinne des Uhrzeigers drehenden Linie  $OE_1$  (Fig. 447) darstellen, deren Länge gleich dem grössten Werthe der elektromotorischen

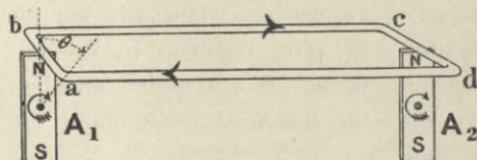


Fig. 446.

Kraft  $E_1$  gesetzt wird. Wenn die Selbstinduction des ganzen Stromkreises gleich  $L$  und der Widerstand gleich  $R$  ist, so wissen wir aus früheren Darlegungen (Seite 532), dass

der Strom um den Winkel  $\varphi$  in der Phase zurückbleibt; die Verticalprojection von  $Ri$  stellt dann in dem Moment die Grösse der elektromotorischen Kraft dar, welche mit dem Strom gleiche Phase hat. Wir setzen dabei fest, dass eine oberhalb der Achse  $OX$  gezogene Linie einen positiven Werth der elektromotorischen Kraft oder des Stromes darstellt, d. h. eine elektromotorische Kraft oder einen Strom, der in dem Stromkreis der Fig. 446 die durch die Pfeile angedeutete Richtung  $abcd$  hat. Der entlang  $cd$  fließende Wechselstrom hat nun das Bestreben, den Magnet  $A_2$  abwechselnd im Sinne der Uhrzeigerbewegung und entgegengesetzt zu drehen, so dass bei der Geschwindigkeit, mit der die Polarität wechselt, überhaupt keine Drehung stattfinden kann. Wenn wir aber  $A_2$  künstlich dieselbe Drehungsgeschwindigkeit, welche  $A_1$  hat, verleihen, so wird  $A_2$  dann unter passenden Verhältnissen nicht nur mit  $A_1$  synchron laufen, sondern auch das Bestreben haben, diesen Synchronismus beizubehalten, und infolge dessen einen beträchtlichen Zug ausüben können. Wir haben zu untersuchen, wie diese passenden Verhältnisse beschaffen sein müssen. Nehmen wir an, dass in einem bestimmten Zeitpunkte die Magnete die in Fig. 446 gezeichnete Stellung

einnehmen. Die in  $cd$  erzeugte elektromotorische Kraft wird negativ und in ihrer Grösse von der Stärke des Magnets  $A_2$  abhängig sein. Die beiden Magnete seien zunächst von der gleichen Stärke; dann werden die elektromotorischen Kräfte, welche beide im Stromkreis inducirt werden, durch die Linien  $OE_1$  und  $OE_2$  der Fig. 448 dargestellt ( $OE_2$  negativ angenommen). Die beiden elektromotorischen Kräfte sind gleich, aber entgegengesetzt gerichtet, also wird die resultierende elektromotorische Kraft im Kreise gleich Null sein; da somit kein Strom zum Antrieb von  $A_2$  vorhanden ist, wird die

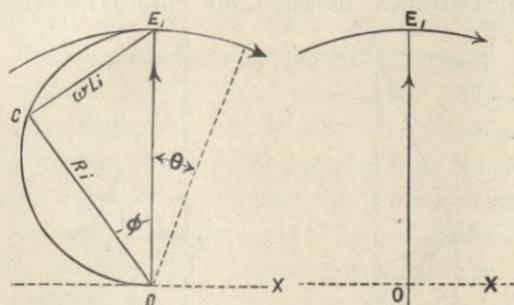


Fig. 447.

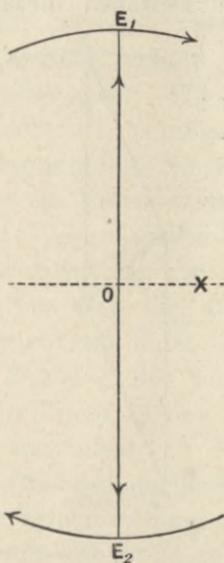


Fig. 448.

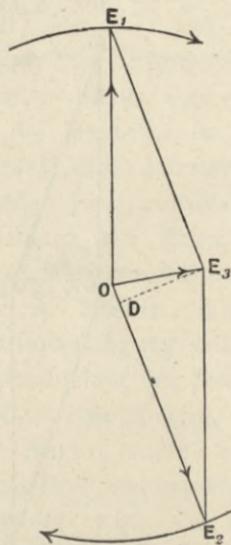


Fig. 449.

Lagerreibung eine Verminderung der Geschwindigkeit herbeiführen, so dass  $A_2$  in der Phase hinter  $A_1$  zurückbleibt. Die elektromotorischen Kräfte seien dann durch  $OE_1$  und  $OE_2$  in Fig. 449 dargestellt; die resultierende elektromotorische Kraft ist dann  $OE_3$ . Die Phase des Stromes hängt ab von der Selbstinduction des Kreises. Wäre keine Selbstinduction im Kreise vorhanden, würde der Strom mit  $OE_3$  gleiche Phase haben, und von der Grösse  $\frac{OE_3}{R}$  sein.

Nun sahen wir Seite 544, dass, wenn der Strom einer Wechselstrommaschine hinter der elektromotorischen Kraft um weniger als 90 Grad in der Phase zurückbleibt, die Maschine dann als Stromerzeuger arbeitet, und somit Kraft zum Betriebe verbraucht. Wenn dagegen der Phasenunterschied zwischen Strom und elektromotorischer

Kraft mehr als 90 Grad (genauer zwischen 90 und 270 Grad) beträgt, arbeitet die Maschine als Triebmaschine und leistet Arbeit. In Fig. 449 beträgt der Phasenunterschied zwischen  $OE_3$  und den beiden elektromotorischen Kräften von  $A_1$  und  $A_2$  weniger als 90 Grad, so dass beide Maschinen als Stromerzeuger arbeiten. Da aber nun auf  $A_2$  kein treibendes Drehmoment mehr wirkt, so wird sie anhalten. Ist indessen grosse Selbstinduction im Kreise vorhanden, so dass der Strom hinter der Resultante  $OE_3$  zurückbleibt, wie in Fig. 450 gezeichnet, wo die Linie  $Ri$  die Stromphase darstellt, so ist der Winkel zwischen dieser Linie und  $OE_2$  grösser

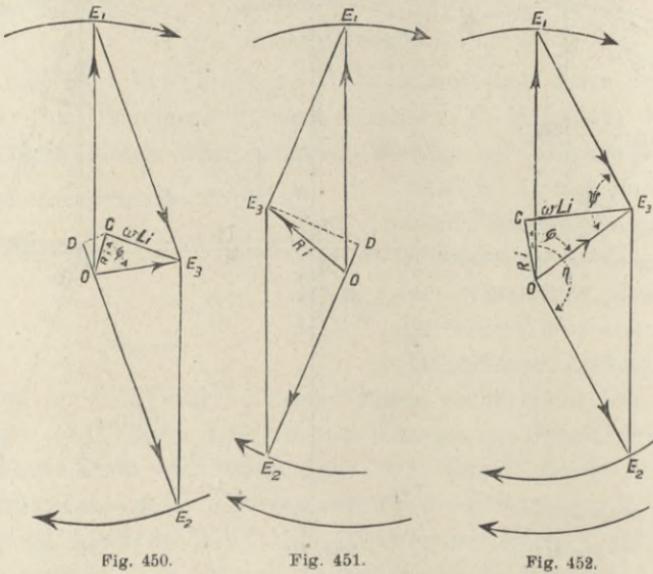


Fig. 450.

Fig. 451.

Fig. 452.

als ein rechter, die Maschine  $A_2$  wird somit als Triebmaschine arbeiten. Füllen wir von  $C$  aus ein Loth auf die Richtung  $OE_2$ , so wird die Linie  $OD$ , getheilt durch den Widerstand, denjenigen Theil des Stromes darstellen, welcher gerade entgegengesetzte Phase zu  $OE_2$  hat, d. h. denjenigen Theil des Stromes, welcher zum Betriebe von  $A_2$  als Triebmaschine dient. Die von  $A_2$  geleistete Arbeit ist proportional dem Product  $OD \cdot OE_2$ . Da die Linien der Figur die Höchstwerthe von Strom und elektromotorischer Kraft darstellen, so ist die Leistung gleich  $\frac{OD \cdot OE_2}{2R}$  (vergl. Seite 538).

Der Magnet  $A_2$  würde gerade so viel hinter  $A_1$  zurückbleiben, dass  $OD$  noch gross genug ist, das erforderliche Drehmoment auszuüben.

Bis jetzt nahmen wir an, dass die elektromotorische Kraft bei beiden Maschinen gleich gross sei. Erregen wir nun aber  $A_1$  mehr, so dass der Magnet stärker wird als  $A_2$ , also  $E_1$  grösser als  $E_2$ , dann wird der Stand der Dinge durch die Figuren 451 und 452 dargestellt. Fig. 451 zeigt, was geschehen würde, wenn die Selbstinduction im Vergleich zum Widerstande<sup>1)</sup> klein ist. Die Resultirende  $E_3$  und demnach auch der Strom sind in der Phase um mehr als 90 Grad von  $E_2$  verschieden, es entsteht also ein starkes Drehmoment, das den Magnet bei  $A_2$  sich rascher drehen lässt als  $A_1$ , bis er um so viel vor dem Letzteren voreilt, dass  $OD$  sich auf eine Grösse herabmindert, welche gerade noch das erforderliche Drehmoment hergiebt und nicht mehr. Wir sehen daraus, dass eine geringere Erregung des Motors ein Voreilen des Magnetes in der Phase bewirkt, während Selbstinduction ein Zurückbleiben hervorruft. Ist sehr viel Selbstinduction im Kreise vorhanden (was gewöhnlich der Fall ist, besonders bei Wechselstrommaschinen mit Eisen im Anker), so sind die Phasenbeziehungen zwischen den verschiedenen elektromotorischen Kräften aus der Fig. 452 zu ersehen. Diese Figur stellt den gewöhnlichsten Fall einer Kraftübertragung mittels Synchronmotoren dar; die Wirkung der Selbstinduction im Stromkreise besteht darin, dass der Motor in den Stand gesetzt wird, ein beträchtliches Drehmoment auszuüben, ob der Magnet unter- oder übererregt ist. Wir wollen etwas genauer untersuchen, was geschieht, wenn die Felderregung der Triebmaschine geändert wird, die Belastung aber constant bleibt. Wir sehen aus Fig. 452, dass  $OE_2 = E_1 E_3$  ist, so dass wir  $E_1 E_3$  als Darstellung der elektromotorischen Kraft der Triebmaschine oder der elektromotorischen Gegenkraft, wie sie gewöhnlich bezeichnet wird, ansehen können. Wir wollen nun die halbe Figur in grösserem Maassstabe (Fig. 453) aufzeichnen, und untersuchen, was geschieht, wenn der Werth  $E_1 E_3$  verändert wird, während die inducirte Spannung  $OE_1$ , der Widerstand  $R$ , die Selbstinduction  $L$  und die Leistung  $P$  der Triebmaschine unverändert bleiben.  $R$  und  $L$  sind bekannt,  $\varphi$ , der Verzögerungswinkel des Stromes gegen die resultirende elektromotorische Kraft  $OE_3$ , ist bestimmt (durch die Gleichung  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}$ ) und bleibt constant. Wir verlängern  $OC$  bis  $F$ , und beschreiben über  $OE_1$  den Halb-

1) Vergl. Bedell und Ryan, „Action of a Single-phase Synchronous Motor“, Amer. Inst. Electr., März 1895, Seite 197.

kreis  $E_1FO$  mit dem Mittelpunkte  $G$ , ziehen  $FE_1$ , dann ist, da  $OFE_1$  ein rechter Winkel,  $OF$  die Projection der wirkenden elektromotorischen Kraft  $OE_1$  auf die Richtung des Stromes  $OC$ , so dass  $\frac{OF}{\sqrt{2}}$  den Werth der effectiven Spannung angiebt, welche

gleiche Phase mit dem effectiven Strom von dem Werthe  $\frac{CO}{R\sqrt{2}}$  hat.

Die von dem Stromerzeuger  $A_1$  aufgewandte Arbeit ist daher gleich  $\frac{OF \cdot CO}{2R}$ . In ähnlicher Weise erhält man, da  $FC$  die Projection

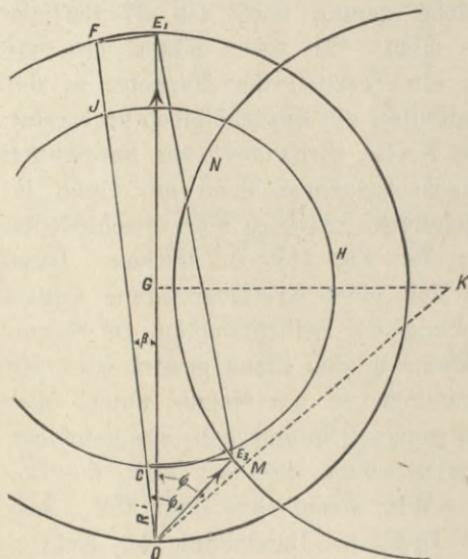


Fig. 453.

von  $E_1E_3$  ist, die von dem Motor  $A_2$  geleistete Arbeit zu  $\frac{FC \cdot CO}{2R}$ , und diese nehmen wir als constant an. Wenn nun die Linie  $E_1E_3$  in ihrer Länge sich ändert, bekommt die Figur eine andere Form, aber stets so, dass der Winkel  $E_1FO$  ein rechter bleibt,  $F$  sich also auf dem Halbkreise  $E_1FO$  bewegt. Gleichzeitig muss sich der Punkt  $C$  auf dem Kreise  $CHJ$  bewegen<sup>1)</sup>, der mit  $E_1FO$  concentrisch ist, damit  $FC \cdot CO$  (oder  $JO \cdot CO$ ) constant bleibt.

Wenn sich nun  $C$  auf dem Kreise  $CJH$  bewegt, muss sich der Punkt  $E_3$  auch auf einem Kreise bewegen, da  $\varphi$  constant bleibt, und  $OC$  und  $OE_3$  in einem constanten Verhältniss stehen. Der Mittelpunkt des Kreises  $ME_3N$ , welcher den geometrischen Ort für  $E_3$  bildet, wird gefunden, indem man  $OK$  unter dem Winkel  $\varphi$  gegen  $E_1O$ , und  $GK$  unter rechtem Winkel zu  $E_1O$  zieht. Nunmehr können wir den Werth jeder der Grössen, die in der Figur dargestellt sind, für einen gegebenen Werth von  $E_1E_3$ , der elektromotorischen Gegenkraft der Triebmaschine, finden. Obwohl wir  $OE_1$  als Darstellung der in den Leitern des Stromerzeugers inducirten elektro-

1) R. V. Picou, „Transmission de Force par Moteurs alternatifs synchrones“, Bull. Soc. Int. Électriciens, Februar 1895.

motorischen Kraft gewählt haben, sind doch alle die oben gegebenen Uhrdiagramme ebensogut anwendbar auf den Fall, dass  $OE_1$  die elektromotorische Kraft an den Klemmen der Triebmaschine darstellt; dann sind nur unter  $R$  und  $L$  der Widerstand und die Selbstinduction der Triebmaschine allein zu verstehen. Wir sehen, dass in der letzten Figur der Strom hinter der wirkenden elektromotorischen Kraft  $E_1O$  um den Winkel  $\beta$  zurückbleibt. Wenn wir  $E_1E_3$  verkleinern, wächst  $\beta$ , während  $Ri$  ebenfalls abnimmt. Das heisst, wenn wir die Erregung der Triebmaschine vermindern, wächst die Verzögerung des Stromes gegenüber der wirkenden elektromotorischen Kraft, und mit ihr der Strom. Wenn wir andererseits die Erregung verstärken, sehen wir aus der Figur, dass, während  $E_3$  sich nach  $M$  bewegt, der Winkel  $\beta$  gleich Null wird, wobei der Strom ein Minimum<sup>1)</sup> wird.

Eine weitere Vermehrung der elektromotorischen Gegenkraft der Triebmaschine bewirkt ein Ansteigen des Stromes, aber, statt dass letzterer hinter der wirkenden elektromotorischen Kraft zurückbleibt, eilt er ihr voran, die Triebmaschine wirkt hierbei in der That wie ein in den Stromkreis eingeschalteter Condensator. Wenn wir eine Curve aufzeichnen aus den Werthen der elektromotorischen Gegenkraft der Triebmaschine (oder des Erregerstromes, wenn beide einander proportional sind) als Abscissen und dem Ankerstrom als Ordinaten, erhalten wir eine V-förmige Curve, welche zeigt, dass der Ankerstrom bis zu einem gewissen Minimum abnimmt und dann wieder mit der elektromotorischen Gegenkraft zunimmt.

Mordey<sup>2)</sup> erhielt von einer Wechselstrommaschine für 50 Kilowatt, die als unbelastete Triebmaschine lief, die in Fig. 454 gezeichnete Curve. Die Werthe des Stromes in der Feldmagnetwicklung des Motors sind als Abscissen, die des Ankerstromes als Ordinaten aufgetragen.

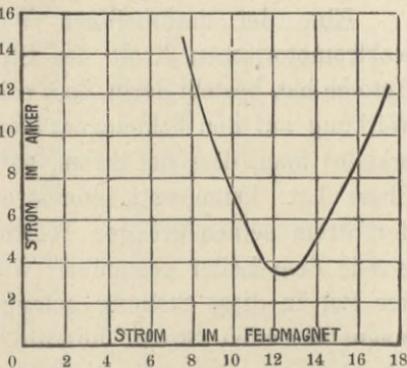


Fig. 454.

1) Blondel, „Coplages et Synchronisation des Alternateurs“, La Lumière Électrique, Bd. 45, S. 423 bis 563. 1892.

2) „On Testing and Working of Alternators“, Inst. Electr. Eng., Febr. 1893.

Bedell und Ryan<sup>1)</sup> haben eine ähnliche Curve für eine kleine Wechselstrommaschine von Westinghouse gegeben mit allen Einzelheiten über die elektromotorischen Kräfte von Stromerzeuger und Triebmaschine und über die Verzögerungswinkel, und haben darnach Uhrdiagramme für verschiedene Punkte der Curve entworfen, um zu zeigen, dass die Theorie mit der Praxis übereinstimmt.

Die Eigenschaft einer übererregten synchronen Triebmaschine, den Strom gegen die wirkende elektromotorische Kraft voraneilen zu lassen, würde diese Maschine sehr geeignet machen, in Stromkreisen, in welchen sich Stromwandler befinden, die im Sinne einer Stromverzögerung wirken, dem entgegen zu arbeiten und damit den Wirkungsgrad zu vergrössern.

Eine der nachtheiligen Wirkungen, welche eine hinter der elektromotorischen Kraft des Stromerzeugers verzögerter Strom im Gefolge hat, besteht darin, dass solch ein Strom eine entmagnetisirende Wirkung auf den Feldmagnet ausübt (vergl. Seite 566). Aus Fig. 446 erkennt man, dass der Strom, so lange er mit der Spannung gleiche Phase hat, keine entmagnetisirende Wirkung ausübt; denn wenn der Strom seinen grössten Werth erreicht hat, steht der Magnetpol gerade dem Leiter gegenüber, wie bei  $A_1$  der Fig. 446. Kurz bevor der Pol in diese Stellung gelangt, unterstützt der Ankerstrom den magnetisirenden Strom, unmittelbar nachdem diese Stellung überschritten ist, arbeitet er dem letzteren entgegen, so dass im Ganzen die mittlere Stärke des Magnets nicht geändert wird, obwohl die grösste elektromotorische Kraft des Ankers wahrscheinlich etwas später eintritt, als es sonst der Fall sein würde. Wenn aber der Strom etwas in der Phase zurückbleibt, dann erreicht der Strom gerade dann seinen höchsten Werth, wenn der Pol an seiner mittleren Stellung eben vorbeigekommen ist. Dadurch wird nun eine kräftige entmagnetisirende Wirkung und somit ein Spannungsabfall hervorgerufen, wenn nicht die Erregung der Feldmagnete verstärkt wird. Wenn dagegen der Strom voraneilt, erreicht er seinen Höchstwerth, wenn der Pol sich dem Leiter nähert, wodurch die Magnetisirung und somit die Spannung erhöht werden. Wenn Stromerzeuger und Triebmaschine entgegengesetzte Phase haben, wird ein Strom, der gegen die eine Maschine verzögert ist, gegen die andere voraneilen; wenn man daher einen untererregten synchronen Motor mit

1) „Action of a Single-phase Synchronous Motor“, Journ. of the Franklin Institute, März 1895.

einem Stromerzeuger, dessen Strom verzögert ist, zusammenschaltet, hat der Generator das Bestreben, die Spannung fallen zu lassen, der Motor umgekehrt wird seine Spannung erhöhen. Wenn man die Erregung der Triebmaschine allmählich steigert, wächst auch die Spannung des Stromerzeugers wegen der Voreilung der Stromphase. Dies ist sehr klar in der oben erwähnten Abhandlung von Bedell und Ryan entwickelt.

Picou fand, dass, wenn er die in Fig. 453 gegebene Construction auf einen praktischen Fall anwendete, die dann mehrere Tausend Volt darstellenden Linien gegenüber  $E_1E_3$  so gross werden, dass die Bögen der Kreise  $E_1FO$  und  $CHJ$  als gerade Linien, und  $OE_1$  als parallel  $E_1E_3$  angesehen werden können. Die Construction wird dann noch einfacher. Ein Beispiel ist in der oben erwähnten Abhandlung von Picou ausgeführt.

Aus der oben gegebenen graphischen Darstellung lassen sich noch einige interessante Ableitungen machen. Es ist klar, dass es bei einer gewöhnlichen Kraftübertragung am vortheilhaftesten ist, die Erregung der Triebmaschine so zu wählen, dass der Strom mit der

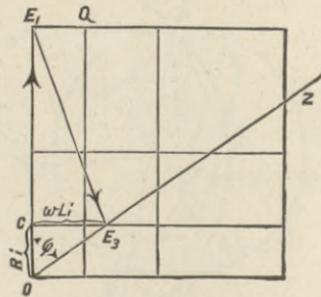


Fig. 455.

wirkenden elektromotorischen Kraft gleiche Phase hat. Unter Bezugnahme auf Fig. 453 wollen wir die Bedingung aufstellen, dass  $Ri$  mit der Linie  $OE_1$  zusammenfällt, wir erhalten dann das in Fig. 453 dargestellte Diagramm, wenn wir die Linie  $OZ$  unter dem Winkel  $\varphi$  gegen  $OE_1$  ziehen. Für jede gegebene Belastung der Triebmaschine giebt es dann für den Strom nur einen bestimmten Werth, der der vorgeschriebenen Bedingung genügt: die Linie  $OC$ , welche  $Ri$  dar-

stellt, muss so lang sein, dass  $\frac{EC \cdot CO}{2R}$  gleich der gegebenen Leistung

ist. Ziehen wir nun  $CE_3$  unter rechtem Winkel zu  $OE_1$  bis zum Schnitt mit  $OZ$ , dann stellt  $E_1E_3$  die elektromotorische Gegenkraft der Triebmaschine nach Grösse und Phase dar. Verändern wir nun die Leistung, so bewegt sich  $C$  entlang  $OE_1$ , und  $E_3$  entlang  $OZ$ , da die Leistung der Triebmaschine stets gleich der Fläche des Rechtecks  $CQ$  dividirt durch  $2R$ , und diejenige des Stromerzeugers gleich der Fläche des Rechtecks  $OQ$  dividirt durch  $2R$  ist. Wenn die Leistung Null ist, wird  $E_1E_3 = E_1O$ , der Strom ebenfalls gleich Null. Die Leistung wird am grössten, wenn  $CQ$  ein Quadrat ist.

Aus der Figur sehen wir, dass dann die maximale Leistung  $= \frac{E_1^2}{4R}$  und da  $Ri$  gleich  $\frac{1}{2}E_1$ , der Wirkungsgrad gleich 50 Procent ist. Wir sehen hieraus, dass Jacobi's Gesetz und die Seite 468 gegebene Construction nicht nur für Gleichstrommotoren gelten, sondern in gleicher Weise auch auf synchrone Wechselstrommotoren anwendbar sind. Die elektromotorische Gegenkraft der Triebmaschine bei einer vorgeschriebenen Leistung kann ohne Weiteres aus der Figur entnommen werden.

Wir können noch die Veränderungen des Stromes und der elektromotorischen Gegenkraft, wenn die Leistung gleich Null ist, in folgender Weise darstellen.

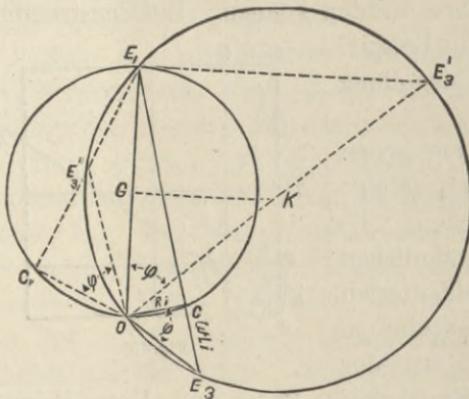


Fig. 456.

$Ri$  (Fig. 456) ist unter rechtem Winkel zu  $E_1E_3$  gezogen, weil die Phase des Stromes, wenn die Leistung Null ist, unter rechtem Winkel zu derjenigen der elektromotorischen Gegenkraft der Triebmaschine steht. Wenn wir den Werth von  $E_1E_3$  verändern, muss der geometrische Ort des Punktes  $C$  der Kreis  $OCE_1$  sein; aus

dem Seite 632 erwähnten Grunde ist der Ort für  $E_3$  ebenfalls ein Kreis, dessen Mittelpunkt in  $K$  liegt.

Wenn wir eine Curve aufzeichnen, indem wir die elektromotorische Gegenkraft als Abscisse und den Ankerstrom als Ordinate auftragen, so finden wir, dass sie die Form der in Fig. 457 stark ausgezogenen Linie hat. Wenn wir damit beginnen, dass wir  $E_3$  mit  $O$  zusammenfallen lassen, erhalten wir in Fig. 457 den Eckpunkt  $C_0$ . Vergrössern wir nur die elektromotorische Gegenkraft, indem wir von  $O$  aus den Kreis  $OE_3E_1$  der Fig. 456 durchlaufen, so nimmt auch der Strom zu, bis wir den Punkt  $E_3'$  erreichen, wo der Strom seinen Höchstwerth erreicht.  $Ri$  ist dann gleich  $E_1$ , also der Strom  $i = \frac{E_1}{R}$ . Stände der Motor still, so würde der

Ankerstrom nur gleich  $\frac{E_1}{\text{Impedanz}}$  sein, wenn er aber läuft, kann die elektromotorische Gegenkraft in Grösse und Phase so abgeglichen

werden, dass sie die Selbstinduction des Ankers völlig aufhebt, so dass der Strom dann gleich  $\frac{E_1}{R}$  wird. Praktisch würde sich der obere Theil der Curve in Fig. 457 nur schwer ausführen lassen, wofern nicht der Motor gezwungen wird, die Phasenverhältnisse beizubehalten, theoretisch aber können wir  $E_3$  verfolgen bis zum Zusammentreffen mit  $E_1$ .

Die Curve  $C_0 E_3' E_1$  der Fig. 457 bildet in Wirklichkeit einen Theil einer punktirt gezeichneten Ellipse, deren Gleichung weiter unten aufgestellt wird. Wenn wir  $E_3$  weiter auf dem Kreise der Fig. 456 verfolgen, bis wir nach  $E_1$  kommen, dann entsteht die Frage, ob wir der elektromotorischen Gegenkraft beim Aufzeichnen der Curve, Fig. 457, das positive oder negative Zeichen geben sollen. Die Gegenkraft würde, wenn sie durch Null gegangen ist, theoretisch negativ zu setzen sein, wodurch wir in den punktirten Theil der Curve gelangen würden; wir wollen aber die Gegenkraft als positiv ansehen; dann erhalten wir die stark ausgezogene Linie  $E_1 C_0$ . Diese bildet einen Theil einer anderen, der ersten ähnlichen Ellipse, deren Hauptachse schräg zur Achse der ersteren liegt. Wenn wir die Gegenkraft und den Strom nicht aus der Fig. 456, wo die Leistung gleich Null ist, entnehmen, sondern aus einem Uhrdiagramm, wie dem der Fig. 453, wo die Leistung einen bestimmten Werth hat, würden wir Curven wie die dünn ausgezogenen der Fig. 457 erhalten; die Flächeninhalte der Curven würden kleiner und kleiner werden, wenn die Leistung grösser wird, bis bei der Maximalleistung die Curve zu einem Punkte zusammenschrumpfen würde, der den Strom =  $\frac{E_1}{2R}$

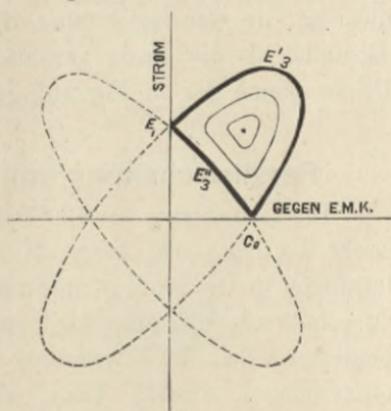


Fig. 457.

und die Gegenkraft =  $\frac{E_1 \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}{2R}$  darstellen würde. Die unteren Ecken dieser Curven sind die Seite 633 erwähnten V-förmigen Curven. Die Gleichung der Curven ist einfach abzuleiten; wenn wir uns erinnern, dass die Linien  $OE_1$ ,  $E_1 E_3$  und  $OE_3$  in der Fig. 452, bezw. die elektromotorischen Kräfte  $E_1$ ,  $E_2$

und  $iT$  darstellen, wo  $T$ , die Impedanz,  $= \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$  ist, erhalten wir

$$E_1^2 = E_2^2 + i^2 T^2 + 2 E_1 \cdot iT \cos \psi \dots (1)$$

und (Fig. 452)  $\cos \psi = \cos (\varphi - \eta) = \cos \varphi \cos \eta + \sin \varphi \sin \eta$ .

Ferner ist  $\cos \varphi = \frac{R}{T}$ ,  $\sin \varphi = \frac{\omega L}{T}$ ,

und  $\cos \eta = \frac{P}{E_2 i}$ ,  $\sin \eta = \sqrt{1 - \left(\frac{P}{E_2 i}\right)^2}$ ,

wo  $P =$  der Leistung des Motors ist.

Setzen wir diese Werthe in (1) ein, so erhalten wir

$$E_1^2 - E_2^2 - i^2 T^2 - 2RP = 2\omega L \sqrt{i^2 E_2^2 - P^2};$$

dies ist die Grundgleichung der Synchronmotoren<sup>1)</sup>. Nehmen wir  $E_2$  und  $i$  als die einzig veränderlichen Grössen, so erhalten wir eine Curve gleich der in Fig. 455 für jeden Werth von  $P$ .

### Parallelschaltung von Wechselstrommaschinen.

Die Grundsätze für das Parallelschalten sind in Fig. 450 untersucht worden.  $OE_1$  kann als Darstellung der zwischen den Hauptleitungen herrschenden Spannung angesehen werden. Die parallel zu schaltende Maschine wird angelassen, und ihre Erregung wird so bemessen, dass ihre Spannung  $OE_2$  gleich  $OE_1$  ist. Bevor sie nun eingeschaltet werden kann, muss der Synchronismus hergestellt werden, d. h. sie muss nicht nur mit derselben Geschwindigkeit laufen, sondern es müssen auch die Schwankungen ihrer elektromotorischen Kraft in Tritt mit jenen der Hauptleitungen kommen. Hierzu sind besondere Vorrichtungen erforderlich. Fig. 458 zeigt das Prinzip einer solchen Vorrichtung. Eine Glühlampe wird von zwei in Reihe geschalteten Transformatoren gespeist: Die primäre Wickelung des einen Transformators ist mit den Hauptleitungen, diejenige des zweiten mit der einzuschaltenden Wechselstrommaschine verbunden. Die Verbindungen sind so hergestellt, dass, wenn die Maschinen synchron laufen, die secundären Wickelungen beider Transformatoren einander in der Stromlieferung für die Lampe unterstützen, und gegeneinander wirken, solange der Synchronismus

1) Steinmetz, „Theory of the Synchronous Motor“, Amer. Inst. Electr. Eng., Okt. 1894; Rhodes, „A Theory of the Synchronous Motor“, Proc. Phys. Soc., 26. April 1895, Phil. Mag., Juli 1895. Auch „Alternate Current Motors“, Electr. Review, Bd. 37, S. 182, 222.

noch nicht hergestellt ist. Solange die einzuschaltende Maschine nicht synchron läuft, kommt sie abwechselnd in und ausser Tritt, die Lampe leuchtet also abwechselnd rasch auf und erlischt wieder. Dann wird der Dampfzufluss zur Maschine verändert, die Lampe blitzt in immer grösseren Zwischenräumen auf, bis zuletzt ein Zeitraum von mehreren Secunden zwischen hellstem Glanz und gänzlicher Verdunkelung liegt. Nun werden gerade im Moment des hellsten Aufleuchtens, während gleichzeitig der Spannungsmesser  $V$  die volle Spannung anzeigt, die Ausschalter geschlossen; dann strahlt die Lampe dauernd ohne Schwankungen in der Helligkeit und zeigt dadurch an, dass die Spannung der Maschine mit der

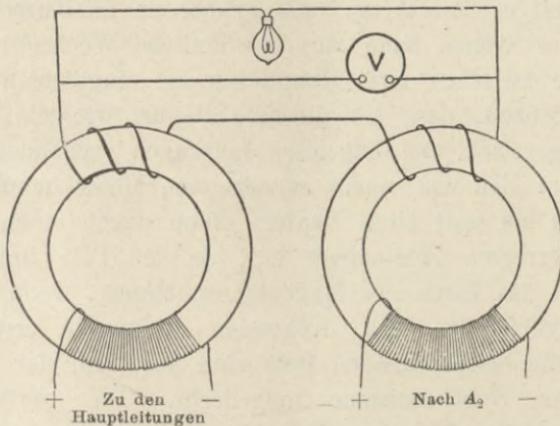


Fig. 458.

Spannung der Hauptleitungen im Tritt ist. Wenn jetzt der Dampfzufluss etwas vergrössert wird, wird die Maschine einen Theil der Belastung übernehmen. Der Stromantheil, den sie liefert, hängt nun ganz von dem Dampfquantum ab, das der treibenden Maschine zugeführt wird. Würde jetzt der Dampf abgesperrt, so würde die Dynamomaschine als Motor laufen und die Dampfmaschine umtreiben. Fig. 450 zeigt nicht den dem äusseren Kreise zugeführten Hauptstrom, sie zeigt nur die resultirende elektromotorische Kraft  $OE_3$  im Wechselstromkreise (vergl. Fig. 445), welche auftritt, wenn  $A_2$  ein wenig zurückbleiben würde. Diese resultirende elektromotorische Kraft erzeugt einen Strom, welcher wegen der Selbstinduction des Stromkreises um mehr als 90 Grad in der Phase verschieden ist von dem der zurückbleibenden Maschine, und daher der Letzteren Kraft liefert und ihre Geschwindigkeit wieder erhöht. Man sieht aus der Figur, dass der durch  $OD$  dargestellte Strom (bei einer

bestimmten Verzögerung der Maschine) am grössten ist, wenn der Winkel  $\varphi$  45 Grad beträgt; d. h. wenn im Wechselstromkreis  $R = \omega L$  ist. Bei sorgfältig entworfenen Maschinen werden  $R$  und  $L$  so klein als möglich gehalten. Es ist genügend, wenn  $R$  ungefähr gleich  $\omega L$  ist.

### Synchrone Mehrphasen-Triebmaschinen.

Ein Mehrphasensystem der Stromvertheilung, welches grosse Vortheile zum Betriebe selbstangehender Triebmaschinen darbietet, schliesst nicht die Möglichkeit aus, synchrone Triebmaschinen in den Fällen anzuschliessen, wo völlige Uebereinstimmung der Geschwindigkeit erwünscht ist. Als synchrone Triebmaschine für ein mehrphasiges System kann eine gewöhnliche Wechselstrommaschine dienen, die zwischen zwei Hauptleitungen eingeschaltet ist; es ist aber vorzuziehen, dass sie dieselbe Bauart wie die Mehrphasen-Stromerzeuger hat, und mit allen Leitungen verbunden ist. Diese unterscheidet sich von einem asynchronen Motor hauptsächlich dadurch, dass sie statt eines Läufers einen durch einen Gleichstrom besonders erregten Feldmagnet hat; da die Pole immer dieselbe Lage gegen das Eisen des Magnets einnehmen, wenn sie erst die Geschwindigkeit der sich drehenden Ankerpole erreicht haben, so halten die entsprechenden Pole sich fest, und der Magnet wird mit völligem Synchronismus umgedreht. Die gewöhnliche einphasige synchrone Triebmaschine muss, wie wir gesehen haben, durch eine unabhängige Kraftquelle bis zur normalen Geschwindigkeit angetrieben werden; bei einem mehrphasigen System aber ist das Drehfeld, welches auf die in den Polstücken des Feldmagnets versenkten Leiter wirkt, hinreichend, den Motor in Gang zu setzen. Daher ist es möglich, das Prinzip eines mehrphasigen asynchronen Motors soweit mit dem eines wirklich synchronen Motors zu vereinigen, dass Ersterer fähig ist, von selbst anzugehen und, nachdem er die passende Geschwindigkeit erlangt hat, dieselbe bei allen Belastungen ebenso gleichmässig wie der Stromerzeuger zu halten. Es ist zu beachten, dass ein mehrphasiger Stromerzeuger, obwohl er immer wie eine synchrone Triebmaschine wirkt, doch nicht nothwendigerweise von selbst angeht. Sein Aufbau muss das Entstehen von Strömen in den Polschuhen erleichtern, wenn er von selbst angehen soll. Ein Beispiel einer ausgezeichneten Anlage von Synchronmotoren dieser Art ist in den Ponemah-Baumwollenfabriken in den Vereinigten

Staaten von Amerika in Taftville, Conn.<sup>1)</sup> zu finden. Dort werden 600 P nach dem Dreiphasensystem mit einer Spannung von 2500 Volt von einer drei englische Meilen entfernten Fabrik, wo Wasserkraft verfügbar ist, übertragen. Die Triebmaschinen haben die gleiche Bauart wie die Stromerzeuger, sie gehen von selbst an und laufen unter Belastung vollkommen synchron. Der Wirkungsgrad der ganzen Kraftübertragung, gerechnet von der Riemenscheibe des Stromerzeugers bis zu der der Triebmaschine, wird zu 80 Procent angegeben.

---

1) Electr. Review (N. Y.), Bd. 24, S. 210. 1894; und ebenda, Bd. 27, S. 82. 1895.

## Kapitel XXV.

### Asynchrone Triebmaschinen.

---

Triebmaschinen, deren Drehung durch die Wirkung des sich drehenden Feldes auf die von letzterem inducirten Ströme hervor gebracht wird, bieten den baulichen Vortheil, dass sie ohne Stromwender und sogar ohne irgend eine Art von Gleitcontacten hergestellt werden können. Die Induction dieser Ströme in einer feststehenden Construction ist an die Bedingung geknüpft, dass der Umlauf asynchron ist, d. h. dass die Umdrehungen des beweglichen Theiles nicht übereinstimmen mit dem Wechsel der wirkenden Ströme.

Asynchrone Triebmaschinen lassen sich eintheilen in mehrphasige und einphasige Maschinen. Bei der ersteren Art werden zwei oder mehr Wechselströme von gleicher Periode, aber verschiedener Phase dazu verwendet, das weiter unten erklärte sogen. magnetische Drehfeld hervorzubringen; dasselbe hat das Bestreben, inducirte Ströme in allen in seinem Bereiche liegenden Leitermassen hervorzurufen und durch die Gegenwirkung dieser Ströme diese Massen mechanisch in Drehung zu versetzen. Bei den einphasigen Triebmaschinen wird ein einfaches schwingendes oder Wechselfeld durch einen Wechselstrom hervorgerufen, und dieses wird, indem es auf ein sich drehendes System von Leitern wirkt, durch die Einwirkung der inducirten Ströme in ein Drehfeld umgewandelt, welches eine treibende Kraft auszuüben vermag.

Da dieser Gegenstand ausführlich in des Verfassers Werke: Mehrphasige elektrische Ströme und Wechselstrommotoren <sup>1)</sup> behandelt ist, können wir uns hier kurz fassen.

---

1) Silv. P. Thompson, Polyphase electric currents and alternate current motors. London 1895. E. & F. N. Spon. — Deutsche Uebersetzung von K. Strecker. Halle a. S. 1896. Wilhelm Knapp.

Entstehung eines magnetischen Drehfeldes. Wenn ein Wechselstrom durch eine Spule geleitet wird, so erzeugt er in der Richtung der Achse der Spule ein magnetisches schwingendes oder Wechselfeld.

Besteht der Kern aus Eisen, so werden die Kraftlinien, die ihn durchziehen, Wechsellinien sein, d. h. sie werden ein Feld bilden, welches zu einem höchsten Werth ansteigt, abnimmt bis zu Null, die Richtung umkehrt, bis zum höchsten Werth in der neuen Richtung steigt und wieder zu Null abnimmt, um den Lauf von Neuem zu beginnen. Die Wechselgeschwindigkeit dieses Wechselfeldes ist dieselbe, wie die der äusseren magnetisirenden Kraft, d. h. des Stromes.

Bekanntlich kann eine gleichförmige Kreisbewegung zerlegt werden in zwei rechtwinklig zu einander stehende geradlinige

harmonische Bewegungen, welche gleiche Schwingungsweite, gleiche Periode und einen Phasenunterschied von einer Viertelperiode haben. Es sei  $P$  ein Punkt, der mit gleichmässiger Geschwindigkeit um einen Mittelpunkt  $O$  umläuft. Die Projectionen des Radius  $OP$  auf die zwei Achsen (Fig. 459) sind  $OM$  und  $ON$ . Wird der Radius  $OP$  mit  $r$  bezeichnet, so

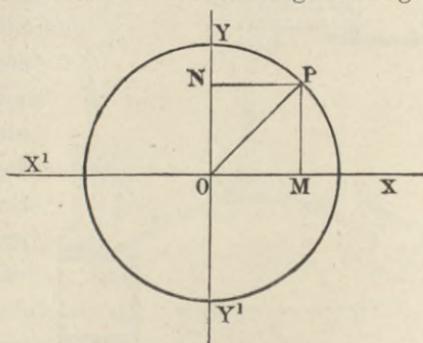


Fig. 459. Deprez' Theorem.

haben wir  $ON = r \sin \vartheta$  und  $OM = r \cos \vartheta = r \sin (\vartheta + 90)$  Grad. Während  $P$  umläuft, schwingt der Punkt  $N$  auf der Geraden  $YY'$  auf und nieder; die Weite seiner Schwingung ist gleich dem Halbmesser des Kreises. Ebenso schwingt der Punkt  $M$  längs der Linie  $XX'$  mit derselben Schwingungsweite und in derselben Zeit; aber  $ON$  wird seinen grössten Werth erreichen, wenn  $OM$  gerade Null ist, und umgekehrt. Es folgt daraus, dass eine gleichmässige Kreisbewegung erzeugt werden kann durch Zusammensetzung zweier geradliniger Bewegungen, die im rechten Winkel zu einander stehen, vorausgesetzt, dass sie harmonisch, von gleicher Periode und gleicher Schwingungsweite sind und einen Phasenunterschied von genau einer Viertelperiode haben.

In mechanischer Beziehung ist diese Bewegung gleichwerthig derjenigen zweier Kolben von gleichem Wege, die mittels zweier Lenkstangen auf dieselbe Kurbel arbeiten, während sie selbst im

rechten Winkel zu einander stehen (Fig. 460). Wenn man die beiden Cylinder geradlinige Bewegungen erzeugen lässt, von denen die eine der anderen um eine Viertelperiode voraneilt, so vereinigt der Apparat diese Bewegungen zu einer genauen Kreisbewegung. Liegen die Cylinder parallel zu einander, so sind zwei Kurbeln erforderlich.

Eine ähnliche Construction kann magnetisch ausgeführt werden<sup>1)</sup>. Wenn ein Wechselstrom durch eine Spule geleitet wird, so dass er ein schwingendes magnetisches Feld oder Wechselfeld längs der Linie  $OX$  hervorbringt, und wenn man zugleich einen zweiten Wechselstrom durch eine zweite Spule schickt, die ein zweites Wechselfeld längs der Linie  $OY$  erzeugt, so wird das Ergebniss ein magnetisches Drehfeld sein, voraus-

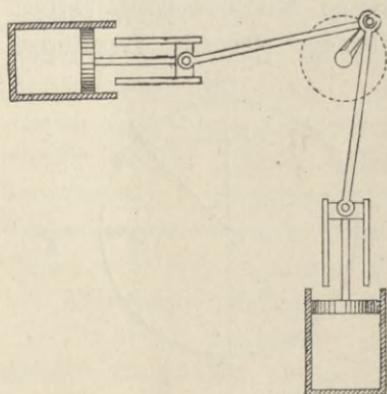


Fig. 460. Zweicylinder-Dampfmaschine.

gesetzt, dass die beiden Magnetfelder gleiche Periode und Schwingungsweite und einen Phasenunterschied von genau einer Viertelperiode besitzen. Wenn sie zwar gleiche Periode, aber nicht genau gleiche Schwingungsweite haben, so wird das Ergebniss gleichwerthig sein mit einem elliptischen Drehfeld, d. h. einem solchen, in dem Stärke und Richtung durch die aufeinanderfolgenden Werthe des vom Mittel-

punkte aus gezogenen Radius vector einer Ellipse dargestellt werden, wenn dieser Radius vector in gleichen Zeiträumen über gleiche Flächenräume streicht. Ein elliptisches Drehfeld wird auch erzeugt, wenn die beiden zusammensetzenden magnetischen Felder zwar gleich in Periode und Schwingungsweite sind, aber nicht genau eine Viertelperiode Phasenunterschied haben. Soll ein vollkommenes Drehfeld, welches der gleichförmigen Kreisbewegung entspricht, entstehen, so müssen die beiden Componenten sich genau wie der Sinus und Cosinus eines Winkels ändern<sup>2)</sup>.

Das Zweiphasensystem von Strömen zur Hervorbringung eines Drehfeldes ist das elektrische Analogon des Zweikurbelmechanismus. Dies ist aber durchaus nicht die einzige Anordnung, welche ein

1) Deprez, Comptes Rendus, Bd. 2, S. 1193. 1883.

2) Ferraris, Rotazioni elettrodinamiche. Turin. Acad., März 1888.

magnetisches Drehfeld erzeugen kann. Die mechanischen Analogien der Dreicylinder-Dampfmaschinen und der dreistiefeligen Pumpe liefern noch andere Lösungen. Im ersten Falle werden drei Cylinder benutzt, deren drei Kolben in aufeinanderfolgenden Phasen mit einem Unterschied von einer Drittelperiode arbeiten.

Wenn (wie in der Brotherhood'schen Maschine), Fig. 461, drei Cylinder mit 120 Grad Abstand und Neigung gegeneinander angebracht werden, so können ihre Stangen auf eine einzige Kurbel arbeiten. Wenn die drei Cylinder nebeneinander gesetzt werden, so braucht man drei Kurbeln, die in Stellungen von 120 Grad Winkelabstand angebracht werden. Wenn dieser Winkelabstand nicht genau eingehalten wird, so sind die Phasenunterschiede der Bewegungen nicht genau gleich einer Drittelperiode.

Die Phasenunterschiede der Bewegungen müssen dem Winkelabstand am Umfange der Vorrichtung, welche jene vereinigt, entsprechen. Nach einem kinematischen Grundsatz muss bei der Zusammensetzung harmonischer Bewegungen zur Drehung der Winkelabstand in der Anordnung, welche die Vereinigung ausführt, das Supplement desjenigen Winkels

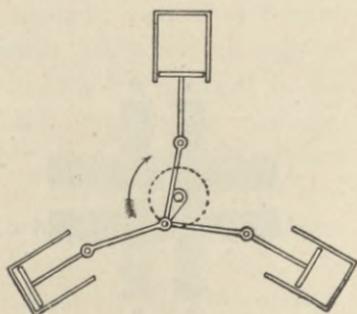


Fig. 461. Dreicylinder-Dampfmaschine.

sein, der die zeitliche Phase der Bewegung angiebt; andernfalls erhält man keine gleichmässige Drehung.

Das Dreiphasensystem (Drehstrom), welches ein Drehfeld zu erzeugen vermag, ist die elektrische Analogie des Dreikurbel-Mechanismus.

Wir haben also zwei Hauptfälle — die Zweiphasen-Methode (bisweilen auch die Quadratur-, oder, weniger correct, die Viertelphasen-Methode genannt) und die Dreiphasen-Methode (nach Dobrowolsky als Drehstrom bezeichnet). Der erste zweiphasige Inductionsmotor wurde von Baily 1879 beschrieben. Der Gedanke, durch geeignete Combination von zwei oder mehr Wechselströmen von verschiedener Phase eine Drehung hervorzurufen, scheint in den Jahren 1885 bis 1888 Mehreren unabhängig voneinander gekommen zu sein, wie Ferraris, Bradley, Tesla, Borel und von Dolivo-Dobrowolsky. Ferraris fand, dass in einem solchen Felde nicht nur drehbare Magnete umliefen, sondern auch massive und geblätterte

Eisenmassen, sowie Scheiben und Cylinder aus Kupfer. Der Zug auf diese wird infolge der in ihnen erzeugten Wirbelströme hervorgerufen, ebenso wie dies bei den Versuchen von Arago eintritt, bei denen durch einen umlaufenden Magnet Kupferscheiben in Drehung versetzt werden. Die Fig. 462 zeigt eine einfache Form der Triebmaschine von Ferraris. Der Apparat besteht aus einem kupfernen Cylinder, der innerhalb zweier Spulensätze  $AA$  und  $BB$  drehbar ist. Die Spulen liegen rechtwinklig zu einander.

Ferraris untersuchte die Theorie der Vorrichtung und fand, dass die Inductionswirkung proportional ist dem Schlupf<sup>1)</sup> oder dem Gleitungsverlust, d. h. dem Unterschied zwischen der Winkelgeschwindigkeit des Magnetfeldes und derjenigen des sich drehenden Cylinders; dass ferner auch der in dem sich drehenden Metall

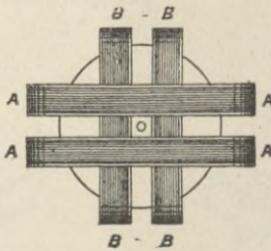


Fig. 462. Triebmaschine mit einfachem Drehfeld.

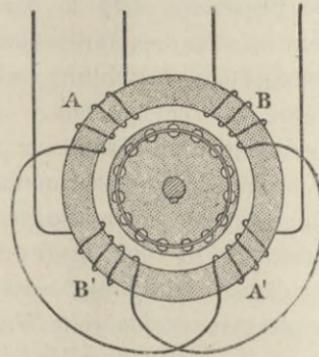


Fig. 463.

inducirte Strom ebenfalls proportional sei dem eben erwähnten Unterschied der Winkelgeschwindigkeiten. Die Leistung der Triebmaschine ist sowohl dem Schlupf als auch der Geschwindigkeit des sich drehenden Theiles proportional.

Betrachten wir einen geblättern Eisenring, Fig. 463, der mit zwei Paar Spulen  $AA_1$  und  $BB_1$  bewickelt ist, die in die Stromkreise eines zweiphasigen Stromerzeugers eingeschaltet sind. In dem Augenblick, wo der Strom in  $AA_1$  sein Maximum erreicht, wird der von  $BB_1$  gleich Null sein, da die Ströme in Quadratur stehen. Die magnetisirende Wirkung von  $AA_1$  strebt nur danach, quer durch den Ring in der Richtung von  $BB_1$  ein Magnetfeld hervorzurufen. In dem Maasse, wie der Strom in  $AA_1$  abnimmt, steigt er in  $BB_1$  an und treibt demnach den Pol vorwärts. Wenn die

1) Dieses Wort ist in der Maschinenkunde seit Langem üblich; vergl. Reuleaux, Constructeur. 3. Aufl. S. 360. 1869 bis 1870.

Ströme in  $AA_1$  und  $BB_1$  gleich geworden sind, wirken  $A$  und  $B$  zusammen wie eine Spule, und  $A_1$  und  $B_1$  wie eine andere, die entstehenden Pole liegen nun rechts zwischen  $B$  und  $A_1$  und links zwischen  $B_1$  und  $A$ . Wenn der Strom in  $BB_1$  seinen höchsten Werth erreicht, liegen die Pole gerade unter den Spulen  $AA_1$ .

Da sonach im Ringe der Maschine eine wandernde Polarität herrscht, so wird jede Eisenmasse, z. B. ein Cylinder, der in das Feld gebracht wird, in Umlauf gelangen, wenn auch nicht unbedingt synchron laufen. Ein Kupfercylinder würde durch die in ihm erzeugten Wirbelströme umgetrieben werden. Wenn der Cylinder mit derselben Geschwindigkeit wie das Magnetfeld sich drehte, würden keine Wirbelströme und keine Triebkraft entstehen: Der drehbare Theil strebt also danach, seine Geschwindigkeit zu steigern bis zum Synchronismus, erreicht ihn aber niemals; denn ohne Schlupf, d. h. ohne Geschwindigkeitsdifferenz, würden keine Ströme inducirt werden. Würden jedoch die Wirbelströme aufs Gerathewohl in der Kupfermasse fließen können, so entstände ein starker Energieverbrauch durch Erwärmung, da die für den Antrieb nützlichen Ströme einzig diejenigen sind, welche im rechten Winkel zu den Kraftlinien und zur Bewegungsrichtung fließen, bezw. bei schräger Richtung die in diese Richtung fallende Componente derselben. Es ist deshalb zweckmässiger, den bewegten Theil als Eisenmasse herzustellen, die von geeigneten geschlossenen Drahtwickelungen umgeben ist, in denen die inducirten Ströme verlaufen.

Eine für kleine Triebmaschinen sehr geeignete Form besteht aus einem geblättern Eisen-cylinder, innerhalb dessen Umfangs eine Anzahl kräftiger isolirter Kupferleiter eingebettet sind, die parallel der Achse liegen, und deren Enden so miteinander verbunden sind, dass eine geschlossene Wickelung entsteht. Ein Kupfer-ring an jedem Ende — der mit den Leitern zusammen eine Art Eichhörnchen-(Triller)käfing aus Kupfer und mit Eisen ausgefüllt bildet — dient dazu, die Leiter kurz zu schliessen. Fig. 464 zeigt eine derartige kurzgeschlossene Bauart.

Werden solche aus Eisen und Kupfer zusammengesetzte Theile zum Umlauf benutzt, so entsteht die Frage, welcher Theil der Maschine als Anker und welcher als Feldmagnet zu betrachten ist. Wird der Ring als Anker betrachtet, so muss man die Vereinigung von Kupfer und Eisen als einen Feldmagnet ansehen, der durch die Wirbelströme im Kupfer selbst magnetisirt wird, und der ununterbrochen die Wanderpole an der Aussenseite aufzuhalten sucht, um

die Wirbelströme auf ein Minimum zu bringen und seine magnetische Polarität constant zu halten. Wird indessen der Ring als gleichwerthig einem umlaufenden Magnet angesehen, so erscheint die Vereinigung von Kupfer und Eisen als Anker, in dem Ströme

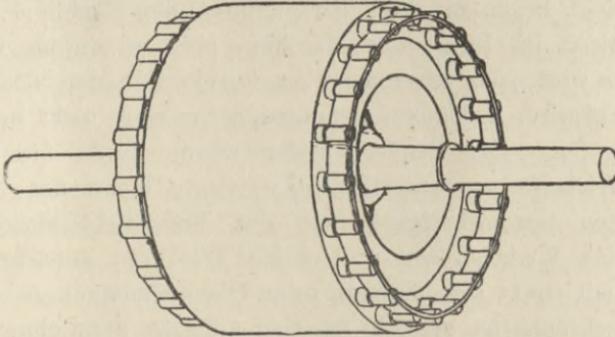


Fig. 464. Umlaufender Theil einer Triebmaschine von Brown.

inducirt werden und der durch die Gegenwirkung dieser Ströme umgetrieben wird. Die erstere Anschauung ist sicherlich die correctere: aber zur Vermeidung von Zweideutigkeit ist es besser,

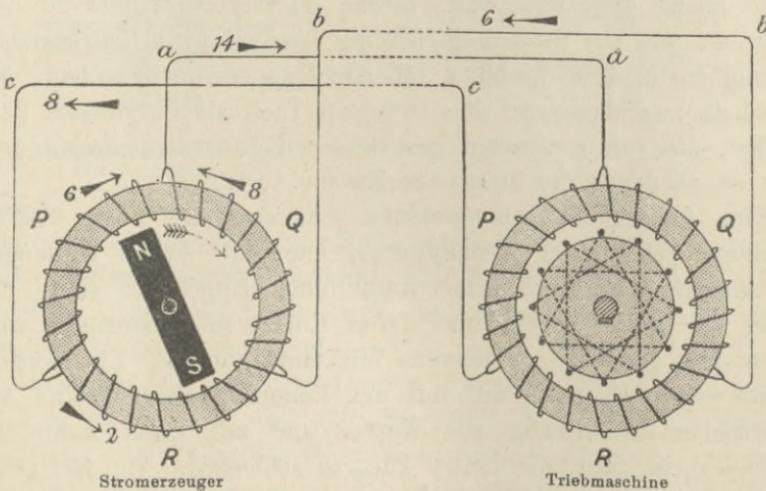


Fig. 465. Darstellung einer dreiphasigen Kraftübertragung.

überhaupt von der Bezeichnung Anker und Feldmagnet abzusehen, und die sich drehende Masse Läufer, die feststehende, welche die Primärströme empfängt, Ständer zu nennen.

Der Fall eines Dreiphasensystems ist in Fig. 463 dargestellt. Der Stromerzeuger wird durch einen innerhalb eines Ringankers sich drehenden Magnet dargestellt, welcher drei um 120 Grad in

der Phase verschobene Ströme erzeugt. Die Ringe sind mit drei Wicklungen versehen, die an ihren Enden vereinigt und mit drei Leitungen verbunden sind. Der Strom in jeder Leitung ist jederzeit gleich der algebraischen Summe der Ströme in den beiden anderen Leitungen. Die Phase der Ströme in jeder Leitung liegt zwischen der Phase der Ströme in den beiden Wicklungen, die Strom entsenden. Im Weiteren liegt in der Triebmaschine der Strom in  $P$  bezüglich der Phase zwischen den Strömen in  $c$  und  $a$ , da er um  $1/12$  Periode dem zugeführten Strom voraneilt.

Bei dem Umlaufe des Magnetes im Stromerzeuger entstehen in dem Ringe der Triebmaschine wandernde Pole. Man bemerkt, dass in diesem Falle die Wicklungen einen geschlossenen Kreis bilden.

Es giebt verschiedene Methoden zur Verbindung der drei Wicklungen, um das umlaufende Feld hervorzubringen.

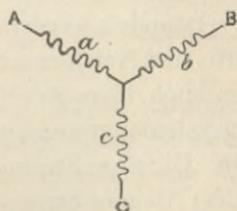


Fig. 466. Sternverbindung.

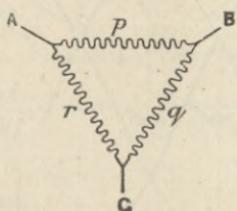


Fig. 467. Netzverbindung.

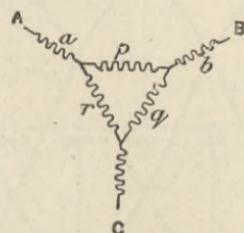


Fig. 468. Vereinigte Stern- und Netzverbindung.

1. Jede der drei Wicklungen kann unabhängig durch zwei Leitungen mit den Enden der entsprechenden Wicklungen der Triebmaschine verbunden werden, so dass sechs Leitungen nothwendig sind.
2. Drei Enden der drei Wicklungen können unabhängig durch drei Leitungen mit den drei entsprechenden Enden der Wicklungen der Triebmaschine verbunden werden, während die drei anderen Enden zu einer gemeinschaftlichen Rückleitung zu führen sind, so dass vier Leitungen nothwendig werden.
3. Die drei Wicklungen  $a$ ,  $b$  und  $c$  können mit ihren einen Enden verbunden werden (Fig. 466); die anderen Enden sind an je eine Leitung angeschlossen.
4. Die drei Wicklungen  $p$ ,  $q$  und  $r$  lassen sich, wie in Fig. 467 angegeben ist, als geschlossenes Netz vereinigen, von dessen Eckpunkten dann die drei Leitungen ausgehen. In diesem Falle liegen die Phasen der Ströme in  $p$ ,  $q$  und  $r$  zwischen den Phasen der drei Ströme in der Linie.

5. Man kann sechs Wickelungen, wie in der Fig. 468 angegeben ist, benutzen. Diese Methode zeigt, wie man die Wirkung von sechs Phasen durch einen dreiphasigen Strom mittels Vereinigung der Stern- und Netzanordnung erhält.

6. Man wickelt eine Wickelung linksgängig anstatt rechtsgängig, so dass die Phase der magnetisirenden Kraft umgekehrt wird. Setzt man z. B. eine umgekehrte Wickelung zu *a* in der Fig. 465 ein, so ergibt sich eine Wirkung, die in der Phase von *a* um 180 Grad verschieden ist und deshalb zwischen *b* und *c* liegt.

Die Fig. 469 zeigt, wie die drei Ströme in der Phase sich überdecken; die Phasendifferenz beträgt hier 120 Grad. Drei Ströme mit einer Phasendifferenz von 60 Grad können ebenfalls den Zweck erfüllen und in drei von 120 Grad durch blosse Umkehrung der

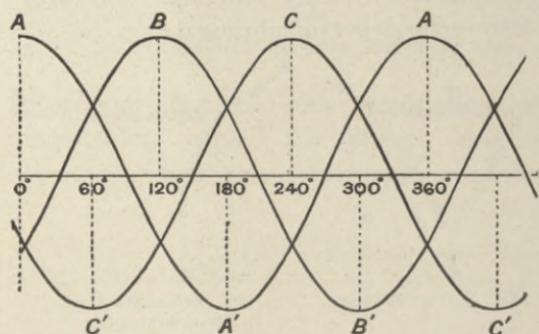


Fig. 469. Dreiphasenstrom - Curven.

Verbindungen einer der Wickelungen an jedem Ende verwandelt werden.

Stern- und Netzformen können auch beim Zweiphasensystem angewendet werden. Die zwei Stromkreise der Niagara-Stromerzeuger sind getrennt gehalten, es sind daher vier Leitungen erforder-

lich; in manchen Fällen würden aber drei Leitungen genügen, wovon die eine als gemeinsame Rückleitung diene. Wenn Netzformen zur Anwendung kommen, weicht der in einer Masche des Netzes durch einen Strommesser ermittelte Werth des Stromes von dem in der Leitung ab. Bei einem Zweiphasensystem ist der Strom

in der Masche  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  des Stromes in der Leitung, bei einem Dreiphasensystem ist dies Verhältniss gleich  $\frac{1}{\sqrt{3}}$ . Bei Sternformen sind die

Ströme in den Leitungen gleich denen in den Verbindungen, dagegen weicht die Spannung zwischen Leitung und Leitung ab von derjenigen zwischen Leitung und Vereinigungspunkt. Bei einem Zweiphasensystem mit vierstrahliger Sternverbindung ist die Spannung zwischen zwei benachbarten Leitungen  $\sqrt{2}$  mal so gross, wie die zwischen Leitung und Vereinigungspunkt; bei einem Dreiphasensystem ist sie  $\sqrt{3}$  mal so gross.

Bradley beschrieb 1887 einen Zweiphasenmotor (Fig. 470) mit Netzverbindungen; der Strom wurde durch vier Schleifringe zugeführt. Dies war indessen ein Synchronmotor mit festem äusseren Feldmagnet. 1889 beschrieb er eine Dreiphasenmaschine mit ähnlichem Anker, der an drei symmetrisch liegenden Punkten mit drei Schleifringen verbunden war.

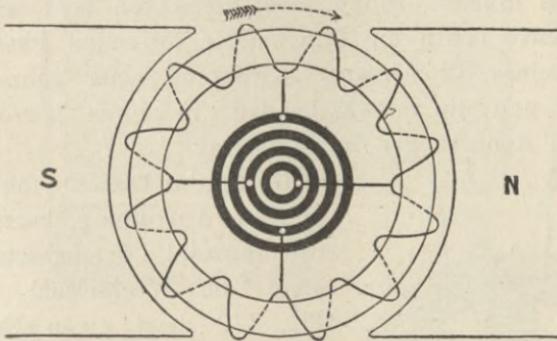


Fig. 470. Zweiphasiger Motor von Bradley.

Tesla entwarf viele Constructionen mit Drehfeld. Fig. 471 zeigt einen Stromerzeuger mit zwei Spulen, deren freie Enden an mehrere auf der Welle sitzende isolirte Contactringe geführt waren.

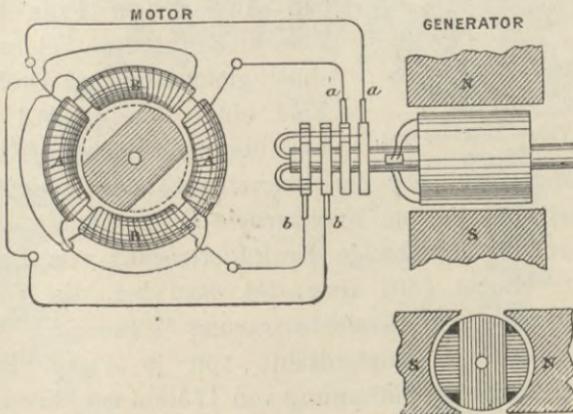


Fig. 471. Tesla's Zweiphasensystem.

Auf den Ringen schleifen vier Bürsten, von denen vier Drähte den Strom zum Motor führen. Dies ist in Wirklichkeit ein einfacher Zweiphasen-Stromerzeuger, der zwei unabhängige, in Quadratur stehende Ströme liefert. Der Motor ist ein Ring mit vier Spulen, von denen je zwei mit zwei Drähten zu einem Stromkreis verbunden sind. Sie arbeiten paarweise zusammen, um ein Feld auf den diametral gegenüberliegenden Theilen des Ringes hervorzubringen.

Innerhalb des Ringes bewegt sich in Zapfen eine Eisenscheibe *D* als Läufer, deren Seiten so weggeschnitten sind, dass sie einen länglichen Körper bildet; derselbe dreht sich so, dass er stets die grösstmögliche Zahl von magnetischen Linien von einer Seite des Ringes zur andern überträgt. Es stellte sich bald heraus, dass diese Form nicht zur Erreichung einer Drehung wesentlich war, da eine kreisrunde Scheibe sich ebenfalls drehte. Durch eine Reihe von acht schematischen Figuren erklärte Tesla die aufeinander folgenden Phasen, welche die Spulen eines Stromerzeugers während einer ganzen Drehung durchlaufen, und die entsprechenden, hierdurch hervorgebrachten magnetischen Aenderungen im Motorring.

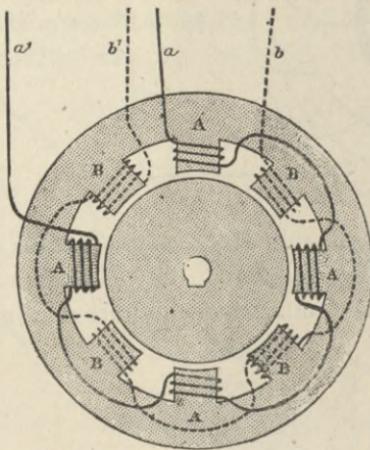


Fig. 472. Vielpolige Anordnung.

Durch die Verwendung einer vielpoligen Anordnung kann die Umdrehungszahl herabgesetzt werden, ohne die Wechselzahl zu ändern. Fig. 472 zeigt einen Entwurf von Tesla mit einem achtpoligen Felde, das vier Pole (abwechselnd N- und S-Pole) in dem Stromkreise *A* und vier zwischenliegende im Kreise *B* hat. In solchem Falle besteht die Verschiebung des Feldes nicht in einer gleichmässigen Drehung. Das Feld eines Poles bei *A* läuft nicht um bis zum nächsten Pole bei *B*.

Es verschwindet vielmehr der Magnetismus des Poles *A*, während neuer Magnetismus in dem Nachbarpole *B* entsteht.

Die berühmte dreiphasige Kraftübertragung von Lauffen nach Frankfurt im Herbst 1891 trug viel dazu bei, die Vortheile der Mehrphasensysteme für Kraftübertragung allgemeiner bekannt zu machen. Durch drei Kupferdrähte von je 4 mm Durchmesser wurden 100 P auf eine Entfernung von 175 km mit einem Wirkungsgrade von 75 Procent übertragen, wobei die Spannung durch Transformatoren auf etwa 8000 Volt erhöht wurde. Einzelheiten über diese Anlage sind in des Verfassers Werk: Mehrphasige elektrische Ströme (s. Fussnote Seite 642) angegeben.

### Neuere mehrphasige Triebmaschinen.

Bei den neueren Motoren sind sowohl Läufer als Ständer aus gestanzten Blechen von Weicheisen aufgebaut, die mit Löchern oder

Schlitz zur Aufnahme der Leiter versehen sind. Fig. 473 stellt in ungefähr  $\frac{1}{4}$  Grösse einen von Brown entworfenen vierpoligen

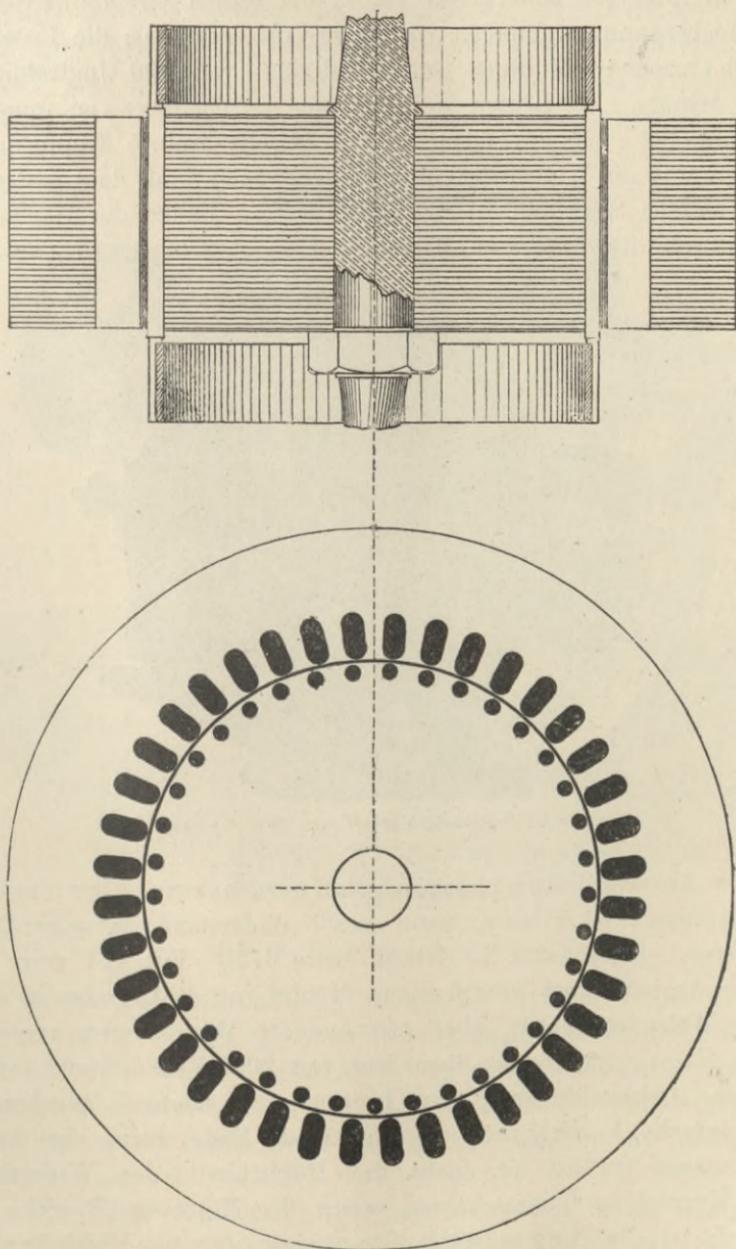


Fig. 473. Bleche für Ständer und Läufer (Brown).

Zweiphasenmotor von 6 P dar; der Läufer hat die Fig. 464 gezeichnete kurzgeschlossene Trillerkäfigform mit 37 Leitern. Dieser Motor soll

bei 100 Volt mit einer Frequenz von 40 Perioden 1200 Umdrehungen in der Minute machen. Tafel XXI giebt maassstäbliche Zeichnungen eines dreiphasigen Motors von 100 P, der seinen Strom unmittelbar aus Hochspannungsleitungen von 5000 Volt entnimmt; die Frequenz ist 40 Perioden bei einer Geschwindigkeit von 600 Umdrehungen in der Minute. Der Läufer, welcher einen Durchmesser von ungefähr 760 mm hat, hat 96 Löcher, durch welche isolirte Kupferdrähte gezogen und als Wellenwicklung so verbunden sind, dass sie einen dreistrahligem Stern bilden; die drei äusseren Enden der Wickelung sind durch die Achse an drei Schleifringe geführt, so dass ein

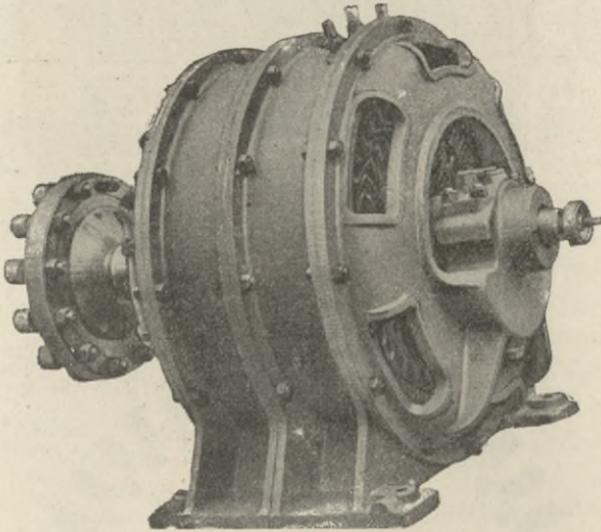


Fig. 474. Zweiphasiger Motor von 120 P (Brown).

äusserer Anlasswiderstand eingeschaltet werden kann. Die Zugkraft beim Anlassen ist grösser, wenn dieser Widerstand im sekundären Stromkreis eingeschaltet ist (vergl. Seite 677). Fig. 474 zeigt die äussere Ansicht eines zweiphasigen Motors von 120 P, der in derselben Weise aufgebaut, aber mit anderen Wickelungen versehen ist, so dass er mit einer Spannung von 2000 Volt arbeitet. Hier ist der Anlasswiderstand im Innern des Läufers angebracht; eine einfache Vorrichtung, die an einem Ende durch die Achse nach aussen geführt ist, giebt die Möglichkeit, den Widerstand durch Kurzschluss auszuschalten, wenn der Motor im Betriebe ist. Dadurch ist die Notwendigkeit der Anbringung von Schleifringen vermieden; der Motor hat keine äusseren Verbindungen irgend welcher Art.

**Motoren der Aktiengesellschaft Elektrizitätswerke vormals  
O. L. Kummer & Co., Dresden.**

Die Motoren werden für Ein-, Zwei- oder Dreiphasensystem nach dem Modell  $\alpha$  (Fig. 475) gebaut, und zwar werden die kleinen Modelle der Mehrphasenmotoren von 0,2 bis 2,5 P ohne Schleifringe ausgeführt und können direct von einer Lichtleitung gespeist werden.

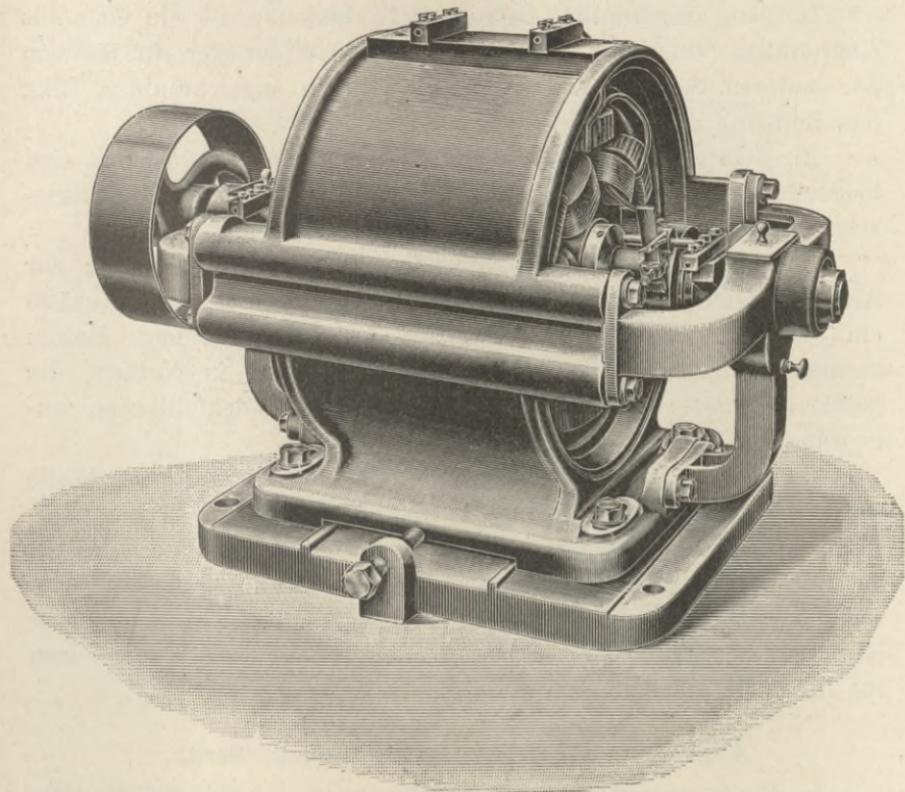


Fig. 475. Wechselstrommotor Modell  $\alpha$ .

Die grösseren Modelle von 3,8 P an werden mit Schleifringen versehen, um ein grösseres Anzugmoment bei geringer Anlaufstromstärke zu erzielen. Für diese Motoren ist es empfehlenswerth, falls ein besonderes Kraftnetz nicht vorhanden ist, Transformatoren vorzusehen, z. B. den später beschriebenen Dreileiter-Transformator mit magnetischem Ausgleich.

Die Einphasenmotoren werden bis  $2\frac{1}{2}$  P ohne Schleifringe gebaut und durch eine besondere Vorrichtung angelassen, welche in der Hauptsache aus einem parallel zur Hälfte der Ständerwicklung geschalteten Widerstande besteht. Die Motoren von  $2\frac{1}{2}$  P aufwärts

werden nur mit Schleifringen ausgeführt und mit Hilfe einer Anlassvorrichtung in Betrieb gesetzt, welche eine Inductionsspule und eine Capacität enthält. Die Motoren laufen mit einem Drehmoment an, welches  $\frac{2}{3}$  des bei normaler Umlaufszahl bestehenden beträgt, ohne dass die Stromstärke die der Normalbelastung entsprechende übersteigt.

Die Construction dieser Motoren ist die folgende:

In dem ringförmigen Gehäuse aus Gusseisen ist ein ebenfalls ringförmiger Vorsprung angegossen, der ein Widerlager für die von der anderen Seite durch einen am Gehäuse angeschraubten Ring aus Rothguss angepressten Bleche bildet.

An dem unteren fussartig erweiterten Theile des Gehäuses sind beiderseits Traversen angeschraubt, die Lager mit doppelter Ringschmierung und Weissmetall-Lagerschalen erhalten.

Die Welle trägt ein sternförmiges Kreuz aus Gusseisen zur Aufnahme der Läuferbleche. Diese werden durch seitliche Ansätze am Kreuze, beiderseitige Kränze aus Rothguss und Bolzen zusammengehalten, und zwar liegen die Bolzen in Nuthen, die halbkreisförmig sowohl im Kreuz als auch in den Blechen angeordnet sind.

Die Stromzuführung erfolgt innerhalb einer Bohrung der Welle durch Drähte, die mittels Pressspahnrohr gut isolirt sind. Die Schleifringe sind aus Rothguss oder Gusseisen und werden durch Bolzen zusammengehalten, die in Ambroinbüchsen isolirt und in dem scheibenartig erweiterten Stellring befestigt sind. Auf dem Lager ist ferner noch eine gusseiserne Scheibe befestigt, in der die Bolzen für die Bürstenhalter angeordnet sind.

#### Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.

In Fig. 476 sind Drehstrom-Elektromotoren, Modell KD, dargestellt. Die Motoren KD und LKD eignen sich besonders zum Einzelantrieb, z. B. für Werkzeugmaschinen, und werden in verschiedenen Grössen von  $\frac{1}{8}$  bis 5 P ausgeführt. Die kleineren Motoren unter 2 P werden nur mit Kurzschlussläufer hergestellt, die grösseren werden ebenfalls mit Kurzschluss-, Stufen-, Anlassschleifring-Läufer, d. h. mit Schleifringen und Kurzschliesser, oder Regulierschleifring-Läufer, d. h. mit Schleifringen ohne Kurzschliesser, ausgeführt. Die grösseren Motoren KD sind im Stande, bei constanter Betriebsspannung vorübergehend das etwa  $2\frac{1}{2}$  fache der Normalbelastung durchzuziehen, während sie bei  $\frac{2}{3}$  der normalen Spannung ihre normale Leistung noch geben können.

In Fig. 477 ist die Belastungs-Charakteristik eines Drehstrommotors KD 50 wiedergegeben, welche aus Versuchen ermittelt wurde. Von 1 P-Motoren aufwärts beträgt  $\cos \varphi$  etwa 0,9. Der Leerlaufstrom beträgt bei Motoren von 1 P aufwärts etwa 30 bis 40 Procent des normalen Stromes bei Vollbelastung. Die Motoren werden gewöhnlich für 100 Wechsel in der Secunde gebaut.

Auf Tafel XIX sind Schnitt- und Ansichtszeichnungen eines Drehstrommotors Modell ND 800 gegeben. Der Motor leistet 80 P

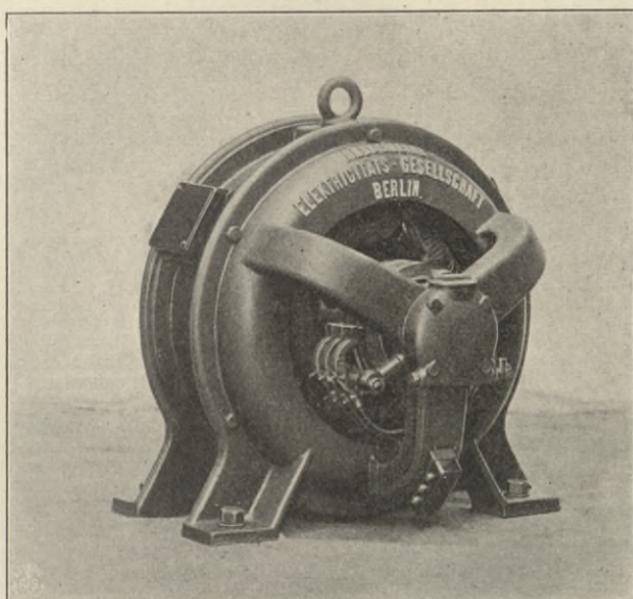


Fig. 476. Drehstrommotor Modell KD.

bei 5000 Volt Spannung und wurde zum Antriebe der Wasserschöpfwerke im Memeldelta verwendet.

Aus den Zeichnungen ist zu ersehen, wie die Magnetkerne ohne Verwendung von Schrauben zusammengebaut werden.

Die 0,5 mm dicken, mit Wasserglas isolirten Kernscheiben des feststehenden Magnetrings liegen zwischen zwei stärkeren Endscheiben, von denen die eine an einer ebenen, sich gegen einen Ring des Gusseisengestelles stützenden Messingscheibe *M* liegt. Gegen die zweite drückt durch radial nach innen stehende Rippen *n* eine nach aussen gewölbte Bronzescheibe *N*, die ihrerseits durch einen schmiedeeisernen, in einer Nuth des äusseren Gestelles liegenden Verschlusskeil in ihrer Lage festgehalten wird. In ähnlicher Weise

ist auch das Magnetgestell des Ankers durch einen stählernen Verschlußring  $D$  zusammengehalten, den zwischen den vorspringenden Nasen der zahnartig ineinandergreifenden Vorsprünge vom Ankergehäuse  $A$  und dem Zahnring  $B$  gelagert ist.

Die Verbinder haben die in der Fig. 235 dargestellte Form, ihre inneren Enden werden durch Holzstücke  $H$  mit Mikanit-Isolation in einer Ringnuthe des Zahnringes festgehalten.

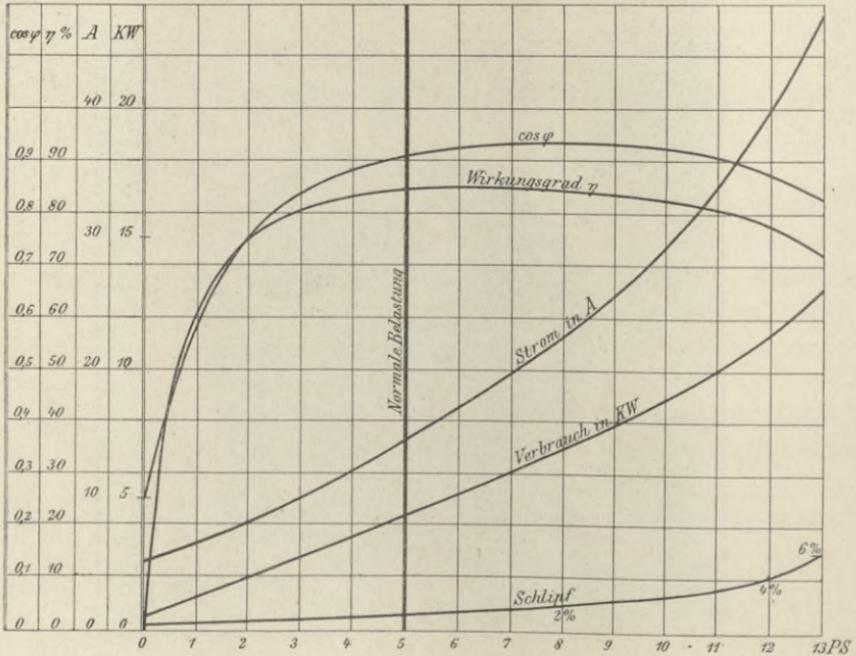


Fig. 477. Belastungscharakteristik eines Drehstrommotors KD 50.

Die Wickelung des Ankers — einfache Wellenwicklung — besteht aus 252 Kupferstäben von 6 mm Durchmesser, die in ebensoviele nach aussen offenen Löchern des Kernes isolirt eingebettet sind. Die Feldwicklung liegt in 150 ebenfalls nach aussen offenen Schlitzen von der in Fig. 214 dargestellten Form.

**Elektricitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. W. Lahmeyer & Co.,  
Frankfurt a. M.**

Die Firma baut asynchrone Motoren für Dreh- und Einphasenstrom von  $\frac{1}{10}$  bis 500 P und mehr normal für 100 Wechsel und für Spannungen bis 5000 Volt.

Eine Specialität der Firma bilden langsam laufende Drehstrommotoren für directe Kuppelung mit unterirdischen Wasserhaltungsmaschinen: Fig. 478 zeigt einen solchen Motor.

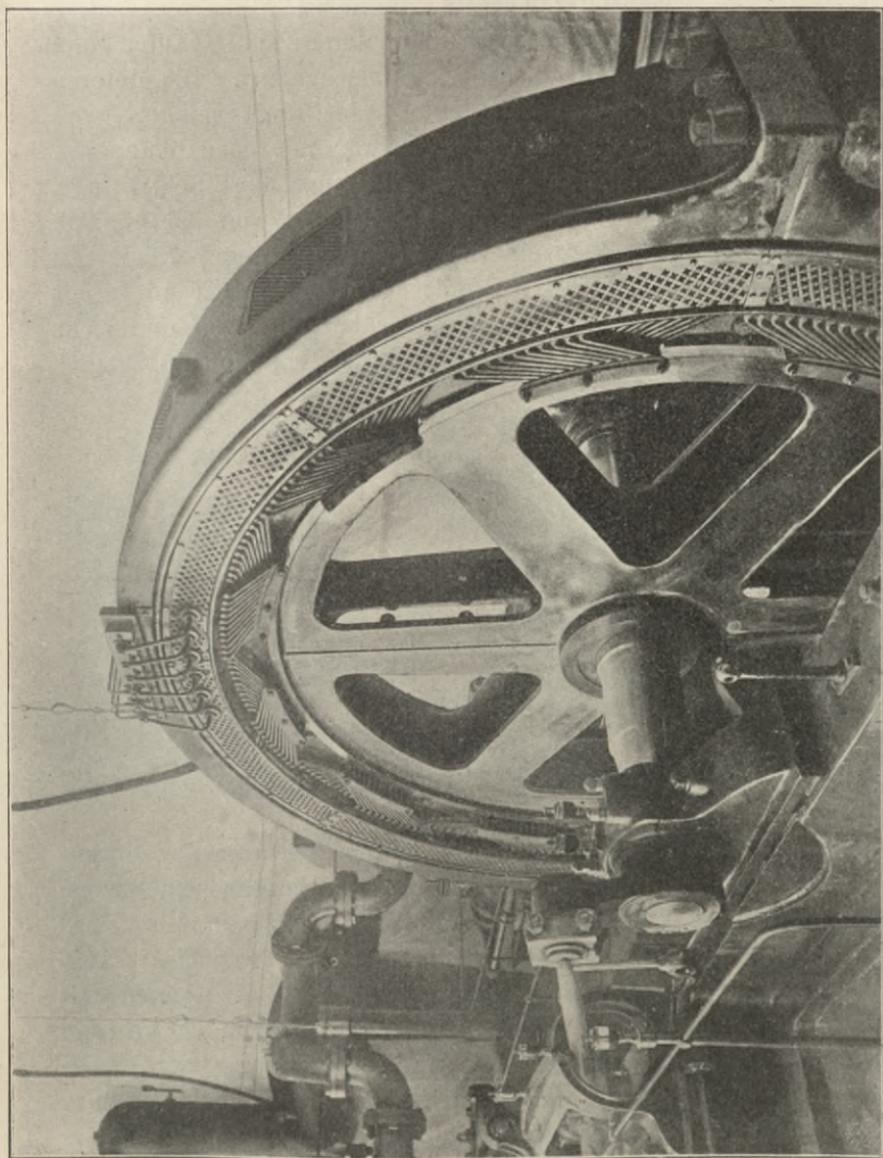


Fig. 478. Langsam laufender Drehstrommotor für directe Kuppelung.

Der Kurzschlussläufer ist ein Phasenanker mit elf Phasen, die Stäbe liegen in 264 Löchern und haben einen Durchmesser von 18 mm. Der Ständer hat 288 Nuthen und ist mit Draht von 4,1 mm

Durchmesser bewickelt. Bei 750 Volt, 75 Umdrehungen und 30 Wechseln leistet der Motor 130 P. Der Ständer ist in offener Verkettung geschaltet.

#### **Gebrüder Körting, Hannover.**

Bei den Dreiphasen-Wechselstrommotoren sind Läufer und Ständer aus gestanzten Eisenblechen zusammengesetzt. Die Motoren werden von  $\frac{1}{20}$  bis 1 P normal ohne Schleifringe geliefert, von 2 bis 7,7 P je nach der Art der Belastung mit oder ohne, von 7,5 P an gewöhnlich mit, auf Wunsch aber auch ohne Schleifringe. Der Leistungsfaktor bewegt sich in den Grenzen von 0,6 bis 0,9. Die Motoren sind bis 4 P mit vier Polen, bei 5 und 7,5 P mit vier oder sechs Polen, bis 20 P mit sechs Polen, bis 40 P mit acht Polen, bis 60 P mit zehn Polen, darüber mit zwölf und mehr Polen ausgeführt. Die Erwärmung beträgt im Maximum 35 Grad C. über die äussere Temperatur.

#### **Helios, Elektrizitäts-Aktiengesellschaft, Köln.**

Die asynchronen Motoren für ein- und mehrphasigen Wechselstrom besitzen feststehendes Feld und rotirenden Kurzschlussläufer. Die Wickelung des Ständers wird so ausgeführt, dass sie mehrere Nuthen umfasst, man erhält dadurch einen günstigeren Leistungsfaktor. Die Läufer der kleineren Motoren bis 6 P werden normal als Kurzschlussläufer ausgeführt, die der grösseren Typen werden dreiphasig gewickelt, erhalten Schleifringe und bedürfen dann eines besonderen Anlassers.

Fig. 479 stellt einen Wechselstrommotor in geöffnetem Zustande dar.

Die kleineren Drehstrommotoren laufen bei normaler Stromstärke mit etwa  $\frac{1}{8}$  der normalen Belastung, bei zweifachem Strome mit etwa  $\frac{1}{3}$  der Vollbelastung an. Diese Modelle bedürfen keines besonderen Anlassers, sie können durch einen dreipoligen Ausschalter in und ausser Betrieb gesetzt werden. Bei Motoren mit Schleifringen wird durch Einschalten von Widerständen in den Läuferstromkreis das Anzugsmoment bedeutend vergrössert. Die normal gebauten Motoren mit Schleifringen laufen bei normaler Stromstärke mit voller Zugkraft an. Je nach Verwendung des Motors kann die Zugkraft beim Anlauf auf Wunsch noch verstärkt werden; Motoren für Kräne und Aufzüge z. B. können mit der doppelten Zugkraft anlaufen, wobei die Anlaufstromstärke bei Anwendung von Schleifringen noch immer keine unzulässigen Werthe erreicht.

Die kleineren Einphasenmotoren laufen von selbst leer an und gebrauchen den  $1\frac{1}{2}$  bis 2 fachen normalen Strom, die kleinen Modelle kommen in etwa  $\frac{1}{10}$  Minute, die mittleren in etwa  $\frac{1}{4}$  Minute auf die normale Tourenzahl. Um bei den grösseren Typen die Anzugskraft zu erhöhen und die Rückwirkung auf das Leitungsnetz möglichst zu vermeiden, erhalten auch diese Läufer mit Schleifringen. Die Einphasenmotoren werden mittels Hilfsspulen (Anlaufwicklung) und Verschiebungswiderstand angelassen. Nachdem die Motoren dem Synchronismus nahe gekommen sind,

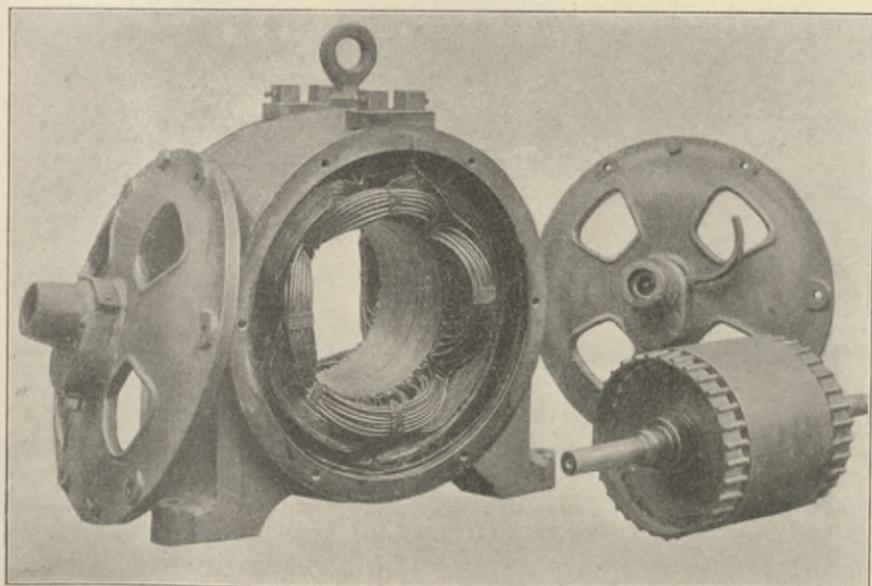


Fig. 479. Wechselstrommotor von Helios, geöffnet.

wird Anlaufwicklung und Widerstand ausgeschaltet. Für besondere Fälle, z. B. bei zu grossem Abfall der Spannung in der Leitung beim Einschalten, kann auch ein Zusatztransformator verwendet werden, der dazu dient, die Spannung über Anlauf- und Betriebswicklung für den Moment des Anlaufes zu erhöhen und der nach erfolgtem Anlauf sammt Hilfsspule und Widerstand ausgeschaltet wird. Die Stromstärke bei Leerlauf beträgt bei Drehstrommotoren etwa 30 bis 50 Procent, bei Einphasenstrom-Motoren 30 bis 55 Procent der normalen, der Verbrauch ist aber wegen der grossen Verschiebung sehr gering; er schwankt bei Motoren für Drehstrom zwischen den Grenzen 5 bis 17 Procent und bei Einphasenstrom-Motoren zwischen 8 bis 18 Procent der normalen Energieaufnahme,

wobei die kleineren Werthe den grösseren, die grösseren den kleineren Motoren zukommen. Der Wirkungsgrad nimmt mit zunehmender Belastung rasch zu, bis zur halben Belastung steigt er proportional der Leistung, nimmt dann nur langsam zu und erreicht sein Maximum bei normalem Betrieb, um bei Ueber-

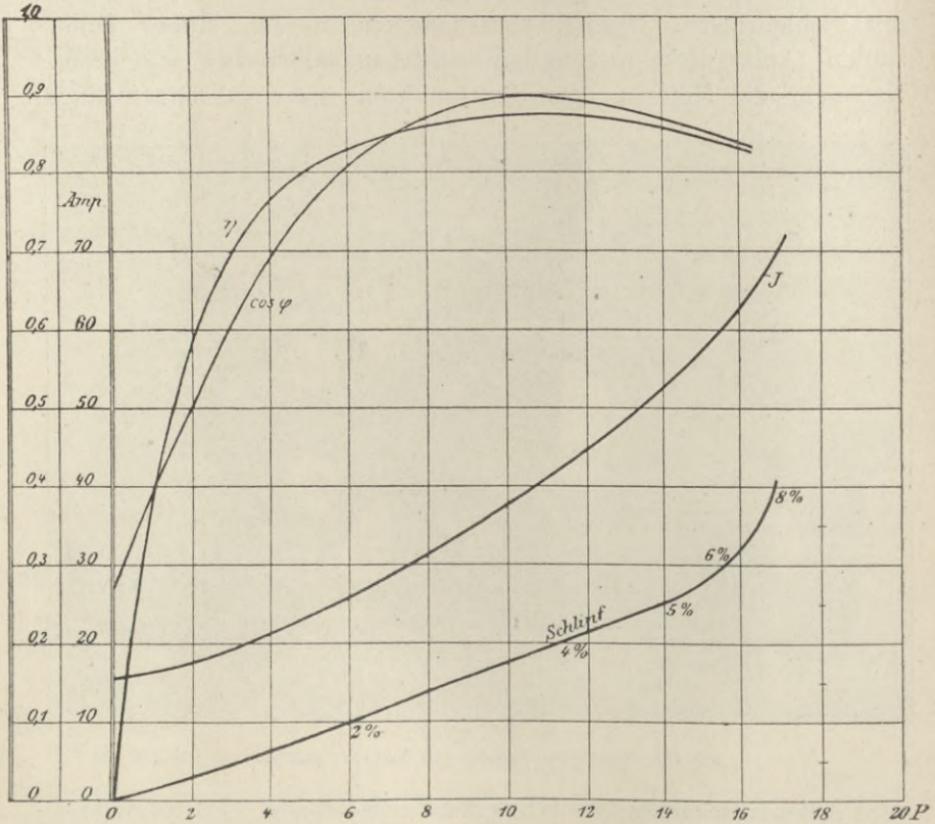


Fig. 480. Diagramm eines Drehstrommotors, Modell DS 12.

belastung wieder zu fallen. Bei kleineren Einphasenstrom-Motoren beträgt der Wirkungsgrad 70 Procent und steigt bei grösseren bis zu 86 Procent, bei Drehstrommotoren schwankt er zwischen 70 bis 90 Procent. Die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung steigt von  $\cos \varphi = 0,1 - 0,23$  bei Leerlauf zuerst nahezu proportional der Leistung, erreicht in der Nähe der normalen Belastung ihr Maximum und fällt erst bei stärkerer Ueberlastung langsam ab. Bei Drehstrommotoren liegt das Maximum zwischen den Werthen 0,70 bis 0,90, bei Einphasenstrom-Motoren zwischen 0,70 bis 0,84. Die

Temperatur der Motoren bei Dauerbetrieb bewegt sich zwischen 40 bis 50 Grad C.

Die in dem Diagramm (Fig. 480) gezeichneten Curven geben die Werthe von  $n$ ,  $\cos \varphi$  und Schlipf eines Drehstrommotors (Modell DS 12). Die normalen Motoren von TS 1 bis TS 6 arbeiten mit 1500, TS 6 bis TS 25 mit 1000, die grössten Typen bis TS 50 mit 750 Umdrehungen in der Minute. Die Tourenzahl bei Leerlauf der asynchronen Motoren ist an die Periodenzahl gebunden, sie ergibt sich aus  $120 \times \text{Periodenzahl}$ , getheilt durch Polzahl; bei zunehmender Belastung nimmt die Tourenzahl etwas ab, und zwar beträgt der Schlipf bei mittleren und grossen Motoren bei normaler Belastung 3 bis 4 Procent.

Soll ein Einphasenstrom-Motor umgesteuert werden, so vertauscht man die Zuleitung am Anlauf, bei Drehstrommotoren genügt es, zwei Anschlussleitungen zu vertauschen.

#### Maschinenfabrik Oerlikon. Oerlikon bei Zürich.

Die Maschinenfabrik Oerlikon baut Drehstrommotoren in 25 normalen Typen, von  $\frac{1}{20}$  P bei 1500 Touren bis 600 P bei 300 Touren und 600 P bei 75 Touren für Spannungen bis 6500 Volt und einer Periodenzahl von 20 bis 60.

Die kleinen Motoren bis 3 P werden fast ausschliesslich mit Kurzschlussläufern ausgeführt, und zwar besteht die Bewickelung des Läufers aus nackten Kupfer- oder Messingdrähten, welche in die Nuthen gewickelt werden.

Die grösseren Motoren haben Schleifringe und eine Kurzschlussvorrichtung.

Die Leiter von Ständer und Läufer werden ausschliesslich mit isolirtem und nacktem Draht von bequem wickelbarem Querschnitt mit geeigneter Parallelschaltung der einzelnen Drähte in Mikanit-röhren, welche in die Nuthen eingepasst sind, gewickelt.

Die Nuthen von Ständer und Läufer sind an der Oberfläche geschlossen.

Fig. 481 stellt einen normalen Motor von 14 P dar.

Der Leistungsfactor erreicht bei sämmtlichen normalen Typen den Werth 0,9. Die Ueberlastungsfähigkeit beträgt bei den kleineren Motoren 100; bei den grösseren 50 Procent. Der Nutzeffect der Motoren über 100 P wird auf 94 Procent gehalten, die maximale Temperaturerhöhung auf 35 Grad C. Der Schlipf beträgt 0,5 bis

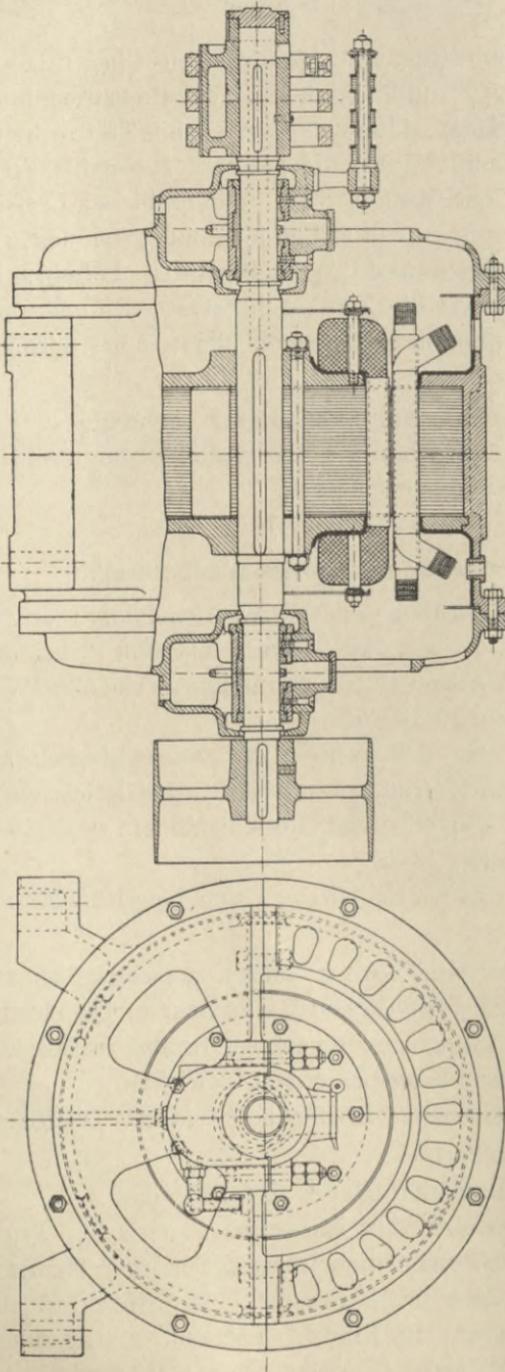


Fig. 481. Normaler Drehstrommotor von Oerlikon (12 P.).

1,5 Proc. Die Motoren unter 50 P haben einen scheinbaren Wirkungsgrad von 75 bis 80 Proc.

Die Verwendung von Drehstrommotoren für besondere Zwecke ist ausserordentlich vielseitig durchgeführt worden. Wir erwähnen einen Motor von 220 P Leistung mit 560 Touren zum Betrieb der Jungfraubahn (Fig. 482). Hier ist das Gehäuse zweitheilig gebaut und so gewickelt, dass nach Lösen von drei Klemmen der Obertheil des Ständers abgehoben werden kann, so dass der Läufer frei liegt. Der grösste bisher ausgeführte Motor dieser Art ist für den Antrieb einer Pumpe in einem Bergwerk bestimmt, mit einer Leistung von 570 P bei 75 Touren. Läufer und Ständer sind zweitheilig; die Bohrung des Ständers beträgt 3300 mm.

Die Maschinenfabrik Oerlikon war die erste Firma, welche die jetzt gebräuchlichen einphasigen Inductionsmotoren in praktischen Betrieb gebracht hat

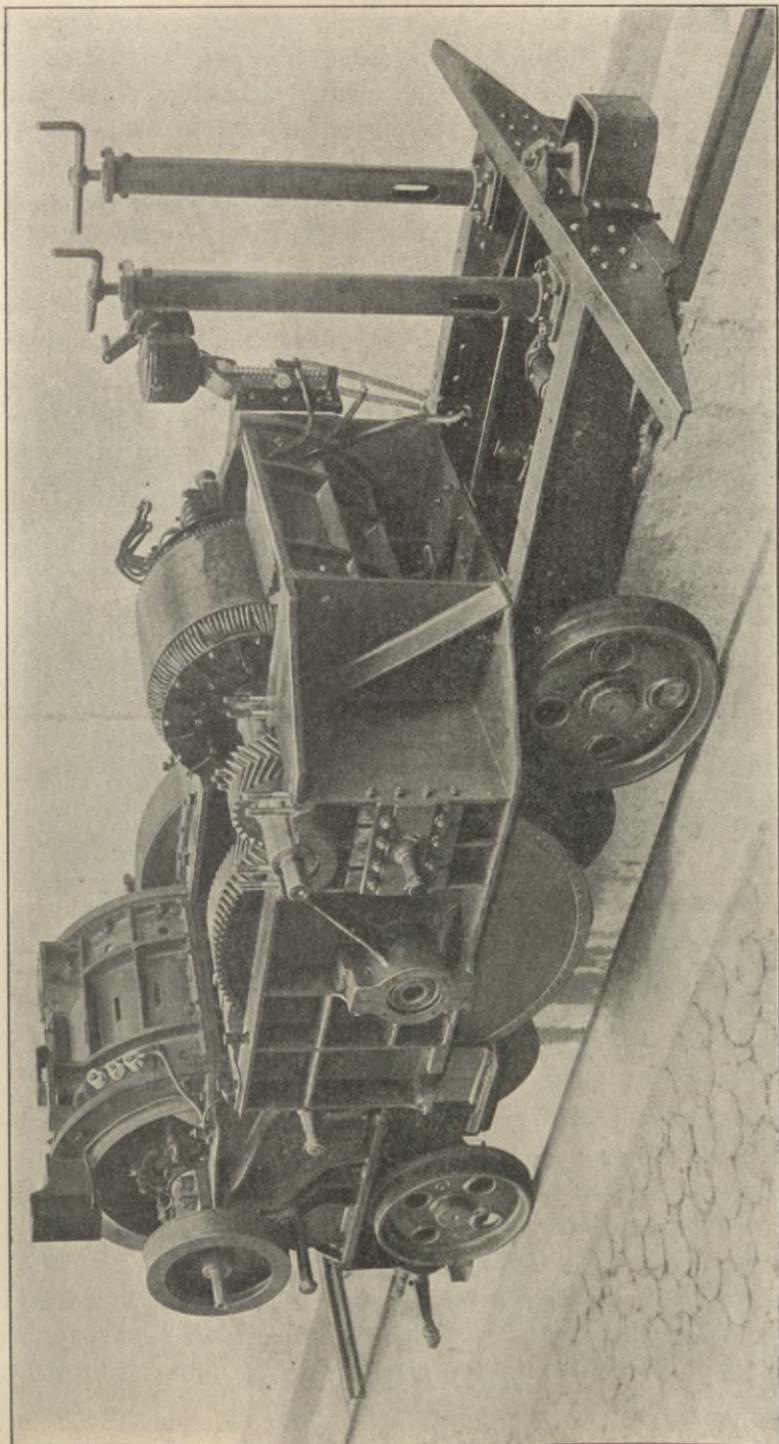


Fig. 482. Drehstrommotor für die Jungfrauabahn.

(1892). Es werden jetzt Motoren in 25 normalen Typen für Periodenzahlen von 40 bis 100 Perioden gebaut.

Die Wickelung des Ständers der Motoren ist derart, dass neben der Hauptwicklung, welche bei normalem Lauf arbeitet und den Haupttheil der Nuthen ausfüllt, eine Hilfswickelung mit einer kleineren Nuthenzahl angeordnet ist. Hinter die Hauptwicklung wird in der Regel ein inductionsloser metallener Widerstand, hinter die Hilfswickelung ein inductiver Widerstand geschaltet.

Der Anlassapparat besitzt einen doppelpoligen Ausschalter, zum Einschalten der Hauptwicklung und einen einpoligen Umschalter, mit welchem beim Anlauf die Hilfswickelung zugeschaltet und beim Lauf der Zusatzwiderstand der Hauptwicklung kurzgeschlossen wird.

Bei grösseren Motoren werden die Läufer meist mit Schleifringen versehen.

Der scheinbare Nutzeffect der Motoren 2 bis 20 P beträgt 60 bis 70 Procent.

Das Drehmoment der Motoren mit Kurzschlussläufern beim Anlauf beträgt ungefähr  $\frac{1}{4}$  des normalen, wenn die Anlaufstromstärke 60 Procent über der normalen Betriebsstromstärke gehalten wird. Bei Motoren mit Schleifringen steigt die Anlaufzugkraft auf die Hälfte der normalen bei 1,5 facher normaler Stromstärke.

Die Ueberlastungsfähigkeit der normalen Typen beträgt 50 Procent.

#### **Siemens & Halske Aktiengesellschaft, Berlin.**

Die asynchronen Wechselstrom- und Drehstrommotoren besitzen einen festen Theil, dessen Bewickelung dem Anker entspricht, und einen umlaufenden Theil mit Drehstrombewickelung. Die Bewickelung besteht, je nach der Spannung, aus Kupferdraht oder Kupferstäben im Ständer, und aus Kupferstäben im Läufer. Durch die Anordnung der Stabwicklung wird der Läufer dauerhafter, die Lüftung wird verstärkt und der Schlipf des Motors verringert. Die Enden der in Sternschaltung angeordneten Wickelung werden bei grösseren Motoren gewöhnlich mit drei Schleifringen verbunden, an die die Anlasswiderstände angeschlossen werden. Kleinere Motoren werden mit Kurzschlussläufer ohne Schleifringe ausgeführt. Sollen auch bei grösseren Motoren die Schleifringe vermieden werden, so wird der Läufer mit sogen. Gegenschaltung ausgeführt. Der umlaufende Theil dieser Motoren ist derart gewickelt, dass während der Anlaufperiode die elektromotorischen Kräfte, die in den einzelnen Wickelungsabtheilungen inducirt werden, sich entgegenwirken, wodurch auch

ohne Anlasswiderstand ein zu starkes Anwachsen der Stromstärke verhütet und ein kräftiges Anzugsmoment erzielt wird.

Hat der Motor eine bestimmte Umlaufzahl erlangt, so werden von Hand, durch Vermittelung eines Handhebels oder selbstthätig durch Vermittelung eines Centrifugalregulators die einzelnen Wicklungsabtheilungen kurzgeschlossen.

Die Induction im Luftraum beträgt etwa 3000, in den Zähnen etwa 10 000, im Kranz etwa 7000 Kraftlinien auf 1 cm<sup>2</sup>.

Der Luftzwischenraum zwischen Ständer und Läufer beträgt, je nach Grösse, 0,5 bis 2 mm, der Wirkungsgrad eines 40 pferdigen

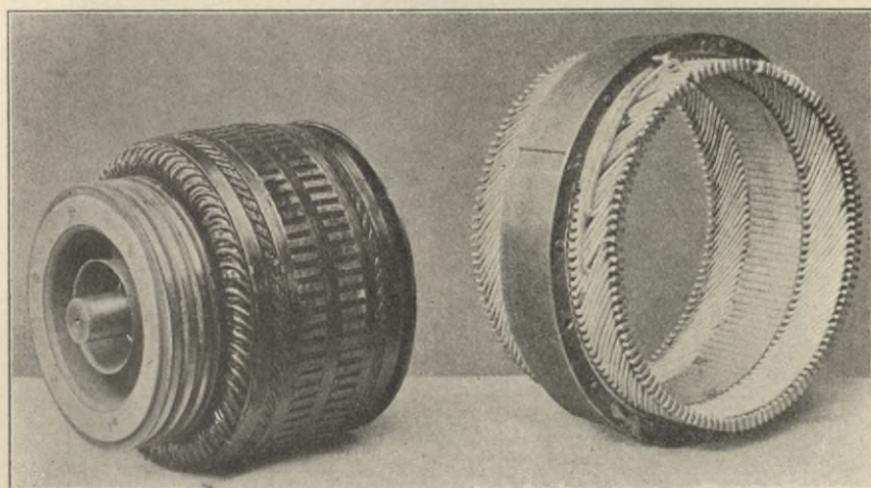


Fig. 483 Drehstrommotor für Schmalspurbahnen.

Motors etwa 90 Procent bei  $\cos \varphi = 0,90$ , die Ueberlastungsfähigkeit 100 Procent und der Schlupf bei normaler Last etwa 3 Procent.

Auf Tafel XX ist ein Drehstrommotor Modell eDM 20 dargestellt. Aus den Figuren ist zu erkennen, in welcher Weise für die Lüftung des umlaufenden Theiles gesorgt ist. Durch sich theilweise überdeckende runde Löcher *C* in den Eisenblechen werden quer durchgehende Schlitze gebildet, durch die die Luft kräftig eingesaugt, und durch radiale Schlitze *D*, welche durch Zwischenlagen von lanzettförmigen Bronzestücken *B* gebildet werden, nach aussen getrieben wird. Die Einzelfigur (rechts auf der Tafel) lässt erkennen, wie durch den Hebel der Kurzschluss der Läuferwicklung bewirkt werden kann.

Fig. 483 zeigt einen Drehstrommotor für schmalspurige Bahnen, welcher bei 500 Volt 7,5 P leistet. Hier ist die sonst übliche

Anordnung, den Hochspannungsstrom in den Ständer einzuführen, verlassen und umgekehrt die Hochspannung in den Läufer eingeführt. Dies ist aus Gründen der Betriebssicherheit geschehen, damit bei eventl. Durchschlagen der Läufer rasch ausgewechselt werden kann.

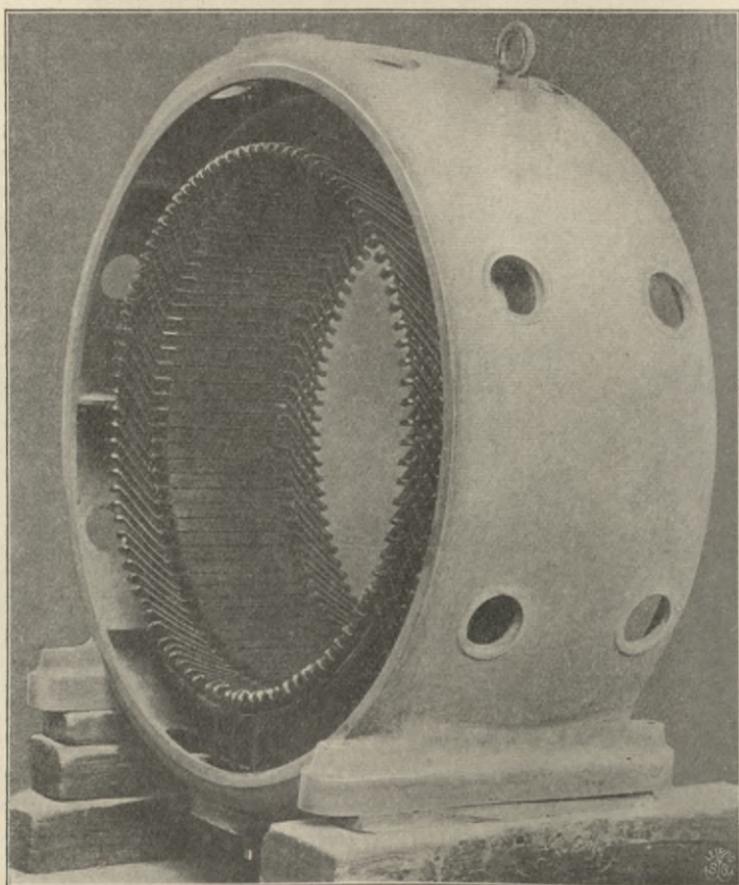


Fig. 481. Stabwicklung eines Drehstromständers.

Aus dem gleichen Grunde ist die Wicklung des Läufers als Schablonenwicklung ausgeführt, um einzelne Spulen leicht ersetzen zu können.

Die Fig. 484 zeigt die jetzt allgemein übliche Stabwicklung der Drehstromständers.

#### **Asynchrone Motoren der Union Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin.**

Der Luftraum zwischen Anker und Feldmagneten ist möglichst klein bemessen, so dass nur ein schwacher Magnetisierungsstrom

erforderlich ist. Es werden, je nach der Verwendung, drei verschiedene Typen gebaut.

Für Krahnbetrieb dienen Motoren, die mit Schleifringen versehen sind und vermittelst getrennt aufgestellter Schalter und Widerstände unter voller Last angelassen werden. Die Tourenzahl ist in mehreren Stufen von 0 bis zur normalen regulirbar.

Fig. 485 stellt einen Inductionsmotor mit einem im Anker eingebauten Anlasswiderstand dar, der beim Anlaufen durch Bewegen des Hebelarmes ausgeschaltet wird. Das Anlaufen geschieht unter Last; die Tourenzahl sinkt, je nach der Belastung, bis auf 96 Procent

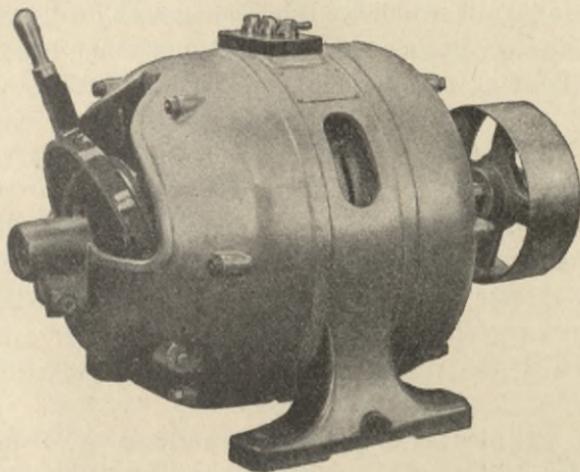


Fig. 485. Inductionsmotor mit Anlasser.

der für Leerlauf giltigen. Anlassstrom wie Anlaufmoment sind ebenso gross wie bei normalem Gang des Motors.

Für Gruben und andere Betriebe, wo Funken vermieden werden sollen, werden Motoren gebaut, die im Anker einen automatisch sich ausschaltenden Widerstand tragen. Bei diesem Modell steigt für das normale Anlaufdrehmoment der Anlassstrom auf das  $2\frac{1}{2}$  bis 3fache.

### Elementare Theorie der mehrphasigen Triebmaschinen.

Wird ein magnetisches Drehfeld durch zwei- oder dreiphasigen Strom im Ständer erzeugt, so erzeugen die Ströme im Läufer gleichfalls ein magnetisches Feld, welches sich mit dem des Ständers zu einem resultirenden Drehfeld zusammensetzt. Diesem resultirenden Felde verdanken die elektromotorischen Kräfte in den Leitern und die Zugkraft ihre Entstehung. Wir wollen den Vorgang so ansehen, als wenn das Feld aus einem gleichmässigen Kraftlinienbündel

bestände, welches sich diametral durch den Läufer erstreckt und die Leiter sowohl des Ständers als des Läufers bei seiner Drehung schneidet.

Wir bezeichnen mit  $\Omega$  die Winkelgeschwindigkeit des magnetischen Drehfeldes  $= 2\pi n$  in einer zweipoligen Maschine, wo  $n$  die Wechselgeschwindigkeit bedeutet.

Ist die Maschine mehrpolig, besitzt sie z. B.  $m$  Polpaare, so ist

$$\Omega = \frac{2\pi n}{m}.$$

$\omega = 2\pi n_2$  möge die Winkelgeschwindigkeit des Läufers bedeuten, worin  $n_2$  die wirkliche Umdrehungszahl in der Secunde ist.

$D$  sei das Drehmoment zwischen Ständer und Läufer,

$P$  die Leistung in Watt (total), welche der Ständer dem Läufer zuführt,

$p$  die Nutzleistung, die wirklich zur Drehung des Läufers verbraucht wird.

$\Omega - \omega$  ist der Schliff des Läufers gegen das Feld, die Differenz ihrer Winkelgeschwindigkeiten. Wenn die Winkelgeschwindigkeit des Feldes grösser als die des Läufers ist, so ist klar, dass die Inductionswirkung dieselbe ist, als wenn der Läufer mit einer Geschwindigkeit  $\Omega - \omega$  rückwärts gedreht würde, während das Feld still stände.

$P - p$  ist die Leistung, welche verloren wird und als Erwärmung der Leiter und des Eisens des Läufers erscheint; denn dies ist der Unterschied zwischen der ganzen dem Läufer zugeführten Leistung und demjenigen Theil davon, der zur Drehung benutzt wird.

Nun ist  $P$  proportional zu  $D$  und  $\Omega$ , so dass man — bei Wahl passender Einheiten — schreiben kann  $P = D\Omega$ .  $p$  ist proportional zu  $D$  und  $\omega$ , also  $p = D\omega$ .

Durch Division erhält man hieraus

$$\frac{p}{P} = \frac{\omega}{\Omega}.$$

Der Wirkungsgrad des Läufers ist also gleich dem Verhältniss der beiden Geschwindigkeiten. Der Wirkungsgrad des Ständers muss noch besonders betrachtet werden.

Wir sehen ferner, dass der Drehfeldmotor nur eine Art umlaufender Transformator ist, dessen primäre und secundäre Wicklung von den Ständer- und Läuferspulen gebildet werden. Wenn nun  $\omega = \Omega$  gemacht würde, so entstünden in den Leitern des Läufers keine Inductionsströme, und der Ständer würde nur als Drosselspule

wirken. Es folgt hieraus, dass die magnetischen Kraftlinien, welche durch die Maschine gehen und mit der Geschwindigkeit  $\Omega$  umlaufen, einen bei allen Belastungen nahezu gleichbleibenden Werth haben, wenn der Motor mit constanter Spannung gespeist wird, gerade wie die Kraftlinien in einem gewöhnlichen Transformator. Dies ist natürlich nur richtig, wenn der Strom im Ständer nicht abgeschwächt wird; es ist nicht mehr richtig, wenn z. B. ein Widerstand vor die Ständerspulen geschaltet wird, oder wenn der Motor ohne Widerstand im Läuferkreise angelassen wird, wie wir später sehen werden.

Ferner, wenn in dem Luftraum zwischen Ständer und Läufer wenig Streuung stattfindet (was bei guten Motoren wirklich der Fall ist), werden die einzigen in den Läuferleitern erzeugten elektromotorischen Kräfte diejenigen sein, die von dem resultirenden magnetischen Felde hervorgebracht werden, und deshalb werden die stärksten Ströme auftreten, wenn die Leiter sich in demjenigen Theile des Feldes bewegen, wo die Kraftliniendichte am grössten ist. Und da die Kraftlinienzahl bei allen Belastungen (unter den eben erwähnten Bedingungen) gleich bleibt, so folgt daraus, dass die Zugkraft proportional den Strömen im Läufer ist.

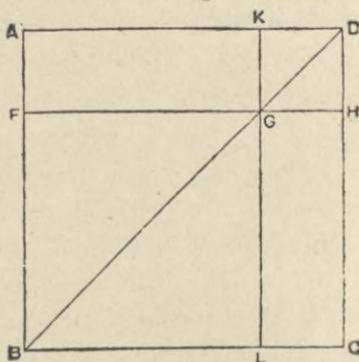


Fig. 486.

Diese aber sind proportional dem Schlupf  $\Omega - \omega$ ; also folgt, dass  $D$  proportional zu  $\Omega - \omega$  ist, und dass man schreiben kann

$$D = b(\Omega - \omega),$$

worin  $b$  eine Constante ist, die von der Stärke des Feldes, dem Durchmesser des Läufers und der Länge und dem Widerstande der Leiter des Läufers abhängt.

Wir schreiben nun:

$$\text{nutzbare Leistung } p = b\omega(\Omega - \omega),$$

$$\text{ganze Leistung } P = b\Omega(\Omega - \omega),$$

$$\text{verlorene Leistung } P - p = b(\Omega - \omega)^2.$$

Daher können wir auch hier das bekannte Diagramm des Wirkungsgrades des Motors anwenden, indem wir das Quadrat  $ABCD$  (Fig. 486) ziehen; die Seite  $AB$  ist numerisch gleich  $\Omega$ , und wir schneiden ein Stück  $BF = \omega$  davon ab. Die Fläche  $AFHD$  stellt die ganze, dem Läufer gelieferte Leistung dar, die Fläche  $AFGK$  oder  $GLCH$  die nützliche Leistung, und das Quadrat  $KGHD$  die

verlorene Leistung, die als Erwärmung der Leiter des Läufers auftritt. Der Wirkungsgrad nähert sich der Einheit, wie  $P$  aufwärts nach  $A$  hin sich bewegt. Wie bei Gleichstrommotoren würde, abgesehen von der Schwächung des Feldes durch die Rückwirkung des Ankers, die ganze Leistung ihren Höchstwerth erreichen, wenn  $\omega = \frac{1}{2} \Omega$ ; der Wirkungsgrad würde dann aber nur 50 Procent betragen. Wir werden sogleich sehen, dass die magnetische Streuung und andere Ursachen bei einem Motor, der erheblich unter seiner regelmässigen Geschwindigkeit läuft, eine so bedeutende Rolle spielen, dass die Zugkraft geringer ist, als bei höherer Geschwindigkeit. Fig. 486 ist indessen nur auf den Fall des regelmässigen Betriebes anwendbar und zeigt, dass diese Drehfeldmotoren sich ganz ähnlich wie Gleichstrommotoren verhalten.

In guten Drehfeldmotoren beträgt der Schlipf des Läufers nur etwa 4 Procent, ausgenommen bei sehr kleinen Motoren, wo er bei voller Last auf 10 Procent steigen kann.

Bei der obigen Untersuchung ist auf den Verlust durch Erwärmung der Leiter des primären oder Ständerkreises keine Rücksicht genommen worden. Dieser Verlust macht, wie der gewöhnliche, durch  $J^2 R$  auszudrückende Verlust in dem Erregerkreise einer Dynamomaschine, nur einen geringen Procentsatz der ganzen zugeführten Leistung aus und kann leicht aus dem Widerstande der Ständerspulen berechnet werden. Ebenso ist auch keine Rücksicht auf die hysteretischen Verluste im Ständer genommen worden, deren Betrag gleichfalls zugeführt werden muss und sich als eine Verstärkung des Erregerstromes zeigt; aber diese sind bei einer gut gebauten Maschine gering.

Ausser den Verlusten durch Hysterisis und Wirbelströme im Eisen ist noch die Reibung in den Achslagern von der verfügbaren Leistung abzuziehen, aber alle diese Verluste sind sehr gering, da die Umkehrungen des Magnetismus im Läufer nicht proportional  $\Omega$ , sondern  $\Omega - \omega$  sind.

### 1. Resultirendes magnetisches Kraftfeld des Motors.

Es ist oben bei der Betrachtung der Analogie des Drehfeldmotors mit einem Transformator auseinander gesetzt worden, dass die Stärke des magnetischen Kraftfeldes im Motor bei allen im Bereiche des regelmässigen Betriebes liegenden Belastungen nahezu gleich bleibt.

Wir können annehmen, dass in dem Luftraume zwischen Läufer und Ständer die Kraftliniendichte um den Umfang herum von Punkt zu Punkt sich annähernd wie eine Sinusfunction ändert. Wir wollen diese Dichte der Kraftlinien an der Stelle, wo sie ihren höchsten Werth hat,  $\mathfrak{B}$  nennen. Wie im Kerne eines Transformators ist die Kraftliniendichte das Ergebniss der magnetisirenden Kräfte sowohl der primären als der secundären Wickelungen.

Kapp<sup>1)</sup> hat in seinem Buche über elektrische Kraftübertragung den Vorgang beschrieben und erklärt; seine Worte lassen sich etwa, wie folgt, zusammenfassen:

Wir zeichnen eine Linie  $\mathfrak{B}$ , welche den Höchstwerth der Kraftliniendichte darstellen soll (Fig. 487); in einer zweipoligen Maschine kann man sie betrachten, als liefe sie mit der Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  wie der Uhrzeiger um den Mittelpunkt  $O$ . Das Feld rührt her von der gemeinsamen Wirkung des von dem äusseren, primären Strome im Ständer hervorgerufenen Feldes und des von den secundären Strömen inducirten Feldes in dem Läufer. Diese Läuferströme haben mit dem resultirenden Felde gleiche Phase (wenn keine magnetische Streuung vorhanden ist), sie sind in ihrer Stärke dem Felde und dem Schlipf im Felde proportional und suchen eine quermagnetisirende Wirkung hervorzubringen. Man kann sie als eine Gerade von der Länge  $c$  in der Richtung der Linie  $\mathfrak{B}$  darstellen. Dieser Strom sucht ein seiner eigenen Stärke proportionales Querfeld hervorzubringen, welches wir durch die zu  $\mathfrak{B}$  senkrechte Gerade  $b$  andeuten. Hierbei ist  $b = k \cdot c$ , wenn  $k$  ein Coëfficient ist, der von dem Widerstand des magnetischen Kreises und der Zahl der Windungen auf dem Läufer abhängt. Durch die Gerade  $a$  stellen wir das Dreieck  $Bba$  her; dann ist  $a$  in Grösse und Richtung (Phase) gleich dem magnetischen Feld, welches durch den äusseren primären Strom im Ständer erzeugt werden muss, da  $\mathfrak{B}$  die Resultante von  $a$  und  $b$  ist.  $\beta$  ist der Winkel, um den der Strom im Läufer hinter dem vom äusseren Strome herrührenden Felde zurückbleibt.

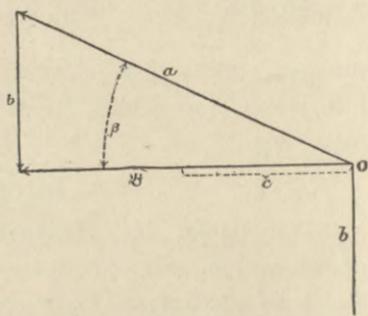


Fig. 487.

1) Gisbert Kapp, Electric Transmission of Energy. 1894. Seite 310.

Da nun ferner das Drehmoment sowohl zu  $\mathfrak{B}$  als auch zu  $c$  — demnach auch zu  $\mathfrak{B}$  und  $b$  — proportional ist, so stellt die Fläche des Dreieckes  $a\mathfrak{B}b$  das Drehmoment dar.

Da  $c$  ausserdem von der elektromotorischen Kraft in den Läuferdrähten abhängt, ist es auch dem Schliff proportional; es ist ferner proportional zu  $\mathfrak{B}$  und zu einer Constanten, die dem Widerstande im Läuferkreise umgekehrt proportional ist; wir können also schreiben:

$$c = \frac{\mathfrak{B} \cdot \text{Schliff}}{R}$$

oder 
$$\text{Schliff} = \frac{cR}{\mathfrak{B}}.$$

Setzen wir hierin 
$$c = \frac{b}{k},$$

so wird der 
$$\text{Schliff} = \frac{b}{\mathfrak{B}} \cdot \frac{R}{k},$$

nun ist  $b/\mathfrak{B} = \text{tg } \beta$ , also ist der Schliff proportional zu  $R \text{ tg } \beta$ ; d. h. wenn der Schliff gross ist, so wird der Verzögerungswinkel gross sein.

## 2. Betriebsbedingungen.

Wir haben drei Hauptstufen des Betriebes zu betrachten; zunächst wollen wir die Speisespannung als gleichbleibend und die Maschine als frei von magnetischer Streuung ansehen.

(1.) Angehen. Hier ist  $\omega = 0$ , der Schliff  $= \Omega$ ; die Läuferströme sind überaus stark, ebenso der primäre Strom. Der Phasenunterschied  $\beta$  zwischen primärem Strom und resultirendem Feld ist demnach sehr gross. Die Zugkraft würde sehr hoch sein, wenn keine magnetische Streuung vorhanden wäre (s. Seite 675).

(2.) Betrieb mit geringer Belastung. Hier ist  $\omega$  sehr nahe gleich  $\Omega$ ; der Schliff ist gering, die Läuferströme und ihre Rückwirkung auf das Feld sind schwach. Der Winkel  $\beta$  ist klein, und  $\alpha$  wird nicht viel grösser als  $\mathfrak{B}$  sein.

(3.) Betrieb mit grosser Belastung. Hier muss  $\Omega - \omega$ , der Schliff, gross genug sein, um im Läufer die Entstehung von Strömen zu ermöglichen, die im Stande sind, die erforderliche Zugkraft bei der vorhandenen Drehungsgeschwindigkeit zu erzeugen.

## 3. Zugkraft beim Angehen.

Im Obigen haben wir einen Motor betrachtet, der unter regelmässigen Bedingungen arbeitet, so dass die Läuferströme nicht

übermässig stark sind und die magnetische Streuung vernachlässigt werden kann.

Wenn indess der Motor angelassen wird, so ist der Schlipf so gross, dass gewaltige Ströme in den Läuferdrähten entstehen, wenn diese nur geringen Widerstand besitzen. Diese Ströme erfordern sehr starke Ströme in den primären Spulen, um das magnetische Feld aufrecht zu halten, ganz wie in einem Transformator. Die Wirkung ist dreifach. Erstens geht ein beträchtlicher Theil der Speisespannung als Stromwärme in den Ständerspulen verloren. Zweitens wirken die Amperewindungen des Ständers und Läufers einander entgegen mit grossen magnetomotorischen Kräften, und hierdurch wird ein Theil der Kraftlinien auf Wege gedrängt, welche nicht durch beide Sätze von Spulen führen (z. B. würde längs des Luftzwischenraumes Streuung auftreten), und diese Linien würden elektromotorische Kräfte in den Ständer- und Läuferwindungen neben den vom gemeinsamen resultirenden Felde erzeugten elektromotorischen Kräften verursachen, und eine Drosselwirkung auf die Ströme in diesen Spulen hervorbringen. Drittens wird nicht nur das wirklich resultirende Feld  $\mathfrak{B}$  durch die genannten Ursachen geschwächt, sondern der geringe Rest davon hat eine andere Phase, als der Strom im Läuferkreise, so dass die Zugkraft ganz bedeutend verringert wird, anstatt dass sie durch den übermässigen Schlipf vermehrt würde, wenn der Läuferkreis geringen Widerstand besitzt. Dies hat Kapp sehr einfach durch das vorstehende Diagramm gezeigt. Wenn der Schlipf gross ist, so erhält das Dreieck  $a\mathfrak{B}b$  die Gestalt der Fig. 488; denn wenn der Schlipf zu  $R \cdot \operatorname{tg} \beta$  proportional, und  $R$  klein ist, so muss  $\operatorname{tg} \beta$  sehr gross und  $\beta$  nahezu 90 Grad sein; das dem äusseren Strom entsprechende Feld  $a$  ist nach den vorangehenden Betrachtungen beschränkt; das Drehmoment (dargestellt durch die Fläche) ist demnach sehr klein. Wenn wir  $R$  vermehren, so wird nothwendig  $\operatorname{tg} \beta$  kleiner; dann wird  $\mathfrak{B}$  grösser und die Fläche grösser, und so erhalten wir eine grössere Zugkraft beim Angehen: Also wird durch Einfügen eines inductionsfreien Widerstandes in den Läuferkreis beim Anlassen der Motor befähigt, mit grösserer Zugkraft anzugehen.

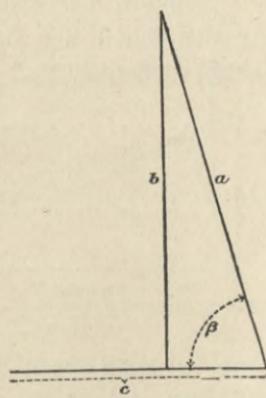


Fig. 488.

## 4. Beziehung zwischen Drehmoment und Schliff.

Um eine Gleichung zu erhalten, welche das Drehmoment durch den Schliff und den Widerstand des Läufers ausdrückt, benutzen wir Fig. 487, aus welcher hervorgeht, dass

$$b = a \sin \beta,$$

$$\mathfrak{B} = a \cos \beta$$

ist. Nun erhalten wir aus der Gleichung

$$\text{Schliff} = \frac{b}{\mathfrak{B}} \cdot \frac{R}{k}$$

die neue 
$$\frac{\text{Schliff}}{R} k = \frac{b}{\mathfrak{B}}.$$

Aendern wir also in Fig. 487 nur den Maassstab, so können wir die Seiten des Dreiecks benennen wie in Fig. 489, wo  $g$  den Schliff bedeutet.

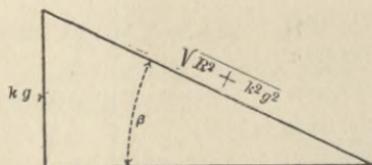


Fig. 489.

Wir sehen hieraus, dass

$$\sin \beta = \frac{k \cdot g}{\sqrt{R^2 + k^2 g^2}}$$

$$\text{und} \quad \cos \beta = \frac{R}{\sqrt{R^2 + k^2 g^2}}.$$

Demnach ist das zu  $b \cdot \mathfrak{B}$  proportionale Drehmoment  $D$  auch proportional  $a^2 \sin \beta \cos \beta$ ; bezeichnet nun  $q$  eine Constante, welche  $a^2$  und ferner noch Constanten enthält, welche von der Bauart abhängen, so erhalten wir

$$D = q \cdot \frac{g R}{R^2 + k^2 g^2}.$$

Hierbei nehmen wir an, dass  $a$ , das vom äusseren Strome herführende Feld, in seiner Stärke gleich bleibt (s. Seite 673).

Wenn wir die Bedeutung dieser Gleichung auf graphischem Wege untersuchen wollen, so nehmen wir für  $R$  einen bestimmten Werth an und stellen die Beziehung zwischen  $D$  und  $g$  als Curve dar.

Zeichnen wir die Gerade  $O X$  (Fig. 490), um die Drehungsgeschwindigkeit des magnetischen Feldes darzustellen, und schneiden von ihr den Theil  $O Q$  ab, welcher die Geschwindigkeit des Motors angiebt. Der Rest  $Q X$  bedeutet den Schliff.

Dies ist dasselbe, als wenn wir den Schliff von  $X$  aus rückwärts auftragen. Die senkrechten Ordinaten stellen dann die Werthe der Zugkraft dar, wie sie aus der Gleichung berechnet wird. Wird z. B.  $Q X$  als  $g$  genommen und durch  $P Q$  der entsprechende Werth

von  $D$  angegeben, so erhalten wir, wenn wir bei  $X$ , wo der Schliff Null ist, beginnen, eine Curve  $XPd_1$ , die steil ansteigt, einen Höchstwerth erreicht und auf den Werth  $Od_1$  herabsinkt, der die Zugkraft beim Angehen bedeutet. Die Zugkraft besitzt einen gewissen Höchstwerth, für den  $\beta = 45$  Grad ist. Es ist zu bemerken, dass das steile Ende der Curve nahezu geradlinig verläuft; es nähert sich asymptotisch einer Geraden, welche die Beziehung zwischen der Zugkraft und dem Schliff darstellen würde, wenn das magnetische Feld von gleichbleibender Stärke wäre, und keine Streuung stattfände. Thatsächlich entspricht diese Gerade dem Ausdruck  $D = b(\Omega - \omega)$  auf Seite 671. Oder, wenn wir in unserer jetzigen Gleichung Werthe von  $g$  betrachten, die gegen  $R$  klein sind, so darf man diese Gleichung

in der Form  $D = q \cdot \frac{g}{R}$  schreiben.

Am anderen Ende der Curve, wo der Schliff gross ist, biegt sich die Curve nach unten ein; diesen Theil können wir angenähert darstellen durch die Annahme, dass  $g$  sehr

gross im Vergleich mit  $R$  ist, oder  $R^2$  klein gegen  $g^2$ ; hierdurch erhält die Gleichung die Gestalt  $D = q \cdot \frac{R}{g}$ .

Dies ist die Gleichung einer Hyperbel (punktirt gezeichnet).

Wenn der Motor in Ruhe ist, so wird  $g = \Omega$  oder  $OQ = O$ , was bei  $Od_1$  den Werth  $D = q \cdot \frac{R}{\Omega}$  giebt, d. h. beim Anlassen ist die Zugkraft dem Widerstande des Ankers proportional. Geben wir nun dem  $R$  einen grösseren Werth und zeichnen einen neuen Satz Ordinaten, so erhalten wir eine neue Curve (punktirt), welche gleichfalls bei  $X$  beginnt, zu einem eben so hohen Werth ansteigt, wie die vorige und dann abnimmt, aber diesmal auf  $d_2$ . Die Wirkung der Einschaltung von Anlasswiderstand ist also, die Zugkraft zu erhöhen; aber zugleich wird der höchste Werth der Zugkraft so verschoben, dass er erst bei einem grösseren Schliff auftritt, als vorher. Der Motor liefert dieselbe Leistung wie vorher; aber der Unter-

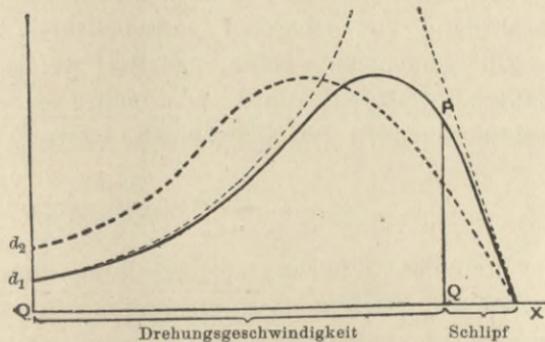


Fig. 490.

schied der Geschwindigkeiten zwischen leichter und schwerer Belastung ist grösser; ausserdem wird der Wirkungsgrad bei voller Last vermindert. Beträgt der Schlipf 5 Procent und der Wirkungsgrad 95 Procent, so erhalten wir keine genügende Zugkraft beim Angehen; wir können sie erzielen, indem wir Widerstand einschalten und uns bei voller Belastung mit 10 Procent Schlipf und 90 Procent Wirkungsgrad zufrieden geben. So versteht man leicht, weshalb in letzter Zeit beim Bau des Ankers grosses Gewicht darauf gelegt wird, einen Widerstand beim Anlassen einzuschalten, welchen man, so bald als der Motor eine gute Geschwindigkeit erreicht hat, kurz schliesst.

In den verschiedenen Theorien des Drehfeldmotors<sup>1)</sup> ist dieser Gegenstand von mehreren verschiedenen Gesichtspunkten aus in Angriff genommen worden; aber auf welche Weise er auch mathematisch behandelt worden ist, immer hat der Ausdruck für das Drehmoment den allgemeinen Ausdruck:

$$D = q \cdot \frac{gR}{R^2 + k^2 g^2}$$

Die obige Methode zur Ableitung dieser Formel ist zwar unvollständig, insofern als sie nicht alle in Betracht kommenden Grössen enthält; sie besitzt aber den Vortheil, dass der wichtigste Punkt fortwährend im Auge behalten wird, und dass hierdurch der Leser in den Stand gesetzt wird, die physikalische Bedeutung der Formeln überall zu verfolgen. Die Grösse  $k$  ist, wie wir uns erinnern, eine Constante, die von der magnetischen Capacität des Kreises und der Windungszahl des Läufers abhängt. Sie ist thatsächlich die Selbstinduction einer vollständigen Windung eines Leiters auf dem Motor. Die Grösse  $q$  enthält  $a^2$  und die Zahl der Windungen auf dem Läufer. Vergleicht man unsere Formel mit den von Anderen gefundenen, so muss man bedenken, dass  $g$  eine Winkelgeschwindigkeit und gleich  $2\pi(n - n_2)$  ist (vergl. Seite 670).

Steinmetz giebt der Formel für das Drehmoment in Kilogrammgewicht am Radius von 1 m die Gestalt

$$D = \frac{f \cdot c^2 m^2 g R}{R^2 + k^2 g^2}$$

---

1) Von Duncan, Hutin und Leblanc, Sahulka, Picou, Arnold, Ferraris, Reber, Steinmetz, De Bast und Anderen. Vergl. des Verfassers Werk über Mehrphasenströme (Fussnote Seite 642).

worin  $m$  das Verhältniss der secundären zur primären Windungszahl ist, und

$$f = \frac{76}{736 \pi p n},$$

worin  $n$  die Wechselgeschwindigkeit und  $p$  die Polzahl ist<sup>1)</sup>.

Die Theorie von Steinmetz ist sehr vollständig, weil sie sowohl die Streuung als auch die Hysteresis berücksichtigt, und eine Formel für  $e$ , die elektromotorische Gegenkraft im Ständer, ausgedrückt durch die äussere Spannung, Streuung und Hysteresis, angiebt. Be-

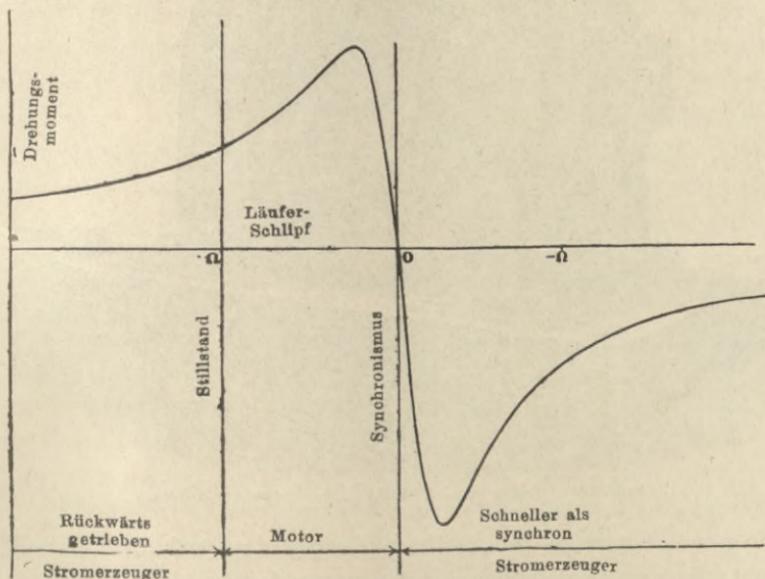


Fig. 491.

rechnet man danach Werthe für das Drehmoment bei verschiedenen Werthen des Schliffes, so erhält man die Curve in Fig. 491, welche denselben Charakter wie die in Fig. 490 besitzt und nur in beiden Richtungen erweitert ist. Wenn die Geschwindigkeit des Motors auf mechanischem Wege über den Synchronismus gesteigert wird, so wechselt die Zugkraft die Richtung, die Maschine arbeitet als Stromerzeuger und liefert den unteren Ast der Curve. Wenn aber der Motor der Umlaufsrichtung des Feldes entgegengedreht wird, so nimmt das Drehmoment in der links gezeichneten Weise ab.

### Zweiphasenmotor von Stanley-Kelly.

Dieser Motor hat die Eigenthümlichkeit, dass seine beiden Magnetfelder, obwohl er ein Zweiphasenmotor ist, ganz unabhängig

1) Vergl. Elektrot. Zeitschrift 1895, Seite 727.

voneinander und nicht zu einem Drehfeld vereinigt sind. Der Ständer (Fig. 492) besteht aus zwei vielpoligen Theilen, welche gegeneinander verdreht sind. Jeder bringt unabhängig von dem

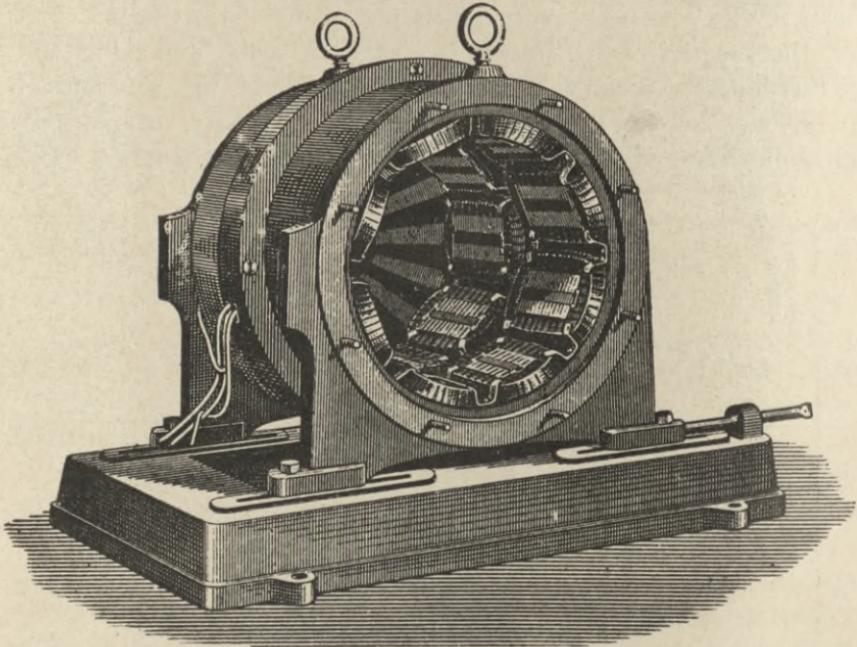


Fig. 492. Ständer eines Stanley-Kelly'schen Motors.

anderen ein einfaches Wechselfeld hervor. Der sich drehende Theil besteht aus zwei nebeneinander liegenden Läufern (Fig. 493), deren

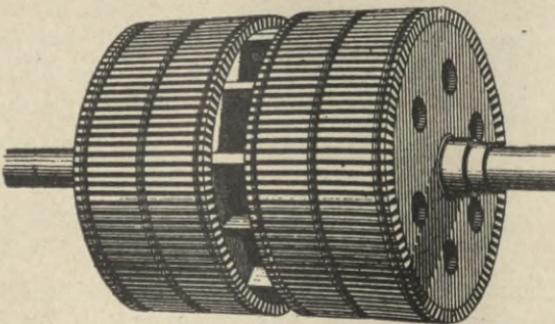


Fig. 493. Läufer eines Stanley-Kelly'schen Motors.

Windungen so untereinander verbunden sind, dass der Draht des ersten Läufers, der gerade unter den Polen liegt, in Reihe geschaltet ist mit demjenigen Drahte des zweiten Läufers, der sich gerade zwischen den Polen befindet. Infolge dieser Verbindung wirkt jeder

Läufer abwechselnd als Motor, indem er Strom empfängt und von diesem getrieben wird, und als Transformator, indem er dem andern Läufer Strom liefert. Die Windungen auf den beiden Läufern sind geschlossen und haben keinerlei Verbindungen mit dem äusseren Stromkreise durch Schleifringe oder Commutatoren.

### Einphasige Triebmaschinen.

Als die mehrphasigen asynchronen Triebmaschinen praktische Erfolge aufzuweisen hatten, wurde es klar, dass die einphasigen Motoren nach ähnlichen Gesichtspunkten gebaut werden müssten. Schon lange Jahre vorher hatte De Fonvielle gefunden, dass eine Eisenscheibe, welche drehbar innerhalb einer mit Wechselstrom gespeisten Spule angebracht wird, ihre Umdrehung beibehält, wenn sie einmal nach der einen oder der anderen Richtung in Bewegung gesetzt ist. Unmittelbar vor der Einführung der mehrphasigen Methoden entdeckte Elihu Thomson die fundamentale Thatsache, dass ein kurz geschlossener Anker, der zwischen den Polen eines Wechselstromelektromagnetes in Drehung versetzt wird, das Bestreben hat, in der Richtung seiner Bewegung weiter zu gehen und seine Drehungsgeschwindigkeit zu vergrössern. Die durch einen stillstehenden Läufer gehende wechselnde magnetische Strömung ruft in den den Läufer umgebenden Leitern starke Ströme hervor, aber es ist kein Bestreben vorhanden, nach der einen Richtung stärker als nach der anderen zu drehen. Aber Thomson fand, dass eine durch Selbstinduction verursachte Verzögerung eine Gegenwirkung des Stromes in dem geschlossenen Stromkreis hervorruft, durch welche ein secundäres magnetisches Feld hervorgebracht wird, welches mit dem ersten Felde ausser Phase ist. Wenn man daher dieses secundäre Feld mit dem primären unter einem Winkel zusammenbringt, wird die resultirende Wirkung gleich der von einem Drehfelde hervorgebrachten sein.

Während seiner Untersuchungen über die Wirkung der Wechselströme<sup>1)</sup> beobachtete Elihu Thomson (1886/87), dass ein kupferner Ring, der in ein magnetisches Wechselfeld gebracht wird, entweder das Bestreben zeigt, aus dem Felde zu gelangen oder sich schräg zu den magnetischen Linien zu stellen. Er nahm einen gewöhnlichen

1) Elihu Thomson, „Novel Phenomena of Alternating Currents“, *El. World* (N. Y.), 28. Mai 1887. Vergl. auch Fleming, „On Electro-magnetic Repulsion“, *Proc. Royal Inst.*, März 1891; und *Journ. Soc. of Arts*, 14. Mai 1890.

Gleichstromanker, brachte ihn in ein Wechselfeld und stellte die Bürsten, nachdem er sie kurz geschlossen, in eine schräge Lage zur Richtung des Feldes. Die Wirkung dieser Anordnung war, dass der Anker sich drehte und ein bedeutendes Drehmoment ausübte. Die Leiter des Ankers wirkten gerade wie ein schräg gestellter Ring, nur mit dem Unterschiede, dass die schräge Richtung durch die Bürsten und den Commutator fortwährend aufrecht erhalten wurde, trotzdem sich der Anker drehte; dadurch wurde die Drehung gleichmässig erhalten.

Ein geschlossener Läufer von der Trillerkäföform, wie Fig. 464, hat, wenn er einmal in einem zweipoligen Wechselfeld in Bewegung gesetzt ist, das Bestreben, seine Drehung zu beschleunigen, bis Synchronismus erreicht ist; d. h. wenn keine Reibung vorhanden wäre, würde er genau eine halbe Umdrehung während jeder Umdrehung des primären Stromes machen. Wird aber bei der Drehung irgendwie Arbeit geleistet, so wird die Geschwindigkeit abnehmen, da der Schlupf (wie bei den mehrphasigen Motoren) proportional dem Drehungsmoment ist. Die einzige Schwierigkeit ist dann nur, die Bewegung einzuleiten.

Einphasige Motoren können also nach ganz ähnlichen Grundsätzen gebaut werden, wie die schon beschriebenen mehrphasigen. Der Läufer kann bei kleinen Maschinen die Form Fig. 464 haben, bei grösseren Maschinen muss er besonders gewickelt und mit einer Einrichtung versehen werden, durch welche ein Anlasswiderstand eingeschaltet werden kann. Der Ständer muss noch mit einer Hilfswicklung versehen sein, die zum Anlassen gebraucht und dann entweder ausgeschaltet oder in den Hauptkreis eingeschaltet wird.

#### Theilung des Stromes unter Phasenverschiebung.

Ferraris erreichte die Drehung seines Motors, indem er das eine Paar Spulen in den Stromkreis eines gewöhnlichen Wechselstromes brachte, während das andere Paar, mit einem Inductions-widerstand zum Verzögern des Stromes versehen, als Nebenschluss zum Wechselstromkreis geschaltet war. Borel erzielte eine ähnliche Wirkung dadurch, dass er das eine Spulenpaar mit Eisenkernen versah.

Der gewöhnliche Weg, auf dem einphasige Motoren in Gang gesetzt werden, ist, dem Wechselfeld in schräger Richtung ein zweites Feld von anderer Phase zuzufügen. Dies wird in der Regel durch Hilfsspulen ausgeführt, die auf dem Ständer sitzen und durch

einen Strom gespeist werden, der mit dem Strom der Hauptspulen ausser Takt ist; man braucht hierzu eine Vorrichtung, welche zwischen den Strömen in den beiden Zweigen einen Phasenunterschied hervorbringt. Diese Theilung des Stromes unter Phasenverschiebung lässt sich auf mehrerlei Weise bewerkstelligen.

Wir haben (Seite 533) gesehen, dass in Stromkreisen mit Widerstand und Selbstinduction die Tangente des Winkels, um den der Strom hinter der elektromotorischen Kraft verzögert wurde, gleich  $\frac{\omega L}{R}$  war. Wenn wir also im einen Zweig eine verhältnissmässig grosse Selbstinduction, im anderen einen verhältnissmässig grossen Widerstand haben, so werden sich die Ströme um nahezu 90 Grad unterscheiden. Dieser Unterschied in der Selbstinduction beider Zweige kann herbeigeführt werden durch verschiedene Windungszahlen der Feldmagnetspulen und die Anordnung des Eisens in ihrer Umgebung, oder indem man in einen der Zweige eine Drahtspule mit Eisenkern einschaltet. In den anderen Zweig bringt man einen inductionsfreien Widerstand.

Ein Phasenunterschied kann auch hervorgebracht werden, indem man dem einen Zweig Ladungsfähigkeit verleiht; denn die letztere hat die Wirkung, dem Strom eine Voreilung zu ertheilen. Gewöhnlich wird für diesen Zweck ein elektrolytischer Condensator verwendet, der aus einer Anzahl Eisenplatten in einer Sodalösung besteht.

Motoren mit Stromtheilung unter Phasenverschiebung.

Von dieser Anordnung, eine Phasendifferenz für das Angehen zu erzeugen, kann auch Gebrauch gemacht werden, um den Motor in Gang zu halten. Von Tesla wurden zweiphasige Motoren construirt, bei welchen beide Polsätze mit Wickelungen von verschiedenen Widerständen und Inductanzen versehen waren. Sie können von einer einzigen Wechselstromquelle gespeist werden.

#### Theorie der einphasigen Wechselstrommotoren.

Professor Ferraris hat eine Methode<sup>1)</sup> zur Behandlung des Gegenstandes angegeben, in der das magnetische Wechselfeld angesehen wird, als sei es in zwei in entgegengesetzten Richtungen

1) G. Ferraris, A Method for the Treatment of Rotating or Alternating Vectors, with an application to Alternate-current Motors. The Electrician, Bd. 33, S. 110, 129, 152, 184. 1894.

umlaufende magnetische Felder zerlegt worden. Es ist ein in der Mechanik häufig benutzter Kunstgriff, eine harmonische geradlinige Bewegung zu zerlegen in zwei gleiche Kreisbewegungen von entgegengesetzten Richtungen. Fig. 494 zeigt einen Weg, auf dem dies erreicht werden kann. Die Schwingungsweite der ursprünglichen Bewegung ist gleich dem Durchmesser jeder der beiden Kreisbewegungen. Ferraris behandelt indessen die Aufgaben des magnetischen Wechselfeldes ganz allgemein, indem er den geometrischen Begriff des umlaufenden Vectors benutzt.

Wenn wir (Fig. 495) durch den Vector  $b_1$ , der sich in der Richtung des Uhrzeigers gleichmässig um  $O$  dreht, Grösse und Richtung eines magnetischen Drehfeldes bezeichnen, und durch  $b_2$

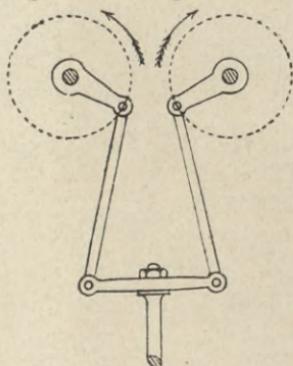


Fig. 494.

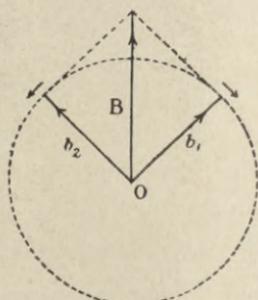


Fig. 495.

Grösse und Richtung eines anderen Feldes von derselben Stärke, welches sich mit der gleichen Geschwindigkeit  $n$  in der entgegengesetzten Richtung dreht, so erkennt man, dass die Richtung des resultirenden Feldes immer längs der Geraden  $\mathfrak{B}$  liegt, und dass seine Grösse zwischen den Grenzen  $+2b$  und  $-2b$  nach einer Sinusfunction der Zeit schwingt, so dass wir schreiben können  $\mathfrak{B} = 2b \cdot \sin 2\pi n t$ .

Umgekehrt, wenn wir ein Wechselfeld haben, das der Formel  $\mathfrak{B}_0 \sin 2\pi n t$  folgt, wie in einem einphasigen Motor, so können wir es auflösen in zwei entgegengesetzt laufende Drehfelder derselben Drehungsgeschwindigkeit  $n$  und können die Wirkung jedes Feldes auf den Läufer besonders betrachten.

Wenn der Läufer sich in der Richtung des Uhrzeigers mit der Geschwindigkeit  $m$  dreht, so ist die Drehungsgeschwindigkeit des mit dem Uhrzeiger laufenden Feldes mit Bezug auf den Läufer  $n - m$ , die Geschwindigkeit des entgegengesetzt laufenden Feldes  $n + m$ .

Jedes Feld kann angesehen werden, als erzeuge es Ströme im Läufer, und die Zugkraft, die aus solchen, durch das Feld fließenden Strömen entspringt, kann angegeben werden durch die Formeln, die für Drehstrommotoren angewandt werden.

Wir fanden oben (Seite 676), dass ein Feld, das sich mit der Geschwindigkeit  $g$  gegen den Läufer bewegt, ein Drehmoment

$$D = q \cdot \frac{rg}{r^2 + 4\pi^2 L^2 g^2}$$

hervorbringt, wo  $L = k$ , und der Coefficient  $2\pi$  hinzugefügt ist, weil Seite 676  $g$  eine Winkelgeschwindigkeit bedeutete, wogegen hier  $m$  und  $n$  Umdrehungen in der Secunde sind. Das Drehmoment, welches von den beiden entgegengesetzt sich drehenden Feldern erzeugt wird, ist

$$\text{Drehmoment} = qr \left[ \frac{n - m}{r^2 + 4\pi^2 L^2 (n - m)^2} - \frac{n + m}{r^2 + 4\pi^2 L^2 (n + m)^2} \right],$$

wo  $q$  proportional der Zahl der Leiter auf dem Läufer und dem Quadrate der magnetischen Strömung ist.

Es ist nicht nöthig, das Drehmoment zu betrachten, welches dadurch entsteht, dass die Ströme, die von dem einen Drehfeld herrühren, in Leitern

fließen, die sich in dem entgegengesetzt laufenden Drehfeld befinden; denn die Wechselgeschwindigkeit dieser Ströme unterscheidet sich um  $2m$  von der des entgegengesetzten Feldes, und demnach ändert dieses Drehmoment sehr rasch seine Richtung.

Um das Drehmoment zu finden, welches das im Sinne des Uhrzeigers mit der Geschwindigkeit  $n - m$  umlaufende Feld erzeugt, ziehen wir die Curve  $OPQW$  (Fig. 496, vergl. Seite 677, wo die Curve umgekehrt ist), welche das Verhältniss zwischen Geschwindigkeit und Drehmoment zeigt nach der Formel

$$D = q \cdot \frac{rg}{r^2 + 4\pi^2 L^2 g^2}.$$

Es möge  $OQ_1$  die Drehungsgeschwindigkeit  $n$  des Feldes darstellen; tragen wir nun rückwärts von  $Q_1$  die Länge  $Q_1P_1 = m =$  Geschwindigkeit des Läufers ab, so erhalten wir die Abscisse  $OP_1$

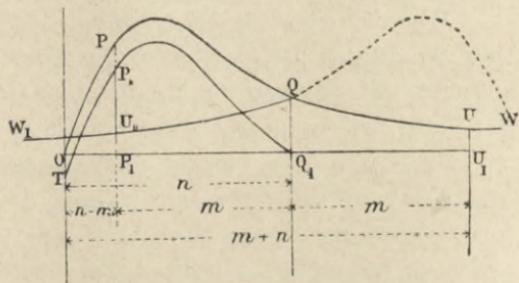


Fig. 496.

$= n - m$ , und die Ordinate  $P_1P$  bedeutet das fragliche Drehmoment.

Um das zu dem entgegengesetzt laufenden Felde gehörige Drehmoment zu erhalten, verlängern wir  $OQ_1$  um  $Q_1U_1 = m$  und bekommen  $OU_1 = n + m$ ; nun bedeutet  $UU_1$  das Drehmoment, welches der Geschwindigkeit  $n + m$  entspricht. Da diese dem Drehmoment  $PP_1$  entgegenwirkt, so können wir von  $PP_1$  ein Stück  $PP_{11} = UU_1$  abschneiden und erhalten nun  $P_{11}P_1$ , welches das thatsächliche Drehmoment des Läufers angiebt.

Zur bequemeren Ableitung der Drehmomente, die dem in umgekehrter Richtung laufenden Felde entsprechen, können wir  $QW_1$  symmetrisch zu  $QW$  ziehen und dann die Zwischenglieder, wie  $U_{11}P_1$ , aus den Ordinaten, wie  $PP_1$ , ableiten. Indem wir dies für alle Ordinaten zwischen  $O$  und  $Q_1$  ausführen, erhalten wir die neue Curve  $TP_{11}Q_1$ , deren Ordinaten das wahre Drehmoment für verschiedene Werthe von  $m$  darstellen.

Wenn  $m = 0$  ist, d. h. wenn der Läufer stillsteht, so halten sich die beiden Drehmomente das Gleichgewicht; wenn  $m$  wächst, so steigt das Drehmoment auf einen Höchstwerth und fällt dann auf Null, ehe  $m$  gerade so gross als  $n$  ist; wächst  $m$  noch weiter, so entsteht ein Drehmoment von entgegengesetzter Richtung.

Hierbei wird angenommen, dass die wirkende Kraftlinienmenge unverändert bleibt; dies ist nur richtig, so lange der Motor mit demselben Strom gespeist wird. Die Curve kann also nicht als die wahre Charakteristik des mit constanter Spannung gespeisten einphasigen Motors angesehen werden, aber sie ist nützlich als eine einfache Darstellung seines Verhaltens im Allgemeinen. Wenn der Motor belastet wird, so nimmt seine Geschwindigkeit ein wenig ab, ein stärkerer Strom fliesst durch den Feldmagnet und verstärkt dementsprechend das ursprüngliche Feld, so dass die mit  $q$  bezeichnete Grösse durchaus nicht mehr constant ist, sondern mit der Belastung wächst. Die hier gegebene Theorie erklärt nur, wie das Wechselfeld im Stande ist, eine Drehung zu erzeugen.

Es ist noch eine Anzahl von Wechselstrommotoren entworfen worden, die unter keine der oben angegebenen Klassen eingereiht werden können, und die überhaupt schwer zu classificiren sind.

Geblätterte Reihenmotoren. Für kleine Leistungen kann ein gewöhnlicher Gleichstrommotor mit Commutator und Bürsten

verwendet werden, vorausgesetzt, dass sein Feldmagnet aus zertheiltem Eisen besteht.

Motoren mit verzögertem Felde. Wenn das eine Ende eines zertheilten Eisenstabes in eine mit Wechselstrom gespeiste Magnetisierungsrolle gesteckt wird, so erfährt der Stab eine wechselnde Magnetisierung. Wenn aber der Stab an einem Punkte in einiger Entfernung von der Spule von einem dicken Kupferring oder kupfernen Fassung umgeben wird, so wirken die in letzterem erzeugten Wirbelströme, welche andere Phase als der primäre Strom haben, in ihrer nächsten Umgebung auf die wechselnde Magnetisierung und verzögern die Phase der magnetischen Polarität an allen Punkten jenseits des Ringes. Wenn also zwei oder drei solcher geschlossenen Ringe oder Bänder aus Kupfer den Eisenkern an verschiedenen Punkten umgeben (Fig. 497), so wird die Wirkung dieselbe sein, als wenn

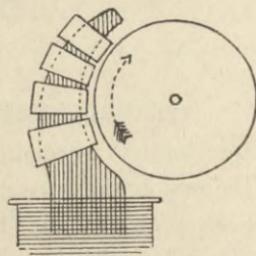


Fig. 497.

die Pole längs des Eisens mit einer begrenzten Geschwindigkeit wandern, oder als wenn auf einen Nordpol ein Südpol und wieder ein Nordpol folgte, jeder nach dem Ende wanderte und dort verschwände. Auf dieser Erscheinung ist der Ferranti-Wright'sche Motor gegründet; er wird benutzt in Ferranti's Wechselstromzählern. Eine drehbar gelagerte eiserne Scheibe befindet sich zwischen zwei gebogenen Polschuhen aus zertheiltem Eisen, von denen jeder von Verzögerungsringen aus Kupfer umgeben ist.

## Kapitel XXVI.

### Umsetzungsapparate.

Wo immer elektrische Energie auf eine gewisse Entfernung fortgeleitet werden soll, fordert die Rücksicht auf Oekonomie gebieterisch die Anwendung einer hohen Spannung<sup>1)</sup>. Auf der anderen Seite fordern die Rücksichten auf die persönliche Sicherheit und die gebräuchlichen Lampenspannungen, dass die elektrische Energie den Verbrauchsstellen mit verhältnissmässig niedrigen Spannungen zugeführt wird. Es sind daher Vorrichtungen erforderlich, welche die Ströme der Hauptleitungen mit hoher Spannung aufnehmen und diese Energie in starke Ströme von geringen Spannungen umwandeln. Diese Vorrichtungen nennt man Umsetzungsapparate oder Transformatoren. Angaben über die geschichtliche Entwicklung der Transformatoren waren in früheren Ausgaben dieses Werkes enthalten.

Zum Transformiren von Gleichströmen dient eine sich drehende Vorrichtung, die im Wesentlichen aus einem von dem ankommenden oder primären Strome getriebenen Motor besteht, der einen Strom-

1) Die elektrische Arbeit in der Secunde wird durch das Product zweier Factoren gebildet, der Stromstärke und der elektromotorischen Kraft, oder

$$e i = \text{Leistung (in Watt).}$$

Die Grössen der Factoren können sich ändern, der Werth der Leistung hängt jedoch nur von dem Product ab. Der Verlust bei Fortleitung der Elektrizität in einem gut isolirten Draht hängt ebenso von zwei Factoren ab, und zwar von der Stromstärke und dem Widerstand des Drahtes; für einen gegebenen Leiter ist der Verlust proportional dem Quadrat der Stromstärke. Will man in einem Leiter bei 10 Ampere und 2000 Volt denselben Verlust erzielen, wie in einem Leiter bei 400 Ampere und 50 Volt, so erfordert der erstere nur  $\frac{1}{1600}$  des Querschnittes des zweiten Leiters. Die Kosten für die Beschaffung der Kupferleiter in Vertheilungsnetzen werden aus diesem Grunde bei Anwendung hoher Spannung und schwacher Ströme, welche durch Umsetzungsapparate wieder auf die für die Verwendungszwecke erforderliche Spannung umgewandelt werden, bedeutend ermässigt.

erzeuger in Bewegung setzt, welcher einen secundären Strom von der gewünschten niedrigen Spannung liefert. Solche Verbindungen werden als Gleichstrom- oder als Gleichstrom-Wechselstrom-Umformer bezeichnet und im nächsten Kapitel näher betrachtet.

Um Wechselströme — seien es einphasige oder mehrphasige — zu transformiren, ist nur eine unbewegliche Vorrichtung erforderlich, bestehend aus einem geeigneten Kern aus zertheiltem Eisen, auf welchen die primären oder secundären Spulen gewickelt sind — die in Wirklichkeit also nichts anderes ist als eine Inductionsrolle. Die Wechselstromtransformatoren bilden den Inhalt dieses Kapitels.

### Grundlehren über Wechselstromtransformatoren.

Die erste und einfachste Form der Transformatoren war der Faraday'sche Ring (Fig. 498), der zwei Spulen, eine primäre und

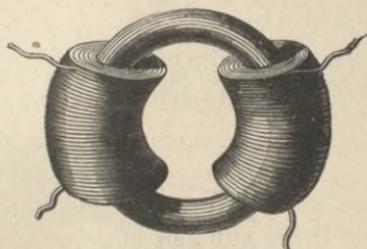


Fig. 498. Faraday'scher Ring mit Primär- und Secundärspulen.

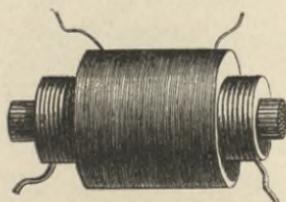


Fig. 499. Einfache Induktionsrolle mit geradem Kern.

eine secundäre, trug. In der secundären Bewickelung entsteht eine elektromotorische Kraft, wenn in der primären die Stromstärke sich ändert, weil die durch den Primärstrom im Eisenring erzeugten magnetischen Linien die secundäre Spule durchdringen und darauf inducirend wirken. Derselbe Vorgang findet in der in Fig. 499 dargestellten Vorrichtung statt, wo die beiden Spulen, die eine über die andere, auf einem geraden Kern aus Eisendrahtbündeln gewickelt sind.

Ein Wechselstrom-Umformer kann als eine Art Dynamomaschine betrachtet werden, in der weder der Anker, noch der Feldmagnet umlaufen, in der jedoch der Magnetismus des Eisenkreises in schnell sich wiederholenden Perioden geändert wird, indem man durch Wechselstrom erregt.

Die primäre Wickelung des Umformers entspricht der Wickelung des Feldmagnetes einer Maschine, die secundäre der Ankerwicklung einer solchen.

Wenn ein Wechselstrom von  $n$  Perioden in der Secunde durch eine der beiden Wickelungen geht, wird in der anderen eine elektromotorische Kraft erzeugt, die dieselbe Frequenz hat, weil der Eisenkern dabei einer wechselnden Magnetisirung von ebenfalls  $n$  Kreisläufen in der Secunde unterliegt. Die Wirkung auf die secundäre Spule ist dieselbe, als wenn der Eisenkern  $n$  mal in der Secunde in die Spule hinein- und wieder herausgezogen würde. Unsere erste Aufgabe wird nun die sein, die elektromotorische Kraft zu bestimmen, welche in einer Spule von gegebener Windungszahl entsteht, wenn eine wechselnde magnetische Induction im Kerne stattfindet. Bezeichnen wir mit  $N$  die Zahl der Windungen der Spule, mit  $\mathcal{S}$  den grössten Werth der Kraftlinienmenge, und nehmen an, dass die Aenderung der letzteren dem Sinusgesetz folge, so hat die Kraftlinienmenge  $\mathcal{S}_1$  zu irgend einer Zeit  $t$  den Werth

$$\mathcal{S}_1 = \mathcal{S} \cos 2\pi n t.$$

Nun ist aber die elektromotorische Kraft in einer Windung proportional der Geschwindigkeit, mit welcher sich  $\mathcal{S}$  ändert, also proportional  $\frac{d\mathcal{S}}{dt}$ . Wir müssen nun noch mit  $N$  multipliciren und mit  $10^8$  dividiren, um die elektromotorische Kraft der ganzen Spule in Volt zu erhalten. Führen wir die Differentiation aus, so erhalten wir die elektromotorische Kraft der Spule zur Zeit  $t$  als

$$E_t = \frac{2\pi n N \mathcal{S} \sin 2\pi n t}{10^8}.$$

Der effective Werth dieser elektromotorischen Kraft wird erhalten, wenn wir für  $\sin 2\pi n t$  die Quadratwurzel aus den Mittelwerthen der Quadrate, nämlich  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ , einsetzen, dann erhalten wir

$$E = \frac{4,45 n N \mathcal{S}}{10^8}.$$

Diese Formel ist die Grundformel für die Berechnung von Transformatoren.

Betrachten wir nun einen einfachen magnetischen Kreis, auf welchen eine primäre Wickelung von  $N_1$  Windungen und eine secundäre von  $N_2$  Windungen aufgebracht ist (Fig. 500). Nehmen wir zunächst an, dass keine magnetische Streuung vorhanden sei, d. h. dass alle magnetischen Linien, welche durch den in der primären Wickelung kreisenden Strom erzeugt werden, auch die secundäre Wickelung durchdringen. Die an den Klemmen der

primären Wickelung wirkende elektromotorische Kraft ruft einen Primärstrom hervor, der in dem magnetischen Kreis eine wechselnde Kraftlinienmenge erzeugt; diese ihrerseits inducirt elektromotorische Kräfte, und zwar nicht nur in der secundären Wickelung, sondern auch eine elektromotorische Gegenkraft in der primären Wickelung. Diese beiden elektromotorischen Kräfte werden genau proportional sein der Zahl der Windungen, und absolut gleiche Phase miteinander haben. Wir können sie ausdrücken durch

$$E_1 = \frac{4,45 n N_1 \mathcal{E}}{10^8}$$

und

$$E_2 = \frac{4,45 n N_2 \mathcal{E}}{10^8};$$

es ist also

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Dieses Verhältniss nennen wir das Transformationsverhältniss, wir bezeichnen es in diesem Kapitel mit  $k$ .

Nun sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Der secundäre Stromkreis ist offen.
2. Der secundäre Stromkreis ist durch eine Anzahl Lampen oder durch andere Widerstände geschlossen.

Wenn der secundäre Stromkreis offen ist, so wird in ihm, wenn auch eine elektromotorische Kraft inducirt wird, doch kein secundärer Strom entstehen, und also auch von dieser Wickelung keine Gegenwirkung irgend welcher Art ausgeübt. Die einzig vorhandene Wirkung ist die der primären Wickelung auf sich selbst. Wie bei einem ohne Belastung laufenden Motor wird auch bei einem Transformator in solchem Falle die gegenelektromotorische Kraft fast gleich der wirkenden elektromotorischen Kraft sein. Letztere muss um ein Geringes grösser sein, denn es muss soviel unausgeglichene Spannung vorhanden sein, als nöthig ist, um den erforderlichen geringen magnetisirenden Strom durch den inneren Widerstand der primären Wickelung zu treiben; da Verluste durch Hysteresis und Wirbelströme entstehen, muss für sie auch ein kleiner Primärstrom da sein. Wenn wir aber hiervon absehen, ist die einzige Wirkung der primären Wickelung, wenn die secundäre offen ist,

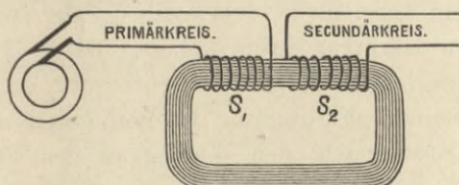


Fig. 500. Einfacher Transformator.

diejenige einer Drosselspule, und die inducirte elektromotorische Kraft  $E_1$  wird fast genau entgegengesetzte Phase wie der Primärstrom haben.

Gehen wir jetzt über zu dem Falle, wenn die secundäre Wickelung durch einige Lampen oder sonstige Widerstände geschlossen ist, und setzen wir zunächst voraus, dass diese Widerstände inductionsfrei sind, so wird ein secundärer Strom entstehen, welcher mit der inducirten elektromotorischen Kraft  $E_2$ , also auch mit  $E_1$ , gleiche Phase hat, demnach fast genau in der Phase entgegengesetzt zum Primärstrom ist. Wenn der Primärstrom zu seinem Maximum ansteigt, wird dies auch der Secundärstrom thun, aber er wird entgegengesetzte Richtung haben. Während der Primärstrom magnetisirend wirkt, wirkt der Secundärstrom entmagnetisirend, und es ist klar, dass die Kraftlinienmenge, von welcher die gegen elektromotorische Kraft der Primärwickelung abhängt, nicht so gross sein kann als in dem vorigen Falle, wenn nicht von der Stromquelle ein stärkerer Strom geliefert wird. In Wirklichkeit wird dies aber von selbst stattfinden wegen der entmagnetisirenden Wirkung des secundären Stromes. Das Vorhandensein eines Stromes im secundären Kreise macht den Widerstand des Primärkreises scheinbar kleiner. Die primäre Wickelung wirkt nun nicht mehr wie eine Drosselspule, die den Primärstrom eindämmt, sondern wie eine Ankerspule, welche Strom im secundären Kreise inducirt, indem der Primärstrom stark genug wird, um die wechselnden magnetischen Kraftlinien trotz der entmagnetisirenden Wirkung des Secundärstromes aufrecht zu erhalten. Wenn nur die Hälfte der Lampen eingeschaltet ist, wird die secundäre Wickelung zum Theil als Drosselspule, zum Theil als Arbeitsspule wirken. Wenn die primär wirkende elektromotorische Kraft constant gehalten wird, wird auch die Klemmenspannung des Lampenkreises nahezu constant sein; die ganze Vorrichtung wird sehr gut selbstregelnd sein, indem von selbst mehr Strom im primären Kreise fliesst, wenn mehr Lampen im secundären Kreise eingeschaltet werden.

Die elementare Theorie dieses einfachsten Falles eines Transformators ohne Streuungsverlust, der auf einen inductionsfreien Lampenkreis arbeitet, ist sehr leicht. Wir wählen dieselben Bezeichnungen, welche wir bei der Theorie der Dynamomaschinen und Motoren gebraucht haben; also bedeutet  $\mathcal{E}$  die an den Primärklemmen gemessene Spannung des Stromes,  $e$  die Spannung an den secundären Klemmen. Es sei  $r_1$  der innere Widerstand der

primären Wicklung,  $r_2$  derjenige der secundären; ferner das Transformationsverhältniss

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2}.$$

Da abgesehen von geringen, hier vernachlässigten Verlusten durch Hysterisis die durch den schwankenden Magnetismus des Kernes geleistete Arbeit gleich der an ihn abgegebenen ist, können wir ferner schreiben:

$$E_1 i_1 = E_2 i_2, \text{ woraus folgt, dass } i_1 = \frac{i_2}{k} \text{ ist.}$$

Die in der Primärwicklung verlorene Spannung ist  $r_1 i_1$ , diejenige der secundären  $r_2 i_2$ . Daraus folgt

$$\mathcal{E} = E_1 + r_1 i_1,$$

$$e = E_2 - r_2 i_2.$$

Schreiben wir die erstere Gleichung in der Form

$$E_1 = \mathcal{E} - r_1 i_1 = \mathcal{E} - \frac{r_1 i_2}{k},$$

und setzen  $\frac{E_1}{k} = E_2$

in die zweite Gleichung ein, so erhalten wir nach Substitution von

$$E_1 = \mathcal{E} - \frac{r_1 i_2}{k}$$

die Gleichung 
$$e = \frac{\mathcal{E}}{k} - \left( \frac{r_1}{k} + r_2 \right) i_2,$$

welche zeigt, dass die Vorgänge in der secundären Wicklung sich gerade so abspielen, als wenn die primäre nicht vorhanden wäre und wir statt  $\mathcal{E}$  einen Theil desselben substituirt hätten, der proportional der Zahl der Windungen ist, und gleichzeitig dem inneren Widerstande einen Betrag zugefügt hätten gleich dem inneren Widerstand der primären Rolle, vermindert im Verhältniss zum Quadrat der Zahl der Windungen.

Beispiel. Bei einem Transformator von Mordey mit einer Leistung von  $1\frac{1}{2}$  Kilowatt ist  $N_1 = 300$ ;  $N_2 = 12$ ;  $r_1 = 10$  Ohm;  $r_2 = 0,014$  Ohm;  $\mathcal{E} = 1000$  Volt. Gesucht  $e$ , wenn  $i_2 = 36$  Ampere. Hier ist  $k = 25$ , also bei offenem Kreise die secundäre Spannung genau gleich  $\frac{1}{25}$  der primären, gleich 40 Volt. Nach der oben entwickelten Formel würde bei einer Leistung von 36 Ampere die Klemmenspannung  $e$  auf 38,92 Volt fallen.

### Bauart der Transformatoren.

Die Aufgabe des Kernes besteht darin, die magnetischen Linien, welche durch die um ihn kreisenden Ströme erzeugt werden, aufzunehmen und durch sie Inductionswirkungen auf die Wickelungen auszuüben. Es ist daher klar, dass es bei dem Bau von Transformatoren wesentlich ist, dass der Kern genügend grossen Querschnitt besitzt; ferner muss seine Form so beschaffen sein, dass alle von der primären Wickelung erzeugten magnetischen Linien mit möglichst wenig Verlust durch die Oeffnung der secundären Spule gehen; und um dies zu erreichen, muss der magnetische Kreis geschlossen, von gedrängter Form sein, und so wenig Verbindungsstellen als möglich haben. Denn wenn magnetische Streuung vorhanden ist, also ein Theil der von dem Strome in einer der Wickelungen erzeugten magnetischen Linien nicht durch die andere hindurchgeht, wird jede Spule zum Theil das Bestreben haben, ihren eigenen Strom zu schwächen, der Spannungsverlust bei voller Belastung wird demnach grösser sein, als er oben nur unter Berücksichtigung der inneren Widerstände berechnet wurde<sup>1)</sup>. Um also einen Abfall der Inductionswirkung zu vermeiden, müssen wir eine Bauart anwenden, bei welcher die Neigung zu magnetischer Streuung am geringsten ist. Demnach ist es sehr wichtig, die Form des magnetischen Kreises so gedrängt als möglich zu wählen, damit die Zahl der erregenden Ampere-Windungen zur Erreichung der erforderlichen magnetischen Linien möglichst klein bleibt. Wenn wir durch Vermeidung von Verbindungsstellen und Zwischenräumen im magnetischen Kreise, durch Wahl eines sehr durchlässigen Eisens, durch möglichste Kürze des Weges der magnetischen Linien und durch genügend grossen Eisenquerschnitt den magnetischen Widerstand des Kreises recht klein halten, wird nur ein sehr geringer Magnetisirungsstrom erforderlich sein.

---

1) Auch die folgende Ueberlegung liefert dasselbe Ergebniss: Wie am Schlusse dieses Kapitels gezeigt werden wird, muss die Wirkung dieser Anordnung, da sie von der gegenseitigen Induction zweier Stromkreise abhängig ist, die Selbstinduction eines jeden derselben getrennt vermindern; oder, wenn die Wickelungen um denselben Kern herumgehen, muss die Wirkung der gegenseitigen Induction unter geometrisch gleichen Verhältnissen die einzelnen Selbstinductionen aufheben. Eine nicht aufgehobene Selbstinduction in einem Stromkreis muss nothwendigerweise zur Folge haben, dass die Wickelung als Drosselspule wirkt; eine magnetische Streuung wird gerade so wie eine unausgeglichene Selbstinduction wirken.

Um hohen Wirkungsgrad bei Transformatoren zu erreichen, ist es ferner sehr wichtig, ein Eisen zu wählen, welches wenig Hysteresis besitzt, und es in so dünnen Scheiben zu verwenden, dass Wirbelströme vermieden werden (ungefähr 0,5 mm ist die gebräuchliche Stärke).

In constructiver Hinsicht ist es ferner nicht unwichtig, solche Formen zu wählen, bei welchen die Wickelungen auf der Drehbank aufgespult und ohne Weiterungen recht bequem aufgebracht und abgenommen werden können.

Kehren wir zu Fig. 498 zurück, welche einen Faradayschen Ringtransformator darstellt. Der Eisenkern desselben war nicht getheilt, und die beiden Wickelungen waren so angebracht, dass das Bestreben zu magnetischer Streuung quer durch den Ring von oben nach unten verhältnissmässig gross war. Dieser Transformator kann leicht dadurch verbessert werden, dass man den Kern aus Draht oder Scheiben herstellt und die primäre und secundäre Spule in Abtheilungen aufwickelt, welche abwechselnd aufeinander folgen, wie in Fig. 501.

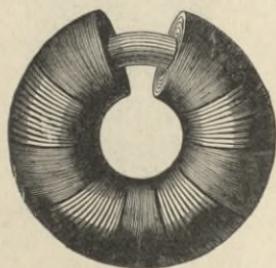


Fig. 501. Ring-Transformator mit abwechselnden Wicklungen.

Wir wenden uns nun zur Fig. 499, welche die cylindrische Form der Transformatoren darstellt, die ebenfalls von Faraday angewendet, später von Callan, Masson und Ritchie ausgebaut, sowie von Ruhmkorff zum Zwecke der Herstellung von Inductionsfunken vervollkommnet wurde. Er hat einen schlechten magnetischen Kreis, denn die magnetischen Linien müssen ihren Rückweg durch die Luft nehmen, der magnetisirende Strom muss daher verhältnissmässig sehr stark sein; ferner wird der Streuungsverlust ziemlich beträchtlich sein, obwohl nicht so gross, als wenn beide Spulen getrennt voneinander auf die beiden Enden des Kernes statt übereinander gewickelt wären. Fig. 502 zeigt eine von Varley angegebene Form, welche augenscheinlich eine Verbesserung bedeutet, da der magnetische Kreis weit besser geschlossen ist. Der Transformator von Ferranti, Fig. 513, gleicht dieser Form, jedoch ist sein Kern aus Eisenblechstreifen aufgebaut. Wenn wir uns die beiden Spulen ganz kurz gewickelt und nebeneinander auf den Kern gesetzt denken, wird aus der länglichen Form der Fig. 502 die kurze der Fig. 503, welche von Zipernowsky herrührt. Kapp hat für diese

Form die Bezeichnung »Schalen- oder Manteltransformator« vorgeschlagen zur Unterscheidung von den Formen mit geraden oder nicht umfassenden Kernen, welche er »Kerntransformatoren« nennt. Jedoch ist diese Unterscheidung nicht genau, weil beide Formen ineinander übergehen. Denn alle Schalentransformatoren haben einen Kern, und alle Kerntransformatoren haben, wenn sie gut gebaut sind, also einen geschlossenen magnetischen Kreis haben, auch irgend welche Eisentheile an der Aussenseite der Spulen; so ist also nur die Frage, in wie weit im einzelnen Falle die aussenliegenden Eisentheile eine voll-

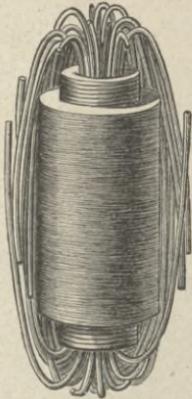


Fig. 502. Varley's Transformator mit geschlossenem Eisenkreis.

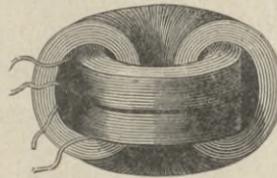


Fig. 503. Zipernowsky's Schalen-Transformator.

ständige Schale bilden. Es ist sicher, dass ausgezeichnete Transformatoren nach jeder dieser beiden Formen hergestellt worden sind.

#### Formen neuerer Transformatoren.

Die neueren Formen von Transformatoren haben ausnahmslos Kerne aus dünnen gestanzten Eisenblechstücken (aus besonders geeignetem Eisen). Es hat sich nämlich herausgestellt, dass bei vielen Eisensorten mit der Zeit eine allmähliche Steigerung des Widerstandes bis auf das Dreifache des anfänglichen Werthes eintritt (magnetische Ermüdung). Das zu verwendende Eisen ist daher sorgfältig auszuwählen. Die in den Fig. 504 und 505 dargestellten Formen sind typisch für eine Klasse, bei welcher die aneinander gefügten Blechstücke einen langen centralen Kern und eine äussere Schale bilden, zwischen welchen zwei lange Oeffnungen sich befinden, die die Wickelungen aufnehmen. Die einzelnen Fabriken haben besondere Formen der Blechstücke und stellen die Wickelungen in verschiedener Weise her.

Um an Material zu sparen, führte Mordey die in Fig. 506 dargestellte Form ein, bei welcher die den inneren Kern bildenden Querstücke einfach aus den rechteckigen Theilen bestehen, welche

aus den die äussere Schale bildenden Blechen ausgestanzt sind. Diese Stücke werden beim Aufbau um und zwischen die Spulen geschoben, welche vorher auf einen leichten rechtwinkligen Rahmen *A* (Fig. 506) aus hartem, mit Ozokerit imprägnirtem Holze aufgewickelt sind.

Fig. 507 zeigt schematisch vier verschiedene Methoden der Unterbringung der primären und secundären Wickelung in dem verfügbaren Raume der Oeffnungen. Abgesehen von einer Zugabe für den kleinen Extrabetrag des Primärstromes zur Magnetisirung sind die für die primäre und die secundäre Wickelung erforderlichen Kupfermengen gleich (bei geringsten Wärme- und Spannungsverlusten); denn wenn der secundäre Draht nur  $\frac{1}{k}$  so viel Windungen hat als der primäre, muss er  $k$  mal so viel Strom führen, also auch einen  $k$  mal grösseren Querschnitt haben.

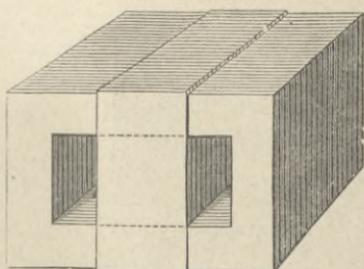
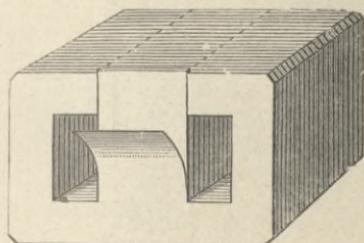


Fig. 504 und 505. Kernplatten von Transformatoren (Westinghouse und Mordey).

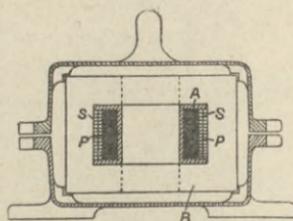


Fig. 506. Mordey's Transformator (Querschnitt).

Gewöhnlich stellt man die Hochspannungswickelung aus rundem, gut isolirten Draht her, die Niederspannungswickelung aus isolirten Kupferbändern oder rechteckigen Streifen. Da die Isolation des Drahtes einen verhältnissmässig grösseren Raum einnimmt, ist auch der gesammte von der Hochspannungswickelung erfüllte Raum grösser als der von der secundären eingenommene. Wegen der unvollkommenen Lüftung kann die Stromdichte nicht sehr gross sein; 0,8 Ampere auf ein Quadratmillimeter wird schon als ziemlich hoch betrachtet (vergl. die Tabelle Seite 348).

In den Fig. 508, 509 und 510 sind drei jetzt sehr beliebte Formen dargestellt, wobei indessen die Verbindungen der Kernstücke nicht zu sehen sind. Die erste Form ist die vorhin betrachtete lange Schalenform, mit ausserordentlich gedrängtem

magnetischen Kreise und langen, auf einem besonderen Rahmen hergestellten Spulen. Die zweite Figur stellt eine von der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft, Berlin, benutzte Form (vergl. Fig. 511) dar, mit einem langen Kern, über den die in cylindrischer Form auf Spulen hergestellten Wickelungen geschoben werden können; erst wenn diese an ihre Stelle gebracht sind, werden die mit bearbeiteten Flächen versehenen Jochstücke eingesetzt und

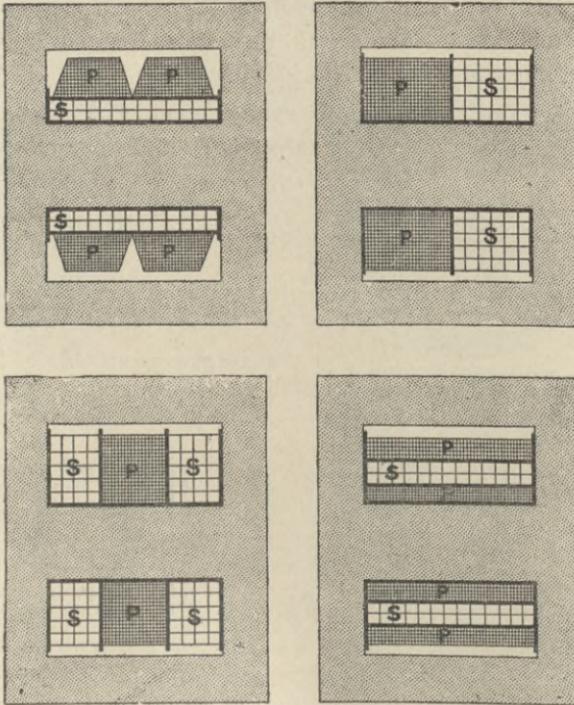


Fig. 507. Verschiedene Arten der Anordnung der Wickelungen bei Transformatoren.

dadurch der magnetische Kreis geschlossen. Diese Methode, die Wickelungen cylindrisch übereinander auf einen langen Kern aufzubringen, hat sich zur Vermeidung von Streuungs- und Spannungsverlusten ausserordentlich bewährt und bietet eine gute Regelung. Eine Annäherung an die cylindrische Form findet statt bei Verwendung von abgestuften Grössen der Kernplatten. Der dünne Hochspannungsdraht wird in zwei Theile getheilt zu dem Zwecke, um die Theile, welche sehr grosse Potentialunterschiede aufweisen, weit auseinander zu legen; die Wickelung nimmt an den Enden conisch ab, um die vorstehenden Spulenwangen zu vermeiden; ohne die letzteren ist die Isolation sowohl in Oel als in der Luft besser.

Der von Brown, Boveri & Co. jetzt hergestellte Transformator hat einen ähnlichen inneren Kern, über welchen auf einen Papiercylinder die secundäre Wickelung, aus Kupferstreifen bestehend, aufgeschoben wird; über diese wird dann die primäre, aus zwei conischen Rollen bestehende Wickelung geschoben. Das Joch besteht nicht wie in Fig. 511 aus zwei Theilen, sondern aus einem Stück vom doppelten Querschnitt mit besonders geformten Verbindungsstellen.

Die in Fig. 510 dargestellte Form ist von Johnson und Phillips, ur-

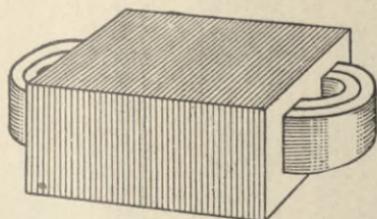


Fig. 508.

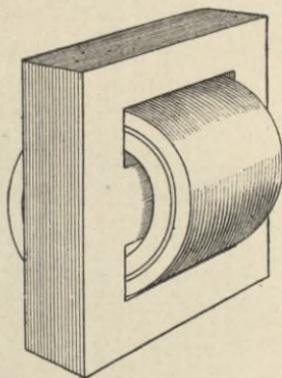


Fig. 509.

sprünglich nach den Plänen von Kapp, hergestellt, und kann als ein verbesserter Faraday'scher Ring bezeichnet werden. Diese Form mit stehenden Wickelungen nimmt weniger Raum ein, als die mit wagerechter Wickelung, obwohl sie den Nachtheil hat, dass die oberen Rollen auf den unteren lasten und dadurch leicht deren Isolation beschädigen können. Es scheint aber dieser Nachtheil praktisch nicht von Bedeutung zu sein, da die meisten Firmen die stehende Anordnung bevorzugen.

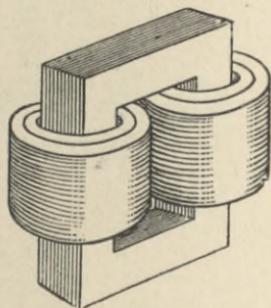


Fig. 510.

Fig. 512 stellt den sogen. Igeltransformator von Swinburne<sup>1)</sup> dar; als Kern dient ein Bündel Eisendrähte, auf welche die Kupferwickelungen aufgebracht werden; die Eisendrähte werden alsdann mit ihren Enden nach allen Richtungen hin auseinandergebogen, um den magnetischen Widerstand zu verringern, der trotzdem in jedem Falle ziemlich hoch ist, da der magnetische Kreis ein offener ist. Man nahm an, dass er einen besseren Nutzeffect hätte, da das Gewicht des Eisens so gering und daher der Verlust durch Hysteresis und Wirbelströme

1) Journ. Inst. Electr. Eng., Bd. 20, S. 183. 1891.

gleichfalls klein ist. Aber wegen seines unvollkommenen magnetischen Kreises erfordert er einen sehr bedeutenden Magnetisierungs-

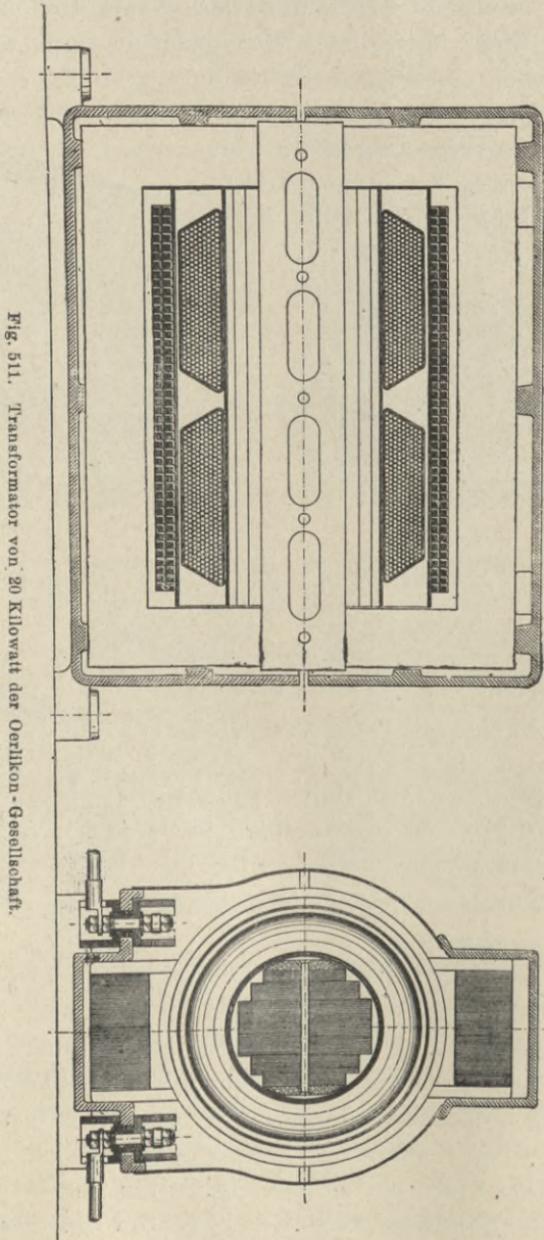


Fig. 511. Transformator von 20 Kilowatt der Oerlikon-Gesellschaft.

strom und verbraucht daher bei geringer Belastung einen unverhältnissmässig grossen Energiebetrag in der primären Wickelung.

Es wird jetzt allgemein anerkannt, dass Formen mit kurzgeschlossenen magnetischen Kreisen vorzuziehen sind: sie bieten noch den weiteren Vortheil, dass Verluste durch Wirbelströme in den Kupferleitern, auch wenn sie sehr mässig sind, gänzlich vermieden werden.

Ferranti's Transformator für aussergewöhnlich hohe Spannung (Fig. 513) hat einen Kern, der aus einer grossen Anzahl dünner Eisenstreifen zusammengesetzt ist, welche senkrecht durch die Mitte der Kupferwickelungen geführt, und oben und unten so rundum



Fig. 512. Swinburne's  
Igeltransformator.

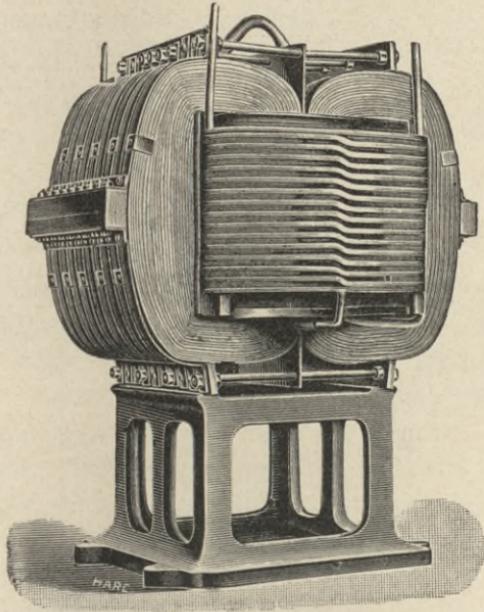


Fig. 513. Transformator von Ferranti.

nach den Seiten gebogen sind, dass sie den magnetischen Kreis schliessen. Die Wickelungen bestehen aus sehr sorgfältig isolirten Kupferstreifen, von denen mehrere zu Abtheilungen vereinigt sind, die durch Isolirsichten voneinander getrennt sind. In dieser Weise sind die Wickelungen, drei an der Zahl, aufgebaut; die innerste bildet einen Theil des primären Kreises, dann folgt die secundäre Wickelung und dieser die dritte, welche wieder ein Theil des primären Kreises ist. In die Zwischenräume zwischen den einzelnen Wickelungen sind Ebonitscheiben eingelegt, durch welche das Ueberspringen von Funken aus den Hochspannungswickelungen verhindert werden soll. In den senkrechten Zwischenräumen, wo die Ebonit-

scheiben zwischen den Spulensätzen eingelegt sind, ist auch Raum für die Lüftung gelassen.

Einige Neuerungen in Mehrphasen-Transformatoren bringt die Firma: Actiengesellschaft Electricitätswerke vorm. O. L. Kummer & Co.

Der Dreileiter- und der Zweiphasen-Transformator (D. R.-P. Nr. 108776) sind von gleicher Eisenkonstruktion, welche im Wesentlichen aus den Schenkeln  $bd$  und  $ce$ , sowie den Schlußstücken  $aBC$

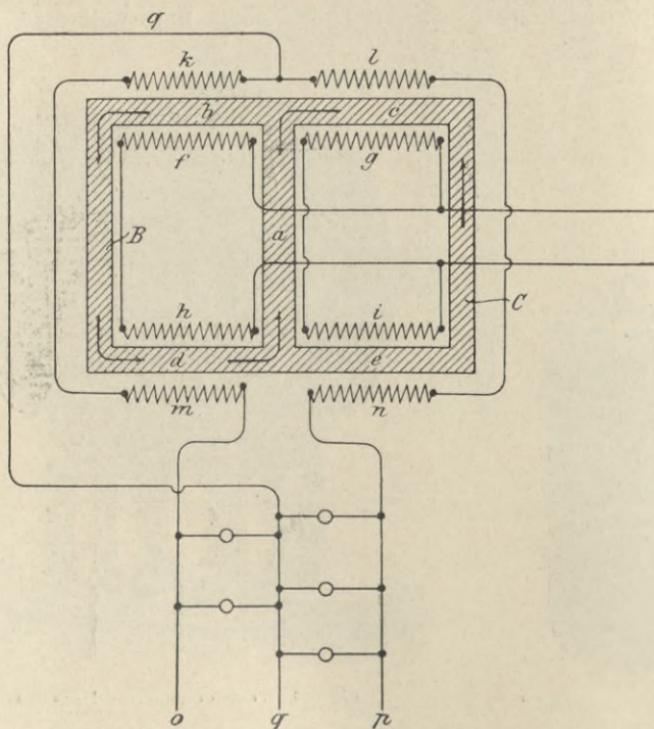


Fig. 514. Schema eines Dreileiter-Transformators.

besteht und schematisch in der Fig. 514 gezeichnet ist. Die Schaltung der Wicklung ist jedoch eine verschiedene, und zwar ist bei dem Dreileiter-Transformator-Schema, Fig. 514, die primäre Wicklung des linken Schenkels  $hf$  und der des rechten Schenkels  $gi$  parallel und so geschaltet, dass die Kraftlinien durch beide Schenkel in gleicher Richtung hintereinander gehen, im Mittelstück  $a$  jedoch gegeneinander gerichtet sind. Sobald Ungleichheiten in der Belastung, bzw. Spannung auftreten, wirkt das Mittelstück  $a$  ebenso ausgleichend wie der Mittelleiter im Dreileitersystem.

Messungen an einem 9 Kilowatt-Transformator ergaben folgende Resultate:

## I. Bei gleicher Belastung der Schenkel:

| Volt I | Amp. I | Volt II | Amp. II | Spannungsabfall<br>in beiden Schenkeln |
|--------|--------|---------|---------|----------------------------------------|
| 246    | —      | 246     | —       | —                                      |
| 244,5  | 20     | 244,5   | 18      | —                                      |
| 242    | 37     | 242     | 37      | 1,68 Prozent.                          |

## II. Einseitige Belastung:

| Volt I | Amp. I | Volt II | Amp. II | Spannungsabfall |
|--------|--------|---------|---------|-----------------|
| 240    | —      | 240     | —       | —               |
| 240    | —      | 238     | 20      | —               |
| 241    | —      | 235,5   | 40      | 1,9 Prozent.    |

## III. Wenn ein Schenkel ausgeschaltet ist:

| Volt I | Amp. I | Volt II | Amp. II | Spannungsabfall |
|--------|--------|---------|---------|-----------------|
| —      | —      | 240     | —       | —               |
| —      | —      | 238     | 20      | —               |
| —      | —      | 235,5   | 40      | 1,9 Prozent.    |

Diese Anordnung bezweckt, einen Uebelstand der gewöhnlichen zweischenkligen Transformatoren zu beseitigen. Wenn man letztere für Dreileiterschaltung verwendet, sinkt die Spannung auf der belasteten Seite und steigt auf der unbelasteten; dies wird durch die beschriebene Anordnung in einfacher und vollkommener Weise verhütet.

Bei dem Zwischenphasen-Transformator sind die primären und die secundären Wickelungen je für sich hintereinander geschaltet.

Eine sehr symmetrische Transformator-Anordnung hat genannte Firma für Dreiphasenstrom eingeführt (D. R.-P. Nr. 113741).

Aus dem Längs- und Querschnitte der Fig. 515 ist zu ersehen, dass drei Schenkel  $d$  vorhanden sind, die senkrecht auf dem unteren Schlussstücke  $g$  stehen, und zwar so, dass der Abstand aller voneinander gleich ist. Die besondere Eigenthümlichkeit der Anordnung besteht jedoch darin, dass die Schenkelbleche in paralleler Richtung zu den Blechen des oberen und unteren Schlussstückes stehen, so dass eine isolirende Zwischenlage an den Stossfugen, die Streuung und Spannungsabfall verursacht, vermieden wird.

Bei der Herstellung werden die oberen und unteren Schlussstücke  $g$  und  $g'$  in Form eines gleichschenkligen Dreieckes gebogen und in passende Gussstücke gepresst; durch Schraubenzwingen  $a$  werden die Segmente zusammengezogen. Die Bolzen  $f$  pressen Ober- und Untertheil auf die Schenkel  $d$ .

Die Messung in Bezug auf Leergangsarbeit, Spannungsabfall und Erwärmung ergab für einen 70 Kilowatt-Transformator sehr günstige

Resultate; dieselben sind in Fig. 516 in Kurvenform aufgetragen, und zwar enthält diese Figur die Kurve des Spannungsabfalles, die Kurve des Wirkungsgrades bei verschiedener Belastung und ebenso den Cosinus der Phasenverschiebung primär und secundär bei der vorhandenen Belastung durch Glühlampen.

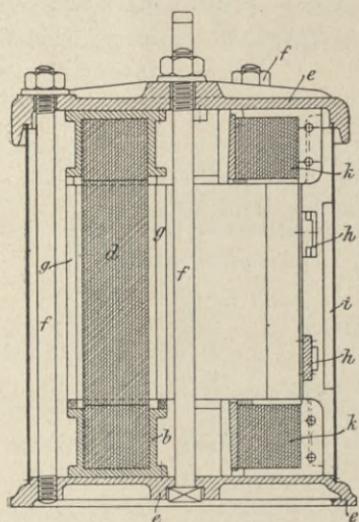


Fig. 515. Schnitte durch einen Dreiphasen-Transformator.

Die einzelnen Schenkel werden durch Anziehen von Druckschrauben fest gegen die Jochstücke gepresst. Die Gehäuse werden bei Transformatoren für Aufstellung in geschlossenen Räumen mit gelochtem Schutzmantel, für Aufstellung im Freien mit geschlossenem Eisenblechmantel und Schutzdach hergestellt.

Die Polklemmen für die Hochspannungs- und Niederspannungswicklung befinden sich auf getrennten Klemmenbrettern. Die Anschlüsse an die Klemmen werden so montirt, dass eine Berührung von blanken, unter Spannung stehenden Theilen unmöglich ist.

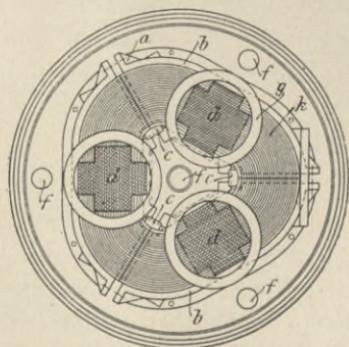
Fig. 517 stellt einen solchen Dreiphasen-Transformator mit abgenommenem Schutzmantel dar.

Die Transformatoren von Siemens & Halske erhalten für Wechselstrombetrieb zwei, für Drehstrombetrieb drei Schenkelkerne aus Eisenblechen, die durch geeignet geformte Jochstücke verbunden sind.

Die Eisenbleche sind einseitig mit Papier beklebt, um bei einfacher Herstellung doch Wirbelströme nach Möglichkeit zu vermindern. Die Bleche werden durch isolirte Bolzen zusammengehalten. Der Schenkelquerschnitt ist kreuzförmig, um bei genügender Lüftung doch eine günstige Ausnützung des Raumes zu haben. Die Wicklungen sind derart um die Schenkel auf isolirte Kästen gewickelt, dass die Hochspannungswicklung die Niederspannungswicklung umgibt.

Die einzelnen Schenkel werden durch Anziehen von Druckschrauben fest gegen die Jochstücke gepresst. Die Gehäuse werden bei Transformatoren für Aufstellung in geschlossenen Räumen mit gelochtem Schutzmantel, für Aufstellung im Freien mit geschlossenem Eisenblechmantel und Schutzdach hergestellt.

Die Polklemmen für die Hochspannungs- und Niederspannungswicklung befinden sich auf getrennten Klemmenbrettern. Die Anschlüsse an die Klemmen werden so montirt, dass eine Berührung von blanken, unter Spannung stehenden Theilen unmöglich ist.



Die Transformatoren haben bei der beschriebenen Anordnung nur geringe Streuung, und daher ist der Spannungsverlust auch bei Phasenverschiebung nicht bedeutend. Der Wirkungsgrad beträgt bei den kleineren Transformatoren von 1 Kilowatt etwa 92 Procent, bei den grossen von 150 Kilowatt etwa 98 Procent.

Die mittlere Figur auf Tafel XXII stellt einen Drehstrom-Transformator von 20 Kilowatt dar, der behufs Aufstellung im Freien in ein verschliessbares Gehäuse eingebaut ist.

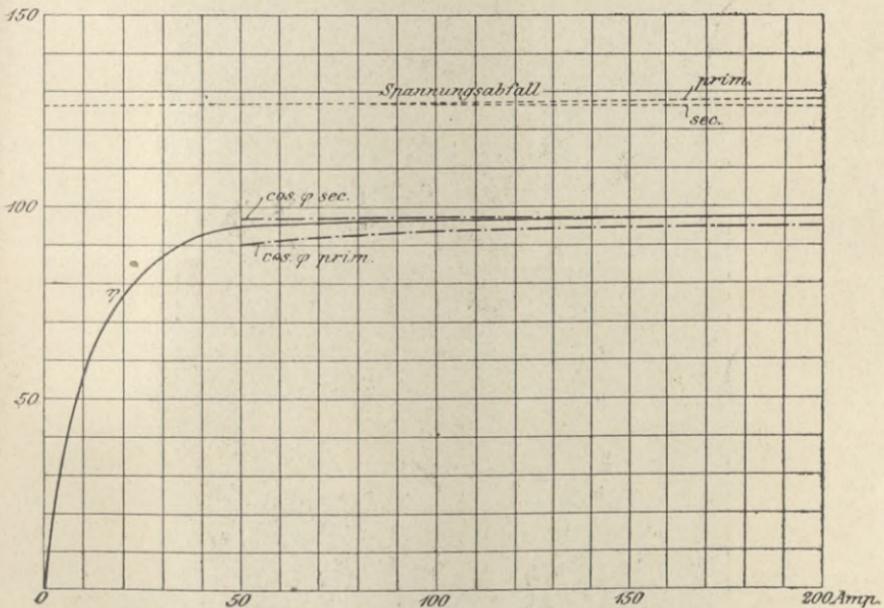


Fig. 516. Diagramm eines 70 Kilowatt-Transformators.

Die Transformatoren der Union Elektrizitäts-Gesellschaft werden für Leistungen von 100 Kilowatt aufwärts zur sicheren Abführung der in Wärme umgesetzten Energie mit künstlicher Luftkühlung versehen. Die primären und secundären Wicklungen bestehen aus flachem, hochkantig aufgewundenem Kupferband und sind in viele Spulen abgetheilt. Zahlreiche Aussparungen zwischen den Lamellen des Transformators und denen der Spulen ermöglichen eine gute Abkühlung durch fortwährende Luftcirculation. Derartige Apparate, sogen. Unterstations-Transformatoren, sind für Spannungen bis zu 30000 Volt im Betrieb.

Fig. 518 stellt einen Transformator der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals H. Pöge dar. Er ist für eine Leistung von

30 Kilowatt bestimmt bei einem Uebersetzungsverhältniss von 2000 : 110. Die Kerne und Joche sind aus einem besonderen Transformatorblech hergestellt. Das Verhältniss des gesammten Kupfergewichtes zum Eisen ist ein verhältnissmässig hohes, wodurch sich die unten angeführten geringen Eisenverluste erklären. Die einzelnen

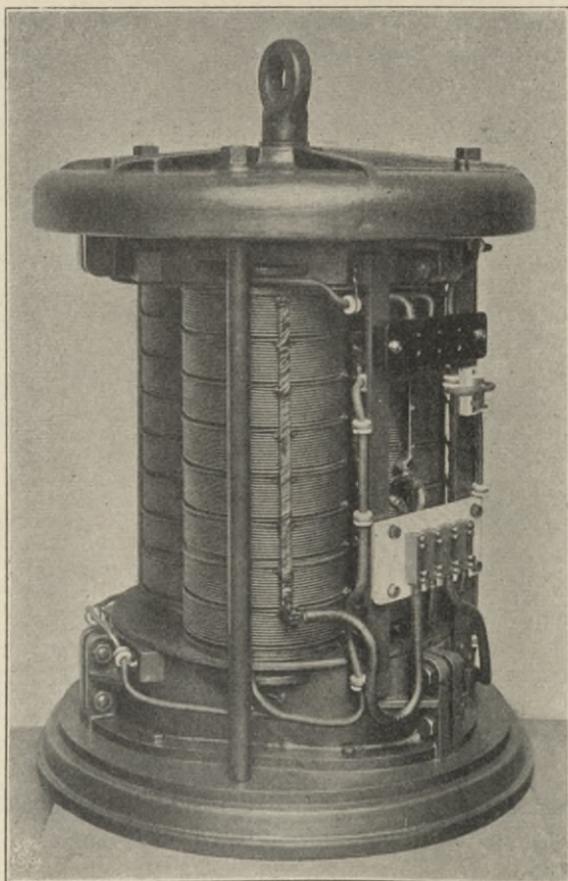


Fig. 517. Ansicht eines Dreiphasen-Transformators von Kummer & Co.

Spulen der Hoch- und Niederspannung sind abwechselnd aufeinander aufgebaut derart, dass an den beiden Enden wieder eine Niederspannungsspule sitzt. Die Hochspannungsspulen sind sämmtlich hintereinander geschaltet, so dass also in einer einzelnen die maximale Potenzialdifferenz nur 2000 : 18, das ist rund 110 Volt, beträgt. Hoch- und Niederspannungsplatten sind durch  $2\frac{1}{2}$  mm starke Glimmerplatten, welche die Spulen übergreifen, isolirt. Die Niederspannungsspulen

sind einzeln aus dünnem Draht hergestellt und die einzelnen Spulen werden später parallel geschaltet.

Die beschriebene Construction des Transformators gewährleistet einen sehr geringen Spannungsabfall durch Streuung.

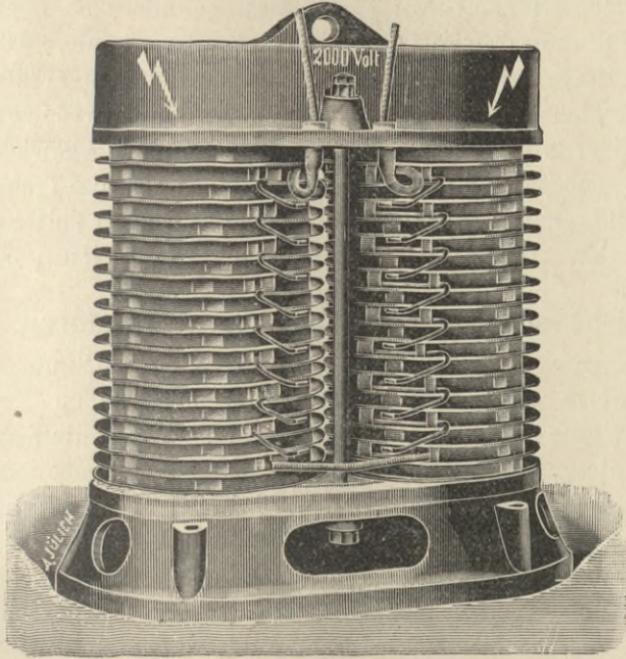


Fig. 518. Transformator von Pöge.

Die wichtigsten Daten des Transformators sind:

|                                                                |                       |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Querschnitt der Kerne . . . . .                                | 195 cm <sup>2</sup> , |
| » des Joches . . . . .                                         | 200 »                 |
| Anzahl der Primärspulen . . . . .                              | 18,                   |
| Windungen einer Spule . . . . .                                | 52,                   |
| Durchmesser des Primärdrahtes . . . . .                        | 4,2, isolirt 4,7 mm,  |
| Gesamte Drahtlänge . . . . .                                   | 650 m,                |
| Verlust in warmem Zustande ca. . . . .                         | 200 Watt,             |
| Anzahl der Secundärspulen . . . . .                            | 20,                   |
| Windungen einer Spule . . . . .                                | 26,                   |
| Durchmesser des Drahtes . . . . .                              | 5,7, isolirt 6,2 mm,  |
| Verlust, wie in der Primärwicklung . . . . .                   | 200,                  |
| Raum des gesammten Eisens . . . . .                            | 30 dm <sup>3</sup> ,  |
| Verlust des Eisens durch Hysteresis und Wirbelströme . . . . . | 300 Watt.             |

Es ergibt sich mithin ein Wirkungsgrad des Transformators von etwa 97,7 Proc.

Die Maschinenfabrik Oerlikon baut die Transformatoren mit einer Capacität von mehr als 20 Kilowatt als Kerntransformatoren mit vertikalen Kernen. Auf jedem Kern befindet sich übereinander geschachtelt eine primäre und eine secundäre Spule. Die innere secundäre Spule wird vorzugsweise aus nackten Kupferbändern mit Asbest-Isolation hergestellt. Die Bänder werden entweder hochkantig gewickelt oder in mehreren Lagen parallel aufeinander gewickelt. Die Abbildung auf Tafel XXII stellt einen Wechselstrom-Transformator für 200 Kilowatt mit künstlicher Luftkühlung, für 50 Volt secundärer Spannung dar. Die Wickelungen sind aus Aluminium hergestellt.

### Phasenverhältnisse bei Transformatoren.

Wenn wir bedenken, dass die grösste Bedeutung bei der Wirkungsweise eines Transformators der wechselnden Kraftlinienmenge im Kerne zukommt, ist es nothwendig, zunächst die Beziehungen zwischen dieser und den anderen in Betracht kommenden Grössen zu untersuchen. Es ist zu beachten, dass bei einem Stromnetz von constanter Spannung die Zahl der Kraftlinien kaum jemals zwischen den Endgrenzen Null und Maximum schwankt. Damit die Spannung an den Klemmen eines Lampenkreises constant bleibt, ist wie bei einer Dynamomaschine mit gemischter Wickelung, so auch bei einem geregelten Transformator zur Ausgleichung eines Spannungsabfalles bei voller Belastung nur eine Vermehrung der Kraftlinienmenge um 2 oder 3 Procent erforderlich. Zur Vereinfachung der Sache wollen wir indessen annehmen, dass ein Spannungsabfall zulässig ist, dass jedoch die magnetischen Kraftlinien stets den gleichen Kreis umschliessen. Wir wollen ferner zur Vereinfachung das Umsetzungsverhältniss  $= 1$  annehmen, so dass die Amperewindungen jeder Wickelung nach irgend einem Maassstabe als Ampere aufgetragen werden können. Bei einem anderen Umsetzungsverhältniss wird es zu jeder Zeit einfach sein, den gegebenen Werth für  $k$  einzusetzen. Es ist alsdann  $E_1 = E_2$ , beide stehen rechtwinklig zur Linie  $NON$ , Fig. 519, welche bei dem Uhrdiagramm die Zeit darstellt, wenn die Kraftlinienmenge nach jeder Richtung den grössten Werth hat. Betrachten wir zunächst den Fall, dass keine Belastung vorhanden ist; dann wird nur in der primären Wickelung Strom sein, und dieser Strom würde, wenn weder Hysteresis noch Wirbelströme im Kern vorhanden wären, gänzlich arbeitslos sein, und mit der

primär wirkenden Spannung in Quadratur stehen, aber mit den magnetischen Kraftlinien gleiche Phase haben. Der Werth dieses magnetisirenden Stromes  $i_m$  soll durch die Linie  $Oi_m$  dargestellt werden. Da aber durch Hysteresis und Wirbelströme der Transformator etwas belastet ist, muss nothwendigerweise eine kleine Stromcomponente  $i_p$  gleiche Phase mit der Spannung haben. Dies sei durch die Linie  $Oi_p$  dargestellt. Der wirklich bei unbelastetem Zustande vorhandene Strom wird also die Resultirende  $Oi_o$  von  $Oi_p$  und  $Oi_m$  sein. Der Leistungsfactor bei unbelastetem Transformator ist demnach das

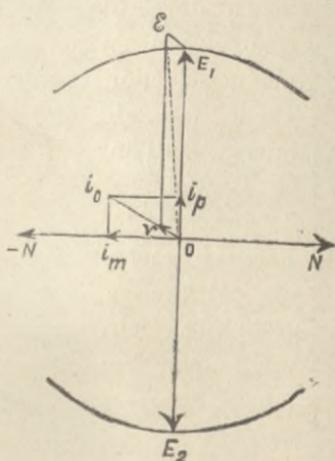


Fig. 519.

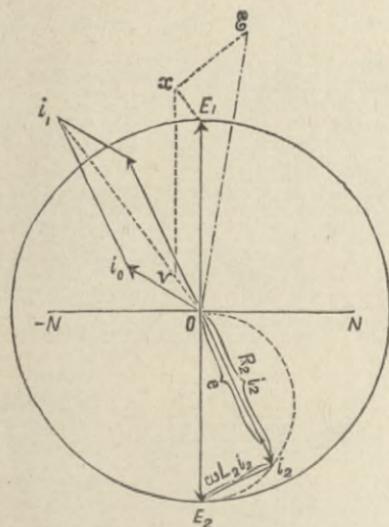


Fig. 520.

Verhältniss der wirklichen Watt zu den scheinbaren Watt, oder  $\frac{i_p}{i_o}$ .

Um die geringe elektromotorische Kraft  $Ov$  hervorzubringen, welche erforderlich ist, um den Strom  $i_o$  durch den inneren Widerstand der primären Wicklung hindurch zu treiben, muss die wirkende primäre Spannung solche Grösse und Phase haben, dass  $O\varepsilon$  die Resultirende von  $OE_1$  und  $Ov$  ist. Aber da der Strom bei unbelastetem Transformator nur etwa, sagen wir 3 Procent des Stromes bei voller Belastung beträgt, und da die in der Primärwicklung verloren gehende Spannung nicht mehr als etwa 2 Procent beträgt, wird  $Ov$  nur ungefähr  $\frac{1}{1500}$  von  $OE_1$  ausmachen, und der Phasenunterschied zwischen  $O\varepsilon$  und  $OE_1$  ganz unbedeutend sein.

Bei voller Belastung sind die Phasenverhältnisse etwas anders, und sie sind verschieden, je nachdem die Belastung des secundären Kreises ein einfacher Widerstand oder ein Inductionswiderstand ist,

da Letzterer eine Verzögerung des secundären Stromes hinter  $E_2$  bewirkt. Wenn wir den letzteren Fall betrachten, können wir leicht feststellen, welchen Unterschied das Fehlen der Selbstinduction ausmachen würde. Wie vorher, gehen wir von der Phase der Strömung aus, und schreiten rückwärts zur Aufsuchung der relativen Phase der wirkenden primären Spannung. Die secundär inducirte elektromotorische Kraft  $E_2$  wird, wie vorher, senkrecht zu  $NON$  stehen.

Wenn nun Inductanz und Widerstand im secundären Kreise vorhanden sind, wird (nach Seite 534) die Verzögerung so sein, dass

$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L_2}{R_2}$  ist; die wirkliche Spannung  $R_2 i_2$ , welche den secundären

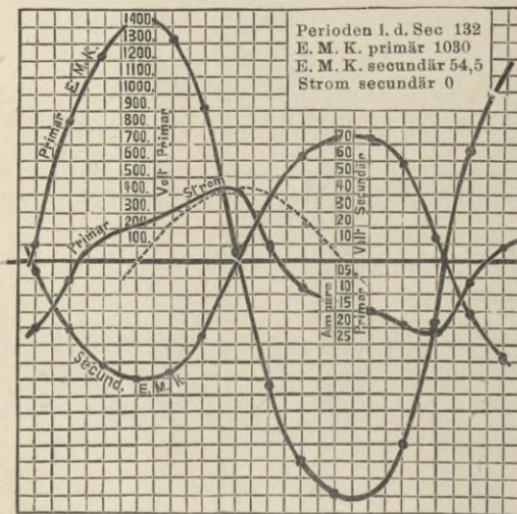


Fig. 521. Curven von Transformatoren bei offenem äusseren Stromkreise.

Strom durch den Widerstand treibt, wird durch die Construction im unteren Theile der Fig. 520 gefunden. Die Länge  $Oi_2$  kann als Darstellung der wirklichen secundären Stromstärke betrachtet werden; die wirkliche Klemmenspannung  $e$  wird erhalten, wenn man von  $Oi_2$  ein kurzes Stück abschneidet, welches der verlorenen Spannung  $r_2 i_2$  entspricht. Der secundäre Strom wird nach seiner Phase ebenfalls durch  $Oi_2$  dargestellt,

und durch passende Wahl des Maassstabes könnte  $Oi_2$  auch der Grösse nach den Secundärstrom darstellen. Verlängern wir  $Oi_2$  nach rückwärts über  $O$  hinaus um sich selbst, und setzen wir diese Linie mit  $Oi_0$  (dem Strome bei unbelastetem Zustande) zu einer Resultirenden zusammen, so erhalten wir in der Linie  $Oi_1$  nach dem gewählten Maassstabe entweder den primären Strom oder die primären Amperewindungen. Auf dieser Linie tragen wir die Grösse  $Or$  ab, welche die zur Ueberwindung des einfachen Widerstandes der secundären Wicklung erforderliche Spannung darstellt. Vereinigen wir nun noch  $Or$  mit der elektromotorischen Gegenkraft  $OE_1$ , welche durch den Kern im Primärkreise erzeugt wird, und berücksichtigen ferner noch die unausgeglichene Selbstinduction im Primär-

kreise (wenn eine vorhanden ist), indem wir eine Linie  $x\mathcal{E}$  (gleich  $\omega L_1 i_1$ ) im rechten Winkel zu  $Oi_1$  ziehen, so erhalten wir das Endergebniss in der Linie  $O\mathcal{E}$ , welche die wirkende Primärspannung nach Grösse und Phase darstellt. Eine Betrachtung des Diagramms lehrt, dass, je geringer der Strom bei unbelastetem Zustande ist, um so mehr  $i_1$  und  $i_2$  bezüglich der Phase in vollständigen Gegensatz treten würden; ferner, dass Selbstinduction im primären Kreise die Phase von  $E_1$  hinter die von  $\mathcal{E}$ , und Selbstinduction im secundären Kreise  $i_2$  hinter  $E_2$  drängt; daher wirkt die magnetische Streuung, durch welche Selbstinduction in beiden Kreisen entsteht, dahin, dass die Linien  $O\mathcal{E}$  und  $Oi_2$  näher aneinander kommen.

Die wirkliche Leistung von Transformatoren ist eingehend von Ryan<sup>1)</sup> untersucht worden, der die Ergebnisse in Curven aufzeichnete, welche die Form und die Phasen der verschiedenen sich

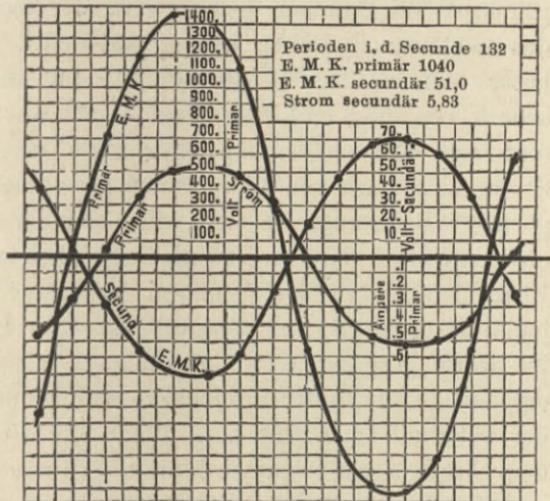


Fig. 522. Curven von Transformatoren bei halber Belastung.

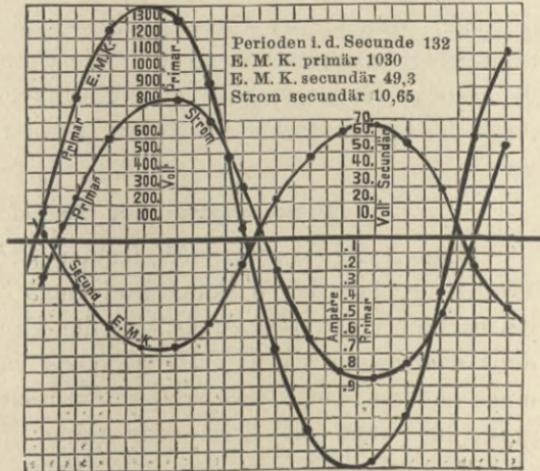


Fig. 523. Curven von Transformatoren bei voller Belastung.

1) Amer. Inst. Electr. Engin. 1889 und 1890. Electr. World, Bd. 14, S. 419. 28. Dez. 1889; und Bd. 16, S. 10. 25. Juli 1890. Electrician, Bd. 24, S. 263 und Bd. 25, S. 313. 1890. Lum. électr., Bd. 35, S. 233. 1890. Vergl. auch Humphrey und Powell im Electr. World, Bd. 16, S. 11. 1890, und The Electrician, Bd. 25, S. 280. 1890.

ändernden Grössen zeigten. Der benutzte Transformator war nur klein, er hatte eine Leistung von 600 Watt, und war zur Umsetzung einer Spannung von 1000 Volt auf 50 bestimmt, die Zahl der primären Wickelungen betrug 675, der secundären 35. Die Masse des geblätternen Eisens betrug  $2050 \text{ cm}^3$ . Der magnetische Kreis besass eine mittlere Länge von 30,8 cm und einen mittleren Querschnitt von  $63,3 \text{ cm}^2$ , die Wechselzahl war 132. Die Figuren 521, 522 und 523 stellen die Ergebnisse dar. Obgleich der primäre Strom sich stark von einer Sinuscurve unterscheidet (besonders bei geringer Belastung), so stellt die secundäre Spannung doch nahezu eine Sinuslinie dar; sie befindet sich auch stets in entgegengesetzter Phase zur Curve der primären Spannung. In einer zweiten Abhandlung zeigt Ryan, dass der Energieverlust durch Wirbelströme im Kern geringer wird bei heissem als bei kaltem Kern. Die eigenartige Form der Stromcurve rührt nur von den Eigenschaften des verwendeten Eisens her. Wenn die wirkende primäre Spannung dem Sinusgesetze folgt, wird die Curve des magnetisirenden Stromes und des Primärstromes natürlich nicht dieselbe Form haben, wofern nicht die Durchlässigkeit constant ist. Wenn Letztere mit der Stromdichte steigt, d. h. wenn  $\mathfrak{B}$  zwischen 1000 und 6000 liegt (vergl. (Fig. 92) braucht der Strom nicht so rasch anzusteigen, als dem Sinusgesetz entspricht; wenn aber die Durchlässigkeit sinkt, während  $\mathfrak{B}$  ansteigt (d. h. wenn  $\mathfrak{B}$  den Werth von 8000 überstiegen hat), muss der Strom rascher anwachsen, als der Sinuscurve<sup>1)</sup> entsprechen würde.

#### Wirkungsgrad der Transformatoren.

Unabhängig voneinander fanden Steinmetz, Fleming und Wedding, dass der Wirkungsgrad eines bestimmten Transformators bis zu einem gewissen Grade von der Form der Curve der wirkenden elektromotorischen Kraft abhängig ist; eine spitze Form gab einen höheren, eine flache breitere Form einen niedrigeren Wirkungsgrad, als wenn die Form eine reine Sinuscurve darstellte. Der Grund hierfür ist der, dass die Hysteresisverluste nicht im einfachen Verhältniss zu der magnetischen Dichte zunehmen. Denn da der Werth der Spannung in einem bestimmten Augenblicke

1) Ryan und Merritt, Fortenbaugh und Sawyer, Major Hippisley, Proc. Roy. Soc. Bd. 52, S. 255. 1892; Fleming: „Delineation of Alternating Current Curves“, Electrician, Bd. 34, S. 507. 1895; Rimington: „Alternate Current when E. M. F. is of Zig-Zag wave Type“, Phys. Review, Bd. 3, S. 100. 1895.

von der Geschwindigkeit der Aenderung der Kraftlinienmenge abhängt, wird eine breite Spannungscurve eine zugespitzte Form der Curve der magnetischen Dichte zur Folge haben, und umgekehrt. Rössler hat bei einer neueren Untersuchung<sup>1)</sup> über diesen Gegenstand gefunden, dass bei unbelastetem Transformator die primäre Wicklung, wenn die Spannung dem Sinusgesetz folgte, 1,5 mal so viel Energie verbrauchte, als wenn die Form der Wellen eine spitzere war. Er stellte fest, dass ein Nachtheil der spitzeren Wellenform darin besteht, dass mehr Gewicht auf sorgfältige Isolation gelegt werden muss, als bei einer Sinuswelle von demselben effectiven Werth.

| Bezeichnung der Transformatoren | Leistung bei voller Belastung (Watt) | Magnetisirungsstrom (Ampere) | Primäre Spannung | Wirklicher Verbrauch, unbelastet (Watt) | Scheinbarer Verbrauch, unbelastet (Watt) | Leistungsfactor | Eisenverluste in Proc. der vollen Belastung | Magnetisierungsstrom in Proc. des vollen Stromes | Gesamter Spannungsabfall b. voller Belastung | Spannungsabfall im Kupfer | Spannungsabfall von der Streuung herrührend | Frequenz während des Versuches | Wirkungsgrad bei voller Belastung |
|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Ferranti (Muster 1885)          | 3750                                 | 0,337                        | 2400             | 540                                     | 808                                      | 0,68            | 14,6                                        | 21,6                                             | —                                            | —                         | —                                           | 83                             | 85,9                              |
| " " "                           | 7500                                 | 0,25                         | 2435             | 444                                     | 600                                      | 0,74            | 5,9                                         | 8,1                                              | 2,6                                          | 1,9                       | 0,7                                         | 83                             | 90,8                              |
| " " "                           | 15000                                | 0,57                         | 2389             | 1019                                    | 1368                                     | 0,75            | 6,8                                         | 9,0                                              | —                                            | —                         | —                                           | 83                             | 91,1                              |
| " " 1892                        | 11250                                | 0,076                        | 2400             | 148                                     | 182                                      | 0,81            | 1,31                                        | 1,61                                             | 3,4                                          | 2,75                      | 0,65                                        | 83                             | 95,5                              |
| " " "                           | 1'000                                | 0,112                        | 2400             | 228                                     | 269                                      | 0,85            | 1,52                                        | 1,79                                             | 2,1                                          | 1,65                      | 0,45                                        | 83                             | 96,6                              |
| Swinburne (Igeltransf.)         | 3000                                 | 0,74                         | 2400             | 112                                     | 1775                                     | 0,063           | 3,73                                        | 59,0                                             | 3,2                                          | 2,23                      | 0,97                                        | 83                             | 93,5                              |
| " " "                           | 6000                                 | 1,216                        | 2400             | 165                                     | 2920                                     | 0,05            | 2,75                                        | 47,5                                             | —                                            | —                         | —                                           | 83                             | 96,1                              |
| Westinghouse                    | 6500                                 | 0,05                         | 2400             | 95                                      | 120                                      | 0,79            | 1,46                                        | 1,85                                             | 2,4                                          | 1,38                      | 1,02                                        | 83                             | 96,9                              |
| Mordey (Brush-Gesell.)          | 6000                                 | 0,076                        | 2400             | 140                                     | 182                                      | 0,77            | 2,33                                        | 3,05                                             | 1,8                                          | 1,75                      | 0,05                                        | 83                             | 95,4                              |
| Thomson-Houston                 | 4500                                 | 0,083                        | 2400             | 108                                     | 199                                      | 0,54            | 2,4                                         | 4,42                                             | 3,3                                          | 2,47                      | 0,83                                        | 83                             | 94,7                              |
| Kapp(Johnsonu.Phillips)         | 4000                                 | 0,145                        | 2400             | 152                                     | 348                                      | 0,61            | 3,8                                         | 8,7                                              | 1,9                                          | 1,33                      | 0,07                                        | 83                             | 94,2                              |
| Mordey (Brush-Gesell.)          | 50000                                | 0,645                        | 2206             | 934                                     | 1423                                     | 0,656           | 1,7                                         | 2,4                                              | 2,45                                         | 2,37                      | 0,08                                        | 100                            | 97,0                              |

Es haben viele Erörterungen über die Curven von Transformatoren und über deren Wirkungsgrad unter verschiedenen Bedingungen<sup>2)</sup> stattgefunden. Fleming<sup>3)</sup> besonders veröffentlichte sehr werthvolle Bestimmungen des Wirkungsgrades einer grossen Zahl von Transformatoren. Der Leser sollte hierüber noch die Veröffentlichungen von Bedell und Crehore, Kapp, Weekes und Feldmann nachsehen. Die vorstehende Tabelle enthält die hauptsächlichsten Ergebnisse der Fleming'schen Untersuchungen. Der

1) Elektrotechn. Zeitschr. 1. Aug. 1895; Engineer, 9. Aug. 1895; vergl. auch Feldmann, Electrician, Bd. 35, S. 809; ferner auch verschiedene Autoren ebenda: Bd. 33, S. 497, 511, 523, 528, 580.

2) Vergl. Mordey, Inst. Elec. Eng., Bd. 18, S. 609. 1890; Ayrton, ebenda S. 664. 1890.

3) Inst. Electr. Eng., Bd. 21, S. 574. 1892. Sumpner, ebenda S. 740.

in dem Verzeichniss zuletzt aufgeführte Transformator hatte bei voller Belastung einen Wirkungsgrad von 97 Procent; bei  $\frac{1}{3}$  Belastung war der Wirkungsgrad 94,5 Procent, wenn er von einem Mordey'schen Transformator mit einer fast reinen Sinuscurve gespeist wurde, dagegen 94,9 Procent, wenn er von einem Thomson-Houston'schen Transformator mit einer spitzeren Curve mit Strom versorgt wurde.

### Entwurf von Transformatoren.

Beim Entwurf von Transformatoren, die eine bestimmte Leistung geben sollen, wenn sie aus einer Stromquelle von gegebener Spannung und Frequenz gespeist werden, kann man in verschiedener Weise vorgehen; in Bezug auf viele Punkte ist hierbei Erfahrung der einzig sichere Rathgeber. Am besten scheint uns der folgende Weg zum Ziele zu führen. Zuerst bestimmen wir das Muster, wonach der Transformator gebaut werden soll; dann entscheiden wir nach ökonomischen Erwägungen, welche Kraftverluste wir im Eisen und im Kupfer zulassen wollen. Wenn der Transformator für immerwährenden Gebrauch bei sehr oft geringer Belastung bestimmt ist, müssen die Eisenverluste unter allen Umständen klein gewählt werden. Wenn der Transformator nicht dauernd, sondern nur während kürzerer Zeiträume eingeschaltet wird, kann ein grosser Verlust im Kupfer zugelassen werden. Ist er für Motorenbetrieb bestimmt, so ist auch ein grösserer Inductionsverlust zulässig. Haben wir uns darüber entschieden, wieviel Watt im Eisen verloren gehen können, dann stellen wir auf Grund früher gesammelter Erfahrungen die ungefähren Abmessungen des Eisengerüstes fest. Wir wählen die Grösse der Kernstücke und bestimmen annähernd ihre für diese Leistung etwa erforderliche Zahl. Es ist dann leicht, etwas mehr oder weniger zu nehmen, wenn eine genauere Durchsicht der Berechnung dies wünschenswerth macht. Nun schätzt man das annähernde Gewicht des Eisens, und hieraus, sowie aus dem zugelassenen Verlust in Watt berechnet man den Verlust auf das Kilogramm Eisen (derselbe sollte die Grenzen 1,1 bis 2,9 Watt nicht überschreiten). Dann greift man auf die Curve, Fig. 91, zurück, welche die Beziehungen zwischen diesem Verlust und der Dichte  $\mathfrak{B}$  darstellt, und entnimmt derselben den entsprechenden Werth von  $\mathfrak{B}$ . Wenn dieser Werth über 8000 oder unter 4000 beträgt, muss die Berechnung wiederholt und dabei je nachdem mehr oder weniger Eisen genommen werden. Ist ein

passender Werth für  $\mathfrak{B}$  gefunden, schätzt man den Nettoquerschnitt des gewählten Kernes (in Quadratcentimeter) und multiplicirt denselben mit  $\mathfrak{B}$ , wodurch man  $\mathfrak{S}$  erhält. Aus  $\mathfrak{S}$  und der vorgeschriebenen Spannung in Volt und Frequenz findet man  $N_1$  durch die Seite 691 gegebene Formel, und aus  $N_1$  und dem Uebersetzungsverhältniss findet man  $N_2$ .

Nunmehr ist es zweckmässig, zunächst den Strom bei unbelastetem Transformator zu berechnen, indem man den arbeitslosen Magnetisirungsstrom  $i_m$  und den Strom  $i_p$  für die Verluste durch Hysterisis und Wirbelströme jeden für sich bestimmt. Der Erstere kann nach den Grundsätzen über den magnetischen Kreis ermittelt werden aus der Länge  $l$  des Weges der Induction im magnetischen Kreise und dem Werthe der Permeabilität  $\mu$ , welcher dem bestimmten Werthe von  $\mathfrak{B}$  entspricht, durch die Formel:

$$i_m = \frac{\mathfrak{B} l}{\sqrt{2} 0,4 \pi \mu N_1} = \frac{0,565 \mathfrak{B} l}{\mu N_1}.$$

Der den Kraftverlusten entsprechende Werth des Stromes  $i_p$  berechnet sich aus der Leistung, welche man im Kern verloren gehen lässt, indem man sie durch die primäre Spannung dividirt.

Schliesslich wird der Strom  $i_o$  bei unbelastetem Transformator durch die Formel  $i_o = \sqrt{i_m^2 + i_p^2}$  erhalten (vergl. Fig. 519).

Gehen wir nunmehr auf den Entwurf zurück, so bestimmen wir aus der Zeichnung (mit Berücksichtigung der Zwischenlagen aus Isolationsmaterial) die mittlere Länge einer Windung der primären, sowie der secundären Wickelung. Dann ermitteln wir aus dem für die Wickelungen verfügbaren Raume (wobei wegen der Isolation  $\frac{3}{5}$  desselben für die primäre und  $\frac{2}{5}$  für die secundäre Wickelung gerechnet werden), sowie aus  $N_1$  und  $N_2$  die Querschnitte, Widerstände und Gewichte der Kupferleiter. Nun bestimmen wir die im Kupfer verloren gehenden Watt bei voller Belastung, und unbelastet, sowie die Dichte. Stellen sich die Verluste im Kupfer zu hoch, so ist der Wickelungsraum zu klein bemessen, und es muss ein grösserer Eisenkern gewählt werden. Es hängt dabei von der gewählten Construction ab, was mit einem grösseren Kern erreicht werden kann. Wenn die Bauart eine solche ist, dass die Oeffnungen für die Wickelungen (wie in Fig. 507) nicht grösser als zuvor werden, hat ein grösserer Eisenquerschnitt den Vortheil, dass, da  $\mathfrak{S}$  grösser ist,  $N_1$  und  $N_2$  beide kleiner sein können, daher kann man Drähte von stärkerem Querschnitt in dieselben Oeffnungen einlegen. Wenn

der neue Kern länger wird als der erst berechnete, aber nicht dicker, kann man bei der gleichen Zahl Windungen, wie vorher berechnet, dickere Drähte anwenden.

In allen Fällen ist es zweckmässig, vorher auf dem Papier die Wirkung von zwei oder drei verschiedenen Annahmen auszurechnen, und diejenige zur Ausführung zu wählen, welche den vorgeschriebenen Bedingungen am nächsten kommt. Einige Hauptfälle sind von Evershed<sup>1)</sup> vollständig ausgeführt und berechnet worden.

Eine andere Methode der Berechnung besteht darin, einen Kern von bestimmten Abmessungen anzunehmen, dann die Frequenz und die Spannung festzustellen, und hieraus die Windungen zu bestimmen, welche eine bestimmte magnetische Dichte (z. B.  $\mathfrak{B} = 5000$ ) im Eisen geben; man nehme dann die Querschnitte der beiden Wickelungen so gross, als es bei der angewendeten Bauart möglich ist. Dies lässt die Stromstärken unbestimmt; die Leistung bei voller Belastung wird dann bestimmt entweder durch die Grenze, bis zu welcher die Temperatursteigerung zulässig ist (welche auf experimentellem Wege oder durch Berechnung aus den Verlusten und der Oberfläche gefunden wird), oder durch den Spannungsverlust, oder annähernd durch die zulässige Dichte, oder durch die Rücksicht auf einen guten Wirkungsgrad. Einzelne Constructeure bemessen ihre Transformatoren nach einer grösseren Leistung, als der, bei welcher die Temperatursteigerung noch innerhalb sicherer Grenzen bleibt. Das Maass, bis zu welchem schliesslich nach mehrstündigem Arbeiten bei voller Belastung die Temperatur ansteigt, hängt ab von den Gesamtverlusten im Eisen und im Kupfer, von der verfügbaren Oberfläche zur Wärmeausstrahlung und von der mehr oder weniger leichten Abkühlung, z. B. der Circulation von Oel im äusseren Kreise. Ein gebräuchliches Maass von Oberflächenkühlung ist 40 cm<sup>2</sup> auf das Watt Verlust. Unter dieser Annahme wird die Temperatursteigerung nur etwa 50 Grad über die umgebende Luft betragen, wenn keine Oelkühlung vorhanden ist, oder etwa 40 Grad bei Oelkühlung. Innerhalb der Grenzen von 15 bis 65 cm<sup>2</sup> auf das Watt steigt die Temperaturerhöhung genau im umgekehrten Verhältniss zur verfügbaren Oberfläche. E. Thomson wendete durchbrochene secundäre Leiter an, um eine grössere Abkühlungsfläche zu erzielen. Bei den neueren Transformatoren von Westinghouse sind die vorstehenden Enden der Wickelungen auseinander gebogen, um eine

1) The Electrician, Bd. 26, S. 477 u. f.

bessere Lüftung zu erreichen. Ferner ist auch eine Vorrichtung zur fortwährenden Circulation des Oels angewandt worden.

Wenn ein für eine bestimmte Spannung und eine gegebene Frequenz entworfener Transformator für dieselbe Spannung, aber eine geringere Frequenz, gebraucht wird, so ist sein Wirkungsgrad geringer: denn aus der Seite 690 gegebenen Grundformel geht klar hervor, dass die Kreisläufe der Magnetisirung des Eisenkernes in diesem Falle zu einem höheren Maximum der Stromdichte ansteigen müssen, womit unverhältnissmässig viele Verluste verknüpft sind. Wenn ein Transformator, der für einen Stromkreis von 2000 Volt Spannung und 100 Perioden entworfen wurde, in einem Systeme mit 50 Perioden gebraucht wird, müsste er auch mit geringerer Spannung, z. B. 100 Volt, betrieben oder sonst umgewickelt werden. Wird dagegen die Frequenz gesteigert, so wird die Dichte (bei gleicher Spannung) kleiner und demgemäss der Wirkungsgrad grösser. Wenn die magnetische Dichte ungeändert bleibt, wird sich auch der in jedem Kreislauf auftretende Verlust nicht ändern, und der Verlust in der Secunde der Zahl der Kreisläufe in der Secunde proportional sein. Unter sonst gleichen Umständen kann man annehmen, dass bei einem gegebenen Verlust in den Kupferleitern (also auch bei einer bestimmten Stromstärke) die Leistung proportional der Spannung ist, daher auch bei einem verhältnissmässigen Verlust im Eisen proportional der Frequenz. Hiernach ist die Leistungsfähigkeit eines gegebenen Transformators bei einem bestimmten Gesamtverlust proportional der Frequenz. Mit andern Worten: Hohe Frequenz bedeutet eine Ersparniss an Gewicht und an Anlagekosten, es können viel kleinere Transformatoren gebraucht werden, als in Stromkreisen von niedriger Frequenz.

#### **Wechselstrom-Umformer für constanten Strom.**

Transformatoren, bei welchen die Selbstinduction der beiden Wickelungen hoch ist im Vergleich zu ihrer gegenseitigen Induction, sind von Elihu Thomson und Stanley zu dem Zwecke entworfen worden, Wechselströme mit gleichbleibender Zahl der effectiven Ampere zu erhalten. Solche Typen, bei welchen die magnetische Streuung gross ist, sind für diesen Zweck brauchbar. Swinburne<sup>1)</sup> fand, dass ein Igeltransformator ganz geeignet ist, wenn die primären und secundären Wickelungen nicht dicht nebeneinander, sondern an

1) Proc. Roy. Soc., Februar 1887.

den entgegengesetzten Enden des Kernes angebracht werden. Ein gewöhnlicher Transformator kann für diesen Zweck zurecht gemacht werden, wenn eine Drosselspule in den primären Stromkreis eingeschaltet wird. Diese Apparate für gleichbleibenden Strom finden Anwendung, wenn in Reihen geschaltete Bogen- und Glühlampen betrieben werden sollen.

### Einspuliger Transformator.

Der einspulige Transformator besteht nur aus einer Drahtspule auf einem Eisenkern, welche mit den Hauptleitungen verbunden wird. An irgend einem Punkte der Spule, näher oder ferner dem einen Ende, je nach der gewünschten Spannung, ist ein Abzweigdraht angelegt, und es wird Strom abgenommen zwischen dieser Abzweigung und dem einen Ende. In Fig. 524 sind die Enden  $pp$  mit den Hauptleitungen verbunden, während  $ss$  gleichsam die Klemmen der sekundären Wickelungen bilden, von denen Strom geringerer Spannung entnommen werden kann; die Vorrichtung bewirkt also eine Verminderung der Spannung. Man sieht, dass auf diese Weise ein weit stärkerer Strom erhalten wird, als thatsächlich die Hauptleitungen liefern, da das Stück zwischen der Abzweigung und dem benutzten Ende wie die sekundäre Spule eines Transformators wirkt. Es ist dabei aber weniger Kupfer erforderlich, als wenn zwei Wickelungen vorhanden wären. Wenn die Verbindungen umgekehrt ausgeführt werden, also die Hauptleitungen an  $ss$  angelegt werden, so steigt die Spannung an den äusseren Klemmen  $pp$ ; die Vorrichtung bewirkt in diesem Falle eine Vergrößerung der Spannung.

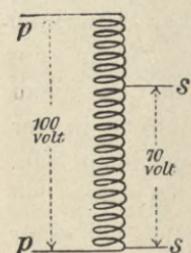


Fig. 524. Einspuliger Transformator.

Zur Stromvertheilung bei einem Dreileitersystem werden die sekundären Spulen oft für 200 Volt gewickelt, wobei eine auf der halben Länge der Spule angebrachte mittlere Klemme mit dem Mittelleiter des Netzes verbunden wird. Um mittels 100 voltiger Hauptleitungen drei Bogenlampen von je 33 Volt hintereinander zu schalten, wird ein einspuliger Transformator mit zwischenliegenden Klemmen angewendet, so dass jede der drei Lampen im Nebenschluss zu einem Drittel der Spule liegt.

### Mehrphasige Transformatoren.

Wegen der besonderen Formen von Transformatoren für zwei-phasige und dreiphasige Ströme, sowie von Transformatoren, welche

zweiphasigen Strom in dreiphasigen und umgekehrt umwandeln, wird auf des Verfassers Werk über Mehrphasenströme<sup>1)</sup> verwiesen.

### Theorie der Wechselstrom-Transformatoren.

Es giebt zwei Methoden, die Theorie der Wechselstrom-Transformatoren zu behandeln. Bei der ersten, welche sich leichter zu einer einfachen Betrachtung eignet, und die bereits auf Seite 693 besprochen ist, geht man von dem Wechsel der magnetischen Linien im Kerne aus, welcher elektromotorische Kräfte in den beiden Wickelungen erzeugt, und seinerseits wieder den Einwirkungen der Ampere-Windungen der beiden Spulen unterworfen ist. Diese Methode ist von Hopkinson<sup>2)</sup> ausgearbeitet worden. Nach der zweiten Methode wird der Begriff der Coëfficienten der gegenseitigen Induction und der Selbstinduction in die Differentialgleichungen der beiden Stromkreise eingeführt. Diese von Maxwell<sup>3)</sup> eingeführte Methode bestimmt die im secundären Kreise inducirten elektromotorischen Kräfte durch die im secundären Kreise wirkenden Aenderungen des Stromes.

Betrachten wir zunächst die Coëfficienten der gegenseitigen und der Selbstinduction. Um die gegenseitige Wirkung der beiden Stromkreise aufeinander berechnen zu können, müssen wir wissen, wieviel Kraftlinien von der secundären Wickelung geschnitten werden, wenn in der primären Wickelung die Einheit der Stromstärke entsteht oder verschwindet. Wir wollen die Zahl dieser Kraftlinien mit  $M$  bezeichnen. Dieselbe ist der Windungszahl der secundären Wickelung proportional, weil jede Windung den Eisenkern umgiebt und die magnetischen Linien einschliesst; sie ist ebenso der Windungszahl der primären Wickelung proportional, weil der im Eisenkern hervorgerufene Magnetismus unter sonst gleichen Umständen den Ampere-Windungen, die ihn erregen, proportional ist;

1) Siehe Fussnote Seite 642.

2) Proc. Roy. Soc., Februar 1887.

3) Philos. Transact., Bd. 155<sup>I</sup>, S. 459. 1865. In dieser Abhandlung zeigt Maxwell, dass die Wirkung des zweiten Kreises darin besteht, den scheinbaren Widerstand des ersten Kreises zu vergrössern und dessen scheinbare Selbstinduction zu vermindern. Ausführlicher findet man die Gleichungen von Mascart und Joubert in *Electricité et Magnétisme* behandelt; auch von Hopkinson im *Journ Soc. Tel. Eng.*, Bd. 13, S. 511. 1884; von Ferraris, *Mem. Acad. Sci. (Turin)*, Bd. 37. 1885; von Vaschy, *Ann. Télégr.* 1885—86 oder *Théorie des Machines Magnéto et Dynamo-Electriques*, S. 31. Eine Zusammenstellung der Maxwell'schen Arbeiten ist in Fleming's Buch enthalten.

sie wird ferner noch der Durchlässigkeit des Eisenkernes in jedem Zustande proportional sein.

In der That lässt sich  $M$  nach den im Kapitel VI dargelegten Grundlehren berechnen. Es möge der Eisenkern einen geschlossenen Kreis von der Länge  $l$ , dem Querschnitt  $A$  und der Durchlässigkeit  $\mu$  bilden;  $N_1$  und  $N_2$  seien die Windungszahlen der primären und secundären Spule. Entsteht die Einheit der Stromstärke (in absoluten  $CGS$ -Einheiten), so beträgt die magnetomotorische Kraft  $4\pi N_1$ , während der magnetische Widerstand  $l/A\mu$  beträgt. Dividirt man den ersten Werth durch den zweiten, so erhält man einen Ausdruck für die Anzahl der Linien im Kern; dieser Werth, mit  $N_2$  multiplicirt, ergiebt die Grösse des Verhältnisses für die vom secundären Kreise geschnittenen Linien, oder

$$M = 4\pi N_1 N_2 \frac{A\mu}{l}.$$

Diese Grösse hat die Bezeichnung »Coëfficient der gegenseitigen Induction« erhalten.

Besitzt der Strom in der primären Wickelung die Stärke  $i_1$  (absolute  $CGS$ -Einheiten), so ist der Betrag der von der secundären Spule beim Angehen oder Aufhören des Stromes geschnittenen Linien  $Mi_1$ .

Wenn nun die Geschwindigkeit des Anwachsens oder der Abnahme des primären Stromes zu jedem Zeitpunkt bekannt ist, so ergiebt erstere mit  $M$  multiplicirt die im secundären Kreise zu dem betrachteten Zeitpunkt wirkende elektromotorische Kraft. Dieselben Ueberlegungen, welche vorhin angestellt wurden, werden zeigen, dass ein Coëfficient der Selbstinduction, den wir  $L_1$  nennen wollen, vorhanden ist. Derselbe stellt den Betrag der von den primären Wickelungen geschnittenen Linien dar, die in der primären Spule selbst erzeugt werden, wenn die Stromeinheit die primäre Spule durchfliesst; den Werth dieses Coëfficienten können wir nach den magnetischen Grundlehren durch

$$L_1 = 4\pi N_1^2 A\mu/l$$

ausdrücken. Da  $N_1$  selbst gewöhnlich gross ist, so wird  $L_1$  sehr gross werden. Ferner besteht für den secundären Kreis ein Coëfficient der Selbstinduction

$$L_2 = 4\pi N_2^2 A\mu/l.$$

Bei einem gut gebauten Umformer ist

$$M = \sqrt{L_1 L_2}.$$

Werden indessen die dem einen Kreise entstammenden magnetischen Linien nicht sämmtlich vom anderen Kreise eingeschlossen, so besitzt  $M$  einen geringeren, als den durch obige Beziehung ausgedrückten Werth (vergl. den von Bedell auf dem Congress in Chicago gehaltenen Vortrag).

Die Beziehung zwischen den beiden elektromotorischen Kräften und den beiden Wickelungen wird für gewöhnliche Zwecke in hinreichender Weise durch Gleichsetzung der Verhältnisse der elektromotorischen Kräfte und der Wickelungen ausgedrückt, d. h.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

Den Werth  $k$  kann man als Coëfficient der Umsetzung (Umsetzungsverhältniss) bezeichnen.

Unter der Voraussetzung, dass gleiche Kupfergewichte für beide Wickelungen benutzt werden, gelten folgende Beziehungen:

|                                   | Primäre Spule | Secundäre Spule | Verhältniss |
|-----------------------------------|---------------|-----------------|-------------|
| Windungen . . . . .               | $N_1$         | $N_2$           | $k$         |
| Widerstand . . . . .              | $r_1$         | $r_2$           | $k^2$       |
| Selbstinduction . . . . .         | $L_1$         | $L_2$           | $k^2$       |
| Elektromotorische Kraft . . . . . | $E_1$         | $E_2$           | $k$         |
| Stromstärke . . . . .             | $i_1$         | $i_2$           | $k^{-1}$    |
| Verlust durch Wärme . . . . .     | $i_1^2 r_1$   | $i_2^2 r_2$     | 1           |

Es ist noch

$$M = \frac{L_1}{k} = kL_2.$$

#### Maxwell's Theorie.

In einem gegebenen Zeitpunkte muss die im primären Stromkreise wirkende elektromotorische Kraft gross genug sein, um nicht nur den Strom  $i_1$  durch den Widerstand  $R$  jenes Kreises hindurchzutreiben, sondern sie muss auch im Stande sein, die Gegenwirkungen zu überwinden, welche von der gegenseitigen und der Selbstinduction herrühren. Letztere haben in jenem Zeitpunkte die Werthe  $M \frac{di_2}{dt}$  und  $L \frac{di_1}{dt}$ . Demgemäss schreiben wir die Differentialgleichung für den ersten Stromkreis in der Form:

$$E_1 - M \frac{di_2}{dt} - L_1 \frac{di_1}{dt} - R_1 i_1 = 0 \quad . . . . \quad (1).$$

Hier bedeutet  $E_1$  die wirkende elektromotorische Kraft der Maschine, die der Bedingung  $E_1 = D \sin 2\pi n t$  (vergl. Seite 519) genügt. Ist die Voraussetzung zulässig, dass eine gleichbleibende (Wechsel-)Spannung an den Klemmen der primären Spule erhalten bleibt (durch geeignete Anordnung in der Maschine oder in anderer Weise), so können  $E_1$ ,  $L_1$  und  $R_1$  nur auf denjenigen Teil des primären Kreises bezogen werden, der zwischen den Klemmen der primären Spule liegt. Aus der Differentialgleichung ist ein Werth für  $M \frac{di_1}{dt}$  abzuleiten. Zur Abkürzung setzen wir  $2\pi n = \omega$  und  $-\omega^2 i$  für  $\frac{d^2 i}{dt^2}$ , da  $i$  eine Sinusfunction darstellt. Durch Differentiation der Gleichung (1) ergibt sich:

$$\frac{dE_1}{dt} + M\omega^2 i_2 + L_1\omega^2 i_1 - R \frac{di_1}{dt} = 0 \quad . \quad . \quad . \quad (2).$$

Diese Gleichung mit  $R_1$  multiplicirt, ergibt die Gleichung (3), die Gleichung (1) mit  $L_1\omega^2$  multiplicirt, ergibt Gleichung (4), durch Addition von (3) und (4) folgt (5). Diese Gleichungen folgen nachstehend:

$$R_1 \frac{dE_1}{dt} + M\omega^2 R_1 i_2 + L_1\omega^2 R_1 i_1 - R_1^2 \frac{di_1}{dt} = 0 \quad . \quad . \quad (3),$$

$$L_1\omega^2 E_1 - L_1\omega^2 M \frac{di_2}{dt} - L_1^2\omega^2 \frac{di_1}{dt} - L_1\omega^2 R_1 i_1 = 0 \quad . \quad (4),$$

$$(R_1^2 + L_1^2\omega^2) \frac{di_1}{dt} = R_1 \frac{dE_1}{dt} + L_1\omega^2 E_1 + M\omega^2 \left( R_1 i_2 - L_1 \frac{di_2}{dt} \right) \quad (5).$$

Man multiplicire jedes Glied jetzt mit  $M/(R_1^2 + L_1^2\omega^2)$  und schreibe zur Abkürzung:

$$\frac{M\omega}{\sqrt{R_1^2 + L_1^2\omega^2}} = k,$$

$$k^2 R_1 = \rho,$$

$$k^2 L_1 = \lambda,$$

$$-\frac{K^2}{M} \left( \frac{R_1}{\omega^2} \cdot \frac{dE_1}{dt} + L_1 E_1 \right) = E_2 = k E_1 \sin(\omega t - \varphi),$$

wenn  $\varphi$  sich auf die Phase der elektromotorischen Kraft bezieht; wir können dann Gleichung (5) schreiben als:

$$M \frac{di_1}{dt} = \rho i_2 - \lambda \frac{di_2}{dt} - E_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6).$$

Die Differentialgleichung für den zweiten Kreis ist:

$$M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7),$$

da in diesem Kreise keine anderen elektromotorischen Kräfte als die der gegenseitigen Induction und der Selbstinduction entstammenden vorhanden sind.

Setzt man in diese Gleichung den aus (6) erhaltenen Werth für  $M \frac{di_1}{dt}$  ein, so folgt:

$$(R_2 + \rho)i_2 + \frac{di_2}{dt}(L_2 - \lambda) - E_2 = 0 \quad . \quad . \quad . \quad (8).$$

Die Untersuchung des Werthes  $k$  zeigt uns, dass, wenn  $R_1$  klein genug oder  $\omega$  gross genug ist,  $k = \frac{M}{L_1^2}$  wird, oder gleich dem Verhältniss der primären zur secundären Windungszahl. Gehen wir nun auf die Gleichung (8) zurück, so sehen wir, dass sie den Beweis dafür liefert, dass die ganze Wirkung die gleiche ist, als wenn der primäre Kreis fehlte und in den secundären Kreis eine elektromotorische Kraft  $kE_1$  eingeführt würde und gleichzeitig der Widerstand um eine Grösse gleich  $k^2 R_1$  zunähme, während die Selbstinduction um die Grösse  $k^2 L_1$  sich verminderte. Befinden sich aber gleiche Kupfergewichte in den Spulen, so ist  $L_2 = \frac{L_1}{k^2}$  und  $R_2 = \frac{R_1}{k^2}$ ; wenn der Umformer voll belastet ist, wird  $\lambda = L_2$  und  $\rho =$  dem Widerstand der secundären Wickelung, die Selbstinduction ist dadurch verschwunden, und der innere Widerstand der secundären Wickelung erscheint verdoppelt.

Perry hat mehrere wichtige Vorträge<sup>1)</sup> über die Theorie der Transformatoren gehalten, in denen er die Streuung und verzweigte secundäre Kreise mathematisch behandelt.

1) Phil. Mag., August 1891; und Proc. Roy. Soc., Bd. 51, S. 425. Mai 1892.

## Kapitel XXVII.

### **Doppelmaschinen.**

---

Doppelmaschinen sind drehbare Vorrichtungen, durch welche Umsetzungen bewirkt werden, welche durch stillstehende Apparate sich nicht erreichen lassen. Dieselben zerfallen in zwei Klassen, und zwar:

1. Maschinen zur Umsetzung eines Gleichstromes von beliebiger Spannung in einen Gleichstrom von anderer Stärke und Spannung.
2. Maschinen zur Umsetzung eines Gleichstromes in einen einphasigen oder mehrphasigen Wechselstrom oder umgekehrt.

In jedem Falle besteht die Vorrichtung im Wesentlichen aus der Verbindung eines Stromerzeugers mit einer Triebmaschine.

#### **Gleichstrom-Transformatoren.**

Im Jahre 1874 erbaute Gramme eine Maschine mit einem Ringanker, der zwei Wickelungen (Stromkreise) besass; eine derselben bestand aus starkem, die andere aus dünnem Draht mit der achtfachen Windungszahl. Zwei besondere Stromabgeber waren mit den beiden Wickelungen in Verbindung. Man konnte diese Maschine zur Umsetzung hoher auf niedrige Spannung oder umgekehrt benutzen. Weniger bequem lässt sich das gleiche Ziel durch Vereinigung der Anker von zwei Maschinen auf derselben Welle benutzen; die eine Maschine treibt dann die andere, die als Stromerzeuger dient; die Maschinen können getrennte Feldmagnete oder auch einen gemeinschaftlichen Feldmagnet besitzen. Solche Maschinen arbeiten fast funkenlos, weil die Gegenwirkungen der beiden Spulensätze einander aufheben.

Der Feldmagnet wird gewöhnlich im Nebenschluss zur Ankerwicklung für die niedrige Spannung erragt.

Swinburne hat verschiedene mögliche Schaltungen erörtert, u. A. auch eine zur Umsetzung eines gleichbleibenden Stromes für

Vertheilung bei Gleichspannung. Hauptsächlich sind bislang Transformatoren für Gleichstrom nur in den Fällen verwandt worden, wo man bei Kraftübertragungen durch Verwendung hoher Spannungen an Kupfer in den Hauptleitungen sparen wollte. Laurence, Paris und Scott<sup>1)</sup> haben in England Gleichstrom-Umformer mit Erfolg eingeführt; sie benutzen eine zweipolige Maschine mit gusseisernem Gestell und einen Anker mit Doppelkreis.

In der Centralstation zu Chelsea werden Motoren mit Stromerzeugern verbunden benutzt. Sie sind von Webber<sup>2)</sup> beschrieben worden. In Oxford wird Gleichstrom von 1000 Volt Spannung nach verschiedenen Punkten der Stadt geleitet und dort zum Betriebe von Stromnetzen für 100 Volt durch Doppelmaschinen transformirt.

Die nachstehenden Einzelheiten betreffen einen Gleichstrom-Umformer von Elwell-Parker, ähnlich der auf Tafel V abgebildeten Maschine mit Trommelwicklung. An jedem Ende des Ankers befindet sich ein Stromabgeber.

|                                                                                                         | Primäre<br>Wicklung | Secundäre<br>Wicklung |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Spannung in Volt . . . . .                                                                              | 1000                | 110                   |
| Stromstärke in Ampere . . . . .                                                                         | 40                  | 360                   |
| Widerstand der Ankerwicklung in Ohm . . . . .                                                           | 0,427               | 0,0052                |
| Leiter um den Anker . . . . .                                                                           | 648                 | 72                    |
| Theile des Stromabgebers . . . . .                                                                      | 162                 | 36                    |
| 500 Umläufe in der Minute.                                                                              |                     |                       |
| Nebenschlusswicklung des Feldmagnetes besitzt 3080 Windungen mit 8,5 Ohm Widerstand.                    |                     |                       |
| Nutzbarer Eisenquerschnitt des Ankers 2102 cm <sup>2</sup> , Kernscheibendurchmesser 41,4 cm.           |                     |                       |
| Wirkungsgrad der doppelten Umsetzung: bei voller Belastung 83 Procent, bei halber Belastung 75 Procent. |                     |                       |

Fig. 525 zeigt einen kleinen Gleichstromtransformator, der von der Crocker-Wheeler Co. für den Verfasser zu Messzwecken gebaut ist. Er verwandelt einen Strom von 10 Ampere bei 100 Volt Spannung in einen solchen von 1 Ampere bei 1000 Volt. Parker stellt Motor-Generatoren mit Eickemeyer'scher Wicklung her, bei welchen die Hochspannungswicklung zuerst aufgebracht wird;

1) Vergl. Electrician, Bd. 19, S. 517, October 1887 und Electr. Review, Bd. 22, S. 4. 1888.

2) Journ. Inst. Electr. Engin., Bd. 20, S. 63 bis 69. 1891.

dann erst wird, nachdem die ganze Oberfläche von Neuem sorgfältig isolirt ist, die Niederspannungswicklung aussen aufgelegt.

Ferner finden noch Gleichstromtransformatoren in der Elektrochemie zur Erzeugung starker Ströme bei sehr niedriger Spannung Verwendung<sup>1)</sup>, z. B. in der Galvanoplastik, ferner beim Aichen von Messapparaten.

Eine dritte Art der Anwendung besteht darin, einen mit Triebmaschine verbundenen Stromerzeuger zur Ausgleichung des Spannungsverlustes in langen Leitungen einzuschalten. Zu diesem Zwecke stellt man an einem entfernten Punkte einen Motor mit Reihen-

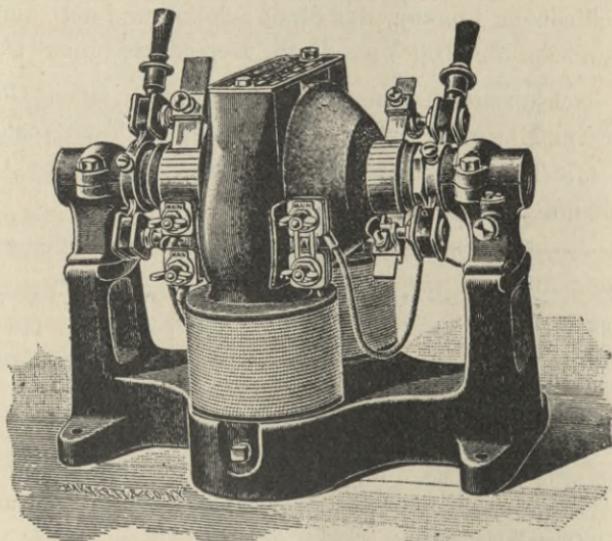


Fig. 525. Gleichstrom-Transformator (Crocker-Wheeler Co.).

wicklung auf, der einen im Nebenschluss zu den Hauptleitungen liegenden Anker umtreibt. Lahmeyer<sup>2)</sup> nennt diese Anordnung eine »Fernleitungs-Dynamomaschine«. Amerikanische Elektriker nennen sie »booster«. Sayers hat solche mit seinen Ausgleichswicklungen (vergl. S. 371) versehene Maschinen im Electrician, Bd. 31, S. 677, beschrieben.

Eine vierte Anwendungsart ist die zum Laden von Accumulatoren mit einer höheren Spannung als der der Dynamomaschine, um die Lampen nach Belieben von der Maschine oder der Accumulatorenbatterie speisen zu können.

1) The Engineer, vom 11. August 1893.

2) Centralbl. f. Elektrotechnik, Bd. 11, S. 402. 1889.

Eine fünfte Art der Benutzung findet in Dreileiter- und Fünfleitersystemen statt. Eine Anzahl von Ankern oder Wickelungen, die auf derselben Welle sitzen, werden zwischen die verschiedenen Paare von Hauptleitungen eingeschaltet. Sinkt in einem Leitungs-paare die Spannung, so speist sein Anker, der von den andern Ankern umgetrieben wird, dieses Paar. Eine solche Anordnung nennt man eine »Ausgleichsdynamomaschine«. Nachstehend folgen einige Angaben über Ausgleichsdynamomaschinen, welche neuerdings von Mather und Platt für das Fünfleitersystem in Manchester ausgeführt sind. Diese Maschinen haben Trommelanker mit der auf Seite 286 beschriebenen Stabwicklung und Nebenschlussmagnete von der Edison-Hopkinson'schen Form.

Widerstand der Magnetwicklung . . . 25 Ohm,

Widerstand jeder Ankerwicklung . . . 0,0126 Ohm.

Mit einer Leistung von 126 Ampere bei 103,4 Volt auf einer Seite war die Leistung des Stromerzeugers 112 Ampere bei 100,4 Volt. Der Wirkungsgrad der doppelten Umsetzung einschliesslich aller mechanischen und elektrischen Verluste ist daher 83,5 Procent; oder, wenn wir die Leistung von dem Standpunkte des Zweckes aus betrachten, für welche die Maschinen besonders bestimmt waren, so kann man sagen, dass Letztere, wenn zwischen zwei Leitungen eines Dreileiternetzes ein Spannungsunterschied von 3 Volt auftritt, 112 Ampere von der höheren zur niedrigeren Spannungsseite übertragen. Die Zapfen dieser Maschinen liefen in Kugellagern.

Cabanellas<sup>1)</sup> hat eine etwas verschiedene Art für Gleichstrom-Umsetzung angegeben, die auch Edison<sup>2)</sup> patentirt worden ist. Diese Einrichtung erfordert weder die Umdrehung eines Ankers noch eines Feldmagnetes, dagegen wird mit Hilfe eines sich drehenden Stromwenders die magnetische Polarität eines doppelt bewickelten Ankers fortgesetzt zum Umlauf veranlasst.

Jehl und Rupp lassen in Abänderung dieser Idee eine Eisenmasse, die den magnetischen Kreis vervollständigt, in dem doppelt bewickelten Ringe umlaufen<sup>3)</sup>.

Indessen tritt bei diesen Anordnungen erhebliche Funkenbildung auf.

1) Vergl. La Nature, S. 43, 1882.

2) Engl. Pat. [1882] Nr. 3949; Electrician B. 19, S. 479, 1887.

3) Vergl. Electrician B. 19, S. 514, 1887; B. 20, S. 7, 1887 und Engl. Pat. [1887] Nr. 2130.

Weiteres über Gleichstrom-Umformer findet man in Abhandlungen von Elihu Thomson in *Electr. World* X, 108, 1887; von R. P. Sellon in *Electrician* XX, 633, 1888 und von Rehniewski in *La Lum. élect.* XXV, 416, 1887; ferner noch *Electrician* XXXI, 677.

### Theorie der Gleichstrom-Transformatoren.

Es sei  $\mathcal{E}$  die Klemmenspannung am primären Theile oder am Triebwerk und  $e$  die Klemmenspannung am secundären Theil oder am Stromerzeuger,  $i_1$ ,  $r_1$  und  $N_1$  mögen den Ankerstrom, Ankerwiderstand und die Zahl der Ankerleiter des primären Theiles bedeuten,  $i_2$ ,  $r_2$ ,  $N_2$  die bezüglichen Grössen für den secundären Theil. Die beiden inducirten elektromotorischen Kräfte sind dann:

$$E_1 = n N_1 \mathcal{E} \text{ und } E_2 = n N_2 \mathcal{E},$$

ferner 
$$E_1 = \mathcal{E} - r_1 i_1 \text{ und } E_2 = e + r_2 i_2.$$

Setzt man  $k$  für  $\frac{N_1}{N_2}$  (= dem reziproken Umsetzungs-Coëfficienten),

so ist 
$$k e = \mathcal{E} - r_1 i_1 - k r_2 i_2.$$

Vernachlässigt man den Arbeitsverlust durch Wirbelströme und Hysterisis, so ist  $E_1 i_1 = E_2 i_2$  und  $i_2 = k i_1$ , und es folgt:

$$e = \frac{\mathcal{E}}{k} - \left( r_2 + \frac{r_1}{k} \right) i_2.$$

Hieraus geht hervor, dass im secundären Kreise alles sich so verhält, als ob die Spannung in den primären Leitungen im Verhältniss der Windungszahlen im Anker verringert wäre; als ob ferner zu dem inneren Widerstand des secundären Kreises ein Widerstand hinzugefügt wäre, der gleich dem Widerstand der primären Wicklung multiplicirt mit dem Quadrat des Coëfficienten der Umsetzung ist. Das Umsetzungsverhältniss ist unabhängig von der Geschwindigkeit und vom Magnetismus, obgleich diese beiden Grössen im umgekehrten Verhältniss zu einander stehen. Ist der secundäre Theil gemischt gewickelt, so kann die Geschwindigkeit bei allen Belastungen nahezu gleichbleibend sein; es liegt hierin aber nur ein geringer Vortheil, da die Geschwindigkeit sich immer selbst auf den erforderlichen Betrag regelt. Ist der entfernte Stromerzeuger mit geeigneter überschliessend-gemischter (over-compounded) Wicklung versehen, so wird die Spannung an den Lampen gleichbleibend erhalten, obgleich der Transformator eingeschaltet ist. Die Einwände gegen die Verwendung dieser Transformatoren werden durch die Erwägung gehoben, dass die Maschinen funkenlos laufen (wegen Ausgleichung der Selbstinduction der beiden Wicklungen), auch mit sehr geringer

Reibung in den Lagern, weil die treibenden und getriebenen Theile auf derselben umlaufenden Welle vereinigt sind. Die einmal in die richtige Lage gebrachten Bürsten brauchen hernach bei wechselnder Belastung nicht mehr verstellt zu werden.

### Gleichstrom-Wechselstrom-Transformatoren.

Zur Umsetzung eines Wechselstromes in einen Gleichstrom oder zu dem umgekehrten Vorgange wird die Vereinigung einer Wechselstrommaschine mit einer Gleichstrommaschine erforderlich; die eine Maschine dient als Stromerzeuger, die andere als Triebmaschine. Man kann, wie aus der Fig. 527 ersichtlich wird, zwei besondere Maschinen miteinander kuppeln. Die Figur stellt eine Wechsel-

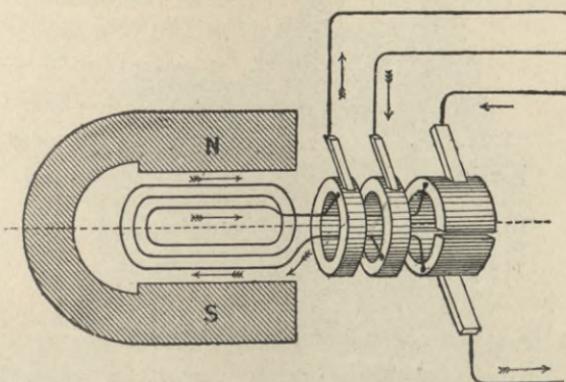


Fig. 526. Einfacher Gleichstrom - Wechselstrom - Transformator.

strommaschine dar, die mit einer Innenpolmaschine für Gleichstrom verbunden ist.

Beide Maschinen sind Muster von Siemens und zur Umsetzung eines Wechselstroms von 2000 Volt Spannung in einen Gleichstrom von 150 Volt Spannung zur Ladung von Sammlerbatterien u. s. w. bestimmt. Die Stadt Cassel wird mit Gleichstrom versehen, der als Wechselstrom mit hoher Spannung von der ausserhalb liegenden Stromerzeugungsanlage zur Stadt übertragen und dort von einer Kapp'schen Wechselstrommaschine, welche als Motor zwei Gleichstrom-Dynamomaschinen treibt, auf niedrige Spannung transformiert wird. In Budapest findet zweiphasige Uebertragung nach Unterstationen statt, wo der Wechselstrom durch gekuppelte Maschinen in Gleichstrom übertragen wird.

Man braucht indessen keine zwei besonderen Maschinen zur Erreichung des Zweckes zu kuppeln. Eine einzelne, in einem zweipoligen Magnetfelde sich drehende Wicklung, Fig. 526, welche

ausser mit zwei Schleifringen noch mit einem Commutator verbunden ist, kann entweder als Motor oder als Stromerzeuger arbeiten, und zwar sowohl mit Wechsel- als auch mit Gleichstrom<sup>1)</sup>. In der Praxis verwendet man zu diesem Zwecke Anker mit vieltheiligen Stromwendern. Z. B. kann man einen gewöhnlichen Gramme'schen Ring verwenden, indem man zwei Schleifringe hinzufügt und dieselben mit 2 um 180 Grad auseinander liegenden Punkten der Wicklung verbindet. Eine solche Maschine hat im Technical College zu Finsbury seit dem Jahre 1885, wo die Ringe von Dr. Walmsley angebracht wurden, zu dem gedachten Zwecke gedient. Sie wirkt als Transformator oder, wenn sie durch äussere Kraft in Drehung

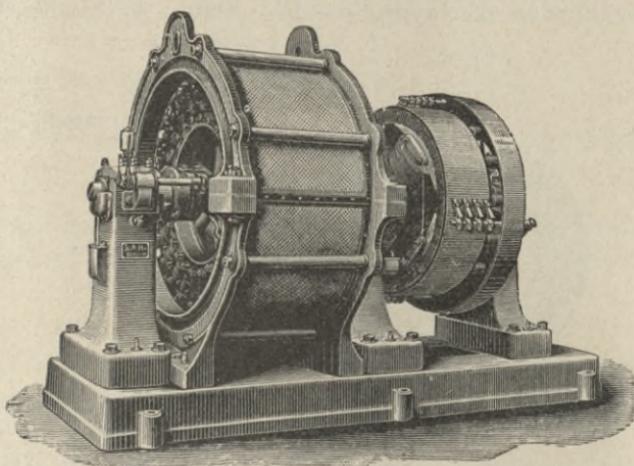


Fig. 527. Gleichstrom - Wechselstrom - Transformator.

versetzt wird, liefert sie nach Bedarf Gleichstrom oder Wechselstrom oder auch beide Stromarten gleichzeitig. Im Jahre 1887 liessen sich Helios und 1889 Bradley und Tesla ähnliche Constructionen patentiren. Um dreiphasigen Strom aus Gleichstrom zu erhalten, müssen drei Schleifringe mit drei symmetrisch liegenden Punkten verbunden werden. Will man zweiphasige Ströme erzeugen, so müssen vier Schleifringe mit 4 um 90 Grad auseinanderliegenden Punkten verbunden werden. Bei einer neueren von Hutin und Leblanc<sup>2)</sup> angegebenen Anordnung ist ein Satz von 18 Schleifringen mit ebensovielen symmetrisch liegenden Punkten verbunden, wodurch

1) Hospitalier schlägt für diese Maschinen die Benennung „polymorphe Dynamomaschinen“ vor; vergl. Soc. Française de Physique, 1894, S. 204.

2) Vergl. den mit Abbildungen versehenen Artikel in L'Électricien vom 21. April 1894.

18 Wechselströme erhalten werden, von denen jeder um 20 Grad in der Phase von den ihm zunächst liegenden abweicht. Ein einfacher mit Stromwender und Schleifringen versehener Anker, wie der in Fig. 528 dargestellte, würde auch ohne Feldmagnet genügen, bei seiner Drehung Gleichströme in Wechselströme umzuwandeln oder umgekehrt Wechselströme gleichzurichten, wenn nicht sich bei der praktischen Ausführung Schwierigkeiten wegen Funkenbildung ergäben. Das Vorhandensein eines Feldmagnets hat den Nutzen, sowohl die elektromotorischen Kräfte in den verschiedenen Theilen der Wicklung auszugleichen, als auch die Drehung gleichmässig zu erhalten. Pollak und Ferranti haben beide mit Erfolg solche Anordnungen benutzt, Ersterer zum Laden von Accumulatoren, Letzterer für Bogenlichtbeleuchtung.

Auf der Frankfurter Ausstellung 1891 waren derartige Transformatoren in grosser Zahl ausgestellt. Besonders zeigten die Firmen Lahmeyer und Schuckert viele interessante Ausführungen dieser Art.

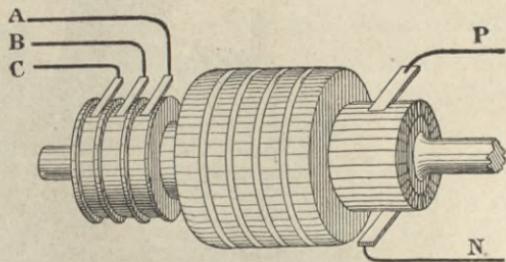


Fig. 528. Anker eines Transformators für dreiphasigen und Gleichstrom.

Schuckert hatte u. A.

eine sechspolige Maschine mit Ringwicklung ausgestellt, welche im Stande war, von den vier Stromarten: Gleichstrom, einphasigen, zweiphasigen oder dreiphasigen Wechselstrom jede beliebige in eine der drei anderen umzuwandeln. Sie hatte einen gewöhnlichen Ringanker mit 144theiligem Stromwender, dessen Wicklungen nach der bekannten Methode von Mordey gegenüber den verschiedenen Polpaaren quer verbunden waren. Da 144 Wicklungsabtheilungen und sechs Pole vorhanden waren, lagen 48 Abtheilungen zwischen zwei benachbarten gleichnamigen Polen. Von der 1., 17. und 33. Abtheilung, d. h. also von drei Punkten, welche gleich weit, und zwar um  $\frac{1}{3}$  des Abstandes von zwei benachbarten gleichnamigen Polen, von einander entfernt sind, führten Drähte zu drei Schleifringen, von welchen durch Bürsten dreiphasiger Strom abgenommen werden konnte. In gleicher Weise waren vier gleich weit voneinander entfernte Punkte der Wicklung (nämlich Abtheilung 1, 13, 25 und 37) mit vier anderen Schleifringen verbunden, welche einphasige und zweiphasige Ströme lieferten.

Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft stellte in Frankfurt einen nach ähnlichen Grundsätzen gebauten achtpoligen sich drehenden Transformator aus, der indessen statt eines Ringankers einen Trommelanker mit Wellenwicklung besass. Dieser Transformator, der sich jetzt im Laboratorium des Technical College, Finsbury, befindet, konnte Gleichstrom von 100 Volt Spannung in Dreiphasenströme von 70 Volt umformen.

Die bemerkenswerthesten Doppelmaschinen, die bis jetzt gebaut wurden, sind ohne Zweifel die in Schenectady für die Kraftanlage am Niagara<sup>1)</sup> hergestellten. Es sind 20polige Trommelmaschinen, welche ausser dem gewöhnlichen Commutator noch vier Schleifringe an der anderen Seite des Ankers haben. Sie erhalten zweiphasigen,

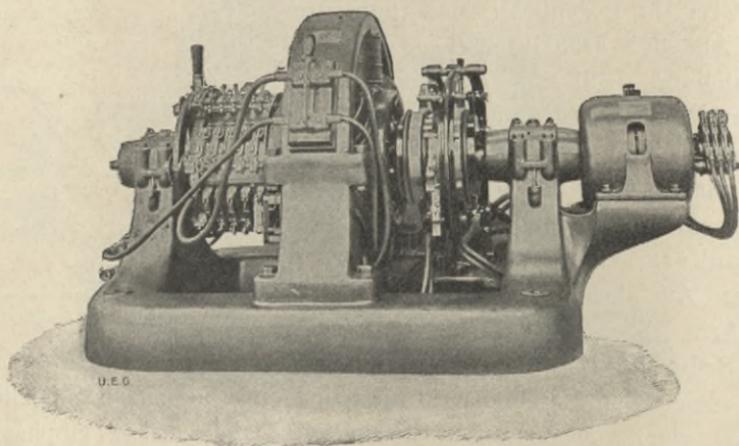


Fig. 529.

bereits auf 115 Volt herabtransformirten Strom, und liefern dafür 3000 Ampere Gleichstrom von 150 Volt für die Zwecke einer Aluminiumfabrik.

Interessant ist auch die im Juni 1900 dem Verkehr übergebene Anlage der Central London Railway. Dort sind Unterstationen vorgesehen, an welchen der hochgespannte Dreiphasenstrom in Gleichstrom umgewandelt wird, der den Bahnmotoren zugeführt wird. Diese Umwandlung geschieht durch rotirende Umformer, in deren Anker auf der einen Seite mittelst dreier Schleifringe Drehstrom eingeleitet wird. Auf der anderen Seite ist der Anker mit einem vieltheiligen Commutator verbunden, auf dem die Bürsten schleifen, denen der Gleichstrom abgenommen wird. Der rotirende Umformer ist demnach

1) Vergl. Cassier's Magazine 1895, S. 334.

gleichzeitig als synchroner Drehstrommotor und als Gleichstromerzeuger aufzufassen.

Das Anlassen der Umformer geschieht gewöhnlich von der Gleichstromseite aus, indem man sie mit Hilfe einer besonderen Stromquelle als Gleichstrommotoren anlaufen lässt.

Bei dem in der Fig. 529 dargestellten rotirenden Umformer der Union geschieht das Anlassen durch einen kleinen Inductionsmotor (rechts in der Figur), dessen Läufer direct auf der Welle sitzt. Hat der Umformer die Synchrongeschwindigkeit erreicht, so wird der Inductionsmotor, der eine Leistung von 4—5 P. besitzt, ausgeschaltet.

Als Dynamomaschine betrachtet ist der Umformer ein sechspoliger Compound-Gleichstromerzeuger, ähnlich der auf Tafel XI dargestellten achtpoligen Compounddynamomaschine.

Bemerkenswerth ist vielleicht noch die rechts in der Figur zu ersehende Montirung der auf den drei Schleifringen der Wechselstromseite schleifenden Bürsten mittelst des Bürstenhalterjoches.

Bei einer Belastung von 100 Ampere ist der Wirkungsgrad 82,9 %, bei 400 Ampere steigt er auf 92,9 %.

Bei den neueren Siemens'schen Umformern besitzt der Anker eine Gleichstromwicklung mit Abzweigungen auf der einen Seite zu einem normalen Gleichstromcommutator. Auf der anderen Seite sind Abzweigleitungen zu sechs Schleifringen derart geführt, dass die einzelnen Potentiale um  $60^\circ$  gegeneinander verschoben sind. Zur Umwandlung von Drehstrom in Gleichstrom wird durch die sechs Schleifringe dem Anker unverketteter Dreiphasenstrom in sechs Leitungen zugeführt. Bei dieser Anordnung wird bei verhältnissmässig geringer Grösse des Umformers eine grosse Leistungsfähigkeit bei gutem Wirkungsgrad erzielt. Diese Umformer werden im Allgemeinen für 50 Perioden und für Leistungen von 70 bis 500 Kilowatt gebaut.

## Kapitel XXVIII.

### Elektrische Uebertragung der Energie.

Für alle Aufgaben, die sich auf elektrische Energieübertragung auf kürzere oder weitere Entfernungen beziehen, sind stets die beiden wichtigen Factoren — die Stromstärke und die Spannung, bei der übertragen wird — im Auge zu behalten.

Bei der gewöhnlichen Vertheilung von Centralstationen aus — möge diese mit Wechselstrom oder mit Gleichstrom vor sich gehen — wird in der Regel die Bedingung der Gleichspannung eingehalten, die Stromstärke ändert sich nach Maassgabe des Bedürfnisses. Zum Betriebe hintereinander geschalteter Lampen lässt sich auch die Vertheilung bei gleichbleibender Stromstärke vorsehen, die Spannung ändert sich dann nach Maassgabe der Zahl eingeschalteter Lampen. Diese Unterscheidung ist bei dem Problem der Kraftübertragung wohl zu beachten, obgleich Kraftübertragung auch ausgeführt werden kann, ohne dass man sich an eine dieser beiden Bedingungen bindet.

Auf Seite 465 wurde angeführt, dass der Erfolg einer Uebertragung auf weite Entfernungen in der Verwendung hoher Spannung liegt, weil diese geringe Stromstärken und demnach die Verwendung dünner Leiter gestattet. Wir können hier zweckmässiger Weise die Frage der Oekonomie einer Kraftübertragung noch einmal berühren.

Es soll die Beziehung zwischen der Spannung, bei der der Strom die Triebmaschine versorgt, und dem Wärmeverlust im Stromkreise bestimmt werden.

Es sei  $\Sigma R$  die Summe aller Widerstände im Stromkreise, der Wärmeverlust ist dann nach dem Joule'schen Gesetz (in Watt)

$$= i^2 \Sigma R.$$

Da

$$i = \frac{\mathcal{E} - E}{\Sigma R}$$

ist, so können wir schreiben:

$$\text{Wärmeverlust} = \frac{(\mathcal{E} - E)^2}{\Sigma R}.$$

Angenommen, man könne, ohne die Widerstände zu ändern,  $\mathcal{E}$  und  $E$  um gleiche Beträge vergrössern, so dass also  $\mathcal{E} - E$ , und damit auch die Stromstärke, denselben Werth wie vorhin behält; dann ist klar, dass der Wärmeverlust derselbe bleibt wie zuvor, während mehr Energie übertragen und mehr Arbeit geleistet wird. Demnach ist der Wirkungsgrad höher, da:

$$\frac{\text{Arbeit des Motors}}{\text{Arbeit des Stromerzeugers}} = \frac{iE'}{i\mathcal{E}'} = \frac{E_1}{\mathcal{E}_1} \text{ ist,}$$

und dieses Verhältniss ist der Einheit näher, als  $\frac{E}{\mathcal{E}}$ , weil sowohl  $\mathcal{E}$  als auch  $E$  um gleiche Beträge zugenommen haben.

Es sei z. B.  $\mathcal{E} = 100$  Volt und  $E = 90$  Volt, die Summe der Widerstände  $= 1$  Ohm. Die Stromstärke  $i$  wird dann gleich 10 Ampere sein. Die zugeführte Arbeit beträgt 1000 Watt, die nutzbare 900 Watt, der Verlust durch Wärmebildung 100 Watt, der elektrische Wirkungsgrad 90 Procent. Es werde nunmehr die Spannung  $\mathcal{E}_1$  auf 1000 Volt,  $E_1$  auf 990 Volt gesteigert, so beträgt die Stromstärke wiederum 10 Ampere. Die zugeführte Arbeit stellt sich jetzt auf 10000 Watt, die nutzbare auf 9900, während 100 Watt in Wärme umgesetzt werden. Es wird demnach die zehnfache Arbeit übertragen, während der Verlust an Wärme derselbe wie vorher und der Wirkungsgrad auf 99 Procent gestiegen ist. Es entspricht deshalb nur den Forderungen der Wirthschaftlichkeit, bei hohen Spannungen zu arbeiten.

Zur Erreichung der höheren elektromotorischen Kraft bieten sich mehrere Wege dar: Man kann entweder die Anker mit vielen Windungen von dünnem Drahte versehen, oder höhere Umdrehungszahlen anwenden, oder aber mehrere Maschinen hintereinander schalten. Bei Wechselstromübertragung kommt noch die Möglichkeit der Steigerung der Spannung durch Transformatoren hinzu.

Der für die elektrische Uebertragung von Energie aus der Anwendung hoher elektromotorischer Kräfte bei beiden Maschinen hergeleitete Vortheil lässt sich auch an einem Diagramm nachweisen.

Die Fig. 328 S. 471 möge den Fall darstellen, in dem  $\mathcal{E} = 100$  Volt und  $E = 80$  Volt ist. Es werde angenommen, dass die Widerstände im Stromkreise ungeändert bleiben, während  $\mathcal{E}$  auf 200 Volt und  $E$  auf 180 anwächst, etwa durch passende Erhöhung der Umlaufgeschwindigkeit bei beiden Maschinen.  $\mathcal{E} - E$  bleibt  $= 20$  Volt, die Stromstärke ist die gleiche wie vorhin. Die Fig. 530 stellt dies dar. Das Quadrat  $KGHD$ , das den Wärmeverlust bedeutet, besitzt dieselbe Grösse wie im früheren Fall; die aufgewendete Energie ist

indessen doppelt so gross, und die nutzbare Arbeit ist von mehr als doppelter Grösse wie vorhin.

Man kann die Sache auch noch von einem anderen Punkte aus betrachten. Da die Arbeit das Product der beiden Grössen  $E$  und  $i$  ist, so werden wir zweckmässig, wenn es sich darum handelt, eine vorgeschriebene Zahl von Watt zu übertragen,  $E$  gross und  $i$  klein machen, denn gerade das Fliessen des Stromes durch die Widerstände des Kreises verursacht den Verlust, während der einzige Nachtheil einer hohen elektromotorischen Kraft nur in der Schwierigkeit einer guten Isolation besteht. Die elektromotorische Kraft wird daher so hoch genommen als mit Rücksicht auf Sicherheit zugänglich ist. Wenn wir die Spannung verdoppeln, also den Strom auf die Hälfte

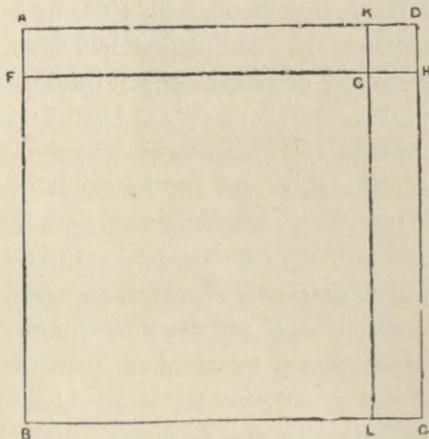


Fig. 530.

vermindern, verringern sich die Verluste auf den vierten Theil, da dieselben dem Quadrate des Stromes proportional sind.

Fontaine<sup>1)</sup> gelang es, durch Anwendung mehrerer, an jedem Ende der Leitung hintereinander geschalteter Maschinen, deren Widerstand 100 Ohm betrug, 50 P mit einem mechanischen Wirkungsgrade von 52 Procent zu übertragen.

Dieser Versuch bestätigte die von Elihu Thomson im Jahre 1879 gemachte Angabe über die wirtschaftliche Verwendung mehrerer hintereinander geschalteter Maschinen. Es wurden sieben Maschinen gleicher Bauart benutzt. Jede wog 1200 kg und leistete 16 Kilowatt. Vier waren als Stromerzeuger hintereinander geschaltet und wurden durch eine Dampfmaschine von 113 indicirten Pferdestärken bei 1298 Umläufen in der Minute betrieben. Bremsversuche wiesen 95,88 P nach. Die andern drei Maschinen wurden als Triebmaschinen benutzt und leisteten 49,98 P bei 1120 Umläufen in der Minute. Die Stromstärke betrug 9,34 Ampere. Es ergab sich ein mechanischer Wirkungsgrad von 52 Procent. Der Widerstand der Maschinen betrug etwa 11,5 Ohm für jede. Die Spannung an den Stromerzeugern betrug 5996 Volt, am Ende der Leitung 5062 Volt.

1) L'Électricien, B, 10, S. 707, 1886.

**Elektrischer Wirkungsgrad der Uebertragung.**

Es lässt sich nachweisen, dass bei Anwendung von zwei Reihenmaschinen der elektrische Wirkungsgrad, wenn kein Stromverlust vorhanden ist, gleich dem Verhältniss der elektromotorischen Kräfte wird, die in den Ankern der beiden Maschinen erzeugt werden.

Wir betrachten zu diesem Zwecke getrennt den Wirkungsgrad in den drei Theilen des Stromkreises, wenn  $E_1$  die im Stromerzeuger entwickelte elektromotorische Kraft,  $E_2$  die in der Triebmaschine entwickelte bedeutet und  $r_1, r_2$  die inneren Widerstände sind.

Dann beträgt der elektrische Wirkungsgrad:

$$\text{des Stromerzeugers} \quad . \quad . \quad . \quad \eta_1 = \frac{E_1 i - r_1 i^2}{E_1 i},$$

$$\text{der Linie} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \eta_2 = \frac{E_2 i + r_2 i^2}{E_1 i - r_1 i^2},$$

$$\text{der Triebmaschine} \quad . \quad . \quad . \quad \eta_3 = \frac{E_2 i}{E_2 i + r_2 i^2},$$

demnach ergibt sich als Wirkungsgrad der gesammten Anordnung:

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = \frac{E_2}{E_1}.$$

Handelt es sich um eine Nebenschluss- oder Verbundmaschine, oder findet Stromverlust auf der Leitung statt, so sind die Ankerströme in beiden Maschinen nicht mehr gleich. Bezeichnet man die Ankerströme mit  $i_1$  und  $i_2$ , so ist

$$\eta = \frac{E_2 i_2}{E_1 i_1}.$$

Ein Beispiel einer Uebertragung auf mässige Entfernung vermittelt Gleichstrom bietet die Anlage, welche die Oerlikon-Gesellschaft in Schaffhausen gebaut hat. Es werden dort 500 effective Pferdestärken elektrisch mit einem Wirkungsgrade von 78 Procent an die dortigen Spinnereien abgegeben; in der etwa 685 m entfernten Primäranlage betreiben die im Flusse aufgestellten Turbinen zwei Stromerzeuger (sechspolige von Brown entworfene Dynamomaschinen mit überschüssender gemischter Wickelung), welche jede 330 Ampere bei 624 Volt leisten. Die Motoren, welche im übrigen die gleiche Bauart wie die Stromerzeuger haben, sind jedoch mit Feldmagneten versehen, welche vergleichsweise viel kräftiger als diejenigen der Dynamomaschinen sind; sie wechseln in ihrer Geschwindigkeit nur um 3 Procent zwischen Leerlauf und voller Belastung.

Ein anderes Beispiel der Kraftübertragung mit Gleichstrom<sup>1)</sup> liefert eine Anlage, welche Fabriken und eine Beleuchtungscentrale in Genua mit Strom versorgt. Die Wasserkraft eines Nebenflusses des Po wird in einer Entfernung von 25,5 km von Genua in mehreren Stationen für die Uebertragung nutzbar gemacht. In einer dieser Stationen sind acht Thury'sche Gleichstrommaschinen von je 70 P aufgestellt, welche paarweise gekuppelt von 140pferdigen Turbinen getrieben werden. Jede Maschine liefert 47 Ampere bei 1000 Volt. Sie sind unabhängig voneinander durch Porzellan isolirt und so in Reihe geschaltet, dass die Kraft mit einer Gesamtspannung von 8000 Volt übertragen wird. Die Leitung besteht aus Kupferstäben, die von Oelisolatoren getragen werden.

Wenn eine ungewöhnlich hohe elektromotorische Kraft für den Zweck einer Uebertragung erforderlich wird, ist es aus zwei Gründen zweckmässig, Wechselstrom zu verwenden (S. 517):

1. Stromerzeuger für Wechselstrom brauchen keinen Stromwender; daher kann der Strom von einer einzigen Maschine mit der verlangten Spannung erzeugt werden.
2. Wechselströme können von einer Spannung auf eine andere durch einfache Transformatoren ohne bewegliche Theile übergeführt werden.

Gegen die Verwendung von Wechselströmen für diesen Zweck sprechen folgende Gründe:

1. Da die Maximalspannung bei Wechselstrom 1,41 mal der Quadratwurzel aus dem mittleren Quadrate der Spannung ist, so kann ein Wechselstrom von bestimmtem Werthe nicht ebensoviel Arbeit durch eine Leitung übertragen als ein Gleichstrom von demselben Werthe, dessen Spannung gleich der Maximalspannung des Wechselstromes ist.
2. Es findet ein von dem arbeitslosen Strom (Seite 538) herrührender Arbeitsverlust in der Leitung statt.
3. In der Leitung findet ausser dem dem Widerstande entsprechenden Spannungsverlust auch noch ein solcher statt, welcher von der Selbstinduction der Leitung abhängig ist (Seite 528).
4. Es tritt eine allerdings nur geringe Vermehrung des Widerstandes in den Hauptleitungen auf, welcher von der Ober-

---

1) Elektrot. Zeitschr. 1892, S. 216.

flächenwirkung herrührt, wenn die Wechselzahl hoch oder die Stromstärke bedeutend ist (Seite 549).

5. Bis in die neueste Zeit stand der Kraftübertragung durch Wechselstrom der Umstand hindernd im Wege, dass Wechselstrommotoren nicht von selbst angingen. Dieser Uebelstand ist nun beseitigt durch die Construction von selbst angehenden einphasigen Motoren mit hohem Wirkungsgrad (Seite 681), und durch die Verwendung von Mehrphasenströmen (S. 642).

Die beiden oben erwähnten Vorzüge des Wechselstromes überwiegen indessen die angeführten Nachtheile so sehr, dass gegenwärtig in der überwiegenden Mehrzahl von Fällen in allen Theilen der Welt die Kraftübertragung auf weite Entfernung durch Wechselstrom stattfindet.

In der grössten je ausgeführten Kraftvertheilungsanlage, derjenigen der Niagara-Fälle, wird zweiphasiger Wechselstrom verwendet. Die 5000pferdigen Dynamomaschinen, welche den Strom erzeugen, sind Seite 615 beschrieben worden. Es sind deren bis jetzt drei vorhanden, jede leistet 1550 Ampere (775 Ampere in jedem Kreise) bei 2250 Volt. Die Kraft wird zum Theil zum Betriebe von benachbarten Fabriken verbraucht, zum andern Theil auf weite Entfernungen übertragen. Zur Aluminiumerzeugung wird der Wechselstrom durch umlaufende Transformatoren in Gleichstrom umgewandelt. Zur Vertheilung auf weite Entfernung wird die Spannung durch Transformatoren auf 20000 Volt erhöht. Die verfügbare Wasserkraft beträgt 100 000 P und wird in dem Maasse, wie der Bedarf wächst, weiter ausgenutzt werden. Wahrscheinlich werden in Zukunft einige der Dynamomaschinen so gebaut werden, dass sie ohne Zuhilfenahme von Transformatoren den Strom für die Uebertragung auf weite Entfernungen unmittelbar mit der erforderlichen Spannung erzeugen können. Ein unterirdischer Kanal führt die aus blanken Kupferstäben bestehenden, auf Oelisolatoren befestigten Hauptleitungen bis zu einer Entfernung von 750 m. Von hier aus gehen ebenfalls unterirdisch die Leitungen zu den benachbarten Fabriken.

Eine seit mehr als drei Jahren bestehende Hochspannungskraftübertragung ist von der Oerlikon-Gesellschaft in Hochfelden in der Schweiz ausgeführt worden. Fig. 531 giebt eine Ansicht der Station und zeigt die drei von Brown 1890 entworfenen Stromerzeugungsmaschinen. Es sind Dreiphasenmaschinen von je 200 P mit 180 Umdrehungen in der Minute. Ihre senkrecht angeordneten Achsen

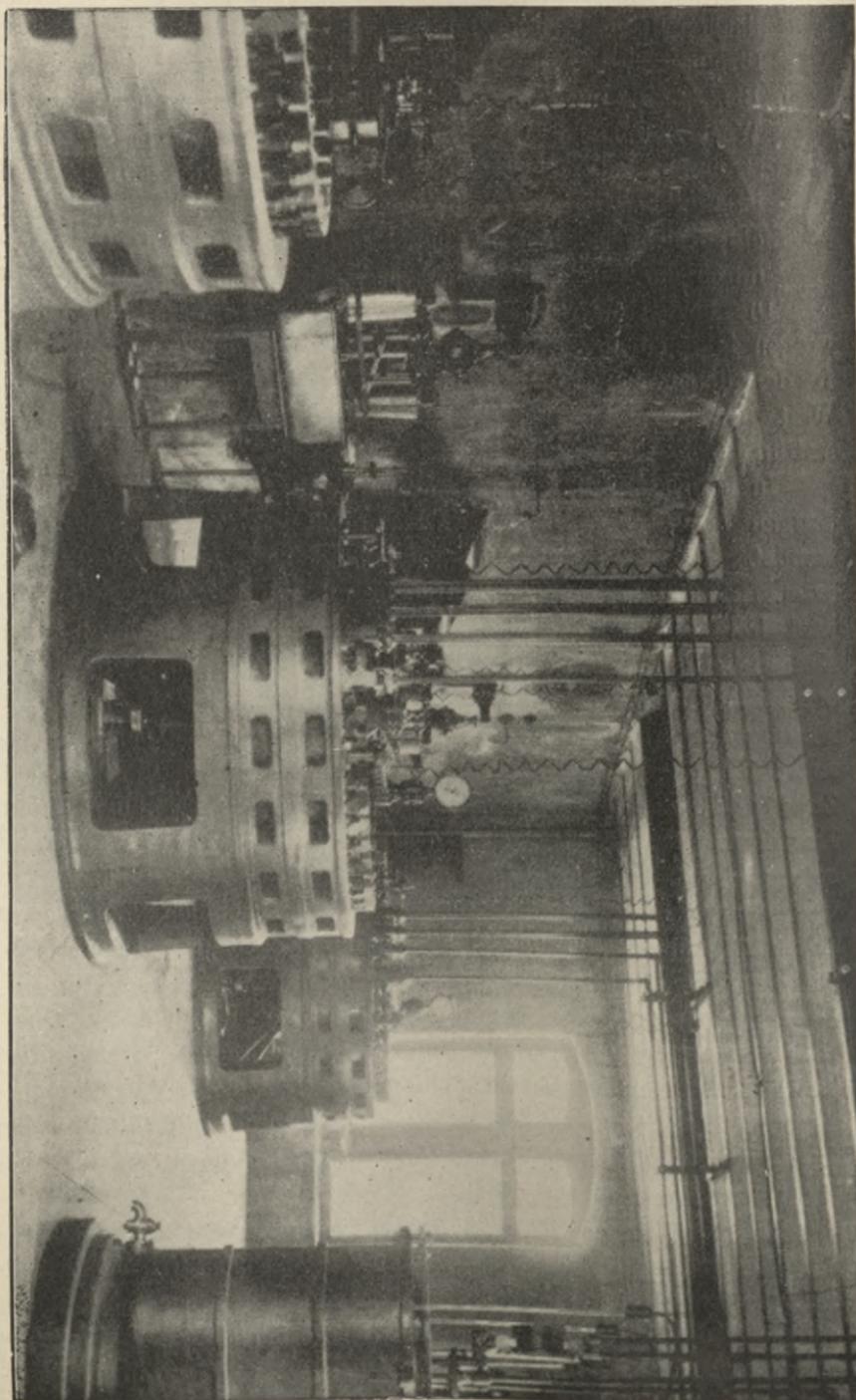


Fig. 531. Dreiphasige Stromerzeuger in der Kraftstation in Hochfelden (Schweiz).

befinden sich unmittelbar über den Antriebsturbinen, im übrigen gleichen sie ganz den Lauffener Dynamomaschinen. Ihre Klemmenspannung beträgt 86 Volt. Zur Erhöhung der Spannung ist jede Maschine mit einem dreiphasigen in Oel getauchten Transformator verbunden, von denen einer in der Zeichnung rechts sichtbar ist. Diese Transformatoren bringen die Spannung auf 13000 Volt; hiermit werden die Ströme vermittelst 3 je 4 mm starker Drähte nach den Werken der Oerlikon-Gesellschaft (etwa 24 km Entfernung) übertragen, dort durch Niederspannungstransformatoren auf 190 Volt umgesetzt, und mit dieser Spannung für Licht und Kraft weiter vertheilt.

### Graphische Darstellung der Uebertragung.

Eine bequeme Art und Weise, den Betrag der Energiemengen graphisch darzustellen, die an der übertragenden Stelle verausgabt

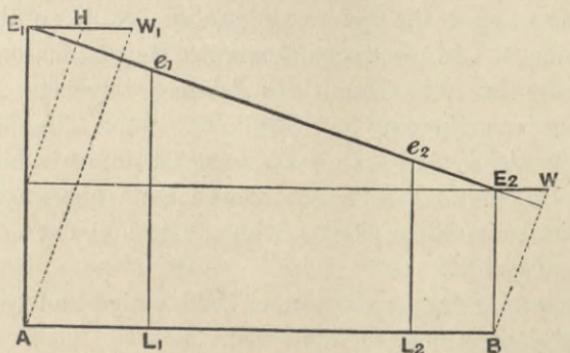


Fig. 532.

und an der empfangenden Stelle nutzbar werden, ist die folgende, von v. Hefner-Alteneck herrührende:

Die Senkrechten  $AE_1$  und  $BE_2$  in Fig. 532 sollen die Grössen der elektromotorischen Kräfte in der abgebenden und empfangenden Maschine darstellen; die horizontalen Linien  $AL_1$ ,  $L_1L_2$  und  $L_2B$  stellen die Widerstände der Maschine in  $A$ , der Leitung (einschliesslich der Rückleitung) und der Maschine in  $B$  dar. Man verbindet  $E_1$  mit  $E_2$ ; die Tangente der Neigung dieser Linie gegen die Horizontale ( $E_2F$ : $E_1F$ ) stellt die Stromstärke dar. Von  $A$  und  $B$  aus fällt man Senkrechte auf die Linie  $E_1E_2$  und verlängert solche bis zum Schnittpunkt mit den parallel zu  $AB$  gezogenen Linien  $E_1W_1$  und  $E_2W_2$ . Die Längen  $E_1W_1$  und  $E_2W_2$  stellen dann das Verhältniss der abgegebenen und wieder erhaltenen Energie dar, da jede von ihnen der elektromotorischen Kraft und der Tangente der

Neigung der Linien  $E_1 E_2$  proportional ist. Die durch Umsetzung in Wärme verlorene Energie wird durch die Länge der Linie  $E_1 H$  dargestellt <sup>1)</sup>.

#### Wirtschaftlichkeit der Uebertragung.

Wie schon erörtert worden ist, hängt die Wirtschaftlichkeit einer Uebertragung von der Spannung ab, mit der die Kraft übertragen wird, und vom Widerstand der Leitung. Es entsteht die Frage, welcher Widerstand der Leitung zu geben ist, um das Maximum der Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Ermässigt man den Verlust der Wärmebildung durch Anwendung eines starken Kupferdrahtes für die Leitung, so wird der Gewinn an Leistung durch die Zinsen der Herstellungskosten mehr wie ausgeglichen werden können.

Lord Kelvin lieferte 1881 eine Lösung der Aufgabe unter der Voraussetzung, dass 1. die Spannung gegeben, 2. die zu übertragende Kraft bestimmt ist. In diesem Falle werden die gesammten jährlichen Kosten für die im Widerstand der Leitung verzehrte Arbeit und der Verzinsung der Leitung ein Minimum, wenn diese beiden Beträge einander gleich sind. Dieses sogen. Thomson'sche Gesetz ist vielfach aus Unkenntniss auch auf andere Fälle übertragen worden, als für welche seine Richtigkeit erwiesen ist, und hat dadurch viel Verwirrung angestiftet.

Ayrton und Perry<sup>2)</sup> erörterten 1886 einige andere Fälle und gelangten dabei zu wichtigen Schlüssen.

Soll an dem einen Ende einer Leitung durch eine Triebmaschine eine bestimmte Leistung erzielt werden, während am andern Ende eine gegebene Spannung vom Stromerzeuger geliefert wird, so erhält man bei grösserer Leitungslänge das Maximum der Wirtschaftlichkeit nicht durch Erhaltung der Stromdichte, sondern dadurch, dass man diese geringer wählt. Je geringer die Spannung am Stromerzeuger ist, desto geringer muss die Stromdichte in der Leitung sein. Kapp<sup>3)</sup> hat neuerdings eine allgemeinere Lösung der Aufgabe geliefert, indem er sowohl die Spannung als auch die Kosten für die Maschinen und die Leitung in Rechnung gezogen

1) Wegen weiterer geometrischer Erörterung der Arbeitsübertragung vergleiche eine Abhandlung von Reignier, in La Lum. Electr. B. 23 S. 352. 1887.

2) Journ. Soc. Electr. Engin. B. 15, S. 120, 1886.

3) Journ. Soc. of Arts, B. 39, 10. Juli 1891; vergl. auch sein Werk: „Electric Transmission of Energy“, 4. Aufl. 1894, worin mehrere sehr brauchbare Curven gegeben sind.

hat. Es wird dabei vorausgesetzt, dass der jährliche Werth der Leistung auf der erzeugenden Stelle und die Kosten der Anlage für die Pferdestärke bekannt sind. Von den als bekannt vorauszusetzenden Grössen, wie die Zahl der primären Pferdestärken, Gesamtwirkungsgrad, Spannung am Motor, jährliche Kosten der erzeugten Kraft und Arbeitsstromstärke ist die letzterwähnte die wichtigste, denn aus ihr können die andern Angaben ermittelt werden. Kapp findet hierbei, dass es unter keinen Umständen wirthschaftlich ist, wenn in der Leitung mehr als die Hälfte der Kraft verloren geht.

Eine brauchbare Tabelle, aus welcher zu ersehen ist, in welcher Weise die Vermehrung des Kupfergewichtes, d. h. desjenigen Theiles der Gesamtausgabe, der der Stromstärke proportional ist, die Betriebskosten beeinflusst, hat Forbes 1885 in seinen Vorlesungen über Vertheilung der Elektrizität gegeben<sup>1)</sup>.

Bei allen Kraftübertragungen auf weitere Entfernungen liegt das Geheimniss der Wirthschaftlichkeit in der Verwendung hoher Spannung. Gleichstrommaschinen lassen sich aber nicht mehr bei Spannungen von 3000 oder 4000 Volt verwenden, weil die Stromabgeber mit ihrer Isolation solchen Spannungen nicht Stand halten. Auch wenn man durch Hintereinanderschaltung mehrerer die Spannung für jede einzelne vermindert, so entgeht man nicht der Gefahr, dass die Isolation zerstört wird. Daher rührt die Ueberlegenheit der Wechselstrommaschinen, die keines Stromabgebers, wie bei Gleichstrommaschinen, bedürfen. Werden ferner Spannungen von über 10000 Volt erforderlich, so zieht man Maschinen für niedrige Spannung vor, setzt den Strom am gebenden Ende auf hohe Spannung und am empfangende Ende der Leitung wieder auf niedere Spannung um, wie schon 1881 von Deprez und Carpentier vorgeschlagen wurde, weil es viel leichter ist, die Wickelungen eines feststehenden Umformers isolirt zu halten, als Theile einer umlaufenden Maschine. Ob aber ein- oder mehrphasiger Strom für weite Entfernungen vorzuziehen ist, kann noch als unentschieden gelten.

Ein Beispiel einer Uebertragung auf weite Entfernung bei besonders hoher Spannung bietet die 1891 erbaute Versuchslinie von Lauffen nach Frankfurt (170 km). Zu Lauffen war am Neckar eine Turbine zum Betriebe einer dreiphasigen Wechselstrommaschine aufgestellt (Maschine von Brown, vergl. Seite 602), die drei Wechselströme von etwa 1400 Ampere bei 50 Volt liefern konnte. Diese

---

1) Journ. Soc. of Arts, 1885.

Ströme wurden in solche von 8000, 12500 oder 25000 Volt umgesetzt. Drei Kupferleitungen von je 4 mm Durchmesser waren bis Frankfurt an Holzstangen geführt, zur Isolirung dienten 10000 sogen. Oelisolatoren. In Frankfurt wurden die Ströme in solche von 60 Volt Spannung umgesetzt und zum Betriebe von Glühlampen oder Triebmaschinen für dreiphasigen Strom benutzt. An dieser Leitung wurden von einer Commission, an deren Spitze Prof. H. F. Weber stand, Messungen angestellt. Der darüber erstattete Bericht schliesst mit der folgenden Zusammenfassung der Ergebnisse:

1. In der Lauffen-Frankfurter Anlage zur Uebertragung elektrischer Energie über eine Entfernung von 170 km mittels eines Systems von Wechselströmen mit der Spannung von 7500 bis 8500 Volt und einer durch Oel und Porzellan isolirten nackten Kupferleitung wurden bei der kleinsten Leistung 68,5 Procent, bei der grössten Leistung bis zu 75,2 Procent der von der Lauffener Turbine an die Dynamo abgegebenen Energie in den tertiären Leitungen in Frankfurt nutzbar gemacht.

2. Bei dieser Uebertragung trat in der Fernleitung als einziger, durch die Messungen fixirbarer Effectverlust der durch den Widerstand der Leitung bedingte Joule'sche Effect auf.

3. Theoretische Untersuchungen ergaben, dass der Einfluss der Capacität langer in Luft geführter nackter Leitungen zur Fortleitung von Wechselströmen für Energieübertragung auf den Wirkungsgrad der Uebertragung bei der Verwendung von Periodenzahlen 30 bis 40 bis 50 so gering ist, dass derselbe in der Planung elektrischer Energieübertragungen als ganz untergeordnete Grösse behandelt werden darf.

4. Als Ausdruck unserer Erfahrungen während der zur Bestimmung des Wirkungsgrades der Lauffen-Frankfurter Energieübertragung vorgenommenen Messungen fügen wir noch als viertes Resultat bei: Der elektrische Betrieb mit Wechselströmen von 7500 bis 8500 Volt Spannung in mittels Oel, Porzellan und Luft isolirten Leitungen von mehr als 100 km Länge verläuft ebenso gleichmässig, sicher und störungsfrei, wie der Betrieb mit Wechselströmen von einigen hundert Volt Spannung in Leitungsbahnen von der Länge einiger Meter.

Bei einigen später noch vorgenommenen Untersuchungen<sup>1)</sup> mit einer Spannung von 25000 Volt und einer Frequenz von 24 Perioden in der Secunde wurde ein Wirkungsgrad von 75 Procent bei einer Belastung von ungefähr 180 P erreicht.

---

1) Officieller Bericht über die Frankfurter Ausstellung, B. 2, S. 451.

## Regulatoren für Dynamomaschinen.

---

Nicht allein zur Aufrechterhaltung der Spannung oder der Stromstärke auf einer bestimmten Höhe braucht man Hilfsmittel zur Regulirung der Leistung von Maschinen, sondern z. B. auch zu dem Zwecke, um die Spannung einer Maschine so zu steigern, dass sie auf bestimmte Entfernung gewisse Leistungen zu erzielen vermag.

Die Leistung einer Maschine hängt von drei inneren Umständen ab, und zwar von der Geschwindigkeit  $n$ , der Anzahl der Ankerleiter  $N$ , und der Kraftlinienmenge  $S$ , sowie von zwei äusseren Umständen, und zwar dem Widerstand des Stromkreises und der elektromotorischen Gegenkraft im Stromkreise. Hiernach ist klar, dass jeder dieser fünf Umstände eine Methode darbieten könnte, die Leistung der Maschine zu regeln.

Die Einschaltung von Widerständen in den Stromkreis ist stets mit Arbeitsverlust verbunden und bildet deshalb keine wirtschaftliche Methode, sondern nur eine für Versuchszwecke geeignete. Die Einführung von elektromotorischen Gegenkräften in den äusseren Kreis geschieht bei Wechselstrom durch Verwendung von Drosselspulen, bei Gleichstrom durch Zufügung von gegengeschalteten geladenen Secundärzellen; doch ist dieses Mittel nur in ganz besonderen Fällen und in geringem Umfange praktisch anwendbar.

Es bleiben also nur die übrigen drei Methoden zu betrachten.

Die Geschwindigkeit lässt sich nur regeln, falls für jede Dynamomaschine eine besondere Antriebsmaschine vorhanden ist; in solchen Fällen wird an Stelle des Centrifugalregulators ein besonderer Apparat erforderlich.

Von einer Aenderung der Zahl der Leiter eines umlaufenden Ankers kann während des Betriebes überhaupt nicht die Rede sein. Die wirksame Zahl der Leiter lässt sich indessen durch Vorwärtsschieben der Bürsten ändern, so dass der Strom nicht an den Punkten höchster Spannung, sondern an andern Punkten abgenommen

wird. Bei dieser Methode äussern einige Ankerwindungen innere elektromotorische Gegenkräfte, und zwar sind dies diejenigen, welche zwischen dem neutralen Punkte und dem Punkte, wo die Bürsten anliegen, sich befinden.

Die Aenderung der Kraftlinienmenge bildet die fast allgemeine Methode der Regelung; sie lässt sich auf zwei ganz verschiedenen Wegen erreichen. Da die Zahl der Kraftlinien von der Erregung (oder den Ampere-Windungen) und vom Widerstand des magnetischen Kreises abhängt, so kann man sie durch Aenderung der einen oder der anderen Grösse regeln.

Die Erregung lässt sich auf verschiedene Weise ändern, und zwar:

- a) mit der Hand unter Zuhilfenahme von Widerständen im erregenden Kreise;
- b) selbstthätig durch besondere Vorrichtungen, welche an Stelle des Handbetriebes treten;
- c) durch Anwendung gemischter Wickelungen.

Den magnetischen Kreis kann man ändern:

- d) indem die Polstücke dem Anker näher oder ferner gebracht werden;
- e) durch Oeffnung oder Schliessung eines anderen Zwischenraumes im magnetischen Kreise;
- f) indem man den Anker zwischen den Polstücken mehr hervorzieht;
- g) durch Anwendung eines magnetischen Nebenschlusses zu den Schenkeln des Magnetes.

Alle diese Arten magnetischer Regelung hat man versucht<sup>1)</sup>, aber, abgesehen von kleinen Maschinen, ohne grossen Erfolg.

Handregulatoren. Sie enthalten gleitende Contacte, um folgende Vorgänge zu ermöglichen:

1. Einschaltung oder Ausschaltung von Widerstand in den erregenden Kreis oder aus demselben bei einer Nebenschlussmaschine<sup>2)</sup> (vergl. den Apparat von Edison, Fig. 152);

1) Ein Beispiel für die unter d) angegebene Regelung bietet Firth's Methode (vergl. Industries, B. 9, S. 161), bei welcher die Polmassen durch Schrauben nach rückwärts gezogen werden können; ein solches für die unter g) angeführte Methode ein von Desroziers angewendeter und in La Lumière Électrique, B. 24, S. 394, beschriebener magnetischer Nebenschluss. Andere Methoden magnetischer Regulirung sind von Goolden und Trotter, Langley, P. Müller, Lontin und von Diehl ausgeführt.

2) Ueber die Bauart solcher Rheostaten, die Wahl der Drahtstärke und dergleichen vergl. Herrick, Electrical World, B. 15, S. 240, 1880. Wichtige

2. Einschaltung oder Ausschaltung von Widerständen, die im Nebenschluss zu den magnetisirenden Wickelungen einer Reihemaschine liegen;
3. Ausschaltung von erregenden Windungen, wenn diese in Abtheilungen angeordnet sind.

### Regulatoren für Gleichspannung und für gleichbleibende Stromstärke.

Alle selbstthätigen Regulatoren enthalten einen Haupttheil, der gewissermassen jede Aenderung beobachtet und einen Mechanismus in Thätigkeit setzt, der dieser Aenderung entgegenwirkt. Dieser Theil wird in der Regel durch einen Elektromagnet gebildet, häufig von einer Spule mit beweglichem eintauchenden Kern. Soll die Spannung gleichbleibend erhalten werden, so muss die Spule wie die eines Spannungsmessers bewickelt, also aus feinem Draht mit hohem Widerstand hergestellt und als Nebenschluss angelegt werden. Soll die Stromstärke gleichbleibend erhalten werden, so muss man die Spule wie die eines Strommessers aus starkem Draht mit geringem Widerstand herstellen und in den Hauptstromkreis einschalten. Wechselstrommaschinen werden gewöhnlich durch Einwirkung auf den Erregerkreis regulirt, der Strom in der Regulirungsspule wird aus den Hauptleitungen mittels eines kleinen Umformers entnommen.

Es giebt zwei Arten selbstthätiger Regulatoren: bei der einen Art wird die Arbeit zur Bewegung des Regulators mechanisch vollbracht, nur die Regulirung erfolgt elektrisch, bei der andern Art wird die Regelung sowie die bewegende Kraft elektrisch hervorgebracht. Der in den früheren Auflagen dieses Buches beschriebene Regulator von Goolden gehört zur ersten Klasse. In dem Apparat befindet sich ein von einer senkrecht angeordneten Schraubenspindel bewegter Gleitcontact; diese Schraubenspindel wird je nach Erforderniss rechts oder links herum gedreht durch Vermittelung eines auf der Spindel gleitend befestigten doppelten Kronrades, zwischen dessen Verzahnungen sich ein kleines von der Maschine langsam bewegtes Zahnrad dreht. Die eigentliche Regulirung bewirkt ein Solenoïd mit eingetauchtem Eisenkern, welcher letzterer die Auf- oder Abwärtsbewegung des Kronrades bewirkt.

---

Fortschritte hierin wurden in der neueren Zeit durch die Verwendung emaillirter Widerstände erzielt. Fleming erfand besondere Formen von Rheostaten, bei welchen die Arbeit verzehrt wurde in Drähten, welche über zurückspringende Stützen gezogen waren.

Besitzt der Strom in der Spule die richtige Stärke, so taucht der Kern gerade so weit ein, dass weder die obere noch die untere Verzahnung des Kronrades in das Triebbad eingreift, die Schraubenspindel also stillsteht. Wird der Strom schwächer, so hebt sich das Kronrad, kommt in Eingriff mit dem kleinen Triebbad, und dreht sich und die Schraubenspindel in dem Sinne, dass durch den Gleitcontact Widerstand aus dem Erregerkreise ausgeschaltet und dadurch der Strom in der Wickelung wieder auf die normale Stärke gebracht wird. Ist der Strom zu stark, so wird der Eisenkern tiefer in das Solenoid gezogen, das Kronrad dreht sich in entgegengesetztem Sinne, und es wird Widerstand in den Erregerkreis eingeschaltet. Neuerdings ist dieser Regulator mit einem Differentialsolenoid ausgeführt worden.

Ein Beispiel für die zweite Regulierungsmethode bietet der Regulator von Maquaire, bei welchem sowohl der regelnde als auch der verschiebende Mechanismus elektrisch bethätigt wird. Der bewegende Mechanismus ist ein kleiner Motor, welcher durch die auf Seite 489 beschriebene Anordnung umsteuerbar gemacht ist. Der regelnde Theil ist im Wesentlichen ein Relais, bestehend aus einem Elektromagnet, dessen Anker durch eine Feder ausbalancirt ist.

Wird nun der Hauptstrom zu schwach, so legt sich die Zunge des regelnden Relais gegen den oberen Contact, der Anker der Triebmaschine dreht sich dann in einer solchen Richtung, dass durch Ausschalten von Widerstand die Erregung der Maschine zunimmt.

Fig. 533 zeigt einen automatischen Regulator von der erst-erwähnten Art, der von Thury entworfen ist und von der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft in Berlin hergestellt wird. Links in der Abbildung erkennt man das verticale Relais: es bewegt die eine oder die andere der beiden horizontalen Rollen, welche die conischen Räder in Eingriff bringen, durch deren Drehung der Rheostatenarm vermittelst einer Schnecke bewegt wird. Das auf der Schnecken-spindel sitzende conische Rad muss von der Maschine aus in langsame Umdrehung versetzt werden; es kann auch nöthigenfalls von der Hand gedreht werden.

Ein einfaches Beispiel einer rein elektrischen Regulierung bietet der Regulator von Brush (Fig. 534), durch welchen eine Reihmaschine auf gleichbleibenden Strom regulirt wird. Quer zu den Feldmagneten  $F-M$  ist ein Kohlen-Nebenschluss  $C$  von veränderlichem Widerstande geschaltet; der Widerstand des Nebenschlusses wird automatisch verändert durch einen Elektromagnet, dessen

Wicklungen einen Theil des Hauptkreises bilden. Vom richtigen Strome durchflossen, zieht der Magnet seinen Anker *A* mit bestimmter

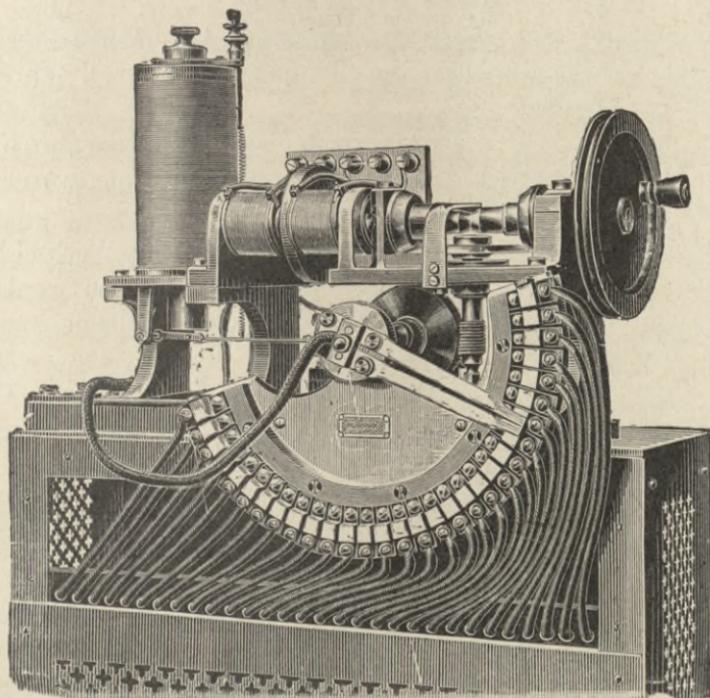


Fig. 533. Regulator von Thury.

Kraft an, die gerade genügend ist, um den Anker in einer neutralen Lage zu erhalten.

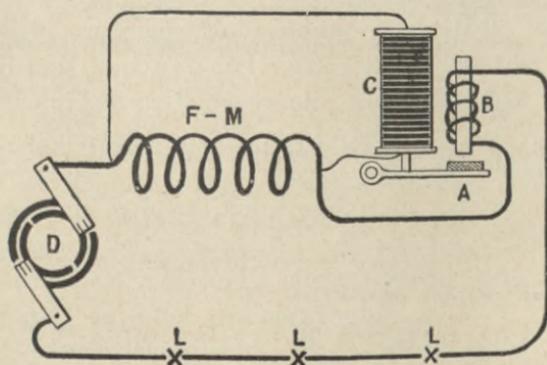


Fig. 534. Automatischer Regulator von Brush.

Steigt der Strom an, so wird der Anker aufwärts gezogen, ein Hebel presst gegen die Säule *C* aus Platten von Retortenkohle, und es erfolgt eine mehr oder weniger bedeutende Ablenkung des Stromes

von den Windungen des Feldmagnetes, dessen Thätigkeit so geregelt wird. Dieser Apparat erhält die Stromstärke gleichbleibend, wenn auch die Triebgeschwindigkeit unregelmässig ist.

Ein anderer rein elektrisch betriebener Regulator ist bei der Bogenlicht-Dynamomaschine von Thomson-Houston zur Anwendung gelangt (Seite 433).

Bei dem Regulator von Statter werden die Bürsten durch eine von der Maschine selbst bewirkte mechanische Bewegung verschoben, aber elektrisch regulirt.

Die Methode, welche zur Regelung der Turbinen-Wechselstrommaschine von Parsons diente, ist Seite 607 beschrieben worden.

Bei einem von Waterhouse angewendeten Regulator empfängt eine an dem Commutator angeordnete dritte Bürste einen veränderlichen Theil des Stromes eines besonderen Ortskreises. Dieser Regulator war ebenso wie die von Henrion und von Sperry in früheren Auflagen dieses Werkes beschrieben.

Caldwell hat eine eingehende Prüfung dieser Methode<sup>1)</sup> an gestellt und gezeigt, dass sie auch zur Regulirung der Gleichspannung angewendet werden kann.

Für genaue Einhaltung einer bestimmten Stromstärke hat Wood einen Regulator angegeben, bei welchem eine stellbare Bürste verwendet wird; es sind ferner zwei erregende, differential gewickelte Kreise, sowie eine elektromechanische Anordnung zur Verschiebung der Bürsten vorhanden. Die Vorrichtung war in früheren Auflagen des Werkes abgebildet.

Ein interessantes Beispiel der Benutzung eines magnetischen Nebenschlusses zur Hervorbringung eines Stromes von gleichbleibender Stärke bietet sich in dem Regulator von Trotter<sup>2)</sup> und Ravenshaw dar, bei welchem gleichfalls die magnetischen Linien von ihrem gewöhnlichen Wege ab-, und einem Wege von geringerem magnetischen Widerstande zugeleitet werden, unter Verwendung eines Eisenkörpers, der aber hier nicht beweglich, sondern in seiner Wirkung dadurch veränderlich gemacht wird, dass er mit einer in entgegengesetzter Richtung magnetisirenden Wickelung versehen ist.

Reignier hat die Aufmerksamkeit auf eine Lösung der Aufgabe gelenkt, einen Strom von gleichbleibender Stärke durch selbst-

1) The Electrician, XXII, 217, 1888; 441, 1889.

2) Abhandlung von Trotter im Electrician, B. 19, S. 374. 1887. Eine Zeichnung des Regulators selbst ist in der Electrical Review, B. 19, S. 289 vom 17. Sept. 1886 enthalten.

thätige Aenderung der Zahl der vom Strome durchflossenen Wicklungen herbeizuführen<sup>1)</sup>.

### Elektrische Regulatoren für Dampfmaschinen.

Ein an der Dampfmaschine angebrachter Centrifugal-Regulator kann die Geschwindigkeit der Dynamomaschine nicht genau gleichbleibend erhalten, denn ein solcher Apparat wirkt nicht eher, als bis die Geschwindigkeit entweder etwas grösser oder kleiner als der Regelwerth geworden ist.

Bei plötzlichen Aenderungen der Belastung erhalten wenige mechanische Regulatoren die Geschwindigkeit innerhalb 5 Procent ihres Regelwerthes. Daraus ergibt sich der bei allen elektrischen Regulatoren vorhandene Grundgedanke, den Zutritt des Dampfes aus dem Kessel zur Maschine durch den elektrischen Strom selbst zu regeln, so dass die Triebgeschwindigkeit je nach dem Bedürfniss des Stromkreises sich ändert. Wenn die Belastung plötzlichen Schwankungen unterliegt, wie z. B. bei den Stromerzeugungsmaschinen für elektrische Eisenbahnen, ist dies besonders nothwendig. Zahlreiche, mehr oder weniger praktische Vorschläge wurden von Lane-Fox, Andrews, Richardson und Anderen gemacht.

Der Regulator von Richardson<sup>2)</sup> war in früheren Auflagen dieses Buches beschrieben und abgebildet. Neuerdings<sup>3)</sup> hat Richardson einige Abänderungen angegeben, welche sich auf die Verwendung eines Elektromagnetes beziehen, durch welchen ein mechanisch angetriebener Regulator in dem Sinne beeinflusst wird, dass die Dampfmaschine eine gleichbleibende elektrische Spannung in jedem beliebigen entfernten Punkte des Netzes aufrecht erhält.

Bei dem Regulator von Willans<sup>4)</sup> wird die von einem Solenoid auf einen Eisenkern ausgeübte Anziehung benutzt, um auf ein Gleichgewichtsventil zu wirken; die Einwirkung erfolgt jedoch nicht unmittelbar, sondern der Solenoidkern wirkt auf ein kleines Ventil, das einen hydraulischen Kolben beeinflusst; der letztere regelt das grosse Dampfventil. Die Anordnung war in einer früheren Auflage des Buches beschrieben und dargestellt.

1) Lum. électr., B. 26, S. 420. 1887.

2) Engl. Patent [1881] Nr. 288.

3) Proc. Inst. Civil Engineers, Teil II. 1895.

4) Vergl. Engl. Patente [1883] Nr. 1184, 5291 und 5945. Ferner Proc. Inst. Cic. Engin B. 81; Teil III, 1884 bis 1885.

Ein verhältnissmässig kleines Solenoid, das nur 0,3 Ampere Stromstärke erfordert und etwa 32 Watt verbraucht, kann auf diese Weise durch die Anwendung einer hydraulischen oder Dampfübersetzung mit einer grossen Kraft auf das Dampfventil wirken und mit Leichtigkeit eine Maschine von mehreren hundert Pferdekraften beherrschen.

Ein grosser Vortheil des elektrischen Regulators besteht darin, dass er den Dampfverbrauch bis zu dem Betrage regelt, der durch die elektrische Leistung geboten ist, und Beschädigungen sowohl der Dynamomaschine wie der Dampfmaschine verhindert.

### Dynamometrische Regulirung.

Eine weitere Methode zur Regelung der Dynamomaschinen ist zu wichtig, um übergangen zu werden.

Die auf eine Welle übertragene Arbeit wird durch das Product zweier Factoren berechnet, der Geschwindigkeit und dem Drehungsmoment. Die Leistung oder Arbeit in der Secunde oder Pferdekraft einer Dynamomaschine wird dagegen elektrisch durch das Product der elektromotorischen Kraft mit dem im Stromkreise herrschenden Stromstärke bestimmt. Bedeutet  $E$  die elektromotorische Kraft,  $i$  die Stromstärke, so ist

$Ei$  = der elektrischen Leistung (in Watt).

Wir wissen, dass unter sonst gleichen Umständen die elektromotorische Kraft einer Dynamomaschine im geraden Verhältnisse zur Umdrehungsgeschwindigkeit steht. Es folgt zugleich daraus, dass das Drehmoment sich wie die Stromstärke verhält. Dies gibt die Anregung, eine Maschine behufs Lieferung eines Stromes von gleichbleibender Stärke nicht von einer Dampfmaschine mit Centrifugal-Regulator zur Erhaltung gleichbleibender Geschwindigkeit betreiben zu lassen, sondern eine dynamometrische Regelung zur Erhaltung eines gleichbleibenden Drehungsmomentes anzuwenden. Jedes gute Transmissionsdynamometer, z. B. das von Morin, das von Ayrton und Perry, oder das von Rev. F. J. Smith<sup>1)</sup> angegebene, kann zur Bewegung eines Gleichgewichtsventiles verwendet werden und würde der obigen Bedingung für die Regelung entsprechen.

Nach dem Vorschlage von Prof. E. Thomson soll ein dynamometrischer Apparat zur Regelung einer Dynamomaschine für gleiche

1) Vergl. das ausgezeichnete kleine Werk des genannten Verfassers über „Work-measuring Machines“ (erschieden bei E. und F. N. Spon).

Stromstärke mittels der Bürstenverschiebung verwendet werden. Eine Beschreibung dieses Regulators war in der zweiten (englischen) Auflage dieses Werkes enthalten.

Regulirung durch Dampfdruck. Es wurde vorher schon erwähnt, dass sowohl elektrische als mechanische Arbeit durch ein Product aus zwei Factoren dargestellt wird. Bei einer gewöhnlichen Dampfmaschine setzt sich die Arbeit in der Secunde gleichfalls aus zwei Factoren zusammen, nämlich der Kolbengeschwindigkeit und dem Dampfdrucke; die Winkelgeschwindigkeit der Welle steht in geradem Verhältnisse zu ersterer, und das Drehungsmoment der Welle in demselben Verhältnisse zu letzterem. Durch gleichbleibenden Dampfdruck sollte demnach die Bedingung zur Erhaltung gleicher Stromstärke erfüllt werden.

Wenn die Ventile bei jedem Kolbenstosse eine bestimmte Dampfmenge eintreten lassen, so wird, wenn der Kesseldruck wirklich gleichmässig erhalten bleibt, auch der auf den Kolben wirkende Durchschnittsdruck gleichbleibend sein. In Wirklichkeit wird dies mit Rücksicht auf die Reibung des Dampfes in den Dampfrohren und Dampfwegen der Ventile nicht erreicht. Die innere Reibung verhindert ebensowohl eine durchaus genaue Selbstregelung bei der Dampfmaschine, als der innere elektrische Widerstand bei der Dynamomaschine. Nur eine Annäherung ist möglich<sup>1)</sup>.

Bei einem von Pollard mit einer Maschine von Gramme angestellten Versuche bewirkte der Strom in einem Galvanometer Ablenkungen nur innerhalb der Grenzen 52 bis 54 Grad, wenn Zusatzwiderstände in den Stromkreis eingeschaltet wurden, durch welche die Geschwindigkeit von 436 auf 726 Umdrehungen in der Minute gesteigert wurde.

Theoretisch müsste sich ein Strom von gleichbleibender Stärke mittels einer Reihenmaschine sehr leicht erzeugen lassen. Hat man passende Dampfkessel, unterhält gleichmässigen Dampfdruck und lässt, unter Beiseitelassung jeder Regulirung, bei jedem Kolbenstosse dieselbe Menge Dampf zuströmen, so mag die Geschwindigkeit sein wie sie will: als Ergebniss muss sich ein Strom von gleichbleibender Stärke herausstellen. Die Bedingung der Gleichspannung kann nicht in ähnlicher Weise erfüllt werden, es sei denn durch Anwendung einer Nebenschlussmaschine bei unwirtschaftlichen und unpraktischen

---

1) Vergl. Edmunds im Journ. Soc. Electr. Engin. B. 17, S. 697., 1888; ferner Electrician, B. 22, S. 349 und 422. 1889.

Voraussetzungen. Soll jedoch gleichbleibende Stromstärke erzielt werden, so kann man hierzu auf folgende Weise gelangen. Die bestehende Methode, den Dampfdruck gleichmässig zu halten, besteht darin, dass am Kessel ein Druckmesser angebracht wird, der dem Heizer das Bedürfniss stärkerer oder schwächerer Feuerung anzeigt. Lässt man den Druckmesser fort, bringt an dessen Stelle am Kessel einen Strommesser an, so hat der Heizer nach dessen Angaben und nach Maassgabe der Erfordernisse des Vertheilungskreises die Feuerung einzurichten.

Gibt es einen zutreffenden Grund, aus dem eine derartige Regelungsmethode für die Praxis nicht verwendbar sein sollte, mindestens für den Fall, dass eine Reihenmaschine gleichbleibende Stromstärke erzielen soll?

Um endlich nach diesem Grundgedanken eine selbstthätige Regulirung herzustellen, ist die Einrichtung mechanisch wirkender Heizvorrichtungen denkbar, die nach Maassgabe des Ganges des Strom- oder Spannungsmessers die Feuerung der Lampenzahl entsprechend versorgen. Für Gas- und Oelmaschinen wäre eine derartige Regulirung sehr leicht auszuführen.

---

## Kapitel XXX.

# Prüfung von Dynamomaschinen und Triebmaschinen.

---

Die an elektrischen Maschinen anzustellenden Prüfungen sind zweierlei Art, nämlich 1. solche, die sich auf die Ermittlung des Widerstandes der verschiedenen Wickelungen und Verbindungen, sowie der Isolation der wirksamen Theile beziehen, und 2. solche, die die Ermittlung des Wirkungsgrades bei verschiedenen Belastungen zum Zweck haben.

### Bauliche Prüfung.

Der Widerstand der verschiedenen Theile der Anker- und Feldmagnetwicklung, sowie der Verbindungen, kann in gewöhnlicher Weise mittels der Wheatstone'schen Brücke oder mittels einer anderen guten galvanometrischen Prüfung bestimmt werden. Den einzigen schwierigen Umstand bildet die Messung der kleinen Widerstände des Ankers und der Reihenwickelungen, da die Widerstände oft kleine Bruchtheile eines Ohm betragen. Man verfährt dabei jedenfalls am zweckmässigsten in folgender Weise:

Mittels einiger Sammlerzellen erzeugt man einen starken Strom in der Wickelung, deren Widerstand gemessen werden soll, während man in den Stromkreis einen Strommesser einschaltet. Dann misst man mittels eines empfindlichen Spannungsmessers die Spannung zwischen den Endpunkten der Wickelung. Nach dem Ohm'schen Gesetz ergibt die Spannung dividirt durch die Stromstärke den Widerstand in Ohm. Zur Sicherheit kann man in den Stromkreis noch einen starken Neusilberstreifen von bekanntem Widerstand einfügen, wie dies Lord Rayleigh empfiehlt, und die Spannung zwischen den beiden Endpunkten des Streifens mit der Spannung in der Wickelung vergleichen. Das sich ergebende Verhältniss entspricht dem Verhältniss der Widerstände.

Keineswegs darf man aber übersehen, dass der innere Widerstand einer Maschine, sobald diese nach einigen Betriebsstunden warm geworden ist, sich bedeutend höher stellt, als wenn die Maschine kalt ist. Widerstandsprüfungen sollte man deshalb vor und nach dem Betriebe anstellen.

Die Vollkommenheit des magnetischen Kreises lässt sich in zweierlei Weise prüfen. Der eine Weg besteht darin, den Betrag der magnetischen Streuung zu messen (vergl. Seite 144 und 145). In anderer Weise kann man die Vollkommenheit des magnetischen Kreises prüfen, indem ein passender bekannter Widerstand mit den Klemmen der Maschine verbunden wird; man setzt die Maschine dann mit geringer Geschwindigkeit in Gang und vergrössert die Zahl der Umdrehungen, bis Selbsterregung eintritt. (Diese Methode ist für viele Wechselstrommaschinen selbstverständlich nicht anwendbar.) Die geringste Geschwindigkeit für die Selbsterregung bildet unter sonst gleichen Umständen einen Maassstab für die Güte des magnetischen Kreises.

#### **Prüfung des Isolationswiderstandes.**

Die einzige zweckmässige Methode, die Isolation der einzelnen Theile einer Maschine zu prüfen, besteht darin, dass man unter Verwendung einer hohen Spannung — 2000 bis 4000 Volt — ermittelt, ob die Isolation dieser Spannung Widerstand leistet. Der elektrische Zug und Druck, welchem hierbei das Isolirmaterial ausgesetzt ist, ändert sich wie das Quadrat der Spannung. Zur Erzielung der Spannung wendet man am besten einen Umformer für Wechselstrom an. Alle Stromerzeuger, Triebmaschinen und Umformer für hohe Spannung sollte man bei einer Spannung gleich der doppelten Betriebsspannung prüfen. Tägliche Prüfungen des Isolationswiderstandes zwischen den Wickelungen einer Dynamomaschine und ihren Kernen bezw. Rahmen vermittelt der Wheatstone'schen Brücke haben nur insofern Werth, als sie Fingerzeige bieten, nach welcher Richtung für die Maschine Sorge zu tragen ist; denn Feuchtigkeit und Schmutz vermindern die Isolation, und können, wenn sie vernachlässigt werden, leicht eine Zerstörung derselben herbeiführen.

#### **Versuche über die Temperaturzunahme.**

Die von der (Britischen) Admiralität gegebenen Vorschriften über die Versuche zur Ermittlung der Temperaturerhöhungen der einzelnen Theile lauten wie folgt:

Am Ende einer Betriebsdauer von sechs Stunden, und eine Minute nach dem Stillstand der Maschine, darf kein zugänglicher Theil des Ankers oder des Feldmagnets eine höhere Temperatur als 30 Grad F. (17 Grad C.) über der Temperatur des Maschinenraumes haben, wenn letztere auf der von der Dampfmaschine abgewendeten Seite der Dynamomaschine, und 3 Fuss (0,914 m) von ihr entfernt gemessen wird. Ferner soll die Maximaltemperatur des Ankers am Ende des sechsständigen Betriebes nicht die Temperatur des Maschinenraumes um mehr als 70 Grad F. (39 Grad C.) übersteigen.

Zur Bestimmung der Temperatur verwendet man gewöhnlich Thermometer mit engen cylindrischen Gefässen, die entweder in den Anker eingelassen oder, wenn dies nicht möglich, einfach darauf gelegt und während des Versuches mit einem Flocke Wollwolle bedeckt werden.

#### **Prüfung der Leistung und des Wirkungsgrades.**

Die Prüfung des Wirkungsgrades und der Leistung einer Maschine, die als Stromerzeuger oder Triebmaschine arbeitet, ist nicht leicht und setzt sowohl elektrische als dynamometrische Messungen voraus.

Dient die Maschine als Stromerzeuger, so muss man

- a) Messungen der aufgewendeten mechanischen Leistung in Pferdekraften,
- b) Messungen der Leistung des Stromes anstellen.

Kommt eine Triebmaschine in Frage, so haben sich die Messungen zu erstrecken auf:

- a) Bestimmung der verbrauchten elektrischen Arbeit,
- b) Bestimmung der erzielten mechanischen Leistung in Pferdekraften.

#### **Messung der mechanischen Leistung.**

Es gibt vier allgemeine Methoden zur Messung der mechanischen Leistungen, nämlich:

- a) Die Indicator-Methode.  
Man nimmt ein Indicator-Diagramm der treibenden Dampfmaschine auf.
- b) Die Brems-Methode.  
Man verbraucht die von der Maschine gelieferte Arbeit mittels einer Bremsvorrichtung, wie die von Prony, Poncelet, Appold, Raffard oder Froude.

## c) Die dynamometrische Methode.

Man verwendet Dynamometer oder Ergometer, wie die von Morin, v. Hefner-Alteneck, Ayrton, Perry, Fischinger oder von F. J. Smith und bestimmt damit die an der Achse oder am Riemen wirkende mechanische Kraft.

## d) Die Gleichgewichts-Methode.

Man bringt die elektrische Maschine drehbar um ihre eigene Welle an und macht sie zu ihrem eigenen Ergometer.

Hierzu tritt eine fünfte Methode:

## e) Die elektrische Methode.

Man lässt die Triebmaschine den Stromerzeuger umtreiben, der erstere mit Strom versorgt, misst dann elektrisch die in dem einen Falle gelieferte oder die im anderen Falle verbrauchte Arbeit und misst entweder mechanisch oder elektrisch die Differenz.

## f) In Fällen, wo keine Indicatoren angewendet werden können z. B. bei Versuchen an Dampfturbinen), kann der Dampfverbrauch in der Stunde, bestimmt entweder aus der Menge des dem Kessel zugeführten Speisewassers oder aus dem condensirten Wasser, als Maass für die geleistete Arbeit dienen.

## a) Die Indicator-Methode.

Da diese Methode allgemein bekannt ist, so soll dieselbe nur kurz erwähnt werden. Sie misst die Bruttoleistung der der Dampfmaschine zugeführten Wärmemenge, nicht aber die Nettoleistung, welche die Dampfmaschine an die Dynamomaschine abgibt. In vielen Fällen ist sie nicht anwendbar, sofern die Dampfmaschine auch noch andere Arbeit zu leisten hat. In solchen Fällen bleibt nur die Aufnahme von zwei Diagrammen übrig; das eine nimmt man, wenn die elektrische Maschine mitarbeitet, das zweite, wenn sie ausgeschaltet ist; der Unterschied stellt die von der Dynamomaschine verbrauchte Leistung dar.

## b) Die Brems-Methode.

Der Bremszaum von Prony ist allgemein bekannt; von den neueren Formen der Reibungs-Dynamometer lässt sich dies kaum sagen. Verschiedene Verbesserungen wurden nach und nach von Poncelet, Appold und Deprez ausgeführt. Nach der Methode von Prony wird die Arbeit in der Weise bestimmt, dass ein Paar Holzbacken um die Riemenscheibe oder die Welle festgeklemmt

werden; das Drehungsmoment an den Backen wird gemessen, indem man an einen vorragenden Arm, der ein genügendes Moment zur Verhinderung der Drehung besitzt, unmittelbar Gewichte hängt. Ist  $p$  das Gewicht, das in einer Entfernung  $l$  vom Mittelpunkte dem Drehungsbestreben das Gleichgewicht hält, so ist der Reibungswiderstand  $f$  multiplicirt mit dem Radius der Scheibe gleich dem Product aus  $p$  und  $l$ .

Demnach ist:

$$\text{Drehungsmoment} = fr = pl$$

$$\text{und } f = \frac{pl}{r}.$$

Bedeutet  $n$  die Umlaufszahl in der Secunde, so ist  $2\pi n$  die Zahl der Radianen in der Secunde, d. h. die Winkelgeschwindigkeit ( $\omega$ );  $2\pi nr$  ist die lineare Geschwindigkeit  $v$  am Umfange. Die Leistung ( $w$ ) ist das Product der am Umfange wirkenden Kraft und der Umfangsgeschwindigkeit, oder

$$w = fv = \frac{pl}{r} \cdot 2\pi nr = 2\pi npl.$$

Ist  $p$  in Kilogrammen gegeben und  $l$  in Metern, so ist, da 75 kgm in der Secunde auf eine Pferdekraft entfallen,

$$\text{verbrauchte Leistung } P = \frac{2\pi npl}{75}.$$

Die später am Bremszaum angebrachten Verbesserungen sind von grosser Bedeutung.

Poncelet fügte einen unbiegsamen Stab unter rechtem Winkel an den Hebel und befestigte die Gewichte am unteren Ende. Appold ersetzte die Holzbacken durch ein Stahlband, das gleichmässige Reibung erzielt und deshalb weniger Neigung zeigt, in Schwingungen zu gerathen. Raffard<sup>1)</sup> verwendete einen in der Breite ungleichen Riemen, der also einen veränderlichen Reibungscoefficienten besitzt, entsprechend dem Betrage, der am Umfange der Scheibe auftritt. Weitere Aenderungen dieser Art Dynamometer wurden von James Thomson, Unwin, Carpentier und Ayrton und Perry bewirkt.

1) Weiteres über diese Vorrichtungen ist zu ersehen aus Weisbach's Ingenieur-Mechanik; ferner Spon's Dictionary of Engineering, Artikel, „Dynamometer“; Smith's Workmeasuring Machines; eine Reihe von Artikeln im Electrician von Gisbert Kapp; Proc. Inst. Mech. Eng. 1877, S. 237 (Froude); Rep. Brit. Assoc. (Unwin); Journ. Soc. Telegr. Eng. and Electr., B. 12, S. 346 (Ayrton und Perry). Vergl. auch den officiellen Bericht über die Elektrotechnische Ausstellung in Frankfurt 1891, wegen der Bremsversuche an den Lauffener Turbinen.

Kennedy erhielt vorzügliche Resultate durch die Anwendung einer Seilbremse.

Auch die Reibung eines Turbinenrades wurde als Dynamometerbremse, und zwar von dem verstorbenen W. Froude benutzt.

Sämtliche Bremsdynamometer messen die Arbeit durch Verbrauch; wenn sie auch vorzüglich geeignet sind, die von einer elektrischen Triebmaschine gelieferte Arbeit zu messen, so können sie doch nicht zur unmittelbaren Bestimmung der einer Dynamomaschine zugeführten Arbeit benutzt werden. Erfahrung im Betriebe dieser Maschinen ist wesentlich, wenn man zuverlässige Ergebnisse gewinnen will; mit den neueren Formen der Instrumente, z. B. denen von Poncelet und Raffard, erhält man gute Ergebnisse. Das Geheimniss des Erfolges besteht darin, dass man die Reibungsoberflächen mittels reichlicher Zuführung von Seifenwasser schlüpfrig erhält.

Vermuthlich die beste Methode zur Messung der Arbeit durch Vernichtung der letzteren ist wohl die, eine Dynamomaschine von hohem und bekanntem Wirkungsgrade mit Lampenbelastung als Bremse zu verwenden; die Leistung wird dann mittelst Spannungs- und Strommesserablesung gemessen.

### c) Die Dynamometer-Methode.

Prony's Zaum wurde vorhin ein Bremsdynamometer genannt; ein richtiges Dynamometer zur Messung übertragener Arbeit verbraucht die Arbeit nicht, die es messen soll. Transmissionsdynamometer lassen sich in zwei nahe verwandte Klassen theilen: in solche, bei denen die an den Riemen übertragene Kraft und solche, bei denen die an die Welle übertragene Kraft bestimmt wird.

Bei Uebertragung der Kraft mittels eines Riemens besteht die wirksame Kraft aus der Differenz zwischen den Spannungen (Zug) in den beiden Theilen des Riemens. Ist  $F'$  der Zug im schlaffen Theile des Riemens vor Erreichung der getriebenen Riemenscheibe und  $F$  der Zug im gespannten Theile, nachdem die getriebene Scheibe verlassen ist, so stellt  $F - F'$  den Zug am Umfange dar, und  $r(F - F')$  ist das Drehmoment  $T$ . Wenn  $n$  die Umlaufzahl für die Secunde ist, so wird die Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 2\pi n$ . Dann ist die Leistung

$$w = \omega T = fv = 2\pi nr(F - F').$$

Ist  $F$  in Kilogramm und  $r$  in Meter gegeben, so muss man den Werth durch 75 dividiren, um Pferdekkräfte zu erhalten.

Ein am Treibriemen anzubringendes Dynamometer, das die Differenz  $F - F'$  am Riemen bestimmt, wurde von v. Hefner-Alteneck hergestellt und ist gewöhnlich unter der Bezeichnung Siemens'sches Dynamometer bekannt<sup>1)</sup>. Andere Formen wurden von Bramwell, Tatham<sup>2)</sup>, Froude u. a. angegeben. Fast alle diese Instrumente bedingen die Einführung von Zusatzscheiben in die Uebertragungsvorrichtung und fügen dadurch Reibung hinzu.

Viel zweckdienlicher sind diejenigen Uebertragungsdynamometer, mit denen die auf die Welle übertragene Kraft gemessen wird. Bei fast allen Instrumenten dieser Klasse befindet sich neben einer fest auf die Achse gekeilten Scheibe eine lose Scheibe, welche mit ersterer durch irgend eine Art Federanordnung in der Weise verbunden wird, dass die Ausweitung oder Biegung der Feder die Verschiebung der einen Scheibe in Bezug auf die andere bestimmt; diese Verschiebung (Winkel) ist proportional der übertragenen Kraft oder dem Drehungsmoment. Zu dieser Klasse gehört das bekannte Dynamometer von Morin, bei dem eine gerade Stabfeder, die mit ihrer Mitte an der Triebwelle befestigt ist, die Verschiebung der losen Scheibe zu hindern sucht.

Abänderungen des Instrumentes von Morin wurden durch Easton und Anderson, Heinrichs<sup>3)</sup>, Ayrton und Perry<sup>4)</sup> Murray<sup>5)</sup> und F. J. Smith angegeben. Eine genaue Beschreibung und Darstellung des Instrumentes von Smith war in früheren Ausgaben dieses Werkes enthalten.

Bei einem neueren von der Actien-Gesellschaft Electricitätswerke vorm. O. L. Kummer & Co. nach Fischinger's Entwurf gebauten Dynamometer werden zwei auf derselben Achse lose drehbare Riemen-scheiben benutzt, deren eine den treibenden, die andere den getriebenen Riemen aufnimmt. Die Verdrehung beider Scheiben gegeneinander bewirkt mittelst mehrerer im Innern der Scheiben gelagerter Hebel das Verschieben einer in einer axialen Bohrung der Welle gelagerter Stange, die ihrerseits einen Ausschlag des rechts in Fig. 535 senkrecht herabhängenden Zeigers herbeiführt.

1) Eine Form des Siemens'schen Dynamometers ist von Hopkinson, Proc. Inst. Mech. Eng. 1879, beschrieben; eine neuere Form von Schröter, Bayer. Industrie- und Gewerbeblatt, 1883.

2) Journ. Frankl. Inst. Nov. 1886.

3) Vergl. Engineering, 2. Mai 1884 und Electrical Review, 26. April 1884.

4) Journ. Soc. Teleg. Eng. and Electr. B. 12, S. 163. 1883.

5) Ebenda B. 18, 1889.

Durch Belasten der Wagschale wird der Zeiger wieder auf Null gebracht, dann giebt das aufgelegte Gewicht die übertragene Kraft  $P$  an, oder vielmehr, da die Wage eine Decimalwage ist,  $\frac{1}{10} P$ . Die Leistung in Pferdestärken ergibt sich durch Multiplication von  $P$  in kg mit der Riemengeschwindigkeit im m/sec. und Division durch 75. Die Leerlaufleistung ist für die gewählte Geschwindigkeit besonders zu bestimmen.

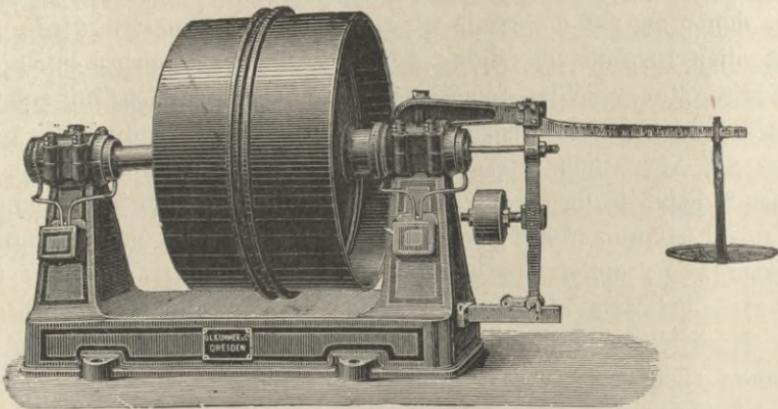


Fig. 535.

Das Dynamometer wird in folgenden 5 Grössen gebaut:

| Modell                                                                      | I    | II  | III | IV  | V   |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|
| Umfang der Riemenscheibe . . . . .                                          | 1,5  | 2,0 | 3,0 | 3,5 | 4,0 |
| Höchste Belastung der Schale in kg . .                                      | 6    | 12  | 22  | 50  | 75  |
| Grösste Umlaufzahl in der Minute . . .                                      | 1200 | 900 | 600 | 510 | 450 |
| Höchste gemessene Leistung bei 30 m/sec.<br>Riemengeschwindigkeit . . . . . | 24   | 48  | 88  | 200 | 300 |

#### d) Die Gleichgewichts-Methode.

Bei kleinen Maschinen entsteht der Uebelstand, dass man bei Anwendung der gewöhnlichen Mittel zur Bestimmung der Leistung verhältnissmässig grosse Reibungswiderstände einführt. Dies wird bei der Gleichgewichtsmethode vermieden. Hierbei wird die zu untersuchende Maschine mit ihrer Ankerwelle zwischen Drehpunkte oder an Reibungsräder gelegt, und das Gewicht der Feldmagnete

und des Gestelles sehr sorgfältig mittels Gegengewichts im Gleichgewicht gehalten.

In der Fig. 536 stellt  $BD$  die Feldmagnete und das Gestell der Maschine vor, die im Gleichgewicht gehalten werden,  $E$  bedeutet den Anker. Sobald Strom zugeführt wird, sucht der Anker in einer Richtung umzulaufen, die Feldmagnete in der anderen. Wenn die Rückwirkung, welche die Feldmagnete umzutreiben sucht, durch Anwendung einer Kraft  $P$  (etwa einer Federkraft) am Punkte  $C$  des Gestelles  $ABCD$  im Gleichgewicht gehalten wird, so wird durch das Moment  $Pd$  das Drehmoment bestimmt, ebenso wie beim Bremszaum von Prony. Man sieht, dass die Maschine als ihr eigenes Dynamometer dient, die magnetische Reibung zwischen Anker und Feldmagnet wird anstatt der mechanischen Reibung zwischen Scheibe und Backen benutzt. Eine von Hermann Müller an-

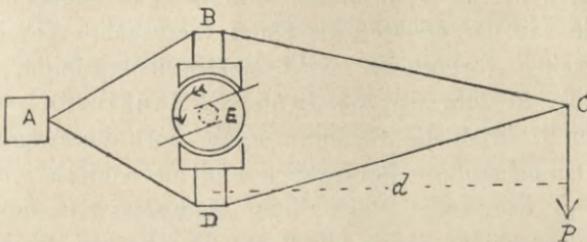


Fig. 536. Smith's Methode zur Prüfung von Triebmaschinen.

gegebene Abänderung dieser Methode besteht darin, dass die Maschine in einem pendelartigen Gestell um die Triebwelle schwingen kann; aus der Abweichung von der Senkrechten wird die verbrauchte Arbeit geschätzt.

Deprez und Brackett haben die Anwendung der Gleichgewichtsmethode auf Maschinen im Betriebe in Vorschlag gebracht. Brackett bringt die Maschine in eine Art Schaukelgestell, das um Drehpunkte, die in der Umlaufsachse liegen, beweglich ist und ins Gleichgewicht gebracht wird. Er misst dann die Gegenkraft oder das Drehmoment zwischen Anker und Feldmagnet und multiplicirt dies mit der Winkelgeschwindigkeit  $2\pi n$ , wodurch er den Werth der auf den Anker übertragenen Arbeit bestimmt.

Alle diese verschiedenen dynamometrischen Methoden bedingen die Anwendung eines Umlaufszählers zur Bestimmung der Umdrehungszahl  $n$ , die in die Berechnung eintritt. Ist die Zahl der Umläufe  $n$  in der Secunde bekannt, so kann man die Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 2\pi n$  berechnen. Diesen Werth braucht man

nur mit dem Drehmoment  $T = Fr$  zu multipliciren, um die Leistung (Arbeit in der Secunde)  $w$  zu finden. Ist  $T$  in Kilogramm-  
metern ausgedrückt, so ist

$$\text{Pferdekraft} = \frac{2\pi n Fr}{75} = \frac{\omega T}{75}.$$

e) Die elektrischen Methoden.

Es gibt verschiedene Arten dieser neueren Prüfungsmethode; sie setzen die Verwendung von zwei, in einzelnen Fällen auch von drei Maschinen voraus. Zwei ähnliche Maschinen, eine als Stromerzeuger, die andere als Triebmaschine wirkend, werden sowohl elektrisch als mechanisch miteinander verbunden, so dass die Arbeit sich in einem Kreise zwischen den beiden Maschinen hin- und herbewegt; indem sie vom Stromerzeuger zum Motor elektrisch übertragen wird, kehrt sie vom Motor zum Stromerzeuger mechanisch zurück. Die von der ersteren Maschine verausgabte Arbeit und die von der zweiten verbrauchte wird elektrisch bestimmt. Bei der ursprünglichen Ausführung von J. und E. Hopkinson<sup>1)</sup> wurde die geringe, zum Umtrieb des Stromerzeugers noch nothwendige Kraft von einer Dampfmaschine hergegeben und mechanisch mittels eines Dynamometers gemessen. Nach dieser Methode ist es möglich, ein Paar Dynamomaschinen von je 500 P mittelst einer Dampfmaschine von 50 P zu untersuchen. Aenderungen dieser Methode, welche den Zweck verfolgen, alle mechanischen Messungen zu vermeiden, wurden von Rayleigh<sup>2)</sup>, Cardew<sup>3)</sup>, dessen Methode aus dem Jahre 1882 stammt, Menges<sup>4)</sup>, Ravenshaw<sup>5)</sup> und Swinburne<sup>6)</sup> angegeben.

Alle diese Methoden sind weit genauer als die rohen mechanischen Methoden, welche früher angewendet wurden; jede besitzt ihre Vortheile, die Methode von Hopkinson verlangt indessen zwei gleichartige Maschinen, diejenige von Cardew erfordert drei Maschinen, von denen die eine kräftig genug sein muss, um die beiden anderen zu treiben. Bei der Methode von Swinburne wird der von dem

1) Philos. Trans. 1886, Bd. 2, S. 347. Electrician, B. 16, S. 347, 1886 und Electr. Rev., B. 18, S. 207 und 230, 1886.

2) Electr. Rev., B. 18, S. 242, 1886.

3) Ebenda, B. 19, S. 464, 1886. Electrician, B. 17, S. 410, 1886, und B. 21, S. 275, 1887.

4) Electrician, B. 16, S. 371, 1886.

5) Electr. Rev., B. 19, S. 424 und 437, 1886.

6) Ebenda, B. 21, S. 181 und 215, 1887.

Widerstände der Leiter herrührende Kraftverlust berechnet, der Abzug dieses vom gesammten Kraftverlust in der Maschine ergibt den durch Wirbelströme, Reibung und magnetische Hysteresis entstandenen Verlust, der nicht ohne weiteres für sich bestimmt werden kann. Diese Einbusse an Kraft wird durch Verwendung der Maschine als Triebmaschine bestimmt; die Feldmagnete werden besonders erregt, so dass auf den Anker dieselbe magnetische Induction wie bei voller Belastung ausgeübt wird; die elektromotorische Kraft, mit der der Anker versorgt wird, ist so gross, dass der letztere mit der Betriebsgeschwindigkeit ungetrieben wird. Man braucht nur einen kleinen Stromerzeuger zur Lieferung des Stromes für diese Arbeit. Wird die Einrichtung so getroffen, dass die zu prüfende Maschine mit der Betriebsgeschwindigkeit umläuft, so ist die zu ihrem Umtrieb verwendete Leistung gleich dem Leistungsverlust bei voller Belastung. Die zum Umtrieb der Maschine erforderliche Leistung wird elektrisch durch Bestimmung der Spannung und Stromstärke im Anker gemessen.

Folgendes Beispiel möge zur Erläuterung dienen. Es soll eine Nebenschlussmaschine für 50 Kilowatt geprüft werden, die 500 Ampere bei 100 Volt und 720 Umläufen in der Minute liefert.  $r_a = 0,006$  Ohm,  $r_s = 12$  Ohm. Der Strom im Nebenschluss beträgt  $100/12 = 8,3$  Ampere die gesammte Stromstärke also rund 508 Ampere. Der Spannungsverlust stellt sich auf  $508 \cdot 0,006 = 3$  Volt, so dass  $E = 103$  ist. Im Anker gehen  $508^2 \cdot 0,006 = 1548$  Watt verloren, im Nebenschluss  $\frac{100^2}{12} = 833$  Watt.

Man nimmt nun eine kleine Maschine, etwa eine für 2 P, die bei 103 Volt Strom liefert; mit dieser betreibt man die zu prüfende Maschine, jedoch ohne Belastung, so dass nur die eigene Belastung durch Reibung, Hysteresis und Wirbelströme in Frage kommt. Die Maschine wird weniger als 720 Umläufe machen, da mit so geringer Stromstärke der Anker keine entmagnetisirende Wirkung hervorbringt. Man fügt deshalb zum Nebenschluss etwas Widerstand hinzu, bis sie die richtige Geschwindigkeit erlangt. Dann misst man den Strom, den die Maschine aufnimmt; dieser Werth mit  $E$  multiplicirt, ergibt den Verlust an Arbeit.

Nimmt z. B. die Maschine 9 Ampere auf, so beträgt der Verlust  $103 \cdot 9 = 927$  Watt. Sämmtliche Verluste betragen also 1548 (im Anker) + 833 (im Nebenschluss) + 927 = 3308. Da die Maschine 50 000 Watt liefert, so ist die Gesamtleistung = 53 308 Watt.

Hieraus ergibt sich folgendes: Es beträgt  
 der Wirkungsgrad der Umsetzung  $\frac{52381}{53308} = 98,3$  Procent,  
 das elektrische Güteverhältniss  $\frac{50000}{52381} = 95,5$  Procent,  
 und der mechanische Wirkungsgrad  $\frac{50000}{53308} = 93,8$  Procent.

Kapp<sup>1)</sup> hat eine Untersuchungsmethode angegeben, durch welche der mechanische Wirkungsgrad auf elektrischem Wege mit viel grösserer Genauigkeit bestimmt werden kann, als mechanisch durch irgend ein Dynamometer. Hierzu sind zwei nahezu gleich grosse Maschinen erforderlich; die eine, *G*, wirkt als Stromerzeuger, die andere, *M*, als Motor, letztere unterstützt durch eine kleine Hilfsmaschine *X* von normaler Spannung, zu welcher die beiden andern Maschinen

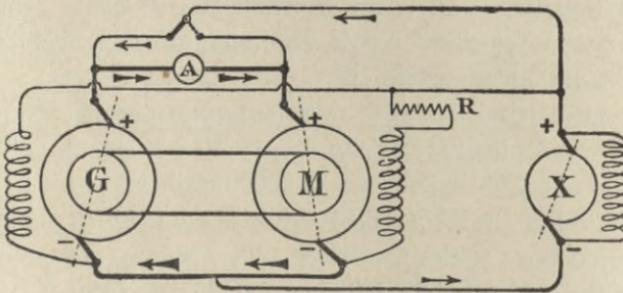


Fig 537. Kapp's Methode zur Prüfung des Wirkungsgrades.

parallel geschaltet sind (Fig. 537). Die Anker von *G* und *M* werden mechanisch miteinander gekuppelt, und das Magnetfeld von *M* durch Einschalten eines Rheostaten geschwächt, so dass *M* als Triebmaschine wirken kann. *X* liefert den für die Erregung erforderlichen Strom und gibt auch die Differenz zwischen den Strömen in *G* und *M* her. Ferner wird noch ein Strommesser zwischen eine Bürste von *G* und eine solche von *M* eingeschaltet. Nun wird einmal der Hilfsstrom rechts, das andere Mal links eingeleitet und im ersten Falle die Stromstärke in *G*, im zweiten diejenige von *M* abgelesen. Da die Spannung in beiden Fällen die gleiche ist, so gibt das Verhältniss der beiden abgelesenen Stromstärken den Wirkungsgrad der Combination der beiden Maschinen an; die Quadratwurzel aus dem Verhältniss der beiden Ablesungen ist alsdann der Wirkungsgrad der einzelnen Maschine.

1) Electr. Engin. (London), 22. Januar 1892, und Electrician, 5. Juli 1895, Seite 319.

**Bestimmung der einzelnen Verluste.**

Bisher ist ein Unterschied zwischen den drei Verlustquellen, Reibung, Wirbelströme und Hysteresis nicht gemacht worden. Man kann aber den Verlust durch Wirbelströme von den andern Verlusten dadurch trennen, dass man Versuche bei verschiedenen Geschwindigkeiten<sup>1)</sup> anstellt, da der Verlust durch Wirbelströme proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit wächst, während die andern Verluste der Geschwindigkeit selbst proportional sind. Die verbrauchte Arbeit wird dem Anker durch eine Triebmaschine zugeführt und elektrisch gemessen.

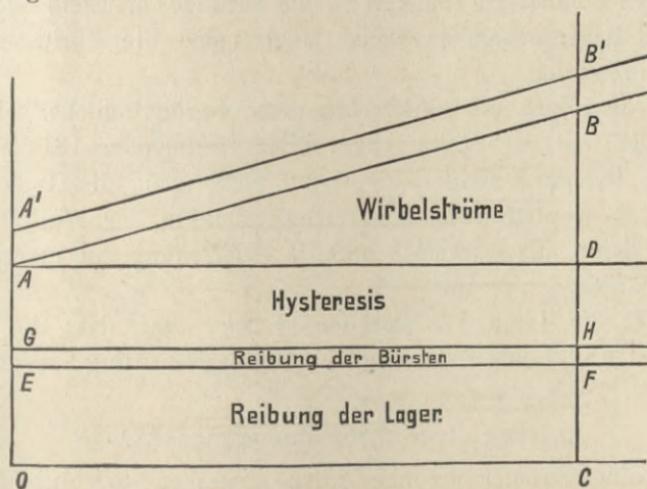


Fig. 538. Trennung der Verluste bei Dynamomaschinen.

Von Kapp<sup>2)</sup> wurde im Jahre 1891 eine Methode zur Trennung der Verluste angegeben, ebenso von Housmann<sup>3)</sup>. Der Abhandlung des Letzteren ist die Figur 538 entnommen, aus welcher die Methode von Kapp und Housmann hervorgeht.

Der Feldmagnet sei in gleichbleibendem Grade besonders erregt. Man misst die Stromstärken, die erforderlich sind, um den Anker ohne Belastung mit verschiedenen Geschwindigkeiten umzutreiben, indem man verschiedene Spannungen anwendet. Das Ergebniss lässt sich als gerade Linie  $AB$  (Fig. 538) darstellen, von der die Ordinate (Stromachse) oberhalb des Anfangspunktes geschnitten wird. Eine

1) Journ. Inst. Electr. Engin., B. 18, S. 620, 1889.

2) The Electrician, B. 26, S. 699, 1891.

3) The Electrician, B. 26, S. 700, 1891. Journ. Inst. Electr. Engin., B. 20, S. 298, 1891.

wagerechte Linie  $AD$ , die man durch  $A$  legt, schneidet die Ordinate  $CB$  in zwei Theile;  $CD$  stellt die Verluste dar, die proportional der Geschwindigkeit sind;  $DB$  die Verluste, die proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit sind. Um die Reibung in den Lagern und an den Bürsten getrennt zu erhalten, müsste man den Anker unmittelbar mit einer andern gleichen Maschine kuppeln und die letztere ohne Erregung des Feldmagnets laufen lassen, da das Anwachsen des Stromes, der zum Umtrieb nothwendig ist, ein Maass für den Reibungsverlust liefert. Man erhält dann die Linien  $EF$  und  $GH$ . Werden weitere Versuche mit einem Felde von anderer Stärke angestellt, so erhält man eine zweite Linie  $A'B'$ , die entweder oberhalb oder unterhalb  $AB$  liegt; dementsprechend zeigen sich die Verluste grösser oder geringer.

Der geringste Gesamtverlust tritt gewöhnlich bei einer Erregung ein, bei der  $B$  im Anker etwa 15000 oder 16000 beträgt. Wird die Erregung stärker, so nimmt nicht allein die Hysteresis zu, sondern es werden auch die Wirbelströme in der Welle und der Riemenscheibe mit Rücksicht auf die Zerstreung der magnetischen Linien stärker.

Steigt die Linie  $AB$  stärker, so zeigt dies, dass die Wirbelströme im Anker eine wahrnehmbare Entmagnetisirung hervorbringen.

#### Prüfung einer Stromerzeugungs-Anlage.

Bei einer Stromerzeugungs-Anlage, bestehend aus einer Dynamomaschine und ihrer Antriebmaschine, wird gewöhnlich die Bedingung gestellt, dass der Wirkungsgrad der ganzen Anlage, also Betriebsmaschine und Dynamomaschine zusammengenommen, nach einer mehrstündigen Betriebsdauer bei voller Belastung eine bestimmte Grösse erreichen und dass der Dampfverbrauch für die Kilowattstunde eine bestimmte Grenze nicht überschreiten soll. In England haben die consultirenden Ingenieure seit Jahren immer steigende Ansprüche gestellt, wodurch erreicht wurde, dass Fabrikanten und Lieferanten aussergewöhnlich hohe Wirkungsgrade erzielten<sup>1)</sup>.

Als Beispiel einer Prüfung einer grösseren Gleichstromanlage führen wir die Versuche an, welche Kennedy im Mai 1893 in Thames Ditton an einer Nebenschlussmaschine von 123 Kilowatt, die von Holmes & Co. gebaut und von einer Willans'schen Zweikurbel-

1) Vergl. die bemerkenswerthe Abhandlung von Crompton in den Proc. Inst. Civil Engineers, B. 106, 1892.

Verbund-Dampfmaschine mit Condensation betrieben wurde, anstelle. Die Zahl der Umläufe betrug 335 in der Minute. Während einer sechsständigen Betriebsdauer bei einer Belastung von 1010 Ampere bei 120 Volt (gleich 121,5 Kilowatt oder 165 Pferdestärken) betrug der Gesamt-Dampfverbrauch 1500 kg in der Stunde oder 12,34 kg auf die Kilowattstunde, oder 9,1 kg auf die Pferdekraftstunde. Gleichzeitig ergab die durch Indicatoren ermittelte indicirte Leistung den Werth 192,8 Pferdestärken, so dass sich der Wirkungsgrad zu 85,6 Procent herausstellte. Der für die indicirte Pferdestärke ver-

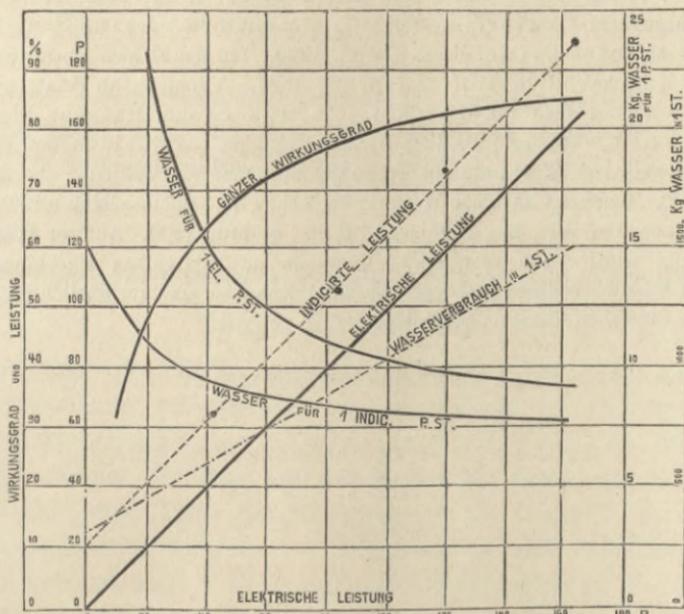


Fig. 539. Untersuchung einer Holmes-Willans'schen Dampfmaschinenmaschine (Kennedy).

brauchte Dampf betrug 7,78 kg. Die Temperatur am Ende des Versuches war 40 Grad C. höher als die der umgebenden Luft. Es wurden sodann noch Versuche bei  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  und  $\frac{3}{4}$  Belastung gemacht, ferner, wenn die Dynamomaschine mit offenem äusseren Kreise lief, mit und ohne Erregung, sowie mit der Dampfmaschine allein, nachdem die Dynamomaschine abgekuppelt war. Die Ergebnisse sind in dem Diagramm, Fig. 539, aufgezeichnet. Aus diesen Versuchen geht hervor, dass der Wirkungsgrad der Dampfmaschine allein 89,5 Procent, der Dynamomaschine allein 95,6 Procent beträgt.

Die sorgfältigen Versuche, welche Ewing 1892 an einer Dampfturbine von Parsons anstellte (s. Seite 607), zeigten einen Dampf-

verbrauch von 12,2 bis 12,7 kg für die Kilowattstunde bei voller Belastung und von 13,6 bis 14,5 kg bei halber Belastung. Noch günstigere Resultate werden für die neueren Dampfturbinen grösserer Art in Anspruch genommen.

Wegen Prüfung von Maschinen vergleiche man folgende Quellen: Report of Comitee of Franklin Inst., 1878. Crystal Palace Exhibition, 1882, Report by Sprague. Officieller Bericht über die Münchener Elektr. Ausstellung 1882. Prof. Adams Inaugural Adress, Journ. Soc. Telegr. Eng. and Electr., B. 14, S. 4, 1885. Reports of Electr. Exhib. at Philadelphia, 1884, veröffentlicht im Journ. of the Franklin Inst. 1885. Prüfung von Bogenlichtmaschinen auf der Ausstellung in Melbourne, von Murray, Journ. Inst. Electr. Engin., B. 18, 1889. Prüfung von Dynamomaschinen (Desroziers, Edison, Gramme etc.) der Pariser Ausstellung 1889 von Minet in La Lum. électr., B. 35, 1889. Hummel über Verlustursachen, Elektrot. Zeitschr., B. 8, 1887 und B. 12, 1891. Versuche an Stanley'schen Wechselstrommaschinen für Bogenlicht, von Duncan und Hassen, Electrician, B. 26, Jan. 1891. Versuche an einer Dynamomaschine von Goolden und Betriebsdampfmaschine von Willans, mit Trennung der einzelnen Verluste, ebenda B. 26, S. 36, 1890. Versuche an einer Wenström'schen Dynamomaschine mit Trennung der einzelnen Verluste, Electr. Review, B. 26, S. 116, 1890. Auf der Frankfurter Ausstellung wurden sehr sorgfältige Versuche an zahlreichen Maschinen unter günstigen Versuchsbedingungen vorgenommen; dieselben sind ausführlich im zweiten Band des officiellen Berichts geschildert.

## Kapitel XXXI.

### **Behandlung von Dynamomaschinen.**

---

Dieses Kapitel behandelt drei verschiedene Punkte: 1. Das Zusammenschalten von zwei oder mehr Dynamomaschinen. 2. Allgemeine Vorschriften über Behandlung von Dynamomaschinen. 3. Störungen im Betrieb.

#### **Zusammenschalten mehrerer Dynamomaschinen in einem Stromkreise.**

Zuweilen wird die Zusammenschaltung von zwei oder mehreren Dynamomaschinen erforderlich, um einen Kreis mit einer grösseren Menge elektrischer Energie zu versorgen, als dies von einer Maschine geschehen könnte. Es hängt von der Bauart der Maschinen, besonders von der Art und Weise der Erregung der Feldmagnete ab, ob die Zusammenschaltung möglich ist, ohne dass die eine den Betrieb der anderen beeinträchtigt. Bei unrichtiger Anordnung ist es möglich und kommt auch vor, dass die eine Maschine Energie der anderen verbraucht und von der anderen angetrieben wird, anstatt dass sie die Energie im Stromkreise vergrössert.

**Hintereinanderschaltung von Gleichstrommaschinen.** Reihenmaschinen können ohne Weiteres zum Zweck der Verdoppelung der elektromotorischen Kraft hintereinander geschaltet werden. Man hat dabei nur zu beachten, dass die positive Polklemme der einen Maschine mit der negativen Polklemme der anderen verbunden wird. Nebenschlussmaschinen können ebenfalls hintereinander geschaltet werden, obgleich diese Anordnung nicht zweckmässig ist, falls nicht die beiden Nebenschlusswickelungen gleichfalls hintereinander geschaltet werden, so dass beide einen langen Nebenschluss zum Stromkreise bilden.

Gemischt gewickelte Maschinen können hintereinander geschaltet werden, falls die Nebenschlusswickelungen der beiden Maschinen zu einem einzigen Nebenschluss vereinigt werden, der über die beiden Anker greift (doppelter kurzer Nebenschluss) oder als Nebenschluss zum äusseren Kreise (doppelter langer Nebenschluss) liegt oder eine Vereinigung des langen und kurzen Nebenschlusses bilden kann. Dasselbe gilt für mehr als zwei Maschinen. Die Zusammenschaltung von Wechselstrommaschinen ist im Kapitel XXIV erörtert worden.

#### Parallelschaltung von Dynamomaschinen.

Dynamomaschinen, welche gut in Nebeneinanderschaltung arbeiten sollen, ohne dass besondere Vorrichtungen dazu erforderlich sind, müssen eine fallende Charakteristik haben (vergl. Seite 191), denn eine Maschine mit steigender Charakteristik würde in dem Maasse als sie einen grösseren Theil des Stromes liefert, auch eine grössere elektromotorische Kraft erlangen, und mehr und mehr Strom liefern, bis sie die ganze Belastung auf sich genommen hat und die anderen Maschinen als Triebmaschinen bewegt. Wenn andererseits die elektromotorische Kraft mit steigendem Strom abnimmt, wird die Belastung automatisch auf die zusammenarbeitenden Maschinen vertheilt. Es ist natürlich möglich, dass eine Maschine, wenn sie mit gleichbleibender Geschwindigkeit läuft, eine steigende Charakteristik hat und doch durch das Langsamerlaufen der Betriebsdampfmaschine bei steigender Belastung, wenn sie mit anderen gekuppelt ist, eine fallende Charakteristik annimmt. In solchem Falle könnte man die Maschinen nebeneinanderschalten, wenn jede ihre eigene Betriebsmaschine hat<sup>1)</sup>.

Einfache Nebenschlussmaschinen haben stets eine fallende Charakteristik, daher bietet das Nebeneinanderschalten derselben keine grosse Schwierigkeit, wie zahlreiche Ausführungen in Beleuchtungsstationen beweisen. Nur ist eine wesentliche Vorsichtsmaassregel zu beachten, wenn eine Maschine dem Stromkreise hinzugefügt wird. Das Feld der hinzukommenden Maschine muss erregt sein, und sie muss mit voller Geschwindigkeit laufen, ehe der Anker in die Hauptleitung geschaltet wird. Andernfalls fliesst der Strom aus den Hauptleitungen in umgekehrter Richtung durch die Maschine und überwältigt die

1) Sayers, Journ. Inst. Electr. Eng., B. 24, S. 137, 1895.

Triebkraft<sup>1)</sup>. Zwei Reihenmaschinen kann man nicht ohne eine kleine Aenderung nebeneinander schalten, andernfalls stören sie sich. Es nehme z. B. die Geschwindigkeit der einen etwas ab, so dass die elektromotorische Kraft dieser Maschine etwas geringer wird, als die Kraft der zweiten. Dann sendet die Maschine mit grösserer elektromotorischer Kraft einen Strom in solcher Richtung durch die zweite Maschine, dass die Polarität der Feldmagnete der letzteren sich umzukehren strebt und die Maschine als Triebmaschine wirkt. Um diesem Uebelstande abzuhelpen, schlug Gramme vor, sowohl die Klemmen als auch die Bürsten miteinander zu verbinden, wie die Figur 540 zeigt. Die Klemmen  $T_1$  jeder Maschine sind mit den Klemmen  $T_2$  der zweiten Maschine verbunden, ebenso die Punkte  $B_1$  und  $B_2$ . Ist die Leistung beider Maschinen genau gleich, so fliesst durch die Verbindung  $B_1 B_2$  kein Strom. Lässt eine Maschine nach, so fliesst aus der anderen ein Strom durch  $B_1 B_2$  und unterstützt die Erregung der schwächer gewordenen Maschine. Dadurch wird eine Umkehrung verhindert. Eine andere Schaltungsmethode für zwei Reihenmaschinen besteht darin, dass jede den Feldmagnetismus der anderen erregt. Hierdurch wird die Arbeit zwischen den beiden Maschinen ausgeglichen.

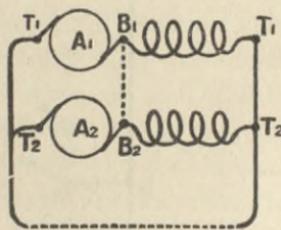


Fig. 540. Parallelschaltung zweier Reihenmaschinen.

Nebeneinanderschaltung von Maschinen mit gemischter Wickelung. Beim Zusammenarbeiten parallel geschalteter Maschinen mit gemischter Wickelung ergibt sich eine Schwierigkeit aus dem Umstande, dass dieselben hierbei die Neigung zeigen, sich ebenso wie Nebenschlussmaschinen zu verhalten.

Mordey hat nachgewiesen, dass die Schwierigkeit gehoben werden kann. Die nebeneinander zu schaltenden Maschinen werden in solcher Art verbunden, dass nicht allein die Nebenschlusstheile der Feldmagnete, sondern auch die Reihenkreise der Feldmagnete parallel geschaltet sind, d. h. es werden die Bürsten und die Klemmen in derselben Weise miteinander verbunden, wie Gramme dies

1) Vergl. Burstyn, in der Zeitschrift für angew. Elektrizitätslehre 1881, S. 717; auch Schellen (II. Aufl.), S. 339; Ledeboer in La Lum. élect., B. 26, S. 210, 1887; Meylan, in La Lum. élect., B. 26, S. 379, 1887 und Feussner, in Zeitschr. f. Elektrot. (1887), S. 108; ferner Puffer in Technology Quarterly, B. 5, S. 380, 1890. Vergl. auch die besondere von Wheeler angegebene Methode, U. St.-Patent, Nr. 325084, 1886.

bei Reihenmaschinen ausgeführt hat. Die Schaltung ist in der Fig. 541 dargestellt.

$A_1 A_2$  sind die Anker der Maschinen,  $T_1 T_1$  und  $T_2 T_2$  die Klemmen; durch die Verbindung  $B_1 B_2$  im Verein mit der Leitung  $T_1 T_2$  links werden die beiden Anker nebeneinander geschaltet. Jede der beiden Dynamomaschinen muss mit einem Ausschalter  $s$  im Nebenschlusskreise versehen sein, und einem zweiten,  $m$ , im Hauptkreise zwischen dem Ankertheile und dem Punkte, wo der Nebenschlusskreis sich abzweigt, so dass der Ankertheil jederzeit unterbrochen werden

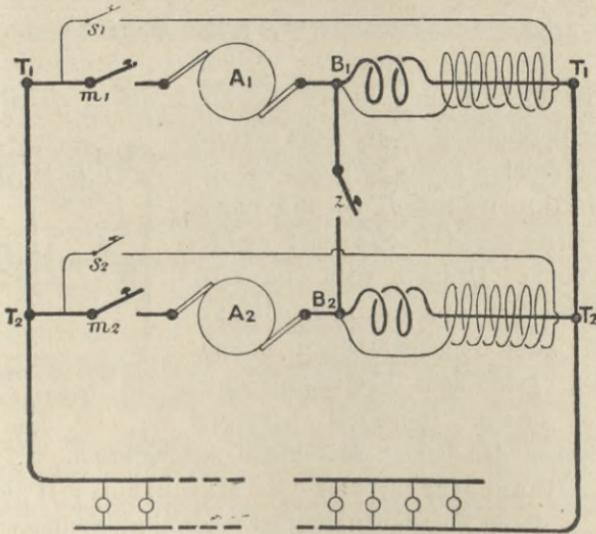


Fig. 541. Parallelschaltung zweier Dynamomaschinen mit gemischter Wickelung.

kann. Ferner muss die Verbindung von Bürste zu Bürste, welche wenigstens ebenso dick wie die Hauptleitungen sein sollte, mit einem Ausschalter  $z$  versehen sein. Nehmen wir an, die Dynamomaschine 1 arbeitet zunächst allein, dann sind die Ausschalter  $s_1$  und  $m_1$  geschlossen. Soll nun die Dynamomaschine 2 eingeschaltet werden, so muss dies in folgender Weise geschehen: Zunächst wird Maschine 2 angelassen, bis sie ihre regelmässige Geschwindigkeit erreicht hat, dann werden die Ausschalter  $s_2$  und  $z$  geschlossen; hierdurch wird der Magnetismus von 2 voll erregt. Zuletzt wird  $m_2$  geschlossen. Soll Maschine 2 ausgeschaltet werden, wird die umgekehrte Reihenfolge der Handgriffe beobachtet: zuerst wird  $m_2$  geöffnet, dann  $z$  und  $s_2$ ; alsdann wird die Maschine stillgesetzt. Am besten ist es, wenn ein besonderer Ausschalter gebaut wird, durch welchen diese

Ein- und Ausschaltungen in richtiger Weise nacheinander ausgeführt werden. Sind die Maschinen in solcher Weise verbunden<sup>1)</sup>, so arbeiten sie zufriedenstellend und zeigen eine bedeutende Fähigkeit der gegenseitigen Regelung; denn jede Steigerung der Stromstärke einer Maschine wird gleichmässig auf die Reihenwickelungen vertheilt, so dass die elektromotorische Kraft der einen Maschine sich nicht über die der andern erheben kann.

Diese gegenseitige Controle findet aber nicht nur bei gleichgrossen Maschinen statt, sondern man darf auch bei Maschinen von ungleicher Grösse, Leistung und Geschwindigkeit darauf rechnen.

Man kann z. B. grosse und kräftige Maschinen mit kleineren von verschiedener Leistung nebeneinander schalten; jede wird dann ihren Arbeitsantheil leisten. Der Widerstand der Reihenwicklung jeder der zusammengeschalteten Maschinen muss in diesem Falle so bemessen sein, dass die Vertheilung des Stromes auf die Wickelungen nach dem Verhältniss der Leistungen der Maschinen stattfindet. Wenn der Ausschalter  $\alpha$  stets geschlossen gehalten wird, so wird dadurch die Felderregung jeder Maschine von der gesammten Leistung der Centrale abhängig gemacht; dadurch wird es erreicht, dass ein Spannungsabfall in den Hauptleitungen ausgeglichen wird.

Centralstationen für Gleichstrom werden gewöhnlich mit einfachen Nebenschlussmaschinen ausgerüstet, die von Hand regulirt werden.

Das Parallelschalten von Wechselstrommaschinen ist bereits im Kapitel XXIV besprochen worden.

### Allgemeine Anweisungen für die Aufstellung und Bedienung von Dynamomaschinen.

**Standort der Maschine.** Der Standort soll trocken und staubfrei sein; kann ein kühler Luftstrom erzeugt werden, so ist dies zweckmässig. Wenn die Maschine nicht unmittelbar angetrieben wird, so muss ein hinreichender Raum zur Anbringung eines Riemens von passender Länge zur Verfügung stehen.

**Fundirung.** Gute Fundirung ist von der grössten Bedeutung. Wird die Dynamomaschine unmittelbar angetrieben, befindet sie sich jedoch nicht auf gleicher Bodenplatte mit der Dampfmaschine, so muss für beide Maschinen zusammen ein genügend grosses Fundament

1) Die von Ledeboer in La Lum. élect., B. 26, S. 210, 1887 vorgeschlagene Methode ist obiger praktisch gleich.

hergestellt werden. Zum Fundament kann man Steine, Beton oder Ziegelmauerwerk in Cement verwenden und dasselbe mit einer starken Steinplatte decken. Bei kleinen Maschinen kann man die Befestigungsbolzen mit Blei oder Schwefel im Deckstein vergiessen, bei grossen Maschinen müssen die Bolzen bis zum Boden reichen und dort in eiserne Platten eingreifen.

Laufschiene. Die von Riemen getriebenen Maschinen müssen mit einer Vorrichtung zum Reguliren des Riemens versehen werden. Befindet sich die Maschine mit ihrer Bodenplatte nicht auf Laufschiene, so dass sie mittels Schrauben verschoben werden kann, so lässt sich die allerdings weniger zweckmässige Methode der Regulirung mittels einer zweiten, besonders aufgestellten, verschiebbaren Scheibe anwenden. In jedem Falle muss die Maschine genau wagrecht stehen, die Welle muss parallel zur Achse der treibenden Riemenscheibe liegen.

Anlassen. Bevor eine Dynamomaschine oder ein Motor, welche längere Zeit nicht benutzt worden oder klimatischen Aenderungen ausgesetzt gewesen sind, wieder angelassen wird, ist es zweckmässig, sie einige Tage an einem warmen und trockenen Platz aufzustellen. Denn das Isolirmaterial kann leicht Feuchtigkeit aufgenommen haben, die nur langsam wieder ausgetrieben werden kann. Nichts kann leichter ein Durchschlagen der Isolation bewirken als das Anlassen einer nicht ganz trockenen Maschine.

Prüfung vor dem Anlaufen. Ehe eine Maschine zum ersten Male in Betrieb gesetzt wird, ist sie zunächst einer Prüfung zu unterziehen.

Man nimmt die Lagerdeckel ab und reinigt die Lager sowie die Zapfen; bei dem Wiederaufbringen darf man die Schrauben nicht zu stark anziehen. Die Schmiergefässe müssen gefüllt sein, das Abtropfen des Oeles muss ordnungsmässig vor sich gehen. Wo selbstschmierende Lager vorhanden sind, ist darauf zu achten, dass die Ringe zum Oelen richtig functioniren. Man verwende Oelgefässe aus Kupfer. Den Anker drehe man herum und überzeuge sich, dass keine Hindernisse, etwa lose Drähte, dem Umlauf entgegenstehen. Den Stromabgeber reinige man mit feinsten Schmirgelleinwand und sehe sorgfältig darauf, dass kein Staub oder feine Kupfertheilchen zwischen den Stäben sich befinden. Eine steife Bürste aus Schweinsborsten thut bei der Reinigung gute Dienste.

Die Bürstenhalter müssen richtig stehen, die Abstellvorrichtungen (falls solche vorhanden sind) in Ordnung sein. Jede Bürste muss

passend zugerichtet, d. h. am Ende unter richtigem Winkel abgeschnitten sein. Einige Maschinenbauer stellen ein besonderes Werkzeug für die passende Zurichtung her. Die Bürsten werden bei ihrer Einstellung zunächst in ihren Haltern recht fest gelegt und müssen auf richtige Länge vorstehen. Dann werden sie weiter eingestellt, so dass sie mit mässigem, aber doch ziemlich starkem Druck gegen den Stromabgeber anliegen. Unter diesem Druck müssen sie aber auch in der richtigen Stellung liegen. Bei zweipoligen Maschinen müssen die Bürsten an zwei genau gegenüberstehenden Stäben des Stromabgebers anliegen, bei vierpoligen Maschinen an Stäben, die um  $\frac{1}{4}$  des Umfanges voneinander entfernt sind. Gewöhnlich bezeichnet man die betreffenden beiden Stäbe mit einem Körner, damit die richtige Lage ein für allemal festgelegt ist. Sind zwei oder mehr positive Bürsten nebeneinander angeordnet, so suche man sie so zu stellen, dass die Zwischenräume zwischen ihnen gerade gegenüber den negativen Bürsten liegen; dann ist die Beanspruchung des Commutators durch die Bürsten eine gleichmässige. Es ist zweckmässig, die Lage der Bürsten von Zeit zu Zeit in der Längsrichtung, also parallel der Achse der Maschine, zu verschieben. Nachdem alle diese Vorichtsmaassregeln ausgeführt sind, entfernt man alle Schraubenschlüssel und beweglichen Eisentheile aus der unmittelbaren Nähe der Feldmagnete. Liegt die Möglichkeit vor, dass die Maschine beim Angehen sich in verkehrter Richtung dreht, so hebt man vorher die Bürsten ab und lässt sie erst nach dem Anlassen herab. Ehe eine Bürste gehoben wird, muss der Strom unterbrochen werden, weil andernfalls die am Stromabgeber auftretenden Funken schädlich wirken.

Bei Kohlenbürsten muss die Auflagefläche besonders gut der Krümmung des Commutators entsprechend bearbeitet sein. In einfacher Weise erreicht man dies, indem man den Commutator mit feinem Glaspapier beklebt und nun die Dynamomaschine laufen lässt, während die Bürsten in ihrer richtigen Lage sich befinden, bis ihre Endflächen die richtige Form angenommen haben. Kohlenbürsten verursachen im Ganzen weniger Störungen als Kupferbürsten, weil sie den Commutator weniger angreifen, auch weniger Anlass zur Funkenbildung geben. Die Kohlenbürsten müssen frei sein von Rissen und Sprüngen und dürfen keine harten Ecken und Kanten oder sonstige harte Stellen haben, die mit dem Commutator in Berührung kommen können.

Sind die Bürsten gut eingestellt und die Schmiergefäße gefüllt, so prüft man, ob alle Verbindungen richtig und die Klemmen fest angezogen sind. Dann kann der Anlauf bei abgehobenen Bürsten und offenem Hauptkreisauschalter beginnen, damit man die Ueberzeugung gewinnt, dass mechanisch alles in Ordnung ist und die Lager nicht warm laufen. Demnächst legt man die Bürsten nieder. Eine Nebenschlussmaschine wird sich nun selbst erregen, wenn auch der Hauptkreisauschalter nicht geschlossen ist. Werden Glühlampen von der Maschine betrieben, so darf die Einschaltung des Hauptkreises nicht eher erfolgen, als bis die Maschine die richtige Spannung liefert, andernfalls können die Lampen verdorben werden. Denn bei zu grosser Geschwindigkeit wird auch die Spannung zu hoch. Eine Probelampe oder ein Spannungsmesser lässt die richtige Spannung erkennen. Ehe nun der Hauptkreis eingeschaltet wird, beobachte man die Bürsten, ob sich Funken bilden. Zeigen sich Funken, so verschiebt man die Bürsten bis zu der funkenlosen Stellung vor- oder rückwärts.

Tägliche Beobachtung. Es ist von der grössten Wichtigkeit, die Dynamomaschinen auf das Sorgfältigste frei von Staub zu halten. Zum Reinigen sind baumwollene Lappen, nicht Putzwolle, zu verwenden, da bei letzterer zu leicht lose Enden an Stellen gelangen, wo sie schädlich wirken. Die Westinghouse-Gesellschaft benutzt einen Blasebalg zum Entfernen des Staubes. Die tägliche Aufmerksamkeit hat sich nicht allein auf die Schmierung, sondern auch darauf zu erstrecken, ob die Bürsten einer Verschiebung oder Zurichtung bedürfen. Den Stromabgeber soll man nicht ölen, sondern nur mit einem mit Vaseline beschmierten Lappen oder mit einem Stück Baumwolle (nicht Putzwolle) reinigen. Dieser Rathschlag gilt jedoch nicht für Bogenlichtmaschinen mit besonderen Stromabgebern mit Luftzwischenräumen; Stromabgeber solcher Maschinen dürfen ohne Weiteres geölt werden. Das Oel soll nicht an Stellen gelangen, wo es nicht erforderlich ist, da Oel die Isolation beeinträchtigen kann, indem es z. B. den Firniss zerstört oder auch Staub und die feinen vom Commutator durch die Bürsten abgeriebenen Kupferpartikelchen festhält. Wenn Oel an den Commutator gelangt, verkohlt es unter den Bürsten und bildet dann leicht einen dünnen Kohlenüberzug, der zu Kurzschlüssen zwischen den Commutatorstäben Veranlassung giebt. Diese Gefahr tritt weniger leicht bei Isolation durch Glimmer ein, als wenn Asbest oder Papier als Isolirmaterial verwendet ist. Es wird häufig die Erfahrung gemacht,

dass der Commutator sich ungleich erhitzt und abnutzt, indem die positive Bürste mehr angreift, als die negative; dies hat aber nichts zu bedeuten. Wenn sich Löthstellen an den Bürsten befinden, muss darauf Acht gegeben werden, dass dieselben nicht in Berührung mit dem Commutator gelangen, denn das Loth giebt Veranlassung zu starker Funkenbildung. Wird die Maschine von einer schweren Welle angetrieben, so dass beim Anlauf oder Anhalten die Gefahr einer Rückwärtsdrehung nicht vorliegt, so dürfen die Bürsten stets am Stromabgeber anliegen. Viele Maschinen geben bei voller Belastung Funken, falls nicht die Bürsten über den Punkt hinaus vorwärts verschoben sind, an dem bei offenem Stromkreise Funkenlosigkeit herrschte. Funkenloser Betrieb ist Hauptbedingung für eine lange Lebensdauer des Commutators. Man kann die Aufmerksamkeit der Wärter nicht genug auf die Funkengebung richten. Der Stromabgeber einer gut gebauten neueren Dynamomaschine, die gehörig beaufsichtigt wird, erhält bald eine schöne, dunkle, glatte Oberfläche. Der Stromabgeber einer noch so guten Maschine kann innerhalb weniger Stunden durch eine sorglose oder unzweckmässige Behandlung unbrauchbar gemacht werden. Liegen die Bürsten zu fest an, so erhält er Kerben oder wird zerkratzt; liegen sie mit zu geringem Drucke an, oder werden sie durch Erzitterungen zum Hüpfen gebracht, oder geben sie Anlass zur Funkenbildung, so wird der Stromabgeber an den Kanten einiger Stäbe abgenutzt und verliert seine cylindrische Gestalt. Das einzige Gegenmittel in diesem Falle bildet ein sorgfältiges Abdrehen oder Abfeilen der Oberfläche; dieses sollte indessen selten vorkommen.

In Centralstationen, wo die unausgesetzte Stromlieferung in erster Linie steht, muss die Isolation der ganzen Maschine täglich gemessen werden. Wenn die Isolation irgend eines Theiles wesentlich herabgesetzt ist, so muss (selbst wenn sie noch zur Zeit genügend hoch ist), die Maschine angehalten, die Ursache ermittelt und abgestellt werden. Tägliche Isolationsmessungen geben guten Aufschluss über den Zustand der Maschine.

### Fehler in Maschinen <sup>1)</sup>.

Verbrennen der Anker. Einzelne Wickelungen eines Ankers erhitzen sich zuweilen so, dass die isolirende Hülle verbrennt. Zu-

1) Vergl. Artikel des Verfassers im *Electrician*, B. 20, S. 82, 1887; ferner *Elektrotechnische Zeitschrift*, B. 9, S. 186, 1890; *Electr. World*, B. 14, S. 99 u. 184 und B. 18, S. 383, 1890; Crocker und Wheeler, „*Practical Management of*

weilen überhitzt sich ein ganzer Anker derartig, dass allgemeine Verkohlung eintritt. Der letztere Fall tritt häufiger bei Ankern von Triebmaschinen als von Stromerzeugern ein. Denn wenn von einer Dynamomaschine zufällig ein übermässig starker Strom entnommen wird, so wird das Drehungsmoment am Anker gewöhnlich so gross, dass der Riemen abgeworfen oder die Dampfmaschine angehalten wird; wogegen bei einem Motor, dessen Anker festgehalten und an der Drehung verhindert wird, ein übermässig starker Strom den Anker durchfließt, wenn nicht die Zuleitung unterbrochen wird.

**Kurzschlüsse im Anker.** Ein Kurzschluss im Anker macht sich gewöhnlich zuerst durch den Geruch von verbranntem Firniss bemerkbar. In solchem Falle muss sofort die Maschine stillgesetzt und der Anker mit der blossen Hand befühlt werden, denn die von dem Kurzschluss betroffenen Windungen lassen sich gewöhnlich schon durch ihre höhere Temperatur auffinden, auch wenn der Firniss noch nicht bemerkbar gekräuselt ist. Wenn in einem grösseren Theile der Wickelungen Kurzschluss entstanden ist, lässt sich der Fehler durch die Temperaturerhöhung nicht so leicht auffinden. Wenn eine unabhängige Stromquelle zur Verfügung steht, besteht ein gutes Mittel zur Entdeckung des Kurzschlusses darin, dass man zwischen zwei gegenüberliegenden Stromwenderstäben einen starken Strom einführt und das Potentialgefälle zwischen den verschiedenen Paaren der Stromwenderstäbe vergleicht. Durch aufmerksame Anwendung des Ohm'schen Gesetzes wird man dann gewöhnlich bald den oder die Fehler finden. Zum Beispiel wissen wir, dass, wenn der Anker ganz fehlerfrei ist, der Spannungsabfall auf jeder Seite des Stromeintrittspunktes gleich sein muss, so dass ein Galvanometer, dessen Klemmen an solchen Stromwenderstäben liegen, welche gleich weit von der Stromeintrittsstelle entfernt sind, wenig oder gar keine Abweichung zeigen wird. Wenn man den Commutator von Stab zu Stab durch das Galvanometer prüft, so zeigt ein grosser Ausschlag des Letzteren sofort eine Aenderung der ursprünglich vorhandenen Symmetrie in den Widerständen an. Die Fälle, welche hierbei auftreten können, sind aber so zahlreich, dass es nutzlos ist, sie alle aufzuführen und erklären zu wollen. Der untersuchende Ingenieur muss sich eben dabei auf seine Erfahrung und seinen praktischen

---

Dynamos and Motors“ (Van Nostrand, New York); Lummis-Paterson, „Management of Dynamos“ (Crosby Lockwood and Son, London); Parkhurst, „Diseases of Dynamos“, Trans. Amer. Inst. Electr. Eng., 1894.

Verstand verlassen. Wenn Fehler im Ankereisen vorhanden sind, lässt man einen Strom zwischen einem der Commutatorstäbe und dem Eisenkern kreisen, und untersucht in gleicher Weise den Spannungsabfall zwischen den verschiedenen Stäben. Eine andere Methode besteht darin, alle Stromwenderstäbe untereinander durch einen umgewundenen Draht zu verbinden, und durch diesen Draht und den Eisenkern einen Strom zu senden. Der Anker wird dann magnetisirt, und die Pole liegen in der Nähe der Fehlerstellen.

Ein Kurzschluss zwischen einem schlecht isolirten Draht und einem darunter befindlichen Eisenkern ist ebenfalls eine fruchtbare Störungsquelle. Es soll damit nicht gesagt sein, dass jeder derartige Contact an sich eine schädliche Wirkung herbeiführt; wenn aber eine solche Fehlerstelle vorhanden ist, und es tritt irgendwo im Lampenkreis ebenfalls ein Fehler auf, so kann sich plötzlich ein bedenklicher Erdschluss entwickeln. Auch wird die Gefahr, dass Personen, die einen Theil des Kreises berühren, einen elektrischen Schlag erhalten, grösser, wenn auch nur ein einzelner Fehler in der Maschine auftritt. Einige Firmen, besonders amerikanische, isoliren deshalb das Maschinengestell von der Erde<sup>1)</sup>.

Die Erfahrung des Verfassers spricht dafür, das Gestell der Maschine sorgfältig mit Erde zu verbinden. Wenn dies geschieht, so wird die Gefahr eines Unfalles für die Wärter — die bei Maschinen für hohe Spannung, wenn solche von der Erde isolirt sind, beträchtlich sind — auf ein geringes Maass zurückgeführt.

Berührung zwischen einem Ankerleiter und dem Eisenkerne kann eintreten, wenn die Eisenscheiben lose werden und die isolirenden Hüllen durchscheuern. Ist die Isolation nicht wasserdicht, und ist sie nass geworden, so kann sie beim Betriebe versagen. Zuweilen werden Anker infolge Verkohlung der isolirenden Hülle fehlerhaft, wobei die Ueberhitzung nicht durch die Ankerleiter, sondern durch den Eisenkern herbeigeführt worden ist. In solchen Fällen ist entweder der Kern nicht gut geblättert oder die Isolation zwischen den einzelnen Scheiben ist mangelhaft. Das zuweilen vorkommende Verbrennen der Bindedrähte rührt davon her, dass die nothwendigen elektrischen Bedingungen nicht genügend erfüllt sind.

---

1) Die an manchen Maschinen verwendeten Blitzableiter sind selbst eine Fehlerquelle. Ist das Gestell der Maschine gut mit Erde verbunden, so bedarf es keines Blitzableiters an der Maschine. Blitzableiter sollte man an der Aussenseite des Maschinenhauses und zwar an der oberirdischen Einführung der Leitungen anbringen.

Wie alle umlaufenden Maschinentheile, sind auch Dynamomaschinen der Erhitzung der Lager ausgesetzt, wenn man nicht auf sorgfältige Schmierung und Beseitigung jeglichen Staubes hält.

**Bruch von Verbindungen.** Der Bruch von Verbindungsstücken zwischen Anker und Stromabgeber kann theils mechanische, theils elektrische Ursachen haben. Die Verbindungsstücke befinden sich zum Theil in einem magnetischen Felde und leiten zeitweise starke Ströme, die zweimal während jedes Umlaufes die Richtung wechseln. Beim Umlaufe werden sie deshalb durch seitliche Kräfte angegriffen, und durch die ununterbrochene Wiederholung erfolgt endlich ein Bruch. Um dies zu vermeiden, macht man die Verbindungsstücke mechanisch sehr stark, oder man stellt sie aus Litzendraht her, oder man ordnet sie so an, dass sie ausserhalb des Streuungsfeldes liegen.

**Unterbrechungen im Anker.** Zuweilen kommt eine Unterbrechung da vor, wo die Ankerleiter oder Wickelungen zusammengeschaltet oder zum Stromabgeber geführt sind. Dies zeigt sich 1. durch Funkenbildung, die man durch Verschiebung der Bürsten nicht heben kann; 2. dadurch, dass einer oder mehrere Stäbe des Stromabgebers an der Kante verbrannt erscheinen.

Ein Weg<sup>1)</sup>, den Fehlerort zu finden, ist, die Maschine mit kurzgeschlossenen Bürsten ganz langsam laufen zu lassen. Nach einigen Minuten hält man die Maschine an und untersucht, ob irgend welche Stellen der Verbindungsstücke heiss geworden sind, solches zeigt dann eine unvollkommene Unterbrechung an. Wird eine ganze Wickelung heiss gefunden, so deutet dies nicht auf Unterbrechung, sondern auf Kurzschluss hin. Wenn der Fehler nicht sofort gehoben werden kann und die Maschine weiter laufen muss, so kann man den zu der fehlerhaften Wickelungsabtheilung gehörigen Commutatorstab durch einen Tropfen Loth mit dem nächstfolgenden Stabe verbinden; dadurch wird die Funkenbildung und die Unterbrechung vorläufig beseitigt.

1) Eine andere, nur bei Trommelankern anwendbare Methode rührt von Loomis (Electr. Engin., New York, December 1891) her, und besteht darin, dass man den aus einer unabhängigen Stromquelle mit Strom versehenen Anker mit der Hand festhält und ihn langsam in einem dem Drehungsmoment entgegengesetzt gerichteten Sinne umdreht. Wenn man hierbei eine Stelle findet, bei welcher die Drehung leichter zu bewirken ist, so ist es klar, dass an dieser Stelle eine Unterbrechung einen Theil des Stromes aufhält. Hierdurch kann man den Fehler leicht finden, indem man von den Commutatorstäben ausgeht, die in dieser Stellung an den Bürsten liegen, und die Verbindungen genau verfolgt.

Abflachungen am Stromabgeber. Es kommt vor, dass ein Theil des Stromabgebers mehr als der übrige Theil verbrennt oder sich abnutzt oder dass zwei benachbarte Stäbe gleich angegriffen werden, so dass an der cylindrischen Oberfläche eine flache Stelle sich bildet. Zur Erklärung der Ursache einer Abflachung hat man verschiedene Gründe angegeben.

Besteht ein Stab aus ungewöhnlich weichem Kupfer, so kann er sich schneller abnutzen; der Fehler tritt indessen selten auf.

Eine unvollkommene Unterbrechung im Anker, in dem Theil, der mit dem betreffenden Stabe des Stromabgebers verbunden ist, gibt Anlass zur Funkenbildung bei jeder halben Umdrehung und nutzt so den Stab ab. Man bemerkt, dass Abflachungen an einem Stabe auch von einem Riss an einer Stelle längs des Stabes fortschreiten.

Eine mechanisch schwache oder mangelhafte Triebvorrichtung bildet eine weitere unzweifelhafte Ursache der Abflachung. Wenn ein an einem dreiarmligen Ankerstern sitzender Anker sich auf einer Welle befindet, die sich biegt, so können periodische Schwingungen eintreten und ein Hüpfen der Bürsten und dadurch Funkenbildung an bestimmten Punkten des Stromabgebers veranlassen.

Ist der Anker gut gebaut und abgeglichen, und läuft er ohne zu schwingen, um, so hat man Abflachungen kaum zu befürchten, falls der Druck der Bürsten hinreichend ist. Zeigt ein Stab des Stromabgebers Brennstellen an seiner Kante, so muss sofort Vorsorge gegen Abflachung getroffen werden. Mittels einer feinen Feile kann man die Oberfläche des Stromabgebers in der Nachbarschaft der Stelle glätten.

Wenn erforderlich, muss der Stromabgeber leicht abgedreht werden. Zu diesem Zwecke sollte ein schmales Werkzeug gebraucht werden, um das Kupfer nicht zu verschleifen, die Oberfläche sollte mit feiner Schmirgelleinwand polirt werden; man hat dann zu prüfen, ob der dünne Gummistreifen zwischen den Kanten der Stäbe nicht metallisch überbrückt ist.

Fehler in den Wickelungen der Feldmagnete. Zuweilen treten auch Fehler in den Feldmagnetwickelungen auf. Dieselben können von zweierlei Art sein: Unterbrechungen oder Kurzschlüsse. Ist eine Unterbrechung vorhanden, so versagt die Maschine wahrscheinlich die Selbsterregung. Die verdächtige Wickelung ist an ihren Endpunkten zu lösen und zu untersuchen. Ein Leclanché-Element, sowie ein einfaches Galvanometer, oder in Ermangelung dessen ein Wecker, genügen zur Prüfung des ununterbrochenen

Zusammenhanges der Wickelung. Sind die Gestelle, auf denen die Wickelung aufgesetzt ist, lose, so kann die dann entstehende Schwingung zu einem Bruche der Drahtenden führen, möglicherweise sogar an einem unterhalb der Oberfläche belegenen Punkte, der nur durch Aufwickelung zu erreichen ist.

Tritt ein Kurzschluss zwischen zwei Wickelungen ein, so bleibt der kurz geschlossene Theil kühl, während der andere Theil der Wickelung warm wird. Der Kurzschluss einiger Nebenschlusswickelungen bringt eine gefährdende Ueberhitzung des übrigen Theiles der Wickelung hervor. Zwischen dem Eisengestell oder den Kernen und den Wickelungen kann ebenfalls ein Kurzschluss entstehen und, wie vorhin angegeben, festgestellt werden.

Besteht eine einzelne Berührungsstelle zwischen der Wickelung und dem Eisentheile des Feldmagnets, so kann ein einzelner Fehler an einer anderen Stelle — im Anker, am Stromabgeber, an den Bürsten, Klemmen oder im Stromkreise — einen erheblichen Unfall herbeiführen.

Fehler in der Erregung. Wenn bei einer Dynamomaschine keine Erregung eintritt, so sind zunächst alle Verbindungen genau nachzusehen, wobei besonders die Aufmerksamkeit auf die Richtung zu lenken ist, in welcher der Strom die Feldmagnetwicklung durchlaufen soll; sodann ist genau nachzusehen, ob die Bürsten in der richtigen Stellung sind und ob sie guten Contact haben; ferner ist zu beachten, dass der äussere Stromkreis bei Nebenschlussmaschinen offen, bei Hauptstrommaschinen geschlossen ist. Wenn die Dynamomaschine noch nicht zur Erregung zu bringen ist, muss man die Bürsten abheben und das Feld aus einer unabhängigen Stromquelle erregen, wobei Sorge zu tragen ist, dass der Magnet mit Rücksicht auf den Drehungssinn und die Art der Verbindungen der Leiter untereinander richtig erregt wird. Hierbei wird eine Unterbrechung im Magnetfeldkreis sicher ermittelt.

Fehler in Wechselstrommaschinen. In Wechselstrommaschinen kommen besondere Fehler vor. Zuweilen tritt ein regelmässig pulsirendes Flackern auf, das zeitlich genau mit den Umläufen des Ankers übereinstimmt. Dies kann nur von einer doppelten Ungleichmässigkeit stammen. Wenn ein Polpaar des Feldmagnetes schwächer als die andern und eine Ankerwicklung fehlerhaft ist, so kann der Strom, sobald bei jeder Umdrehung die Fehlerlagen zusammenkommen, augenblicklich abfallen. Wechselstrommaschinen werden vielfach für hohe Spannung hergestellt, so dass leicht

Isolationsfehler vorkommen, welche bei Maschinen mit niedriger Spannung seltener eintreten. Liegen die beiden Sammelringe nebeneinander auf der Welle, so kann ein Funken — oder besser ein Funkenbogen — von einem Ringe zum andern überspringen, falls nicht eine vorstehende Ebonitscheibe sich zwischen den Ringen befindet. Der Feldmagnet befindet sich nothwendigerweise in der Nähe von Leitern, welche beträchtliche Spannungsunterschiede aufweisen; es ist daher grosse Vorsicht nöthig, um Kurzschluss derselben durch einen Lichtbogen zwischen ihnen und den Polstücken zu verhindern. Die besondere Zugwirkung des Wechselstromes auf die Ankerwickelungen bringt manche Fehler bei diesen Maschinen hervor (vergl. Seite 542).

Schwingungen und Geräusch. Starke Schwingungen können nur durch einen mangelhaft abgeglichenen Anker erzeugt werden. Schwingungen, die für die Maschine verderblich werden, eine Zerrung der Ankerleiter herbeiführen, die isolirende Hülle bröckelig machen, die Bürsten zum Hüpfen und Funkengeben veranlassen, können aber auch bei einer gut abgeglichenen Maschine vorkommen, falls dieselbe nicht fest fundirt ist.

Gleichstrommaschinen sollen geräuschlos laufen; der Riemen macht weit mehr Geräusch als ein anderer Theil der Maschine. Wechselstrommaschinen laufen gewöhnlich nicht geräuschlos, denn die Wickelungen aller Scheibenanker bewegen die Luft heftig zwischen den Polen. Werden die eisernen Kerne des Ankertheiles zu heftig einem Kreislauf der Magnetisirung ausgesetzt, so geben sie einen lauten summenden Ton von sich, den man nur dadurch heben kann, dass man die Maschine bei einem geringern Grade der Erregung benutzt. Dies ist ein baulicher Mangel. Der Verfasser beobachtete einen bemerkenswerthen Fall, in dem eine Maschine einen heulenden durchdringenden Ton von sich gab. Die Ursache war die zufällige Uebereinstimmung zwischen der Wechselzahl und der natürlichen Schwingungsperiode einiger massiver Eisentheile. Der Fehler wurde durch Bearbeitung der Eisentheile gehoben, so dass der Punkt, von dem aus die Theile schwingen konnten, geändert wurde.



## Sachregister.

### A.

- Abflachung am Stromabgeber 783.  
 Angaben, geschichtliche über Maschinen  
 5—23.  
 Anker 2, 36.  
 — der Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft 41, 290.  
 — von Allan 42.  
 — „ Brown 272, 291.  
 — „ Brush 421.  
 — „ Bürgin 266.  
 — „ Crompton 18, 267, 272, 276, 280, 286.  
 — „ Desroziere 43, 262, 451.  
 — „ Edison 42, 261, 285.  
 — „ Eickemeyer 289.  
 — „ Elphinstone 17.  
 — „ Esson 346.  
 — „ Fein 277.  
 — „ Ferranti 43, 557.  
 — „ Fritsche 42, 262, 451.  
 — „ Ganz & Co. 5.  
 — „ Goolden 276.  
 — „ Gramme 16, 17, 41, 283, 440, 552.  
 — „ Gülcher 17.  
 — „ v. Hefner-Alteneck 16, 283.  
 — „ Hopkinson 235, 286, 346.  
 — „ Kapp 250, 276, 289, 344.  
 — „ Lahmeyer 387.  
 — „ Lontin 16, 42.  
 — „ Mordey 17, 43.  
 — „ Pacinotti 15, 16, 36, 43, 267, 450.  
 Anker von Paris 250, 289.  
 — „ Parker 289.  
 — „ Parsons 271.  
 — „ Paterson 268, 272.  
 — „ Schuckert 17.  
 — „ Scott 250, 289.  
 — „ Siemens 33, 42, 43, 284.  
 — „ Swinburne 55, 80, 232, 271.  
 — „ Thomson-Houston 16, 429.  
 — „ Thury 253.  
 — „ Vincent 17.  
 — „ Westinghouse 554.  
 — „ Weston 42.  
 — „ Wilde 43, 552.  
 — Abgleichung der Masse 276.  
 — Bindedrähte 271.  
 — Blätterung 86.  
 — Doppelt-**T**- 11, 34.  
 — Eintheilung der 40.  
 — Entmagnetisirende Thätigkeit 80.  
 — Gyrostatiche Thätigkeit 307.  
 — Induction im 337.  
 — Isolirung der Eisenkerne 275.  
 — Kurzschluss im 780.  
 — Lüftung 275.  
 — mit offenen Wicklungen 39.  
 — praktischer Aufbau 265.  
 — Quermagnetisirung 70.  
 — Sicherung der Wicklung durch Bindedrähte 277.  
 — Stromwege im 58.  
 — Triebstücke 271, 276.  
 — Unterbrechungen im 782.  
 — Verbrennen 779.  
 — Wicklung 229, 278.

Anker, Wirkungen und Gegenwirkungen, magnetische 56.  
 — — mechanische 92.  
 Ankerfeld, Interferenz 356.  
 Ankerkerne 43, 265.  
 — von Jacobi 8.  
 — gezahnte und glatte 267.  
 — getheilte nach Kapp 266.  
 — aus Draht 266.  
 Ankerkernscheiben, Antrieb nach Brown 272.  
 — — nach Immish 274.  
 — — „ Kapp 272.  
 — durchbohrte 271.  
 Ankerleiter, Einbetten der 95.  
 — Zug auf die 98.  
 Ankersterne 272.  
 Ankerstörungen, Theorie der 363.  
 Ankerstrom, Curve des gesammten 200.  
 — quermagnetisirende Wirkung 66.  
 Ankerwicklung 229.  
 — von Arnold 240, 260.  
 — „ Crompton 55.  
 — „ Desroziers 263.  
 — „ Edison 244.  
 — „ v. Hefner-Alteneck 16, 244.  
 — „ Lontin 16.  
 — „ Müller 261.  
 — „ Pacinotti 260.  
 — „ Perry 249.  
 — „ Siemens 247.  
 — „ Sturgeon 33.  
 — „ Thury 253.  
 — „ Wodicka 243.  
 — Abmessung des Drahtes 346.  
 Ankerwickelungen, Abmessung der, in Wechselstrommaschinen 559.  
 Ankerwicklung, geschlossene und offene 39.  
 — rechtsgängige Ring- 231.  
 — — Trommelwicklung 231.  
 — Schaltung der, in Wechselstrommaschinen 558.  
 — Sehnwicklung 233.  
 — Studien von Arnold 23.  
 — „ „ Fritsche 22.  
 — „ „ Hering 22.  
 — Theorie der Verbindungen 231.

Ankerwicklung, vielpolige Ring- 257.  
 Anlassen von Maschinen 776.  
 Antrieb, Hilfsmittel für den 100.  
 Arbeitsloser Strom 538.  
 Arbeitsübertragung 734.  
 — graphische Darstellung 741.  
 — mittels umlaufenden Feldes 643.  
 — Wirkungsgrad 737.  
 — Wirthschaftlichkeit 742.  
 Asynchrone Triebmaschinen 642.  
 — — resultirendes magnetisches Feld 672.  
 — — Betriebsbedingungen 674.  
 — — Zugkraft beim Angehen 674.  
 — — Beziehung zwischen Drehmoment und Schlipf 676.  
 Ausstrahlung 350.  
 Ausgleichwicklung 371, 417, 486.  
 Ausgleichsdynamomaschine 727.

**B.**

Bauart der Maschinen, Prakt. Regeln 344.  
 Behandlung der Maschinen 771.  
 Berechnungen für Gleichstrommaschinen, elektrische 323.  
 — magnetische 326.  
 — Beispiele 331.  
 Blätterung des Ankers 86.  
 Bodenplatten 316.  
 Bogenlicht, Maschinen für 415.  
 Booster s. Fernleitungsdynamomaschine.  
 Bremsdynamometer 761.  
 Buchstaben in Formeln für Dynamomaschinen 158.  
 Bürsten 33, 35, 292, 298.  
 — für Wechselstrommaschinen 305.  
 Bürstenhalter 35, 292, 301.  
 — von Siemens & Halske 298.  
 — „ Smith 300.  
 — für Kohlenbürsten 300.  
 Bürstenhebel 301.  
 Bürstenverschiebung 77.  
 — Isolation 294.

**C.**

Capacität, Wirkung der 535.  
 Centrifugal-Apparat zur Regelung von Triebmaschinen 490.

- Charakteristiken, abfallende 437.  
 Charakteristik, Ableitung des Widerstandes aus der 193.  
 Charakteristik, Anwendungen derselben 206.  
 — Anwendung auf Maschinen, die zum Laden von Sammlern benutzt werden 207.  
 — äussere 188.  
 — — selbstregelnder Maschinen 226.  
 — Beziehung zur Anker- und Magnetwicklung 194.  
 — Beziehung zur Grösse der Maschine 206.  
 — Beziehung zur Umlaufgeschwindigkeit 192.  
 — der Magnetmaschine und der besonders erregten Dynamomaschine 172.  
 — der Nebenschlussmaschine 196.  
 — einer Nebenschlussmaschine mit Dauermagnet 201.  
 — der Reihemaschine 190.  
 — mechanische, für Triebmaschinen 476, 498.  
 — der Verbundmaschine 224.  
 Charakteristische Curven 183.  
 Coëfficient, ökonomisch, bei Maschinen 174.  
 — der Selbinduction 529.  
 Coërcitivkraft des Eisens 124.  
 Compound-Dynamomaschine 342.  
 Curve des gesammten Ankerstroms 200.
- D.**
- Doppelmaschinen 724.  
 — Theorie der 728.  
 Drahtkerne, Anker mit 266.  
 Drehfeld, Entstehung eines magnetischen 644.  
 Drehungsmoment 95.  
 — Beziehung zur Stromstärke 97.  
 — — zum Schlipf 676.  
 — von Triebmaschinen 474.  
 Dreicylinder-Dampfmaschine 645.  
 Dreiphasensystem 650.  
 Drosselspulen 537, 692.  
 Durchlässigkeit, magnetische 114.  
 Durchlässigkeit magnet., Aenderungen der 119.  
 — — Bestimmung der 114.  
 — — Grenzen der 115.  
 Dynamomaschine s. Maschine.  
 — Allgemeine Anweisungen für die Aufstellung und Bedienung von 775.  
 — Ausgleichs- 727.  
 — zur Ausscheidung von Metallen 439.  
 — Behandlung von 771.  
 — Berechnungen des magnetischen Kreises 328.  
 — Berechnung der Wickelungen 317.  
 — besonders erregte 172.  
 — Bestandtheile 32.  
 — für Bogenlicht 415.  
 — Buchstaben, Bedeutung in Formeln für 158.  
 — Druck auf die Lager 306.  
 — Eintheilung 2.  
 — Elektrische Berechnungen 323.  
 — Elemente für den Entwurf von 317.  
 — Entwurf einer Compound- 342.  
 — — vielpoliger Maschinen 372.  
 — Fehler in 779.  
 — für Gleichspannung 209, 224.  
 — — Gleichstrom 375.  
 — — Strassenbahnen 392.  
 — Grundgleichung 159.  
 — Güteverhältniss, elektrisches 175.  
 — Hintereinanderschaltung 771.  
 — homopolare 446.  
 — ideale einfache 32.  
 — Kammzapfenlager 312.  
 — Keile und Federn 315.  
 — Kugelschalenlager 312.  
 — Kuppelungen 316.  
 — Lager und Gestelle 311.  
 — Leistung 96.  
 — Leistungsberechnungen 325.  
 — magnetische Berechnungen 326.  
 — mechanische Einzelheiten für den Entwurf und den Bau 306.  
 — Methoden zur Behandlung der Grundlagen 4.  
 — mit aussergewöhnlich hoher Spannung 444.

Dynamomaschine, Nebeneinanderschaltung von Reihenmaschinen 773.  
 — — von Verbundmaschinen 773.  
 — nützliche Punkte für den Entwurf 344.  
 — mit offener Wickelung 416.  
 — — — Wickelung, Vortheile 434.  
 — ohne besonderen Stromabnehmer 297.  
 — ökonomischer Coëfficient 175.  
 — Physikalische Theorie 24.  
 — Prüfung 755.  
 — — vor dem Anlaufen 776.  
 — Regeln für den Bau 44.  
 — Regulatoren 745.  
 — Riemenscheiben und Riemen 316.  
 — Schaltungsarten 48, 52.  
 — Schmiergefäße 313.  
 — Selbsterregung 48.  
 — selbsterregende mit besonderem Erregerkreis 50.  
 — Selbstregelung 48, 212.  
 — Spannung an den Klemmen 169.  
 — Spannungsverlust 170.  
 — tägliche Beobachtungen 778.  
 — Theorie der 157.  
 — Zapfen 308.  
 — zum Laden von Accumulatoren 444.  
 — wesentliche Theile 34.  
 — Wirkungsgrad 174.  
 — Zusammenschalten von 771.  
 Dynamometer 761.  
 — von Hefner-Alteneck 761.  
 — „ Morin 761.  
 — „ Fischinger 761.  
 Dynamostahl 119.

**E.**

Effective Spannung und Stromstärke 523.  
 Einheit, magnetische 106.  
 Elektrisches Güteverhältniss 101, 175.  
 Elektrolytische Zwecke, Maschinen für 439.  
 Elektromagnet, Gesetz des 133.  
 — Stromrichtung 106.  
 Elektromagnetische Gesetze 106.  
 Elektromagnetismus, Formeln für das Gesetz des 133.

Elektromotor s. Triebmaschine.  
 Elektromotorische Kraft, Beziehung zur Klemmenspannung 170.  
 — — der Maschinen 160.  
 — — Schwankungen der 162, 163, 166.  
 — — Messung der Schwankungen 166.  
 — — Beziehung zur Umlaufgeschwindigkeit 168.  
 — — Ermittlung derselben, Methode der Hilfsbürste 61.  
 — — Methode von Joubert 62.  
 — — „ „ Mordey 62, 63.  
 — — „ „ Swinburne 62.  
 Energie, elektrische Uebertragung der 734.  
 Entmagnetisirende Thätigkeit des Ankers 80.  
 Erregung, Fehler in der 784.  
 Erwärmung der Magnetwickelungen 346.  
 — zulässige, der Wickelungen 350.  
 — durch Wirbelströme 88.

**F.**

Federn 315.  
 Fehler in Maschinen 779.  
 — in den Wickelungen der Feldmagnete 783.  
 — — — Erregung 784.  
 — — Wechselstrommaschinen 784.  
 Feld, magnetisches 26—29.  
 — Zusammendrängung des 369.  
 — magnetisches, Wirkung auf einen Ring 28, 29, 30, 31.  
 Feldmagnete 2, 34, 35.  
 — Berechnung 354.  
 — Erwärmung der Wickelungen 346, 350.  
 — Formen der 148.  
 — Querschnitt 354.  
 — Symmetrie der 354.  
 Feldmagnetismus, Methoden zur Erregung 46.  
 Feldstärke, magnetische 106.  
 Fernleitungs-Dynamomaschine 731.  
 Flachringanker 40.  
 Flachringmaschine von Schuckert 435.  
 Flusseisen 119.

Foucault-Ströme 40.  
 Functionen, periodische 526.  
 Fundirung 775.  
 Funkenbildung, Anordnungen zur Hemmung der 364.  
 — Ursachen 75.  
 Funkenlosigkeit, Punkt für die 357.

**G.**

Gebläse, mechanisches, zur Verhütung der Funkenbildung, von Thomson-Houston 433.  
 Gegenkraft, elektromotorische, in Triebmaschinen 460.  
 Gegenwirkungen i. Anker, magnetische 66.  
 — — mechanische 92.  
 — — Mittel zum Ausgleich 90.  
 Geschichte der Maschinen 6—23.  
 Geschwindigkeit 95.  
 — kritische 18, 196.  
 — von Triebmaschinen 489.  
 Gleichrichter f. selbsterregende Wechselstrommaschinen 565.  
 Gleichspannung, Maschinen für 209.  
 — Entwurf von Maschinen für 224.  
 Gleichstrommaschinen 36, 375.  
 — Berechnungen für 317.  
 — für Elektrometallurgie 405, 439.  
 — Grundformel 44.  
 Gleichstrom-Wechselstrom-Transformatoren 729.  
 — Umformer s. Doppelmaschinen.  
 Gleitungsverlust 646.  
 Grenze der Magnetisirung 345.  
 Grösse einer Maschine, Beziehung zur Leistungsfähigkeit und zum Wirkungsgrad 102.  
 Grundgesetz des magnet. Kreises 328.  
 Grundgleichung d. Dynamomaschine 159.  
 Güteverhältniss, elektrisches 101, 175.  
 — — Aenderung mit d. Stromstärke 176.  
 — der Arbeitsübertragung 737.  
 — der Nebenschlussmaschine 179.  
 — der Reihenmaschinen 177.

**H.**

Hammer, elektrischer, von Deprez 516.  
 Handregulatoren 746.

Hintereinanderschaltung von Dynamomaschinen 771.  
 Hysteresis 124, 132.  
 Homopolarmaschinen 446.

**I.**

Igeltransformator 696.  
 Impedanz 533.  
 Indicator-Methode 758.  
 Inductanz, Gegenwirkung der 528.  
 Induction, Ursprung des Wortes 1.  
 — Coëfficient der magnetischen 114.  
 — im gleichförmigen magnet. Felde 59.  
 — magnetoelektrische (Faraday) 1, 24, 25.  
 — Wirkungen der gegenseitigen 89.  
 Inductionsstörungen, Hilfsmitt. gegen 90.  
 Innenpolmaschine 411.  
 Interferenz des Ankerfeldes 356.  
 Isolationswiderstand einer Dynamomaschine, Prüfung des 756, 779.

**K.**

Keile 315.  
 Kernscheiben 268, 344.  
 — nach Kapp 272.  
 Kleinmotoren für Selbstfahrer 513.  
 Klemmenspannung 169.  
 — Beziehung zur elektromotorischen Kraft 170.  
 — Curve der 188.  
 Kohlenbürsten 300, 502.  
 — Bürstenhalter für 300.  
 Kraft, elektromotorische 44, 45, 162, 170.  
 — magnetisirende 10.  
 — magnetomotorische 111.  
 Kraftfeld, resultirendes 672.  
 Kraftlinien, magnetische 26, 108.  
 — Bestimmung der Zahl der 167.  
 Kraftverluste in Maschinen 100.  
 — in Kupferleitern 348.  
 Kreis, magnetischer 108, 114.  
 — — Berechnungen des 328.  
 — — Grundgesetz des 328.  
 — — Wirkung von Verbindungsstellen im 121.  
 Kreisläufe der Magnetisirung 125.  
 Kritische Stromstärke einer Reihenmaschine 195.

- Kupfer, günstigste Ausnutzung 345.
- Kuppelungen 316.
- Kurzschluss 76.
- im Anker 780.

**L.**

- Lager, Druck auf die 306.
- Kugelschalenlager 312.
- Kammzapfen 312.
- mit Ringschmierung 315.
- Läufer 648.
- Laufschienen 776.
- Leistung von Dynamo- und Trieb-  
maschinen 96.
- mittlere 537, 549.
- Prüfung der 757.
- von Triebmaschinen, Gesetz von  
Jacoby 464.
- — Regeln zur Bestimmung 501.
- Leistungsberechnungen 325.
- Leistungsfähigkeit, Beziehung der Grösse  
einer Maschine zur 102.
- Leistungs-Linien 186.
- Linien, magnetische 107.
- — Bestimmung der Zahl 167.
- — in einer zweipoligen Maschine 56.
- — Zerstreuung der 145.
- Linienintegral der magnet. Kräfte 112.
- Luftreibung 101.
- Luftzwischenraum im magnetisch. Kreise,  
Wirkungen des 120.

**M.**

- Magnetische Durchlässigkeit 114.
- — Aenderungen der 118.
- — Bestimmungen der 115.
- — Grenzen der 115.
- Eigenschaften des Eisens 133.
- Einheiten 106, 135.
- Drehfeld, Entstehung 644.
- Magnetisches Feld, Induction im gleich-  
förmigen 59.
- — um einen Leiter in einem magnet.  
Zwischenraum 94.
- — um einen geraden stromführenden  
Leiter 93.
- — stromführender Leiter im 94.
- Thompson, Dynamomaschinen. 6. Aufl.

- Magnetische Feldstärke 106.
- Induction, Coëfficient der 114.
- Kraftlinien 26, 108.
- Magnetischer Kreis 114, 136.
- — Grundgesetz des 328.
- — Wirkung von Verbindungsstellen  
im 121.
- Magnetische Linien 107.
- — Bestimmung der Zahl der 167.
- — Zerstreuung der 141, 145.
- — in einer zweipoligen Maschine 56.
- Magnetischer Widerstand 113.
- Magnetisirende Kraft 112.
- Magnetisirung, Curven der 115—139.
- Grenze der 115, 345.
- Kreisläufe der 125.
- Sättigungsgrenze der 115.
- Stärke der 112.
- Wirkung der Erwärmung auf die 123.
- Magnetismus, Anwachsen des 132.
- Gesetze des 106.
- Molekulartheorie von Ewing 120.
- rückständiger 123.
- Magnetismus, Verzögerung 132.
- Magneto-Dynamomaschine 46, 168.
- Magnetomaschine, Charakteristik 172.
- Gleichung der 168.
- Magnetomotorische Kraft 109, 111.
- Magneto-Triebmaschine 476.
- Magnetwickelungen, Erhitzung der 346.
- Maschine s. auch Anker, Ankerwicklung,  
Gleichstrommaschine, Triebmaschine,  
Unipolarmasch., Wechselstrommasch.  
Maschinen, Behandlung 771.
- für Bogenlicht 415.
- für elektrolyt. Zwecke von Brown 439.
- geschichtliche Angaben 5—23.
- Maschinenberechnungen 317.
- Maschinengrösse, Beziehung z. Leitungs-  
fähigkeit und zum Wirkungsgrad 102.
- Beziehung der Charakteristik zur 206.
- Maschinenprüfung 755.
- Metallausscheidung, Maschinen für 439.
- Messung von Wechselströmen 539.
- Mechanische Leistung, Messung der 757.
- Mehrphasen-Triebmaschine, synchrone  
640.
- Motor s. Triebmaschine.

**N.**

- Nebeneinanderschaltung von Reihenmaschinen 772.
- — Verbundmaschinen 773.
- Nebenschlussmaschine 49.
- Berechnung 178.
- Charakteristik 196.
- mit Dauermagnet, Charakteristik einer 201.
- Gesamtcharakteristik 200.
- Güteverhältniss 179.
- Verhalten 204.
- Nebenschlusswicklung 49.
- von Bertin 16.
- „ Brush 16.
- Netzschaltung 649.
- Neutraler Punkt 74.

**O.**

- Oberflächenwirkung bei Wechselströmen 549.
- Ohm's Gesetz des Stromes 25, 193.
- Oekonomischer Coëfficient 174.

**P.**

- Parallelschaltung von Dynamomaschinen 773.
- von Wechselstrommaschinen 638.
- Phasenverzögerung und -voreilung 530.
- -verschiebung, Theilung des Stromes unter 682.
- — Motoren mit Stromtheilung 683.
- -verhältnisse bei Transformatoren 708.
- Physikalische Theorie der Dynamomaschine 24.
- Polanker 40, 42.
- in Wechselstrommaschinen 556.
- Polflächen, Abmessungen der, in Wechselstrommaschinen 559.
- Potentialcurven 64, 65, 66.
- Prüfung der Maschinen 755.
- einer Stromerzeugungsanlage 768.
- Punkt, neutraler 74.

**R.**

- Radanker-Dynamomasch. von Fritsche 451.
- Regelung der Thätigkeit von Triebmaschinen 489.

- Regelung, Centrifugalregelung 490.
- dynamometrische 491.
- elektrische 492.
- Regulatoren für Dampfmaschinen 751.
- Dynamomaschinen 745.
- zur Erhaltung gleicher Stromstärke 438.
- für Gleichspannung u. gleichbleibende Stromstärke 747.
- Regulator von Brush 748.
- „ Caldwell 750.
- „ Edison 211.
- „ Goolden 747.
- „ Henrion 750.
- „ Maquaire 489, 748.
- „ Ravenshaw & Trotter 750.
- „ Richardson 718.
- „ Statter 750.
- „ Thomson-Houston 750.
- „ Waterhouse 750.
- für Dampfmaschinen von Richardson 751.
- — von Thury 748.
- — „ Willans 751.
- — dynamometrische Regulirung 752.
- — Regulirung durch Dampfdruck 753.
- Reihenmaschine 48, 216—219.
- Reihenmotoren, geblätterte 686.
- Berechnung 176.
- Charakteristik der 190.
- Güteverhältniss 177.
- kritische Stromstärke 195.
- Nebeneinanderschaltung 773.
- Verhalten 204.
- Reihenschaltung bei besonderer Erregung (Deprez) 53.
- mit langem Nebenschluss 55.
- in Verbindung mit besonderer Wickelung (von Zipernowsky für Wechselstrommaschinen) 55.
- in Verbindung mit Erregung durch Magnetmaschine (Perry) 53.
- Triebmaschine mit 477.
- Verwendung von zwei Maschinen mit, zur Uebertragung 480.
- Riemen 316.

Riemenscheiben 316.  
 Ring mit Drahtkern von Gramme 266.  
 Ringanker 40, 41.  
 — von Gramme 16, 41, 552.  
 — „ Pacinotti 15, 40.  
 — gezahnter, von Pacinotti 267.  
 — mit geschlossener Wickelung 38.  
 — in Wechselstrommaschinen 552.  
 Ringschmierung, Lager mit 315.  
 Ringwicklung 236, 237, 552.  
 — vielpolige 257.  
 — einer vierpoligen Maschine 236, 258.  
 — viertheilige offene 423.  
 Rückständiger Magnetismus 123.  
 Rückwärtsregelung b. Thomson-Houston-Maschinen 431.

**S.**

Sammelringe an Wechselstrommaschinen 35, 557.  
 Schalentransformator 696.  
 Schaltung für Gleichspannung 53.  
 Schaltungsarten der Dynamomaschine 48, 53.  
 Scheibenanker 40, 43.  
 — von Edison 261.  
 — „ Pacinotti 260, 450.  
 — in Wechselstrommaschinen 556.  
 — Wellenwicklung 261.  
 Scheibenmaschinen 450.  
 Scheibenwicklung 260.  
 Scheinbarer Widerstand 84, 533.  
 Schleifenwicklung 242, 247, 567.  
 Schleifringe 35, 557.  
 Schlipf 646, 676.  
 Schmiergefäße 313.  
 Schwingungen 785.  
 Sehnenwicklung 232.  
 Selbsterregung von Dynamomaschinen 48, 52.  
 Selbstinduction 26.  
 — Coëfficient der 529.  
 — Verzögerung infolge 90.  
 Selbstregelnde Maschinen, äussere Charakteristiken 226.  
 Selbstregulirung, Maschinen mit 48, 212.  
 — Theorie 213.  
 Sinuscurve 518.

Spannung an den Klemmen einer Masch. 169.  
 Spannungsmesser von Cardew 524.  
 Spannungsverlust 169, 323.  
 Stabanker von Siemens 484.  
 Stahlfaçonguss 119.  
 Ständer 648.  
 Standort der Maschinen 775.  
 Sternschaltung 649.  
 Streufeld 143.  
 Strom, arbeitsloser 538.  
 Stromes, Wesen des elektrischen 26.  
 Stromabgeber 35, 74, 292.  
 — Abflachung am 783.  
 — von Brush 423.  
 — „ Gülcher 296.  
 — „ Kapp 296.  
 — „ Thomson-Houston 430.  
 — Bauart 294.  
 — Isolation 294.  
 — Stäbe des 293.  
 — in Wechselstrommaschinen 305, 557.  
 Stromcurven f. viertheilige offene Wickelung 419.  
 Stromdichte 113.  
 Stromerzeugungs-Anlage, Prüfung einer 768.  
 Stromschwankungen in Ankern mit offener Wickelung 434.  
 Stromstärke, Drehmoment in Beziehung zur 97.  
 — im Nebenschluss 319.  
 — kritische, einer Reihenmaschine 195.  
 Stromwender 33, 35, 74, 293.  
 — von Clarke 8.  
 — „ Poggendorf 8.  
 — „ Sturgeon 9.  
 — für selbsterregende Wechselstrommaschinen 565.  
 — übergreifender, von Brush 423.  
 Stromwendung, Wirkung der ungleichezeitigen 167.  
 Synchroner Mehrphasen-Triebmasch. 640.

**T.**

Temperaturzunahme, Versuche über 756.  
 Theilung des Stromes unter Phasenverschiebung 682.

- Theorie der Maschinen 157.  
 — der einphasigen Triebmaschinen 683.  
 — — mehrphasigen Triebmaschinen 669.  
 Todte Umläufe einer Maschine 83, 168.  
 Transformatoren s. Umformer.  
 Triebkraft, elementare Theorie der elektrischen 462.  
 Triebmaschinen, asynchrone 642.  
 — Betriebsbedingungen 674.  
 — Zweiphasen-, von Stanley - Kelly 679.  
 — für Bergwerkszwecke (Sayer und Goolden) 508.  
 — Charakteristiken 498.  
 — Drehmoment 671.  
 — elektrische für Gleichstrom 455.  
 — elektromotorische Gegenkraft 640.  
 — für Fahrzeuge 510, 514.  
 — neuere Formen für Gleichstrom 500.  
 — Geschwindigkeit und Drehmoment 474.  
 — graphische Darstellung der Gesetze für 467.  
 — Jacobi's Gesetz über die maximale Leistung von 464, 470.  
 — Gesetz des maximalen Wirkungsgrades 470.  
 — Siemens'sches Gesetz für den Wirkungsgrad von 464.  
 — Magneto- und besonders erregte 476.  
 — mit Nebenschlusswicklung 481.  
 — Nebenschluss- 498.  
 — Prüfung vor dem Anlaufen 776.  
 — mit pulsirendem Gang 516.  
 — „ Stromtheilung unter Phasenverschiebung 682.  
 — Regel von Ayrton und Perry für die Wickelung von selbstregelnden 492.  
 — Regeln von Snell zur Bestimmung der Leistung 458.  
 — Regelung der Thätigkeit 489, 499.  
 — mit Reihenwicklung 477.  
 — synchron laufende 627.  
 — — Mehrphasen- 640.  
 — mit verzögertem Felde 687.  
 — Theorie 465, 669.  
 — — der selbstregelnden 492.  
 Triebmaschinen, treibender Zug 459.  
 — Umsteuerung 488.  
 — Wechselwirkung zwischen Anker und Feldmagnet 483.  
 — neuere mehrphasige 652.  
 Triebspeichen 271.  
 Trillerkäfig als Läuferform 647, 682.  
 Trommel, viel polige 249.  
 Trommelanker 40, 42.  
 — von Fein 277.  
 — mit geschlossener Wickelung 39.  
 — in Wechselstrommaschinen 554.  
 Trommelmaschine, vielpolige, von Kapp 250, 396.  
 Trommelwicklung 243, 283.  
 — von Fritsche 254.  
 — „ Siemens 224.  
 — vielpolige 249.
- U.**
- Uebertragung, elektrische, der Energie 734.  
 — — graphische Darstellung 741.  
 — — Wirkungsgrad 737.  
 — — Wirthschaftlichkeit der 742.  
 Uhrdiagramm 518, 525.  
 Umformer, einspulgiger 718.  
 — Entwurf von 714.  
 — Geschichtliche Angaben 695.  
 — neuere 696.  
 — Theorie 719.  
 — für Wechselströme gleicher Stärke 717.  
 — Wirkungsgrad 712.  
 Umläufe, todte 83, 168.  
 Umlaufendes Feld 20.  
 — — Theorie des, bei mehrphasigem Strom 643.  
 Umlaufgeschwindigkeit 344.  
 — Beziehung zur elektromotorisch. Kraft 168.  
 — — der Charakteristik zur 192.  
 Umsetzungsapparate s. Umformer.  
 Umsteuerung bei Triebmaschinen 488.  
 Unipolarmaschinen 446.  
 — Theorie von Lord Kelvin 448.  
 Unterbrechungen im Anker 782.

**V.**

- Verbindungsstellen im magnetischen Kreis 121.
- Verbrennen der Anker 797.
- Verbundmaschine, Charakteristik der 224.
- Nebeneinanderschaltung 773.
- Verbundwicklung 212.
- von Brush 54.
- „ von Deprez 18, 416.
- Verfahren zur Bestimmung der 223.
- Verluste, Bestimmung der einzelnen, bei Maschinen 767.
- Vertheilungswicklung b. Wechselstrommaschinen 559.
- Verzögerung des Magnetismus 132.

**W.**

- Wärmemaschine von Carnot 469.
- Wechselstrom, Gesetze des 517, 531.
- Messung der mittleren Leistung 537, 549.
- Oberflächenwirkung 549.
- Wechselströme von sehr hoher Frequenz 542.
- Messung 539.
- Wechselstromkreis, Condensatoren im 534.
- Wechselstrommaschinen 551.
- Abmessungen der Polflächen und Ankerwicklungen 559.
- Bau der 572.
- Bürsten für 305.
- Drehungsmoment 542.
- dreiphasige 571.
- Erregung der Feldmagnete 565.
- Fehler in 784.
- Grundformel 45, 544.
- Inductor mit 618.
- Parallelschaltung 638.
- Polanker in 556.
- Ringanker in 552.
- Sammelringe 35, 557.
- Schaltung der Ankerwicklung 558.
- Scheibenanker in 556.
- Stromabgeber 557.
- Stromwender für selbsterregende 565.

- Wechselstrommaschinen, Trommelanker in 554.
- Zusammenschaltung von 627.
- Wechselstromumsetzung, Grundlehren über 689.
- Wechselstromzähler, Ferranti's 687.
- Wellenwicklung von Fritsche 254.
- für Wechselstrommaschinen 567.
- Wicklung der Anker 229, 278.
- Anbringung einer besonderen 365.
- Berechnung der 317.
- für dreiphasigen Strom 604.
- Erwärmung der 346, 350.
- Fehler in der 783.
- Oberfläche für Ausstrahlung 350.
- Regel von Ayrton und Perry für die Wicklung von selbstregelnden Triebmaschinen 492.
- für Ringkerne 236, 280.
- offene 416, 437.
- — von Thomson-Houston 17.
- — Vortheile der 434.
- gemischte 212, 223.
- — Anordnung der 222.
- Schaltung der, bei Wechselstrommaschinen 575.
- selbstaussgleichende 370.
- Sehnen 232.
- Vergleich zwischen Gleichstrom- und Wechselstrom 558.
- vielfache 254.
- vielpolige Ring- 257.
- von Eickemeyer 290.
- Wicklungs-Diagramme 235.
- Wicklungsformeln für geschlossene Ankerwicklungen 240.
- Widerstand, Ableitung aus Charakteristik 193.
- des magnetischen Kreises 114.
- magnetischer 364.
- scheinbarer 84, 533.
- Wirbel, magnetischer 28.
- Wirbelströme 79.
- in den Polstücken 88.
- Wirkungsgrad 101, 174.
- Beziehung der Grösse einer Maschine zum 102.

Wirkungsgrad, Siemens'sches Gesetz für  
den Wirkungsgrad von Triebmasch. 464.  
— Prüfung des 757.  
— der Uebertragung 737.  
— von Umformern 712.

**Z.**

Zapfen 308.  
Zeichen in Formeln 158.  
Zerstreuung der magnetischen Linien  
141, 145.

Zerstreuung, Berechnung der 175.  
Zug auf die Ankerleiter 98.  
Zugkraft beim Angehen von asynchronen  
Triebmaschinen 647.  
Zusammenschalten von Dynamomasch.  
771.  
— von Wechselstrommaschinen 627.  
Zwischenraum, Wirkung der Verbreite-  
rung 355.  
— zweckmässigste Weite 374.

## Namenregister.

### A.

- Achard. 465 Unters. über Triebmasch.  
Adams. 770 Versuche mit Wechselstrommaschinen.  
Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft.  
290 Trommelanker. 314 Lager mit Ringschmierung. 379 Gleichstrommaschinen. 506 Gleichstrommotoren. 577 Wechselstrommasch. 623 Wechselstrommotoren. 656 Neuere mehrphasige Triebmaschinen. 698 Transformatoren.  
Alioth. 579 Wechselstrommaschine.  
Allan. 42 Polanker.  
Ampère. 8, 24 Regel.  
Anderson. 761 Dynamometer.  
André. 492 Triebmaschine.  
Andrews. 751 Regulatoren.  
Appold. 757 Bremsdynamometer.  
Arnold. 23, 230, 238, 240, 260, 758 Ankerwicklung, 449 Homopolarmaschine, 678 Theorie d. Drehfeldmotoren.  
Arnoux. 230 Ankerwicklung, 262 Wellenwicklung, 355 Charakteristiken, 357 Belastungscurven.  
Atkinson. 448 Unipolarmaschine, 508 Triebmaschine, 516 Bohrmaschine.  
Auerbach. 21 Theorie der Maschinen.  
Ayrton und Perry. 20, 491 Regelung von Triebmaschinen, 82 Bürstenverschiebung, 84 scheinbarer Widerstand, 102, 104 Abmessungen von Maschinen, 374 Regel für Stärke der Ankerleiter, 465, 503 Unters. über Triebmasch., 492 Regel für die Wickelung von selbstregelnden Triebmaschinen, 713

Wirkungsgrad von Umformern, 742  
Arbeitsübertragung, 752  
Dynamometer, 758  
mechan. Leistung von Maschinen.

### B.

- Baily. 645 Inductionsmotor.  
Bacon. 118 Mitismetall.  
Baker. 12 Erregung.  
Barlow. 19 Umlaufendes Rad.  
Bast. Siehe de Bast.  
Batley. Siehe Greenwood.  
Baumgardt. 228 Gemischte Wickelung.  
Bedell und Crehore. 521 Abhandlung über Wechselstrom, 713, 721 Umformer.  
Bedell und Ryan. 631 Synchronmotoren, 635 Untersuchung von Wechselstrommaschinen.  
Bell, L. 228 Gemischte Wickelung.  
Bertin. 16 Nebenschlusswicklung.  
Blakesley. 521, 539 Abhandlung über Wechselstrom.  
Blondel. 632 Kuppelung von Wechselstrommaschinen.  
Bollmann. 238 Wellenwicklung, 261, 451 Scheibenmaschine.  
Borel. 645 Triebmasch. mit umlaufendem Feld.  
Bosanquet. 110. Magnet. Durchlässigkeit.  
Bourbouze. 456 Triebmaschine.  
Brackett. 174, 763 Bestimmung des Wirkungsgrades von Maschinen.  
Bradley. 254 Vielpolige Trommelwicklung, 435 Ringmaschine, 570, 645 Zweiphasenmaschine, 651 Maschine für vielphasigen Strom, 730 Umformer.  
Bramwell. 761 Dynamometer.

Breguet. 451 Maschinen.  
 Brett. 10, 12 Erregung des Magnetismus.  
 Brotherhood. 316 Kupplung, 645 Masch.  
 Brousson. 560 Wechselstrommaschinen.  
 Brown. 18 Vielpolige Maschinen, 20 Inductionsmotor, 150, 151, 155 Feldmagnete, 271 durchbohrte Kernscheiben, 273, 274 Umtrieb der Kernscheiben, 291 Anker, 311 Maschinenwelle, 316 Bodenplatte, 344 Kernscheiben-Dimensionen, 370 Polform, 373 vierpolige Ringmaschine, 442 Masch. für elektrolyt. Zwecke, 448 Unipolarmaschine, 577 asynchrone Stromerzeuger, 619 dreiphasige Triebmaschine, 584 Wechselstrommaschine der „Schirm“-Gattung, 654 Zweiphasenmotor, 739 Umsetzer, 737 Gleichstromübertragung.  
 Brown, Boveri & Co. 382 Gleichstrommasch., 584 Wechselstrommasch., 699 Umformer.  
 Brush. 16, 54 Nebenschlusswicklung, 83 Magnetisierungsabfall, 87 geblätterter Anker, 149 Feldmagnete, 258 Victoriamaschine, 298 Bürsten, 350 Erwärmung der Wicklung, 420 Dynamomaschine, 428 Stromwender, 441 Maschinen für elektrolytische Zwecke, 490 Centrifugalregler, 748 Regulator für Triebmaschinen.  
 Bürgin. 150 Feldmagnete, 266 Anker.  
 Burstyn. 773 Schaltung von Maschinen.

### C.

Cabanellas. 85 Scheinbarer Widerstand, 89 Wirbelströme in Polstücken, 727 Umsetzer.  
 Caldwell. 750 Regulator.  
 Callan. 695 Umsetzung.  
 Cardew. 524 Spannungsmesser, 764 Maschinenprüfung.  
 Carhart. 143 Magnet. Zerstreuung, 472 Untersuchungen über Triebmaschinen.  
 Carnot. 469 Wärmemaschine.  
 Carpentier. 743 Umsetzer, 759 Bremsdynamometer.

Clarke. 8 Gleichstrommaschine, 150 Feldmagnete, 450 Scheibenmaschine.  
 Clausius. 22, 86 Theorie d. Maschinen.  
 Cooke. 10 Elektromagnete in Maschinen.  
 Cooper. 268, 272 Anker, 441 Masch. für elektrolyt. Zwecke.  
 Cowper. 457 Triebmaschinen.  
 Crocker. 268 Ankerform der Motoren, 444 Hochspannungsmaschinen, 503 Triebmaschine, 779 Fehler in Maschinen.  
 Crompton. 18 Ankerkern, 55 Compound-Wicklung, 150 Feldmagnete, 212 Compound - Dynamomaschine, 272, 276, 280, 286 Anker, 386 Gleichstrommaschine, 437 Bogenlichtmasch., 442 Maschine f. elektrolyt. Zwecke, 572 Wechselstrommaschine, 572 Maschinenprüfung.  
 Crosby und Bell. 511 Magnetform.

### D.

Dal Negro. 8 Magnetmaschine, 19, 456 Triebmaschine.  
 Davenport. 19 Triebmaschine.  
 Davidson. 458 Triebmaschine.  
 Davis. 19 Magnetismus.  
 De Bast. 23 Wechselstrommaschinen, 678 Theorie der Drehstrommotoren.  
 De Fonvielle. 681 Wechselstromspule.  
 De la Rive. 109 Magnet. Kreis.  
 Delafield. 448 Homopolarmasch.  
 De Meritens. 553 Wechselstrommasch.  
 Deprez. 18, 416 Verbundwicklung, 20, 393 Arbeitsübertragung, 22, 174, 190, 224 Charakteristiken, 53 Reihenschaltung bei besonderer Erregung, 103 Abmessungen von Masch., 151 Feldmagnete, 490 Regelung der Thätigkeit von Triebmaschinen, 516 elektrischer Hammer, 644 Theorie der Maschinen für mehrphasigen Strom, 743 Umsetzer, 763 mechanische Messungen, 758 Bremsmethode.  
 Desroziere. 18, 43, 55, 451 Scheibenmasch., 262 Anker, 746 magnetische Regulierung.  
 Diehl. 746 Regulator.

Dobrowolsky. 20, 622, 645 Drehstrom-  
maschinen, 369 Polform.  
Douglass. 11 Dynamomaschine.  
Dove. 109 Magnet. Kreis.  
Dub. 109 Magnet. Kreis.  
Dubois. 120 Magnet. Kreis.  
Dujardin. 10 Wechselstrommaschine, 17  
Maschine mit schwingender Bewegung.  
Du Moncel. 11 Alliance-Maschine.  
Duncan. 23 Wechselstrommaschinen,  
678 Theorie der Drehfeldmotoren.

**E.**

Easton. 761 Dynamometer.  
Eaves. 153 Feldmagnete.  
Edison. 17 Maschinenformen, 42 Trom-  
melanker, 148, 149 Feldmagnete, 211  
Regulator, 234, 244, 278 Ankerwicke-  
lung, 261 Scheibenanker, 298 Bürsten,  
306, 391 Gleichstrommasch., 503 Trieb-  
masch., 727 Umsetzer, 746 Regula-  
toren.  
Edser. 142 Magnet. Kreis.  
Eickemeyer. 153 Feldmagnete, 290  
Anker, 725 Gleichstrom-Umformer.  
Elkington. 440 Metallausscheidung.  
Elmore. 440 Maschine mit Scheiben-  
anker für Kupferläuterung.  
Elphinstone. 17 Vielpoliger Trommel-  
anker.  
Ellwell. 150, 152 Feldmagnete, 441  
Maschinen f. elektrolyt. Zwecke, 555  
Wechselstrommaschine, 725 Doppel-  
maschine.  
Esson. 22 Theorie der Maschinen, 105  
Abmessungen von Maschinen, 173  
Charakteristiken, 227 gemischte Wic-  
kelung, 277 Bindedrähte an Trommel-  
ankern, 344 Umlaufgeschwindigkeit,  
346 Ankerwicklung, 350 Erwärmung  
der Wickelungen, 358, 360 Interfe-  
renz, 566, 591 Untersuchung von  
Wechselstrommaschinen.  
Ettinghausen. 8 Wechselstrommaschine.  
Evershed. 716 Berechnung von Um-  
formen.  
Ewing. 120 Magnetisierungscurven, 120  
Moleculartheorie des Magnetismus, 122  
Verbindungsstellen im magnet. Kreise.  
123, 125 magnetische Durchlässigkeit,  
131 Energieverbrauch, 131 Remanenz,  
132 „zähe“ (viscous) Hysteresis.

**F.**

Faraday. 1, 3, 5, 19, 26, 28 Induction,  
47 besonders erregte Maschine, 109  
magnetische Linien, 446 Homopolar-  
maschine, 456 magnetoelektrische Ma-  
schinen, 695, 699 Umsetzer.  
Farmer. 12 Erregung.  
Favre. 21 Theorie der Maschine.  
Fein. 152 Feldmagnete, 277 Anker,  
441 Innenpolmaschine.  
Feldmann. 713 Umformer.  
Ferranti. 17, 18, 522, 557, 586 Wech-  
selstrommaschine, 43, 556 Scheiben-  
anker, 153 Feldmagnete, 312 Kamm-  
zapfen, 344 Umlaufgeschwindigkeit,  
568 Wellenwicklung, 687 Wechsel-  
strommotoren und Stromzähler, 701,  
731 Umsetzer.  
Ferraris. 20 Umlauf einer Wechsel-  
strom-Triebmaschine, 448 Homopolar-  
maschine, 678 Theorie der Drehfeld-  
motoren, 682 Phasenverschiebung,  
695, 719 Umformer.  
Feussner. 773 Schaltung von Maschinen.  
Finzi. 131 Unters. über Magnetismus.  
Fischer-Hinnen. 367 Hilfswicklung.  
Fleming. 24, 92 Regel für Induction,  
522, 537, 712 Abhandlung über  
Wechselstrom, 712, 719 Theorie der  
Umformer.  
Fontaine. 736 Arbeitsübertragung.  
Fonvielle. Siehe de Fonvielle.  
Forbes. 146 Formel für Kraftlinien-  
einheit, 153 Feldmagnete, 299 Kohlen-  
bürsten, 350 Erwärmung der Wicke-  
lungen, 367 Hilfswicklung, 447  
Unipolarmaschine, 616 Niagara-Strom-  
erzeuger, 743 Arbeitsübertragung.  
Fourier. 541 Zerlegung periodischer  
Bewegungen.  
Fritsche. 18, 43 Scheibenmasch., 22,  
230, 235 Studien über Ankerwicklung,  
254 Wickelungs - Diagramme, 238

- Wellenwicklung, 262, 451 Scheibenanker.
- Frölich. 81 Gegenwirkung des Ankerstroms, 85 Wirbelströme, 103 Abmessungen von Maschinen, 134 Formel für Elektromagnet, 238 gemischte Wickelung.
- Froment. 19, 457 Triebmaschine.
- Froude. 760 Bremsdynamometer.
- G.**
- Gaisberg. 66 Potentialcurven.
- Ganz. 18, 556, 565 Wechselstrommaschine, 152 Feldmagnete.
- General Electric Co. 392 Maschine für Strassenbahnbetrieb, 593 Wechselstrommaschine.
- Görges. 572 Dreiphasenmaschine.
- Golden. 153 Feldmagnete, 276 Anker, 303 Bürstenhalter, 313 Kugellager, 508 Triebmaschine, 744 Regulator.
- Gordon. 17, 570, 594 Wechselstrommaschine.
- Gramme. 16, 17, 40, 283 Ringanker, 20 Arbeitsübertragung, 64, 192 Gleichstrommaschine, 149, 150, 151 Feldmagnete, 198 Charakteristik einer Nebenschlussmaschine, 440 Maschine zur Metallausscheidung, 553, 569 Wechselstrommaschine, 730 Umsetzer, 773 Maschinen-Schaltung.
- Greenwood und Batley. 153 Feldmagnet.
- Griscom. 150 Feldmagnete.
- Grove. 457 Triebmasch.
- Gruson. 119 Dynamostahl.
- Gülcher. 17 Vielpoliger Ring, 296 Stromabgeber, 302, 303 Bürstenhalter.
- H.**
- Hagenbach. 21 Theorie der Maschine.
- Harris. Siehe Pyke.
- Hefner-Alteneck. 16, 283 Ankerwicklung, 450 Scheibenmaschine, 611 Wechselstrommasch., 741 Arbeitsübertragung, 491, 761 Dynamometer.
- Heisler. 658 Wechselstrommaschine.
- Heinrichs. 761 Dynamometer.
- Helios. 393 Gleichstrommaschine, 595, 660 Motoren, Wechselstrommaschine.
- Henley. 10 Wechselstrommaschine.
- Henrad. 118 Mitismetall.
- Henrion. 750 Regulator.
- Henry. 19, 456 Triebmaschine, 545 Selbstinduction.
- Hering. 22, 230 Studien über Ankerwicklung, 143 magnet. Zerstreuung.
- Herwig. 21 Theorie der Maschinen.
- Hjorth. 11 Maschine mit Selbsterregung 458, 516 Triebmaschine.
- Higgs. Siehe Paget.
- Hobart. 230 Ankerwicklung.
- Hochhausen. 151 Feldmagnete.
- Holmes. 10, 11, 602 Wechselstrommaschine, 51 selbsterregende Maschine, 437 Bogenlichtmaschine.
- Hookham. 261 Elektrizitätsmesser.
- Hopkinson. 18 Verbesserung des magnetischen Kreises, 21, 22 Theorie der Masch., 82 Bürstenverschiebung, 102 Abmessungen von Maschinen, 110, Berechnung von Maschinen, 115, 120 Magnetisirungscurven, 124 Coërcitivkraft des Eisens, 131 Magnetisirungsgrenze, Energieverbrauch im magnet. Kreise, 133 Verzögerung des Magnetismus, 137 Formel für den Widerstand des magnetischen Kreises, 140 Untersuchung über den magnetischen Kreis, 144 magnetische Zerstreuung, 150, 602 Feldmagnete, 184, 185, 187, 206, 207 Charakteristiken, 234, 240, 346 Ankerwicklung, 254, 286 vielpolige Trommelwicklung, 293 Stromabgeber für Wechselstrommaschinen, 331 Berechnung einer Maschine, 357 Interferenz, 397 Manchester-Maschine, 398 Verbesserung der Edison-Maschine, 441 Maschine für elektrolytische Zwecke, 450 Scheibenmaschine, 545 Wechselstromgesetze, 556, 595 Wechselstrommaschine, 719 Theorie der Umformer, 761 Maschinenprüfung.
- Hoppe. 449 Homopolarmaschine.

- Hospitalier. 228 Gemischte Wickelung, 730 Umformer.  
 Housmann. 23 Energieverlust, 365 Hilfspole.  
 Hummel. 443 Homopolarmaschine, 770 Maschinenprüfung.  
 Hunt. 457 Triebmaschine.  
 Hurmuzescu. 445 Maschine für Prüfzwecke.  
 Hutin und Leblanc. 368 Hinderung der Funkenbildung, 678 Theorie des Drehfeldmotors, 730 Umformer.

**J.**

- Jacobi. 8 Ankerkern, 19 Triebmasch., 21 Leistung eines Triebwerkes, 134, 624, 636 Gesetze des Elektromagnetismus, 459, 463, 464, 470 Untersuchungen über Triebmaschinen.  
 Jackson. 120 Magnetisierungscurven.  
 Jamieson. 307 gyrostatische Thätigkeit des Ankers.  
 Jehl. 43, 451 Scheibenmaschine, 728 Gleichstrom-Umformer.  
 Immisch. 274 Ankerantrieb, 489 Triebmaschine.  
 Joel. 150 Feldmagnete.  
 Johnson. 12 Induction.  
 Johnson und Phillips. 395 Gleichstrommasch., 699 Umformer.  
 Joubert. 21 Theorie d. Maschinen, 62 Ermittlung der elektromotorischen Kraft, 84 scheinbarer Widerstand, 103 Abmessungen v. Maschinen, 522 545, 719 Wechselstromgesetze.  
 Joule. 21 Theorie der Maschinen, 109 115 Sättigung von Elektromagneten, 459 Triebmaschine, 466 Untersuchungen über Triebmaschinen.  
 Joyce. 352 Erwärmung der Wickelungen.

**K.**

- Kapp. 22 Theorie der Maschinen, 23 Energieverluste, 82, 103 Ankerwirkungen, 110 Abmessungen von Maschinen, 151 Feldmagnete, 212, 228 Compound-Dynamomaschine, 249, 289 Wickelung vielpoliger Trommeln,

- 272, 344 Kernscheiben, 275 Ankerlüftung, 276 Ankerantrieb, 296 Stromabgeber, 303 Bürstenhalter, 311 Maschinenwelle, 316 Bodenplatte, 334 Berechnung einer Maschine, 351 Regeln für Wickelungsberechnungen, 357 Belastungscurven, 395 Gleichstrommaschine, 457, 480 Untersuchungen über Triebmaschinen, 521 Abhandlung über Wechselstrom, 554, 596 Wechselstrommaschine, 559, 567 Untersuchungen über Construction von Wechselstrommaschinen, 695, 721 Umformer, Theorie der Umformer, 767, 742 Arbeitsübertragung, 766 Maschinenprüfung.

- Kelvin, Lord. Siehe Thomson, Sir W.  
 Kenelly. 81 Quermagnetisirung, 135 magnet. Widerstand.

- Kennedy. 151 Feldmagnete, 554 Wechselstrommaschine, 760 Seilbremse, 768 Maschinenprüfung.

- Kingdon. 618 Wechselstrommaschine.  
 Klimenko. 602 Wechselstrommaschine.

- Körting. 397 Gleichstrommaschinen, 596 Wechselstrommaschinen, 660 Wechselstrommotoren.

- Kohlrausch. 66 Potentialcurven, 545 Wechselstromgesetze.

- Koosen. 21 Theorie der Maschinen, 545 Wechselstromgesetze.

- Krupp. 119 Dynamostahl.

- Kummer. 370 zweitheiliger Polschuh, 375 Gleichstrommasch., 577 Wechselstrommasch., 655 Wechselstrommotor, 702 Transformator.

- Kyle. 287 Anker.

**L.**

- Ladd. 14 Selbsterregende Maschine mit zwei Siemens-Ankerkernen.

- Lahmeyer. 144 Magnet. Zerstreung, 726 Doppelmasch., 151, 153 Feldmagnete, 386, 387 Gleichstrommaschine, 658 Wechselstrommotoren, 731 Umsetzung (Fernleitungsdynamomaschine), 443 Elektrolytmasch.

- Lamont. 134 Formel f. Elektromagn.

- Lane-Fox. 750 Regulatoren.  
 Langley. 746 Regulatoren.  
 Lauckert. 55 Verbundwicklung.  
 Laurence. 725 Doppelmaschinen.  
 Leblanc. Siehe Hutin.  
 Lecher. 449 Homopolarmaschine.  
 Ledeboer. 773, 775 Schaltung von Maschinen.  
 Lenz. 19, 21 Theorie der Maschinen, 134, 486 Gesetz des Elektromagnetismus.  
 Le Roux. 21 Theorie der Maschinen, 545 Wechselstromgesetze.  
 Lontin. 16 Ankerwicklung, 42 Polanker, 151 Feldmagnete, 746 Regulatoren.  
 Loomis. 782 Fehler in Maschinen.  
 Lummis-Paterson. 780 Fehler in Masch.

**M.**

- Mc Tighe. 150 Feldmagnete.  
 Maquaire. 489, 748 Regulator.  
 Martin und Wetzler. 457 Aeltere Triebmaschinen.  
 Mascart. 21 Theorie der Maschinen, 103 Abmessungen von Maschinen, 719 Theorie der Umformer.  
 Masson. 11 „Alliance“-Maschine, 695 Umformer.  
 Mather. 82 Ausgleich der Gegenwirkung im Anker, 152 Feldmagnete, 365 Hilfspole, 397 Manchester-Maschine, 727 Umformer.  
 Matthews. 238 Wellenwicklung, 451 Scheibenmaschine.  
 Mavor. 143 Magnetischer Kreis.  
 Maxwell. 21 Theorie der Maschinen, 112 Linienintegral der magnet. Kräfte, 719 Theorie der Umformer.  
 Melderen. Siehe van Melderen.  
 Menges. 366 Hilfswickelung, 764 Maschinenprüfung.  
 Meritens. Siehe de Meritens.  
 Meyer. 21 Theorie der Maschine.  
 Meylan. 773 Schaltung von Maschinen.  
 Minet. 770 Maschinenprüfung.  
 Moncel. Siehe du Moncel.

- Mordey. 17 Vielpoliger Ring, 18 Wechselstrommaschine, 23 Energieverluste, 43 Scheibenanker, 62 Ermittlung der elektromotorischen Kraft, 132, 133 Unters. über Magnetismus, 154 Feldmagnete, 258 vielpolige Ringwicklung, 311 Maschinenwelle, 312 Kammzapfen, 367 Hilfswickelung, 384 Victoria-Maschine, 446 Homopolarmaschine, 486 Untersuchungen über Triebmaschinen, 522, 697 Wechselstrommaschine, 633 Prüfung d. Masch., 693 Umformer, 713 Wirkungsgrad von Umformern, 773 Schaltung d. Masch.  
 Morin. 491, 761 Transmissionsdynamometer.  
 Mountain, W. C. 302 Bürstenhalter.  
 Muirhead. 150 Feldmagnete, 450 Scheibenmaschine.  
 Müller. 134 Formel f. Elektromagnete, 261 Scheibenanker, 746 Regulatoren.  
 Müller, Herm. 763 Messung der mechan. Leistung von Maschinen.  
 Murray. 12 Erregung, 761 Dynamometer, 770 Prüfung von Bogenlichtmaschinen.

**N.**

- Neumann. 21, 544 Gesetze der Induction.  
 Nevall. 122 Verbindungsstellen im magnet. Kreise.  
 Niaudet. 393 Abhandlung über Gleichstrommaschinen.  
 Niethammer. 143 Streufeld.  
 Nollet. 11 Wechselstrommaschine.

**O.**

- Oberbeck. 81 Quermagnetisirung.  
 Oerlikon. 402 Gleichstrommaschinen, 602 Wechselstrommaschinen, 624 Inductormaschinen, 663 Wechselstrommotoren, 708 Transformatoren.  
 Ohm. 25, 193 Gesetz des Stromes.  
 Owen und Skinner. 434 Versuche.  
 Oeking. 119 Dynamostahl.

**P.**

- Pacioti. 15, 16, 36, 42, 267 Ringanker, 19 Triebmasch., 20 Verhältniss der

- Triebmaschine zur Dynamomasch., 43, 260, 450 Scheibenanker, 292 Stromabgeber.
- Page. 10 Wechselstrommaschine, 19, 458, 516 Triebmaschine.
- Paget Higgs. 55 Compoundwicklung.
- Paris. 250, 289 Ankerwicklung, 725 Doppelmaschinen.
- Parker. 150, 152 Feldmagnete, 289 Anker, 406 Gleichstrommaschine, 441 Masch. für elektrolyt. Zwecke, 725 Doppelmaschinen.
- Parkhurst. 780 Fehler in Maschinen.
- Parshall. 230 Ankerwicklung.
- Parsons. 271 Scheibenanker, 304 Bürstenhalter, 607, 769 Wechselstrommaschinen.
- Paterson. 150 Feldmagnete, 268, 272 Anker, 407, 436 Phönix-Maschine, 441 Masch. für elektrolyt. Zwecke.
- Perry. 20 Regelung von Triebmaschinen, 53 Reihenschaltung in Verbindung mit Erregung durch Magnetomaschinen, 84 scheinbarer Widerstand, 249 Wickelung vielpoliger Trommeln, 260 Ankerwicklung, 485, 503 Triebmaschine, 491 Centrifugalregler, 723 Theorie der Umformer, 742 Arbeitsübertragung.
- Pescetto. 102 Abmessungen von Maschinen.
- Petrina. 8 Stromwender.
- Phillips. Siehe Johnson.
- Phönix. 436 Masch. für Bogenlicht.
- Picou. 498 Regelung von Triebmasch., 632 Ueber Kraftübertragung, 678 Theorie der Drehfeldmotoren.
- Pixii. 9 Wechselstrommaschine.
- Platt. 397 Manchester-Maschine.
- Plücker. 446 Unipolarmaschine.
- Pöge. 388 Gleichstrommaschine, 705 Transformatoren.
- Poele. Siehe Van de Poele.
- Poggendorf. 8 Stromwender (Quecksilber), 21 Theorie der Maschinen.
- Polechko. 453 Scheibenmaschine mit offener Wickelung.
- Poley. 163 Curve der Schwankungen der E. M. K.
- Pollak. 731 Umformer.
- Pollard. 753 Regulirung.
- Poncelet. 758 Bremsdynamometer.
- Preston. Siehe Tolver.
- Prony. 760, 763 Bremszaun.
- Puffer. 143 Magnetischer Kreis, 773 Schaltung von Maschinen.
- Pulvermacher. 9 Kerne aus Eisenblättern.
- Pyke und Harris. 621 Wechselstrommaschine.

**R.**

- Raffard. 760 Dynamometer.
- Ravenshaw. 313 Kugelschalenlager, 750 Regulator, 764 Maschinenprüfung.
- Raworth. 316 Kupplung.
- Rayleigh, Lord. 545 Wechselstromgesetze, 755, 764 Prüfung von Maschinen.
- Reagan. 428 Brush-Maschinen.
- Reber. 678 Theorie der Drehfeldmotoren.
- Rechniewski. 103 Abmessungen von Maschinen, 497 Curven von Triebmaschinen, 728 Umformer.
- Reckenzaun. 502 Triebmasch.
- Reignier. 742 Arbeitsübertragung, 750 Regulator.
- Rhodes. 23, 638 Theorie der Synchronmotoren.
- Richardson. 751 Regulator.
- Richter. 170 Darstellung d. Beziehungen zwischen  $E$  und  $e$ .
- Ritchie. 8, 9, 10 Wechselstrommasch., 19, 456 Triebmaschine, 109 magnet. Kreis, 695 Umsetzung.
- Rive. Siehe de la Rive.
- Robin. 451 Scheibenmaschine.
- Rössler. 713 Umformer.
- Roux. Siehe le Roux.
- Rowland. 109 Magnet. Durchlässigkeit.
- Rücker. 22 Theorie der Maschinen, 177 Güteverhältniss, 228 gemischte Wickelung.
- Ruhmkorff. 51 Selbsterregung m. zweiter Drahtwicklung, 695 Umsetzer.
- Rupp. 43, 451 Scheibenmaschine, 727 Umsetzung.
- Ryan. 18 Mittel gegen Funkenbildung, 23 Synchronmotoren, 91 Polform,

367 Hilfswickelungen, 712 Leistung der Umformer.

### S.

- Sahulka. 678 Theorie der Drehfeldmotoren.
- Sawyer. 11 Wechselstrommaschine, 151 Feldmagnete, 712 Umsetzungsapparate.
- Saxton. 8 Gleichstrommaschine, 450 Scheibenmaschine.
- Sayers. 51 Einrichtung zur Bürsterverschiebung, 371, 486 Ausgleichwicklung, 442 Masch. f. elektrolyt. Zwecke, 451 Scheibenmaschine, 508 Triebmaschine, 726 Fernleitungsdynamomaschinen.
- Schröter. 761 Dynamometer.
- Schuckert. 17 Vielpoliger Ring, 274, 384 Anker, 390 Gleichstrommasch., 345 Flachringmaschine, 608 Wechselstrommaschinen, 610 Schwungradmaschine, 731 Gleichstr.-Wechselstr.-Umformer, 699 Umformer.
- Schultze. 81 Quermagnetisierung.
- Schwartzkopff. 582 Wechselstrommaschinen, 624 Inductormaschinen.
- Scott. 250 Vielpolige Trommeln, 553 Wechselstrommaschine, 725 Doppelmaschinen.
- Sellers. 312 Abhandlung, 314 Schmierung.
- Sellon. 384 Flachringmaschine, 728 Umsetzer.
- Siemens, Alexand. 197 Nebenschlussmaschine.
- Siemens, Sir C. W. 182, 197 Nebenschlussmaschine.
- Siemens, Werner. 11, 33 Doppelt „T“-Anker, 13 Selbsterregung, 16 Nebenschlusswicklung, 17 Maschine mit schwingender Bewegung, 42 Trommelanker, 43, 556 Scheibenanker, 81 Quermagnetisierung, 148, 150 Feldmagnete, 244, 283 Ankerwicklung, 298 Maschine ohne Stromabgeber, 440 Elektrolyt. Maschinen, 344 Abmessungen der Kernscheiben, 447 Unipolarmaschine, 464 Gesetz f. d. Wirkungsgrad von Triebmasch., 480 Triebmaschine, 516 Bohrmaschine, 522 Wechselstrommaschine.
- Siemens Brs. 408 Gleichstrommaschine, 437 Bogenlichtmaschine.
- Siemens & Halske. 18 Vielpolige Masch., 152 Feldmagnete, 257 vielpolige Ringankermaschine, 283 Trommelanker, 410 Gleichstrommaschine, 440 Masch. z. Metallausscheidung, 513 Kleinmotoren, 611 Wechselstrommasch., 666 Wechselstrommotoren, 704 Transformatoren.
- Sinsteden. 10 Selbsterregung.
- Skinner. Siehe Owen.
- Smee. 457 Triebmaschine.
- Smith, F. J. 174 Bestimmung des Wirkungsgrades von Maschinen, 491 761 Dynamometer.
- Smith, Holroyd. 300, 489 Bürste für Umkehrung der Umlaufsrichtung.
- Smith, Willoughby. 447 Homopolarmaschine.
- Snell. 362 Leistungscoefficienten, 485 Regeln zur Bestimmung der Leistung von Triebmaschinen, 458 Triebmasch.
- Sperry. 436 Maschine mit offener Wicklung, 750 Regulator.
- Spottiswoode. 542 Wechselströme von sehr hoher Periode.
- Sprague. 150 Feldmagnete, 492, 503 Triebmaschine.
- Stafford. 441 Maschine für elektrolyt. Zwecke.
- Stanley. 20, 680 Zweiphasen-Motor, 717, 770 Umsetzung.
- Stansfield. 142 Prüfungsmethode.
- Statter. 436 Bogenlichtmaschine, 750 Regulator.
- Steinmetz. 23, 638 Theorie d. Dynamomaschinen, 127 Energieverlust durch Hysteresis, 638, 679 Theorie d. Wechselstrommotoren, 712 Umformer.
- Stevenson. 457 Triebmaschinen.
- Stöhrer. 9 Sechspolige Maschine, 450 Scheibenmaschine.
- Storch. 103 Abmessungen von Masch.

Stromberg. 81 Entmagnetisierende Wirkung des Ankerstroms.  
 Sturgeon. 9 Stromwender, 33 Ankerwicklung, 109 magnet. Kreis, 456 Scheibenmaschine.  
 Sumner. 713 Umformer.  
 Swan. 55 Compound-Wicklung.  
 Swinburne. 55 Compound-Wicklung, 62 Ermittlung der elektromotorischen Kraft, 80, 83 Ausgleich der Gegenwirkung im Anker, 287 Ankerwicklung, 271 Kernscheiben mit Durchbohrungen, 358 Interferenz, 365 Hilfswicklung, 370 Sehnenwicklung, 568 Untersuchung an Wechselstrommaschinen, 699 Umsetzer, 724 Schaltungen für Doppelmaschinen, 764 Maschinenprüfung.

**T.**

Tatham. 761 Dynamometer.  
 Tesla. 20 Umlauf einer Wechselstrom-Triebmaschine, 542 Wechselströme von sehr hoher Periode, 651, 683 zweiphasige Motoren, 730 Umformer.  
 Thompson, M. E. 66, 367 Untersuchung von Maschinen, 434 Potentialcurven.  
 Thompson, S. P. 55 Reihenschaltung mit langem Nebenschluss, 61 Methode zur Ermittlung der elektromotorischen Kraft, 89 Wirbelströme in den Polstücken, 112 Linien-Integral der magnet. Kräfte, 147 magnetische Streuung, 152 Feldmagnete, 367 Hilfswicklung, 451 Scheibenanker, 642 Mehrphasenströme, 779 Fehler in Maschinen.  
 Thomson, E. 16 Maschine mit offener Wicklung, 83 Ausgleich der Gegenwirkung im Anker, 150 Feldmagnete, 365 besondere Wicklung, 367 Hilfspole, 561, 681 Untersuchung über Wechselstrommaschinen, 728 Umsetzung, 736 Arbeitsübertragung, 752 Dynamometer.  
 Thomson, James. 759 Bremsdynamometer.

Thomson, J. J. 122 Verbindungsstellen im magnet. Kreise, 549 Oberflächenwirkung.

Thomson, Sir W. (Lord Kelvin). 18 Wechselstrommasch., 22, Theorie der Masch., 109 Abhandlungen über Magnetismus, 307 gyrostatische Thätigkeit des Ankers, 353 Radmaschine, 448 Theorie der Unipolarmaschine, 465 Untersuchungen über Triebmaschinen, 568 Wellenwicklung, 742 Arbeitsübertragung.

Thomson-Houston. 16, 143, 428 Maschine mit offener Wicklung, 151 Feldmagnete, 298 Bürsten, 467 Untersuchungen über Triebmasch., 565 Wechselstrommaschinen, 714 Umformer, 750 Regulator.

Thurston. 428 Versuche.

Thury. 152 Feldmagnete, 254 Wellenwicklung, 449 Homopolarmaschine, 748, 749 Regulator.

Tighe. Siehe Mc Tighe.

Timmermann. 352 Ausstrahlungsfläche.

Tolver Preston. 449 Homopolarmasch.

Trotter. 298 Bürsten, 500 Regelung von Stromerzeugern, 746, 750 Regulator.

Tweter. 143 Magnet. Zerstreung.

Tyndall. 457 Triebmaschine.

**U.**

Union. 413 Gleichstrommaschine, 613 Wechselstrommaschine, 668 Wechselstrommotor, 705 Transformatoren, 733 Gleichstrom-Wechselstrom-Umformer.

Uppenborn. 228 Gemischte Wicklung 448 Beschreibung von Unipolarmasch.

Upton. 391 Dynamomaschine.

**V.**

Van de Poole. 151 Feldmagnete, 516 Bohrmaschine.

Van Melderden. 11 Wechselstrommasch.

Van Nostrand. 780 Fehler in Masch.

Varley. 13, 55 Selbsterregende Masch.; 163 Curve d. Schwankungen d. E. M. K., 446 Unipolarmaschine, 695 Umsetzer.

Vaschy. 719 Theorie der Umformer.  
 Vincent. 17 Vielpoliger Trommelanker.  
 Voice. 448 Homopolarmaschine.

### W.

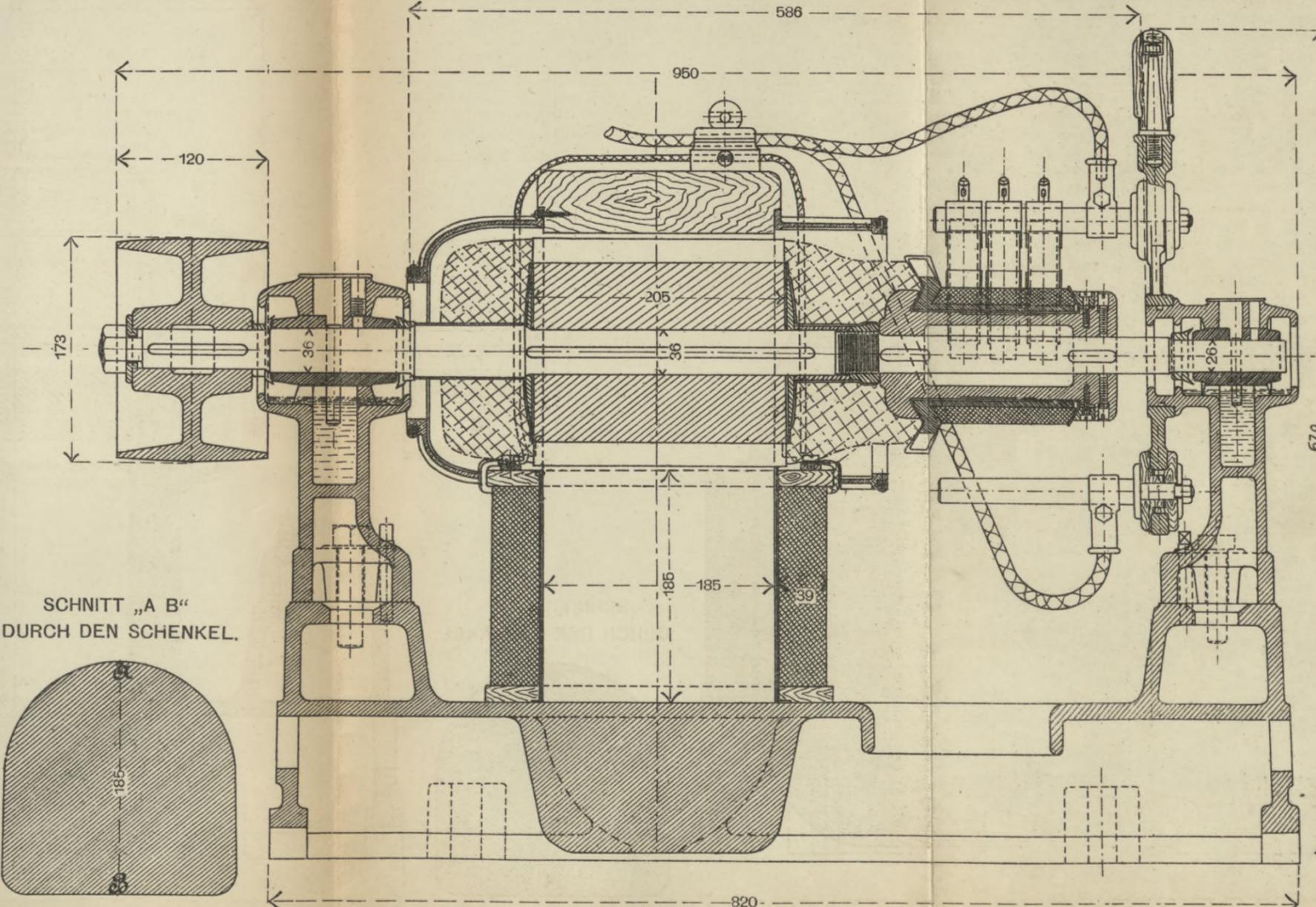
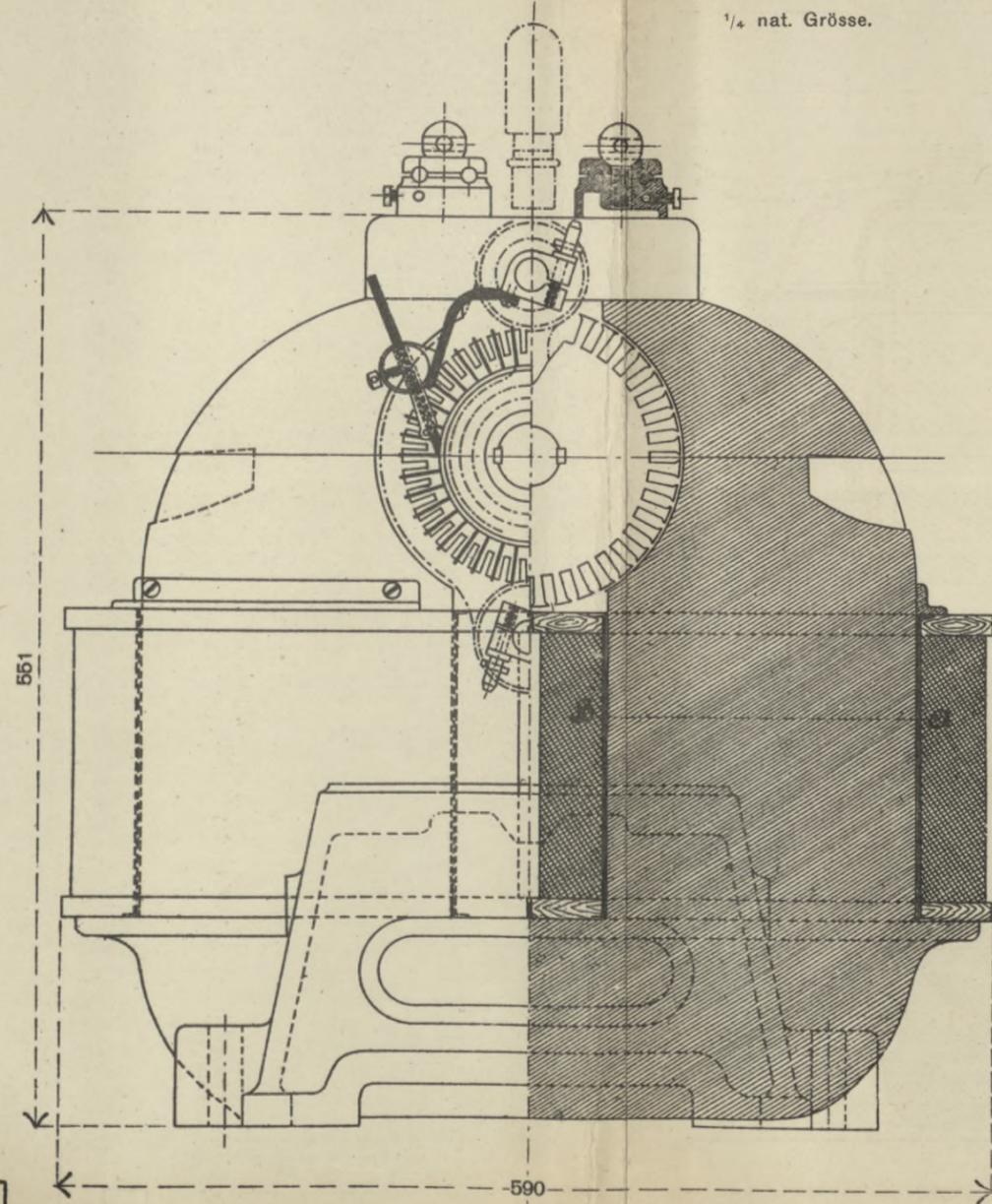
Walenn. 20 Verhältniss der Triebmasch. zur Dynamomaschine.  
 Waltenhofen. 21 Theorie der Maschinen.  
 Waterhouse. 750 Regulator.  
 Watkins. 8 Wechselstrommaschine.  
 Watson. 499 Regelung von Triebmasch.  
 Webber. 725 Doppelmaschinen.  
 Weber. 21, 446 Gesetze d. Induction, 449 Homopolarmasch., 545 Selbstinduction.  
 Weber, H. F. 744 Arbeitsübertragung.  
 Wedding. 143 Magnetischer Kreis, 712 Umformer.  
 Weekes. 713 Umformer.  
 Weisbach. 759 Regulatoren.  
 Wenström. 151 Feldmagnete, 271 durchbohrte Kernscheiben.  
 Westinghouse. 152 Feldmagnete, 305 Bürsten u. Stromabgeber für Wechselstrommaschinen, 515 Strassenbahnmotor, 555, 572, 616, 634, 697 Wechselstrommaschinen, 716 Umsetzer.  
 Weston. 16 Maschinenform, 42 Trommel- und Polanker, 150 Feldmagnete, 313 Lager, 440 Maschine für Nickelniederschlag.  
 Wetzler. Siehe Martin.  
 Weymouth. 230 Ankerwicklung.  
 Wheatstone. 9 Gleichstrommaschine, 10 Elektromagnete in Maschinen, 14 Selbsterregung, 19 Triebmasch.  
 Wheeler. 773 Schaltung von Masch., siehe auch Crocker.  
 Wiener. 143 Magnetische Zerstreung, 343 Berechnung einer Maschine, 345 Statistik.  
 Wilde. 11, 12, 522, 552 Wechselstrommaschine, 17 Maschine mit schwingender Bewegung, 43, 556 Scheibenanker, 47 besonders erregte Maschine, 148, 152, 153 Feldmagnete, 440 Maschinen für Metallausscheidung, 586 Feldmagnetf. Wechselstrommasch.  
 Willans. 751 Regulator.  
 Wilson. 133 Magnetische Verzögerung.  
 Wodicka. 243 Ringwicklung.  
 Wood. 436 Maschine mit offener Wicklung.  
 Woolrich. 9 Vielpolige Maschine, 440 Metallausscheidung.  
 Wynne. 384 Flachringmaschine.

### Z.

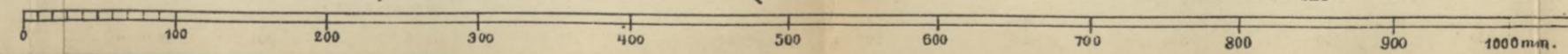
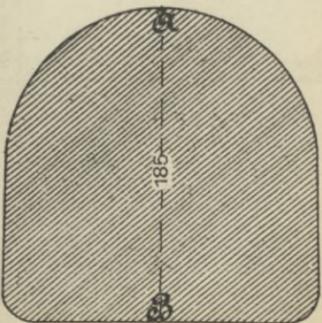
Zickler. 228 Gemischte Wicklung.  
 Zipernowsky. 591, 696 Wechselstrommaschine, 675 Umsetzung.

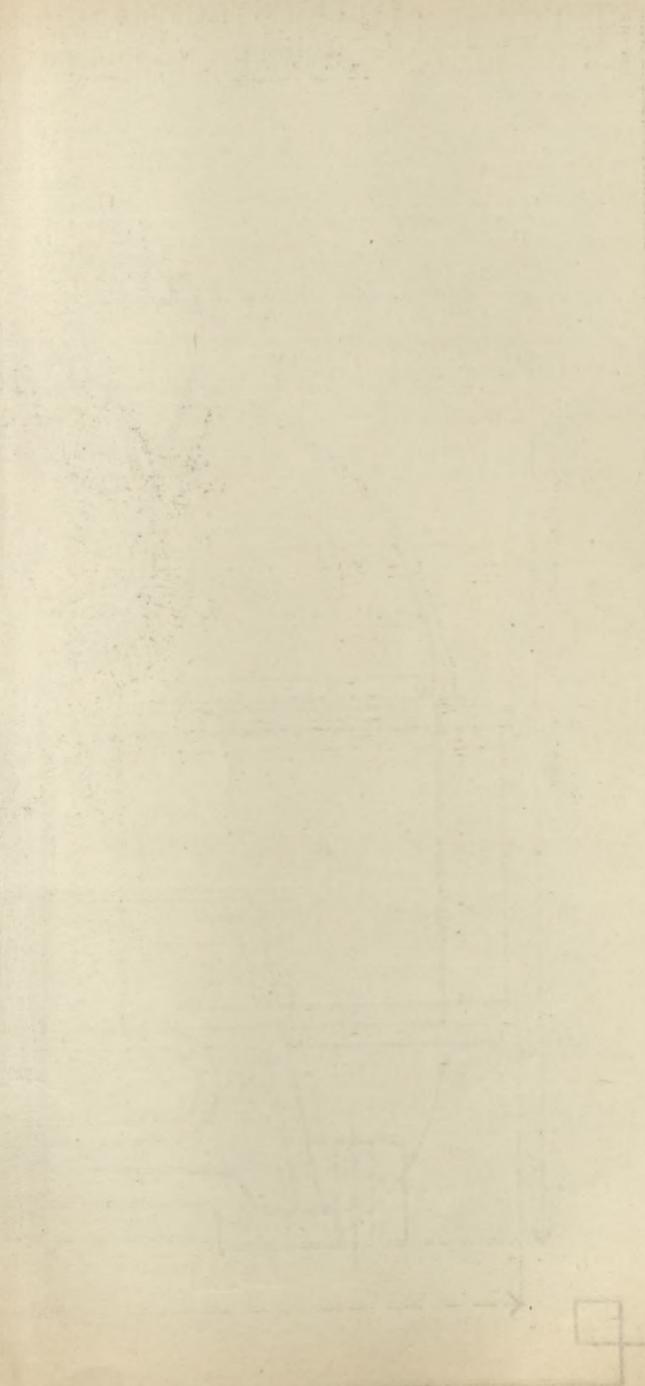
GLEICHSTROMMASCHINE VON SIEMENS & HALSKE AKTIEN-GESELLSCHAFT  
 MODELL L H 5 FÜR 110 VOLT UND 50 AMPÈRE BEI 1320 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.

1/4 nat. Grösse.



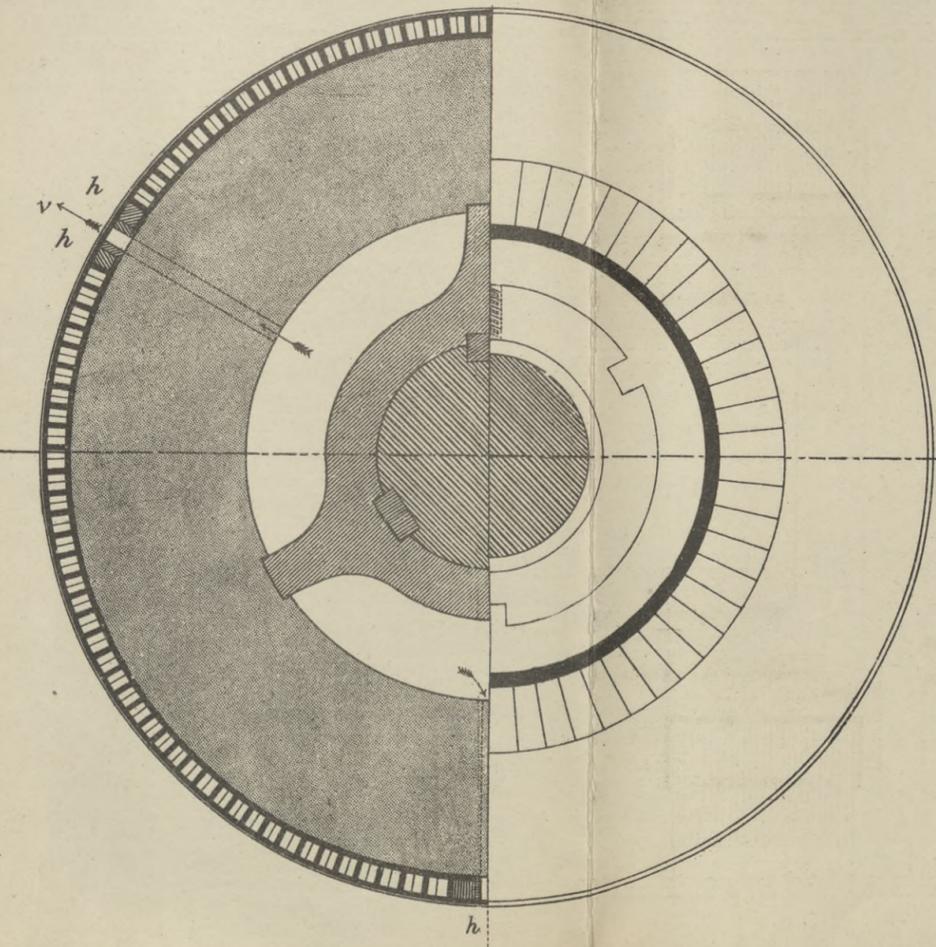
SCHNITT „A B“  
 DURCH DEN SCHENKEL.



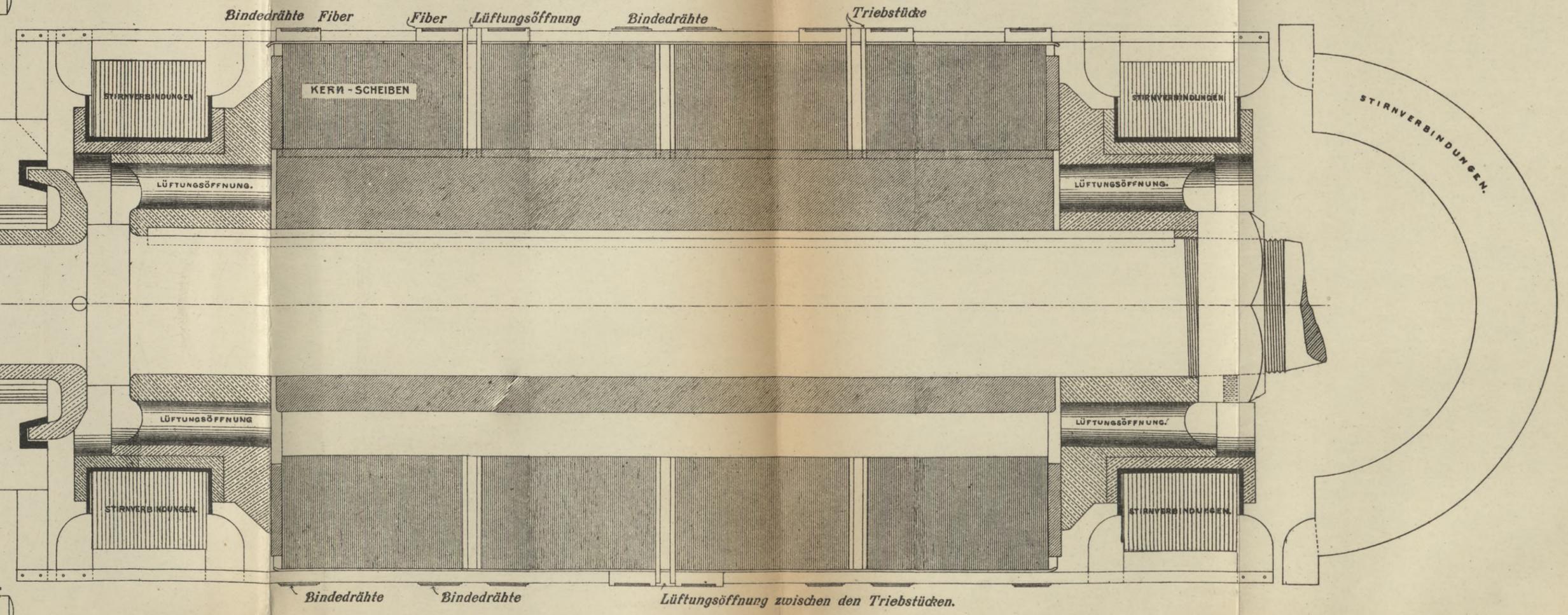
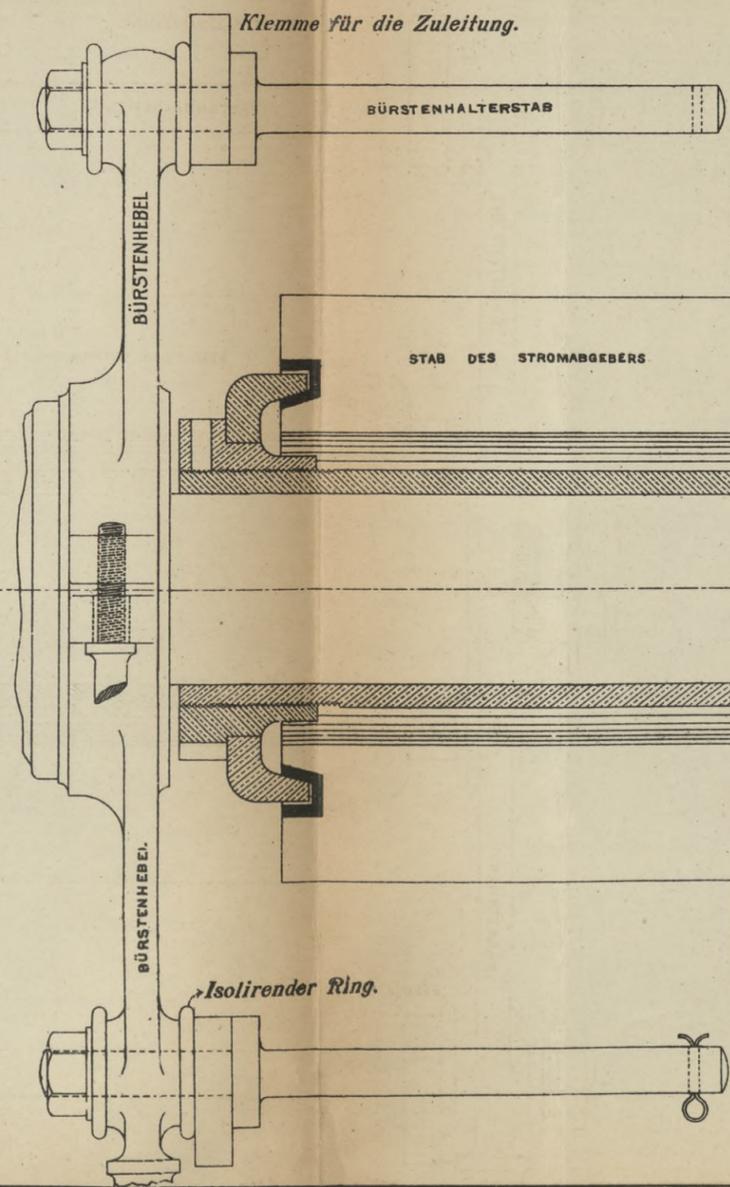


ANKER EINER 2-POLIGEN TROMMELMASCHINE  
FÜR 200 AMPÈRE UND 105 VOLT  
BEI 780 UMLÄUFEN IN DER MINUTE.

Entworfen von Gisbert Kapp.  
Erbaut von Johnson & Phillips.



QUERSCHNITT. HALBE GRÖSSE. - ENDANSICHT DES STROMABGEBERS.



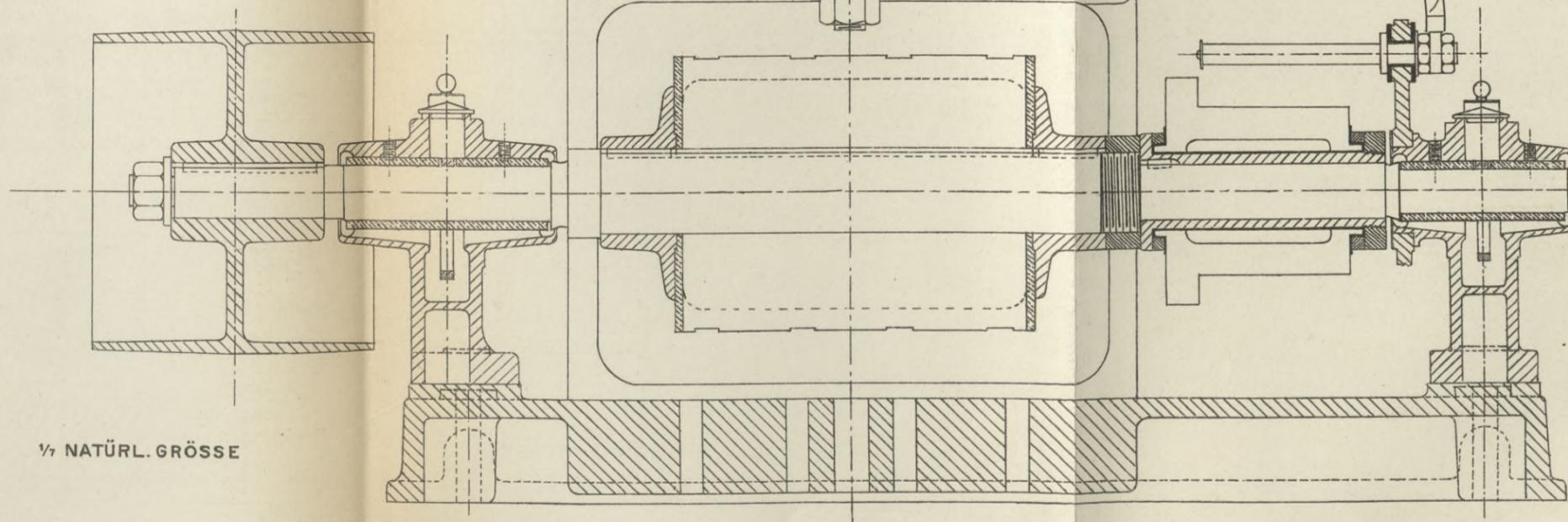
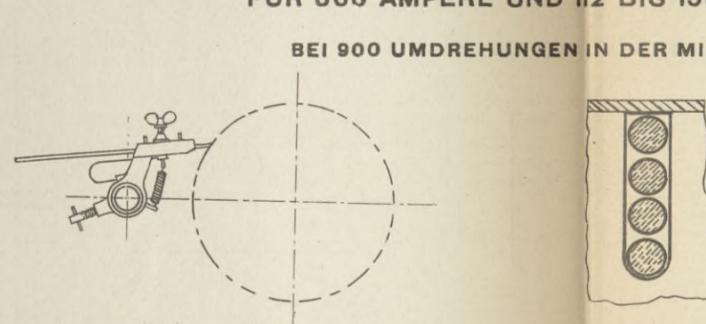
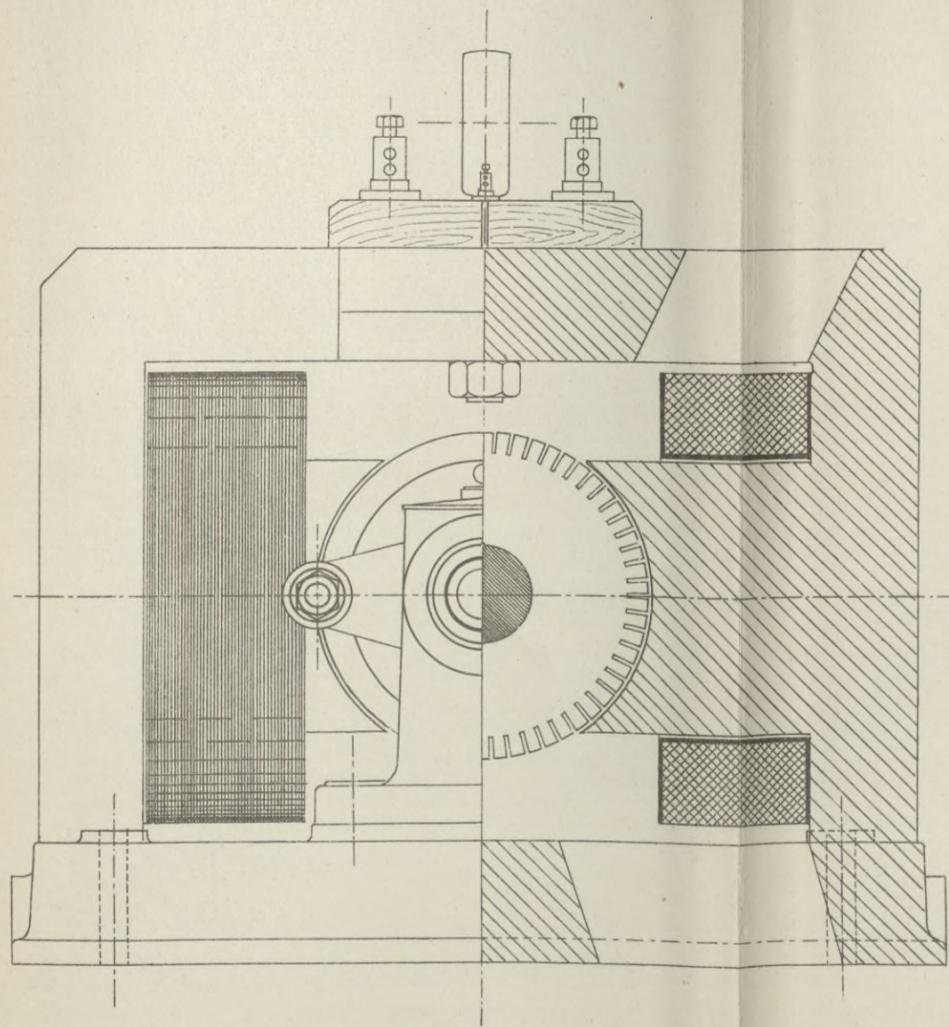
LÄNGSSCHNITT. HALBE GRÖSSE.



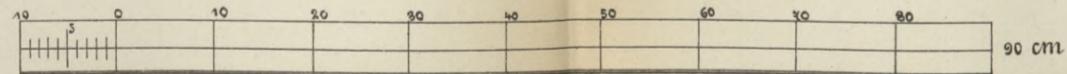
# GLEICHSTROMMASCHINE, MODELL GVII, DER DEUTSCHEN ELEKTRICITÄTS-WERKE ZU AACHEN.

FÜR 300 AMPERE UND 112 BIS 150 VOLT

BEI 900 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.



1/2 NATÜRL. GRÖSSE





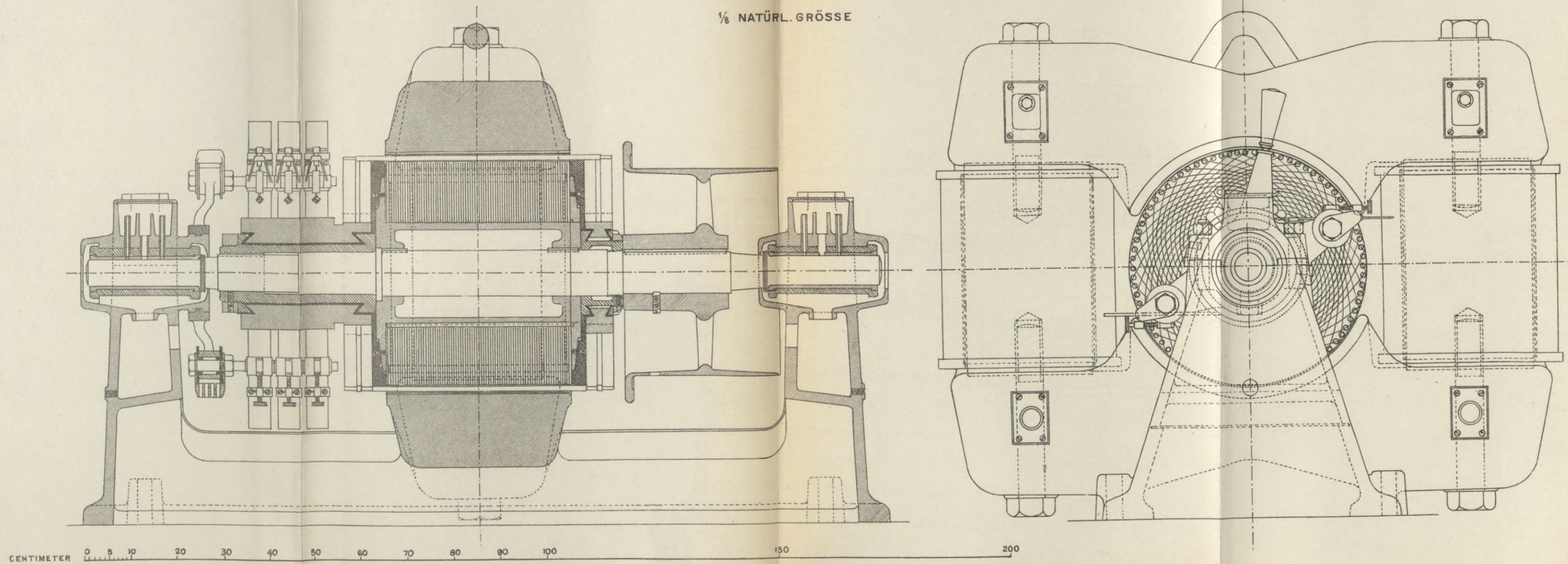
MASCHINE FÜR 38 P; 400 AMPÈRE BEI 70 VOLT.

400 UMLÄUFE IN DER MINUTE.

Entworfen von C. E. L. Brown.

Erbaut in der Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich.

1/8 NATÜRL. GRÖSSE

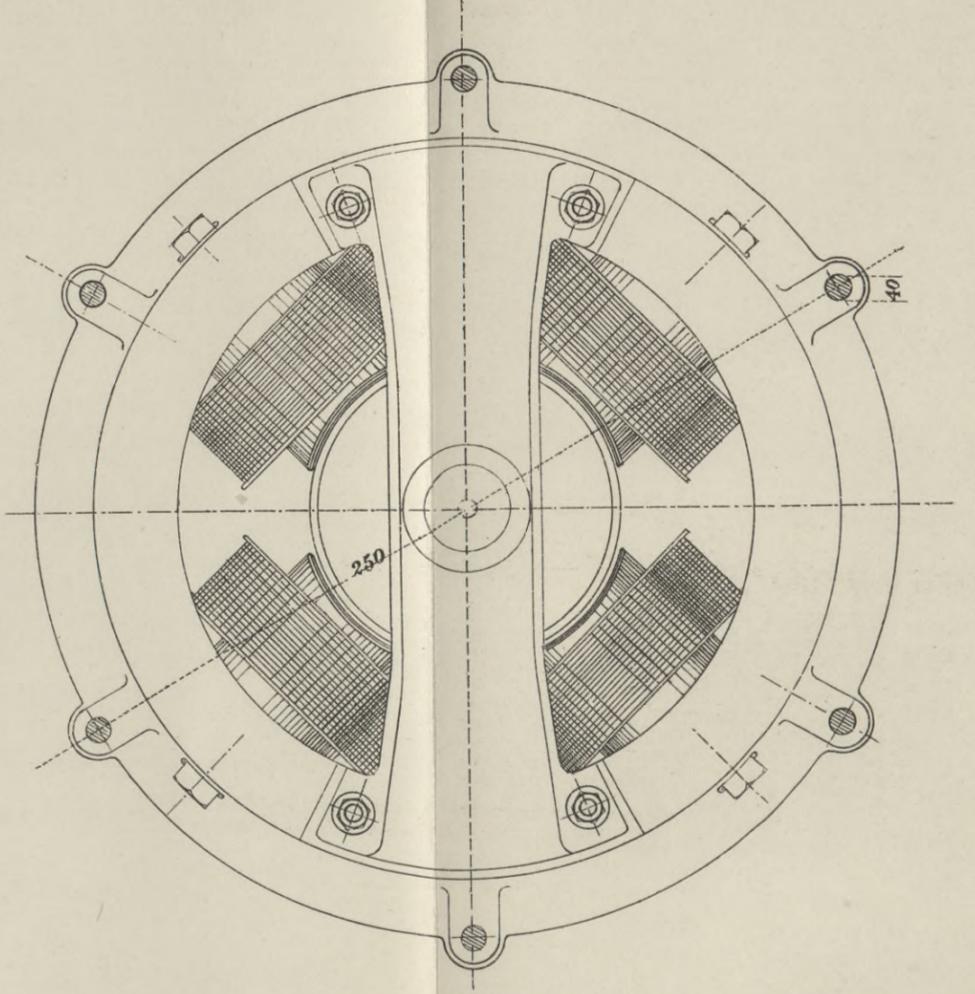
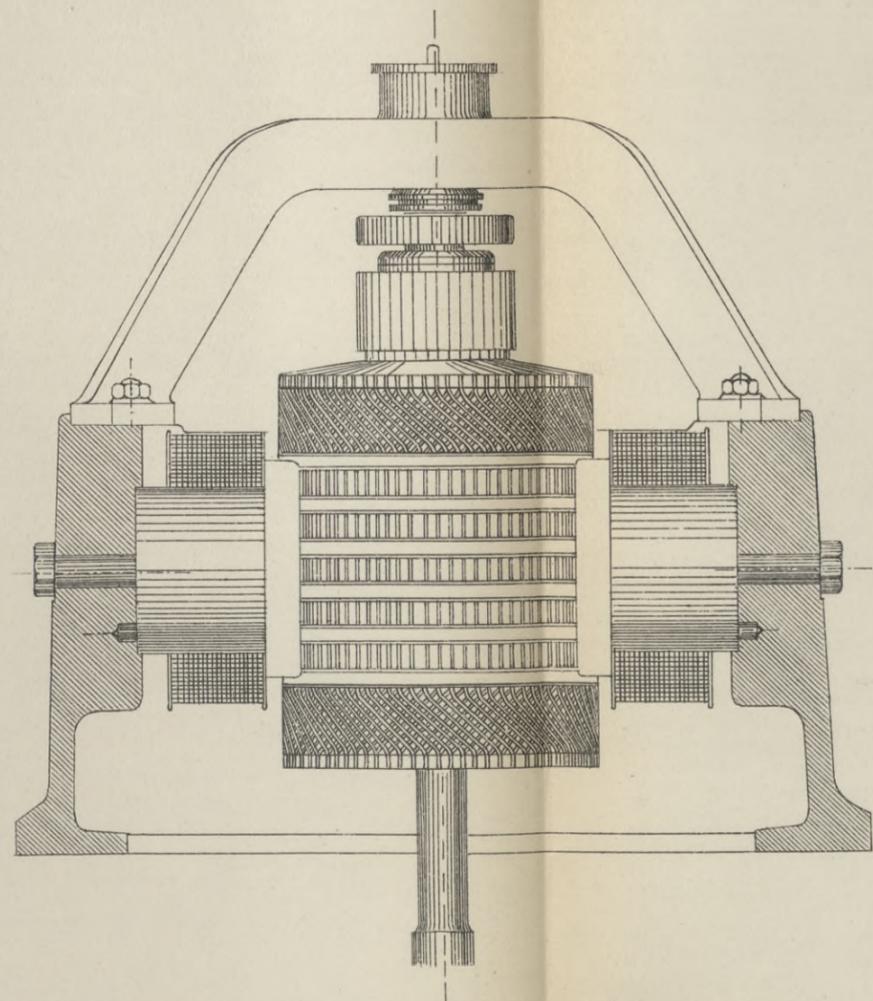
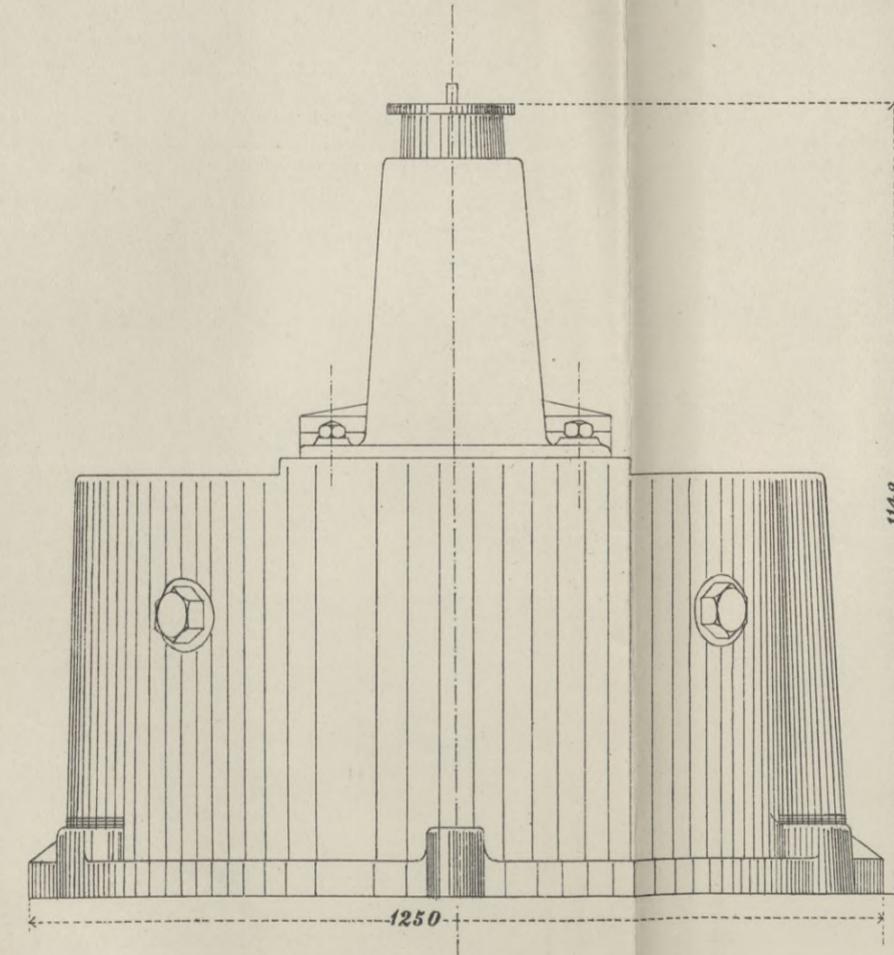




### VIERPOLIGE GLEICHSTROMMASCHINE MIT SENKRECHTER ACHSE.

30 P BEI 300 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE. 200 AMPERE, 80 VOLT.

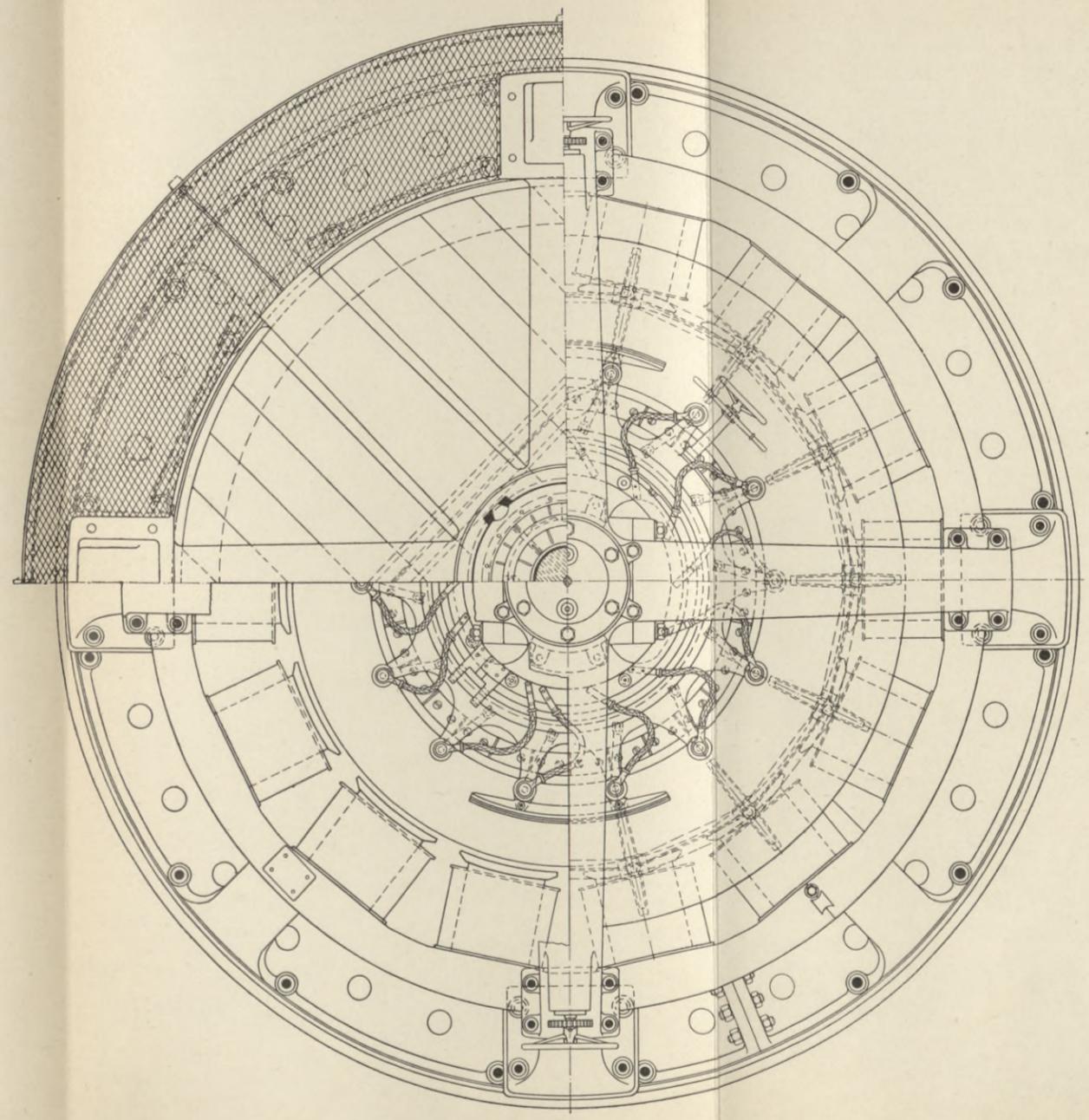
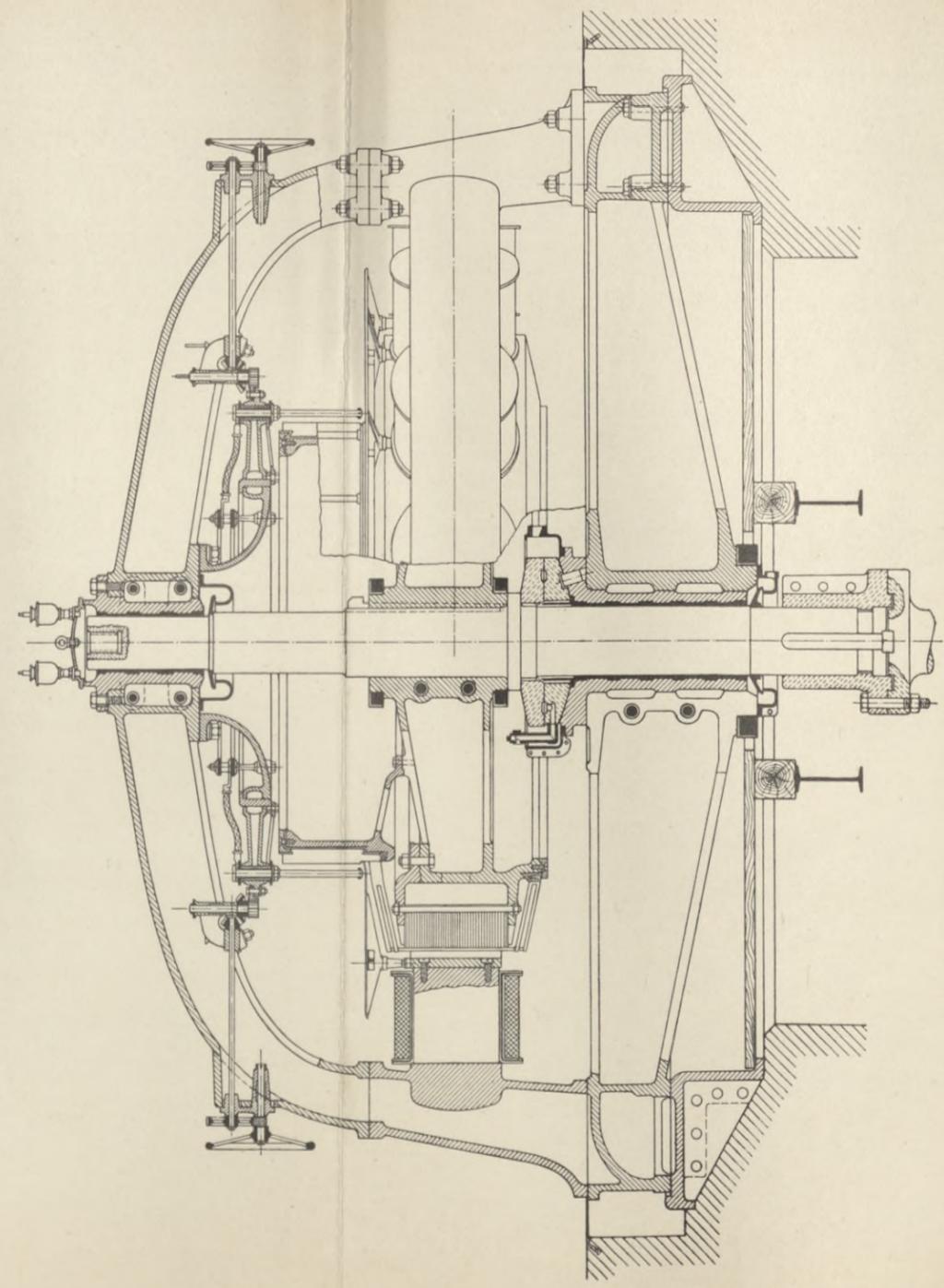
Entworfen von C. E. L. Brown für die Turbinenanlage in Aarau.



1/10 DER NATÜRLICHEN GRÖSSE. MAASSE IN MILLIMETERN.



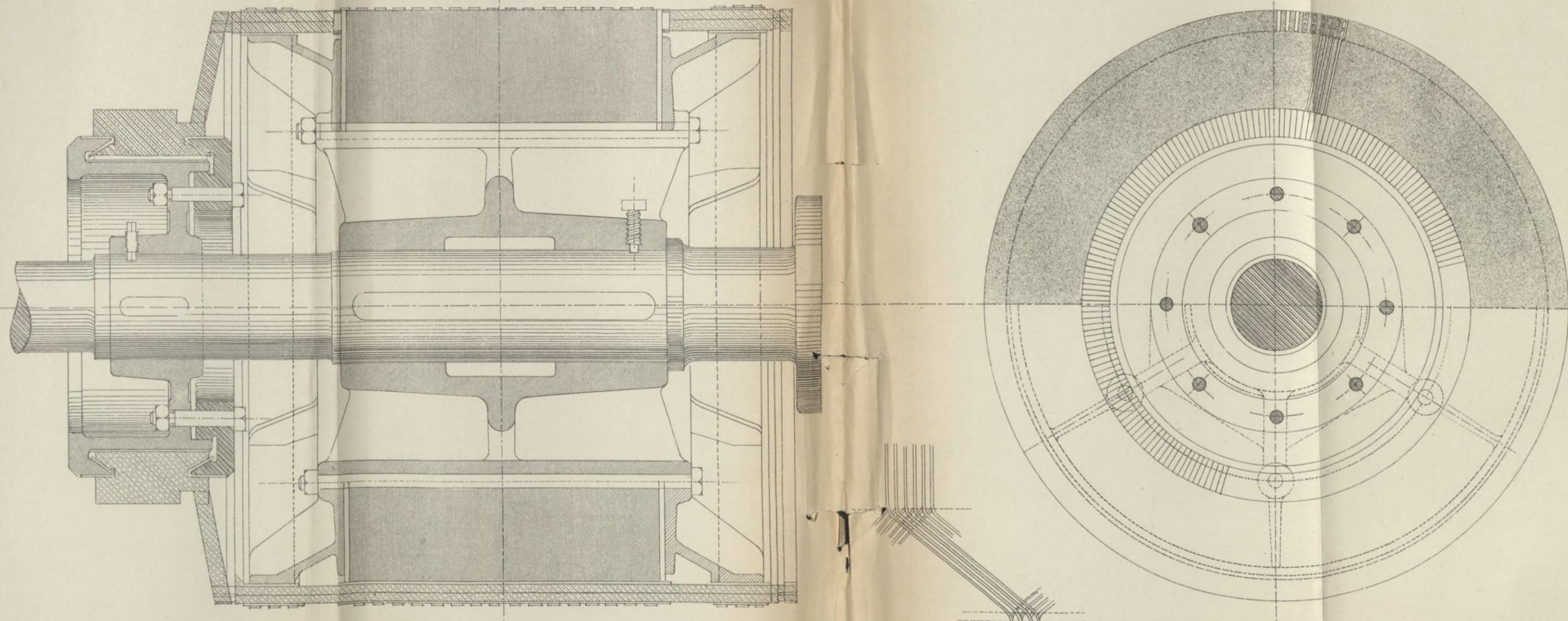
**VIELPOLIGE GLEICHSTROMMASCHINE MIT SENKRECHTER AXE  
DER ALLGEMEINEN ELEKTRICITÄTS-GESELLSCHAFT IN BERLIN,  
MODELL R F 7200 FÜR 130 BIS 140 VOLT UND 4300 AMPERE BEI 68 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.**





# TROMMELANKER.

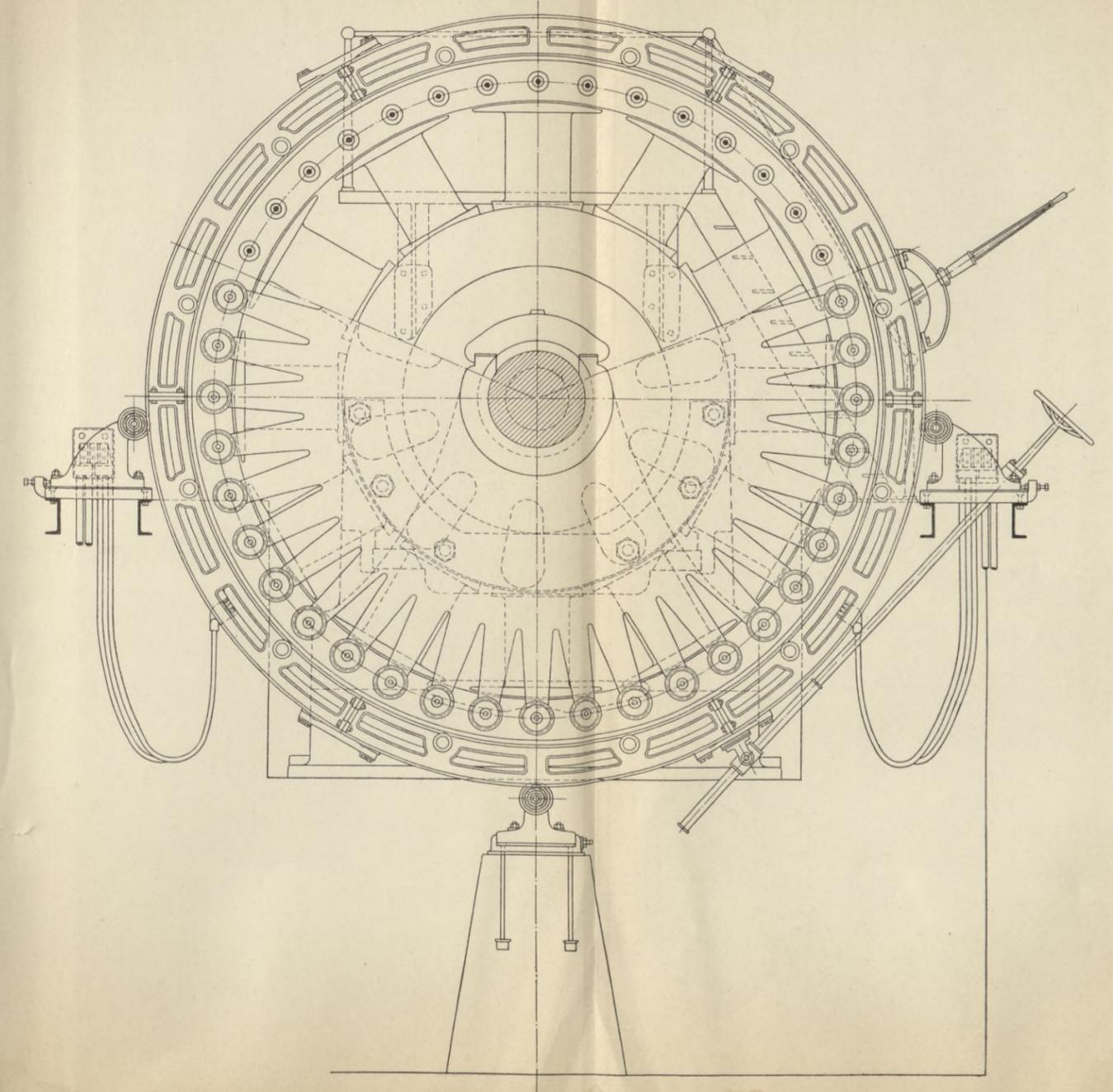
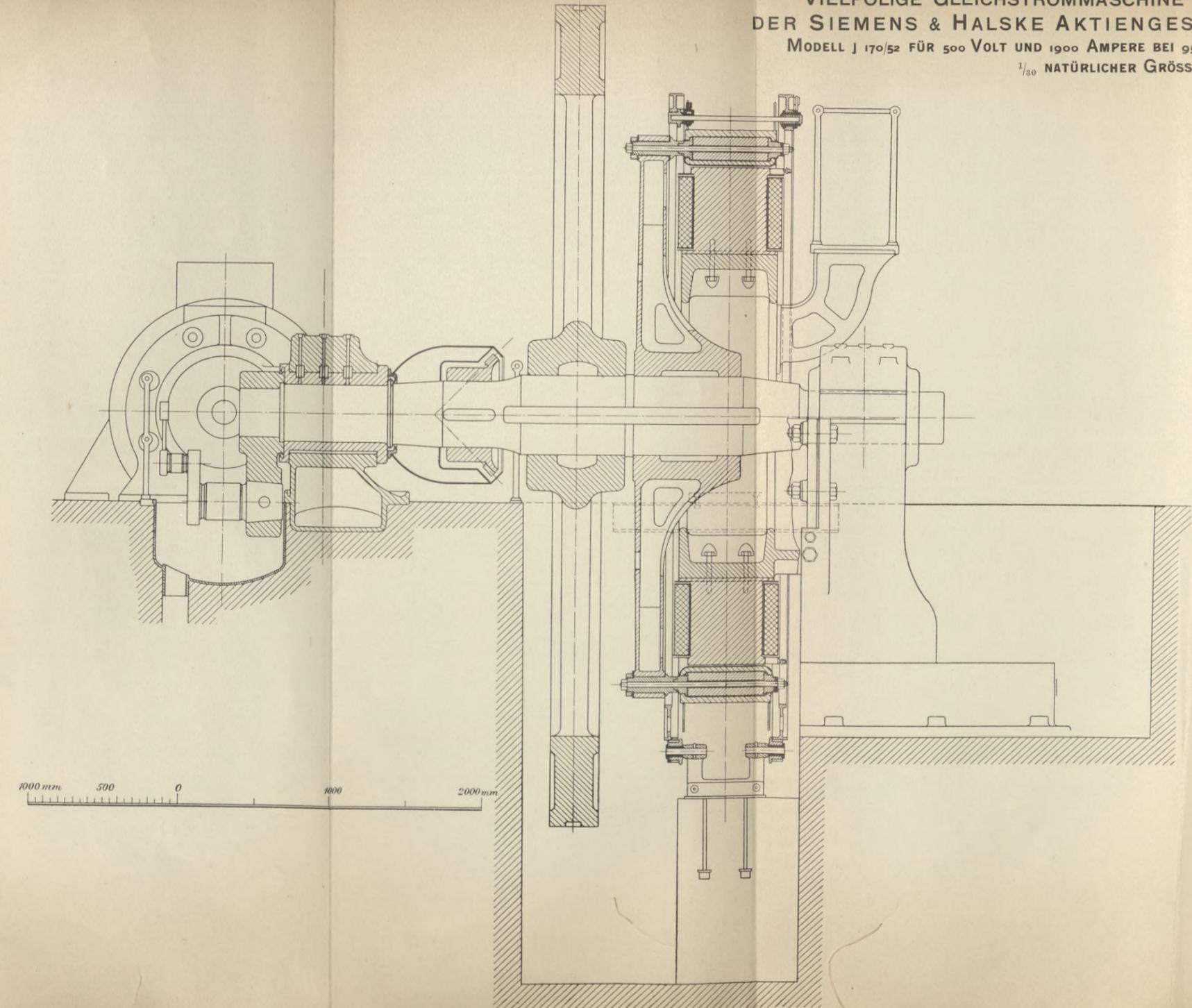
Entworfen von C. E. L. Brown



1/6 DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.



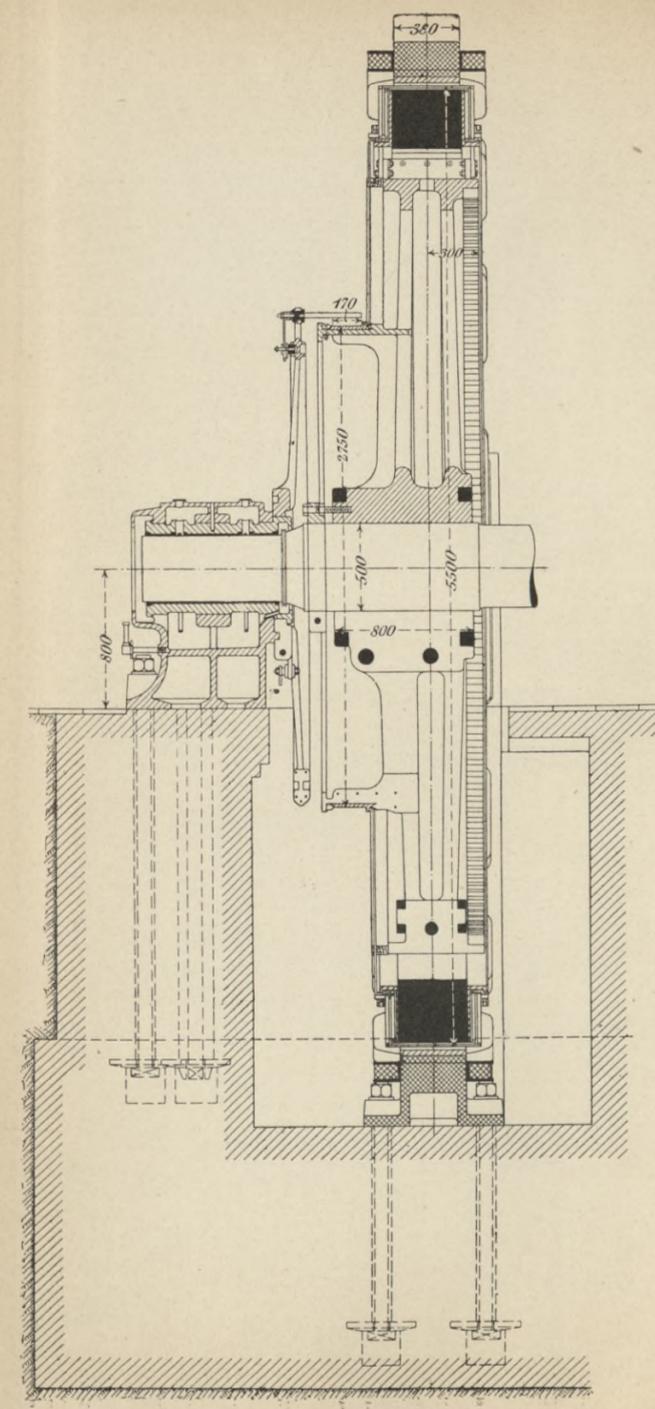
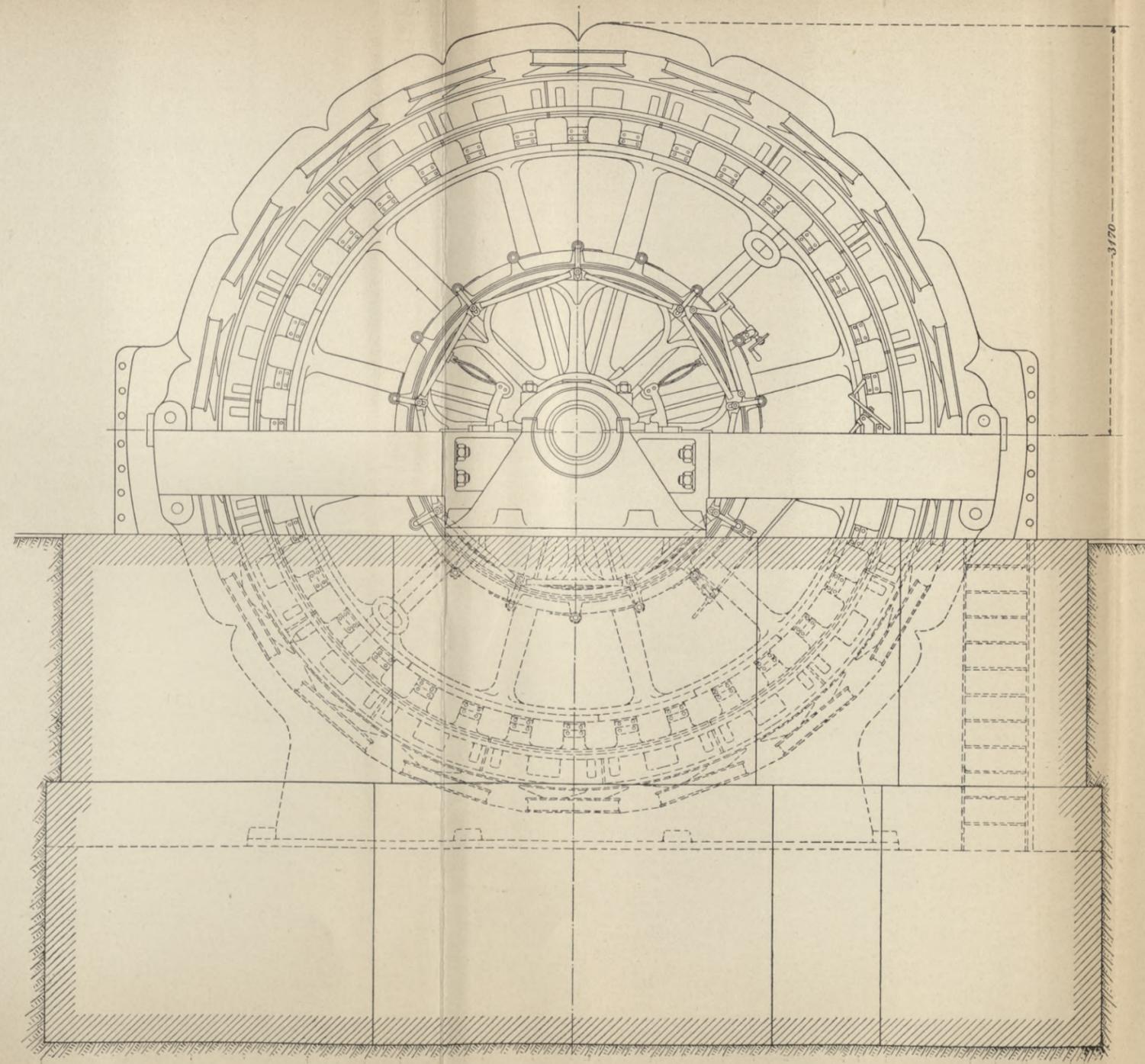
VIELPOLIGE GLEICHSTROMMASCHINE (INNENPOLMASCHINE)  
DER SIEMENS & HALSKE AKTIENGESELLSCHAFT IN BERLIN,  
MODELL J 170/52 FÜR 500 VOLT UND 1900 AMPERE BEI 95 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.  
 $\frac{1}{30}$  NATÜRLICHER GRÖSSE.



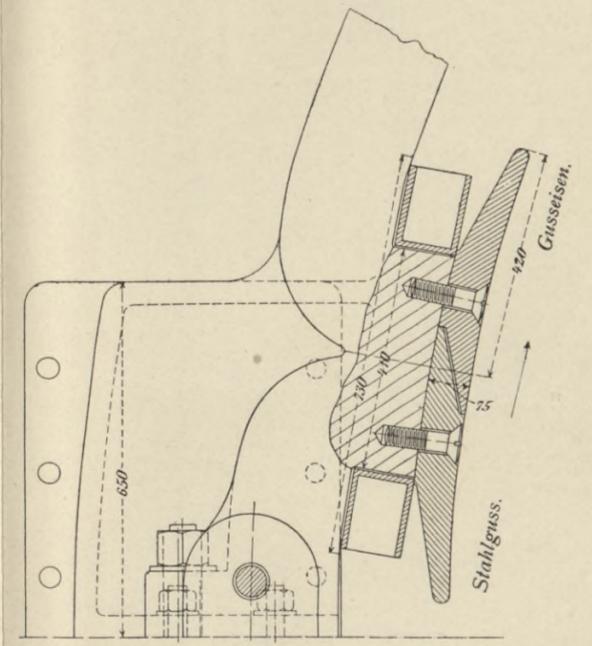


DIRECT GEKUPPELTE VIELPOLIGE GLEICHSTROMMASCHINE  
DER AKTIEN-GESELLSCHAFT ELEKTRICITÄTSWERKE (FORM. O. L. KUMMER & CO.)  
IN DRESDEN UND NIEDERSEDLITZ.

MODELL ZETA V FÜR 680 BIS 800 KILOWATT BEI 570 VOLT UND 90 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.  
 $\frac{1}{40}$  DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.



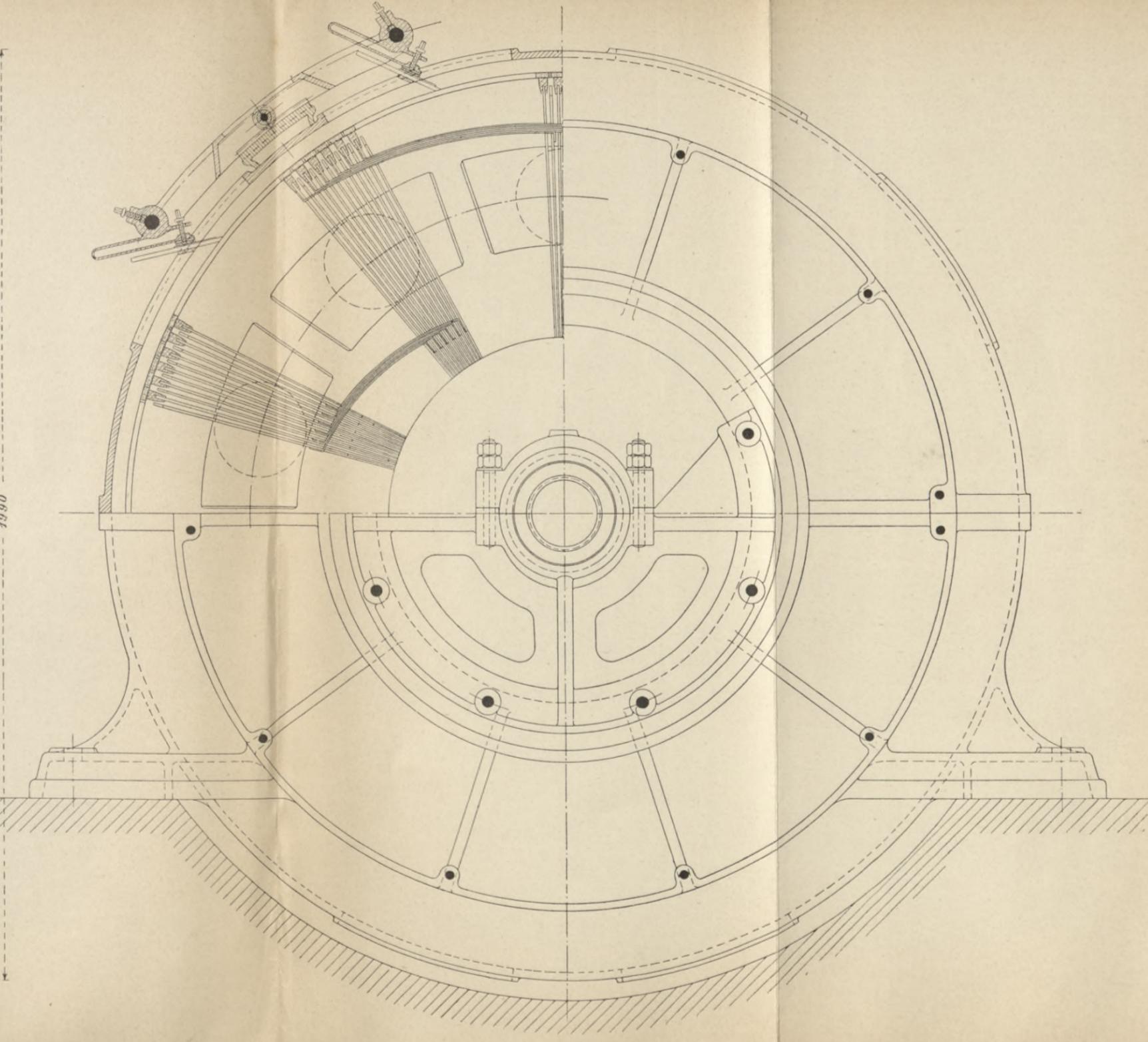
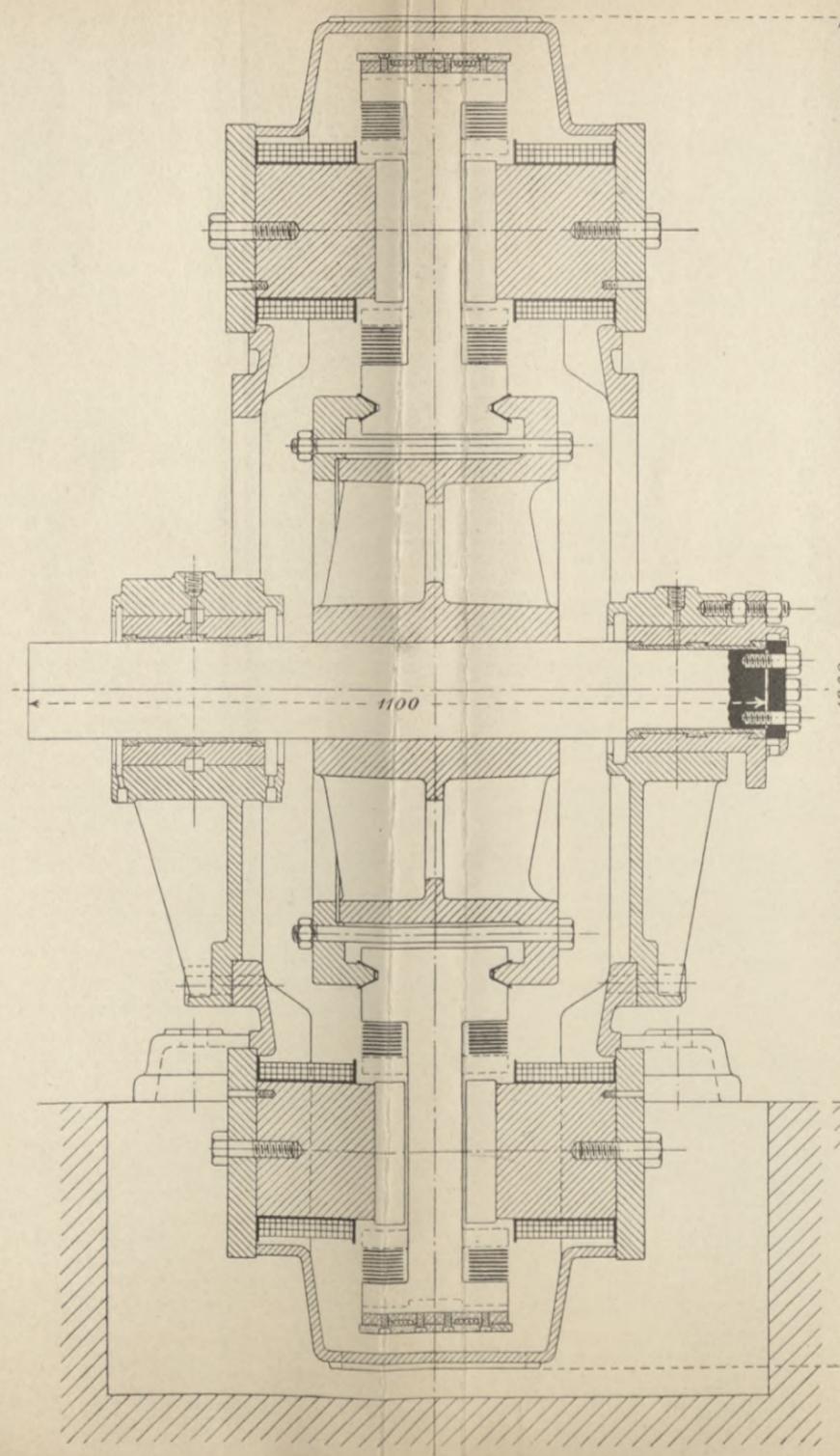
ANORDNUNG DER POLSCHUHE.  
 $\frac{1}{12}$  DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.





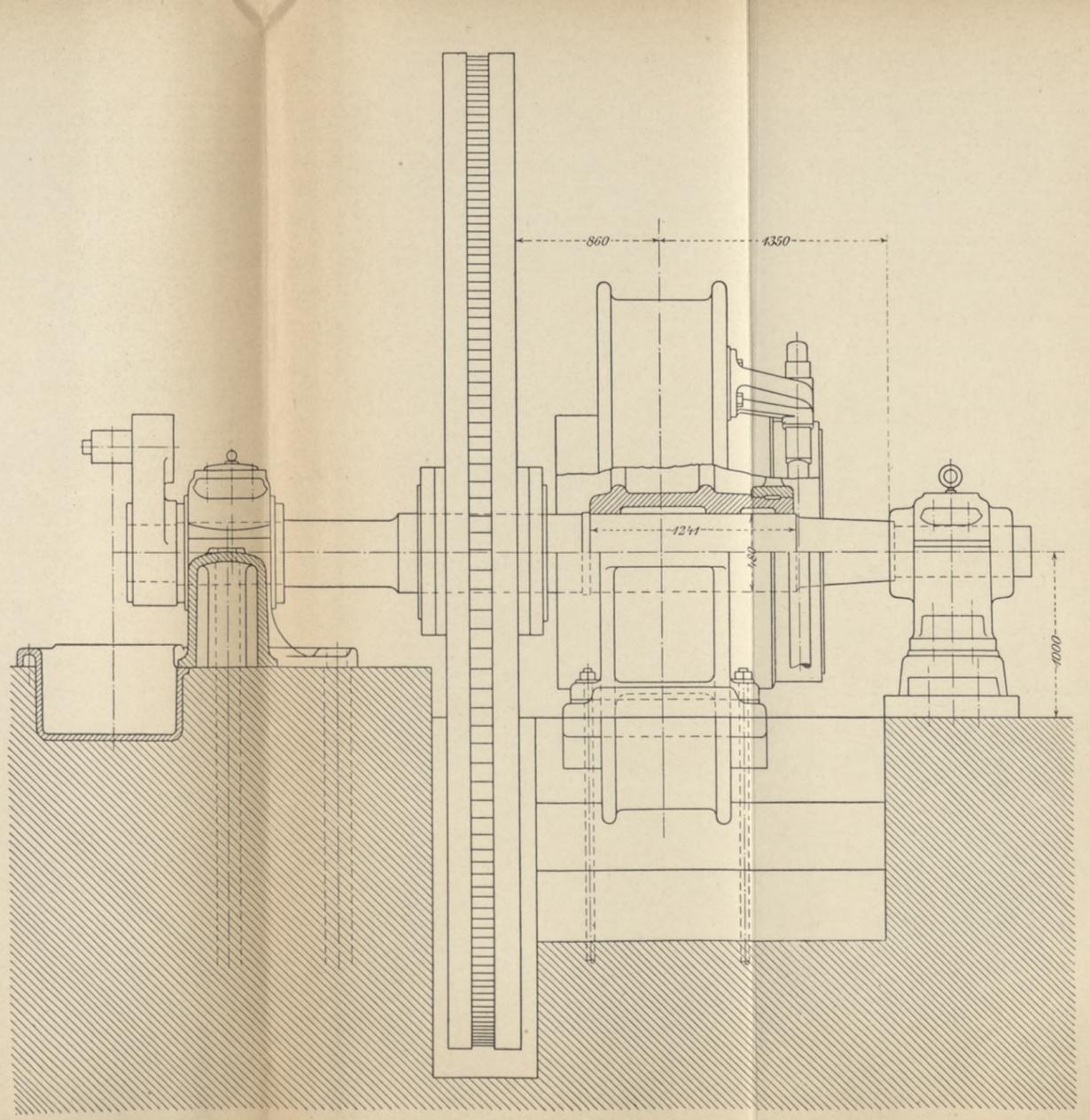
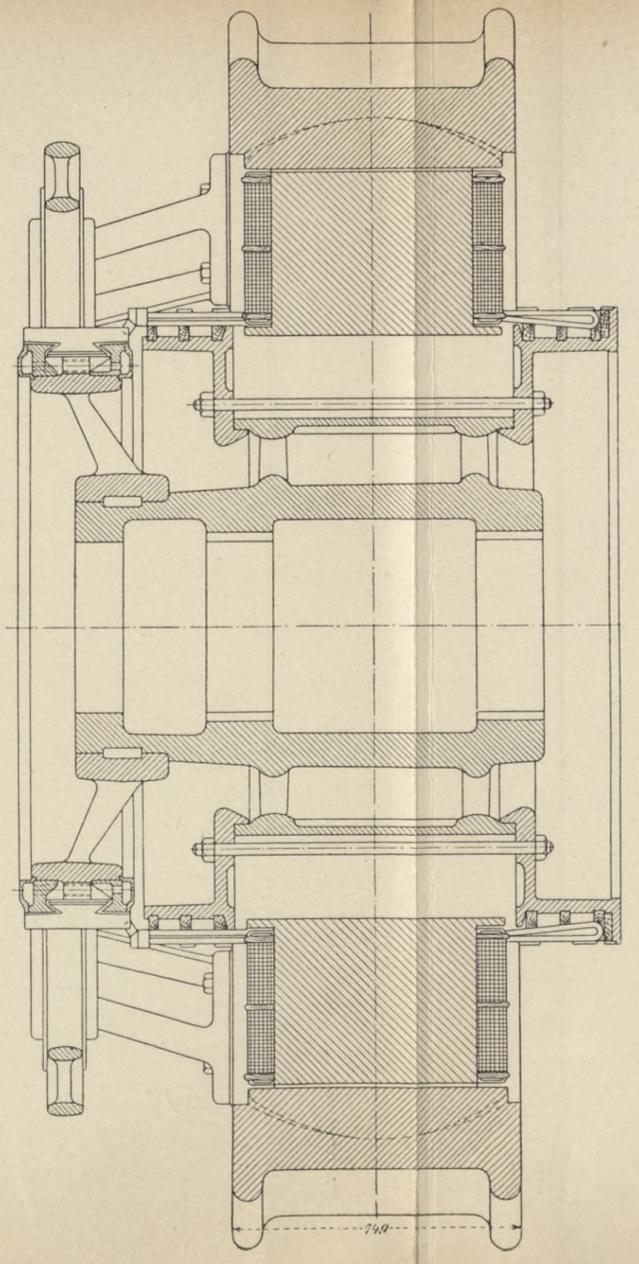
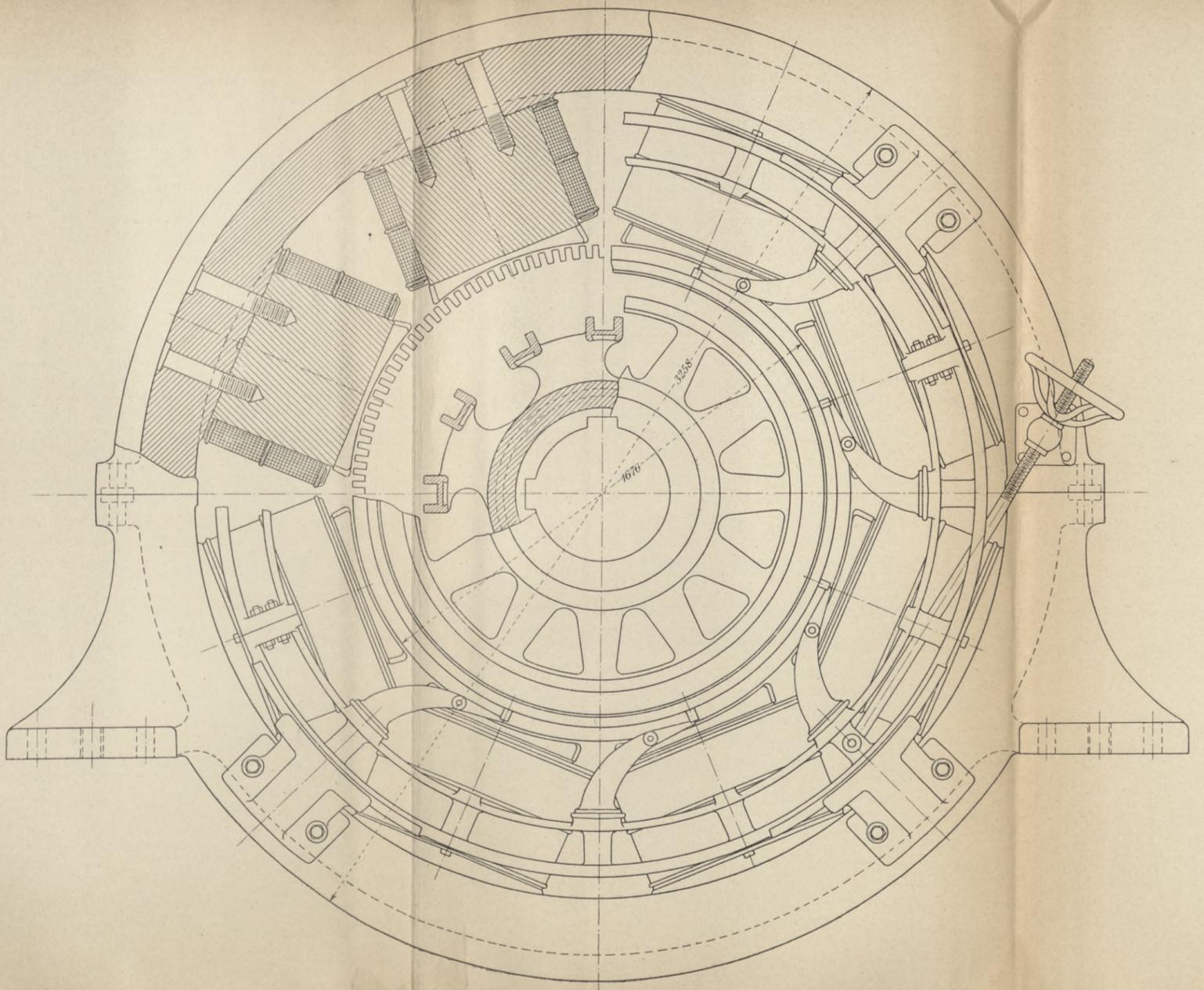
TAFEL X.

**RADANKER-MASCHINE VON FRITSCHE UND PISCHON IN BERLIN.**  
MODELL M FÜR 120 VOLT UND 600 AMPERE BEI 120 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.  
 $\frac{1}{10}$  DER WIRKLICHEN GRÖSSE.





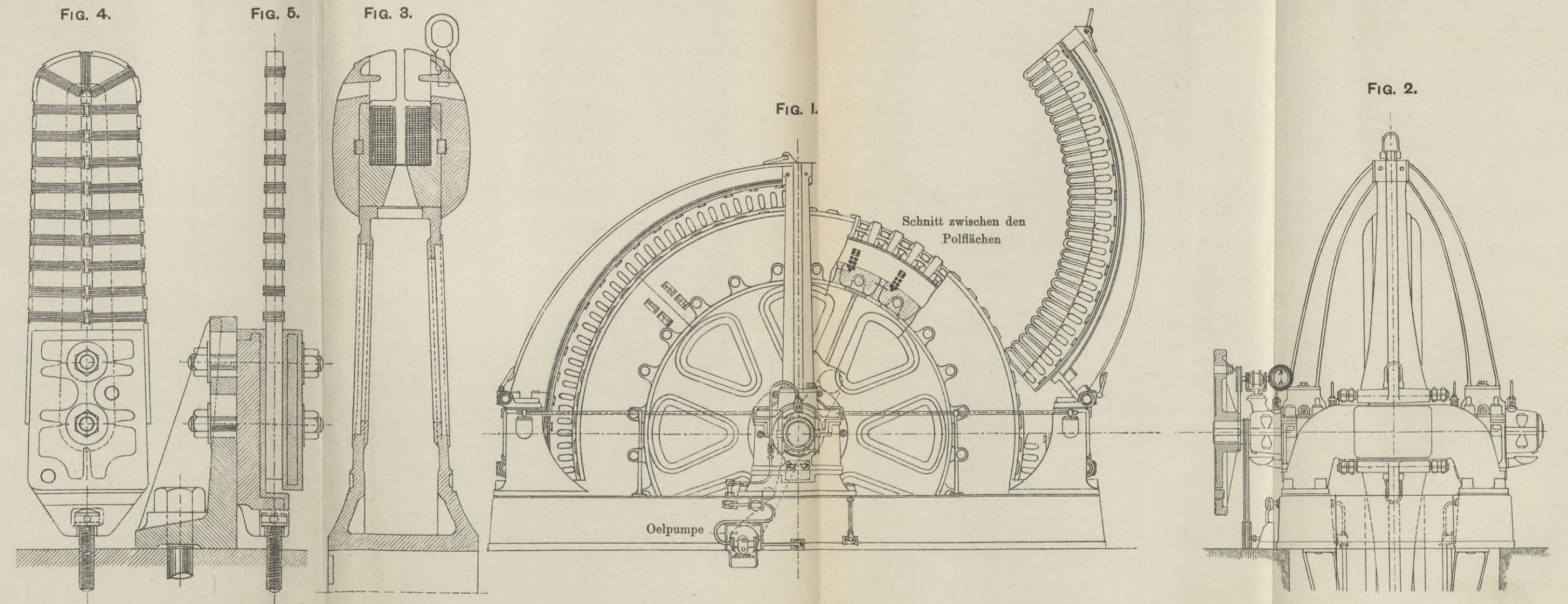
DIRECT GEKUPPELTE VIELPOLIGE GLEICHSTROMMASCHINE  
DER UNION ELEKTRICITÄTS-GESELLSCHAFT IN BERLIN.  
MODELL M P 8-425-80 FÜR 425 KILOWATT BEI 550 VOLT, 780 AMPERE NORMALER STROMSTÄRKE UND 80 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE  
 $\frac{1}{10}$  DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.





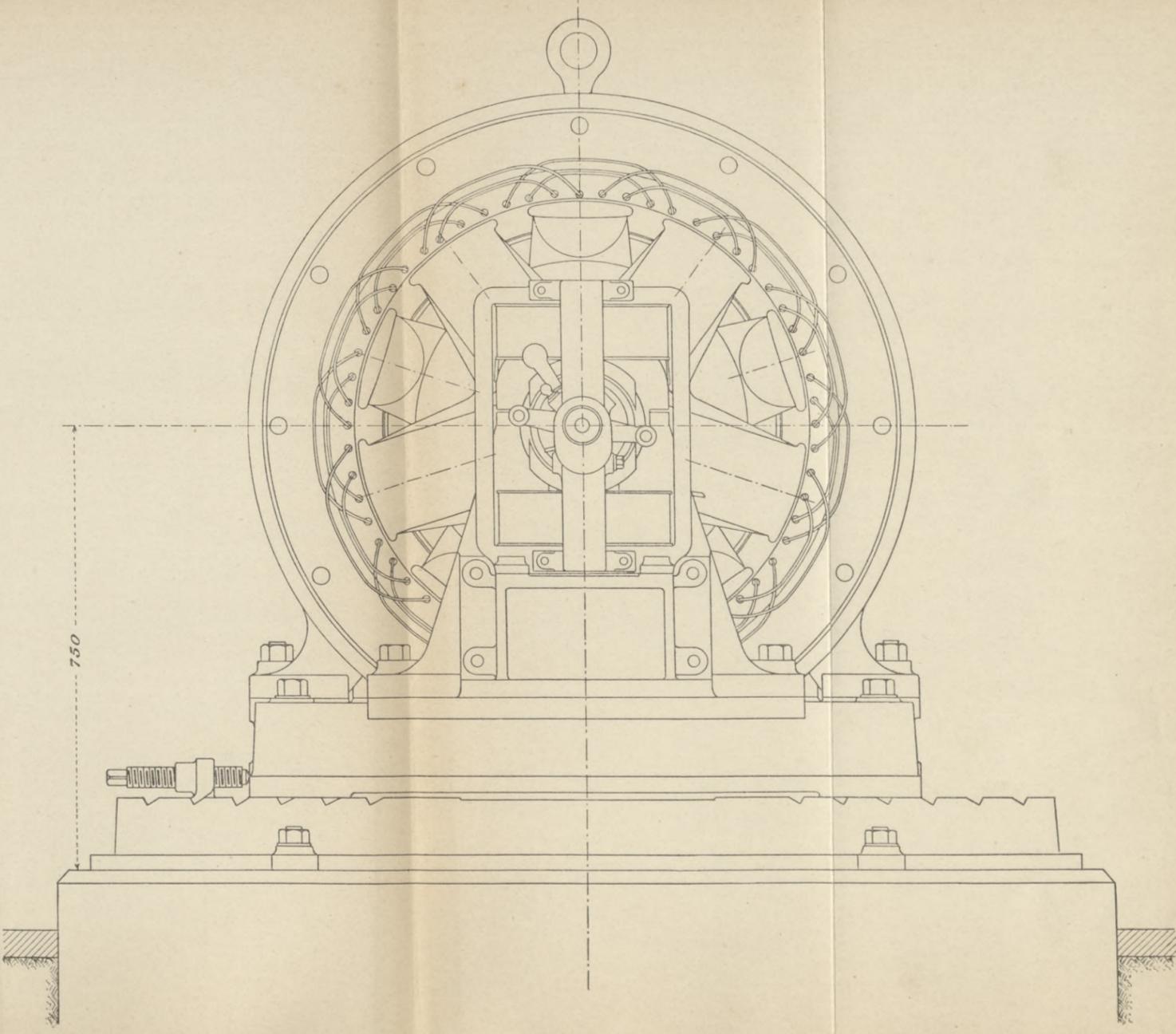
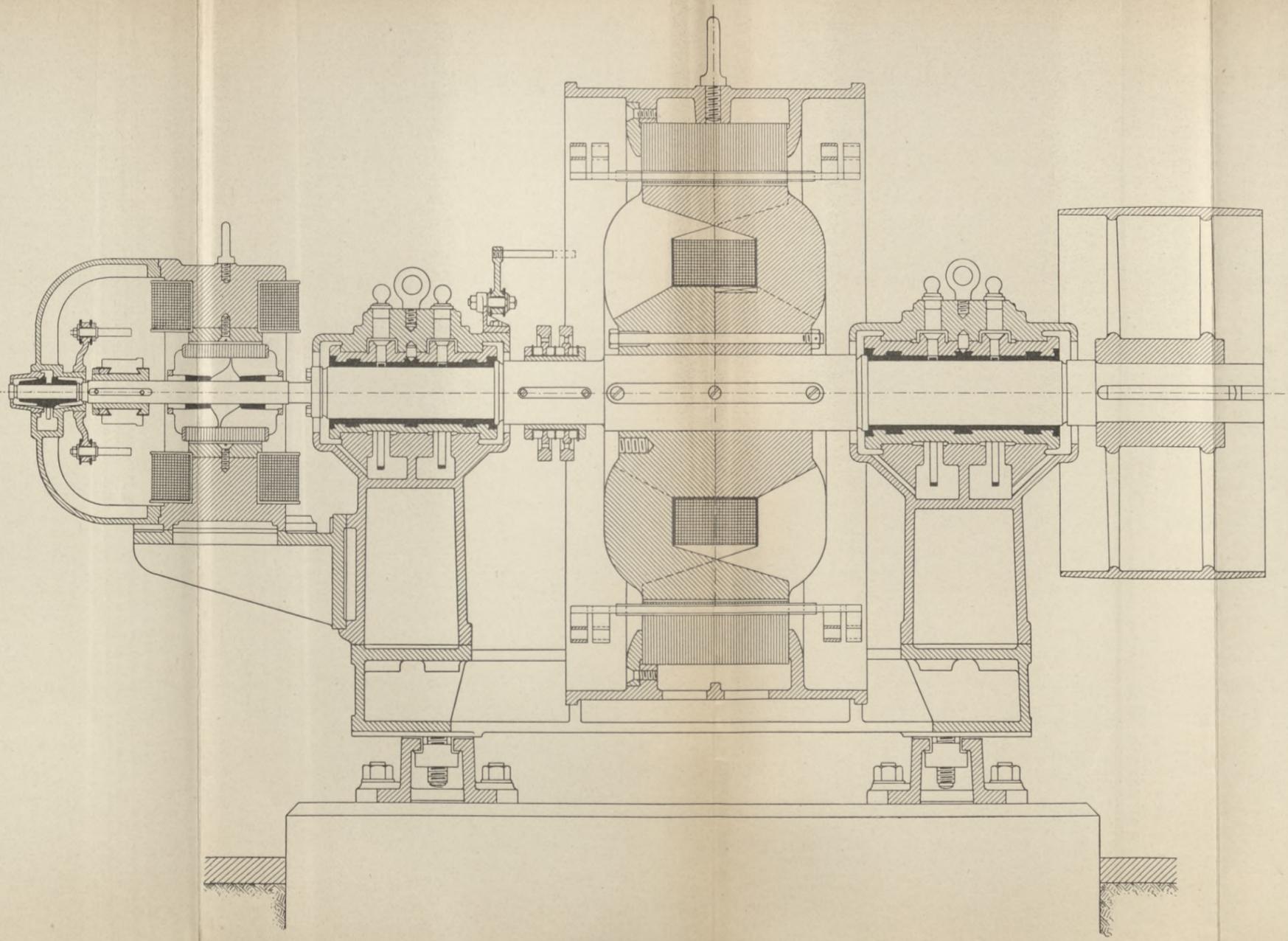
**MORDEY'SCHE WECHSELSTROMMASCHINE**  
 FÜR 200 KILOWATT (100 AMPERE UND 2000 VOLT) BEI 96 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.  
 Erbaut von der Brush Electrical Engineering Company.

Maassstab 1:36 nur für die Figuren 1 u. 2.



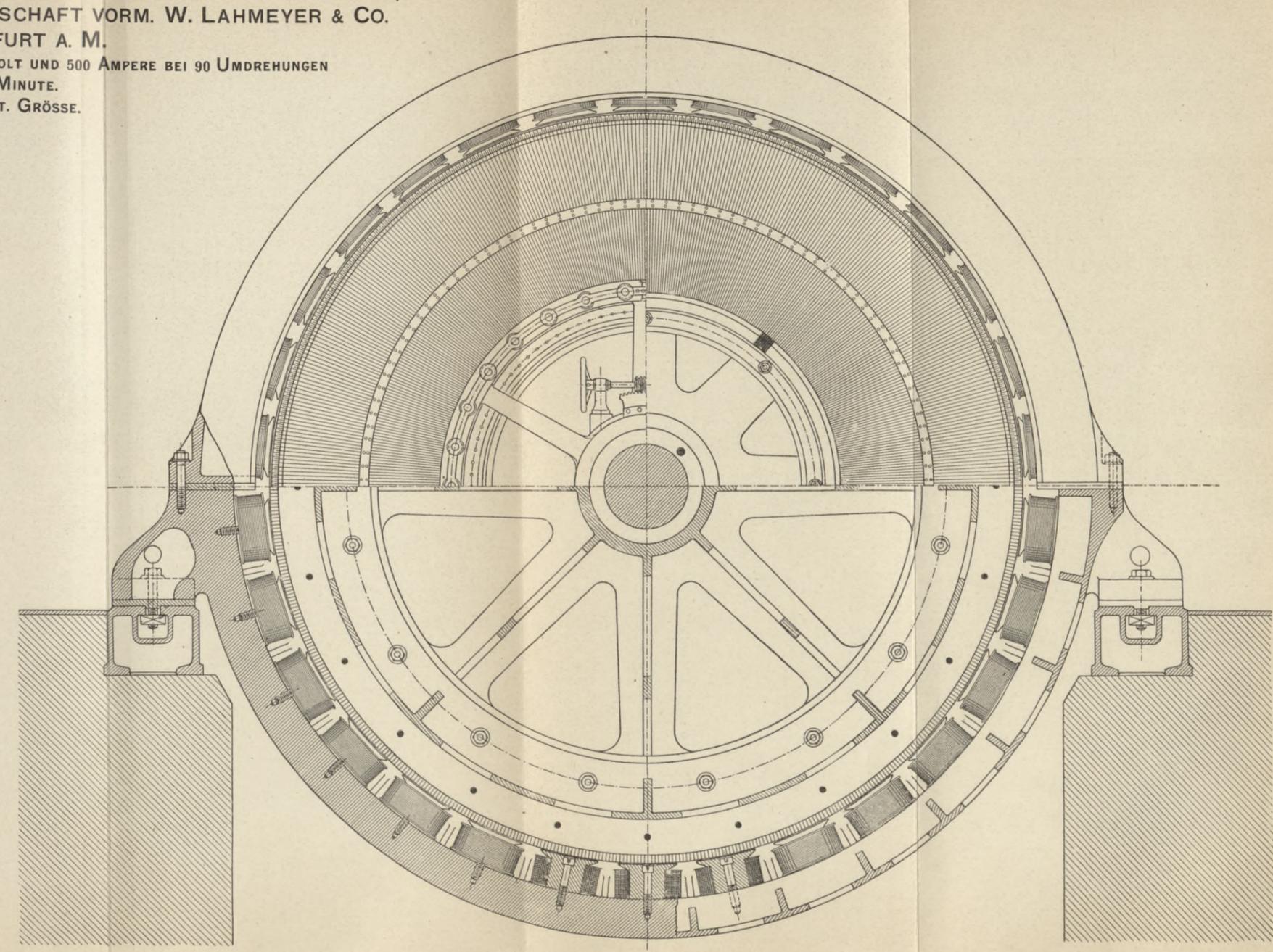
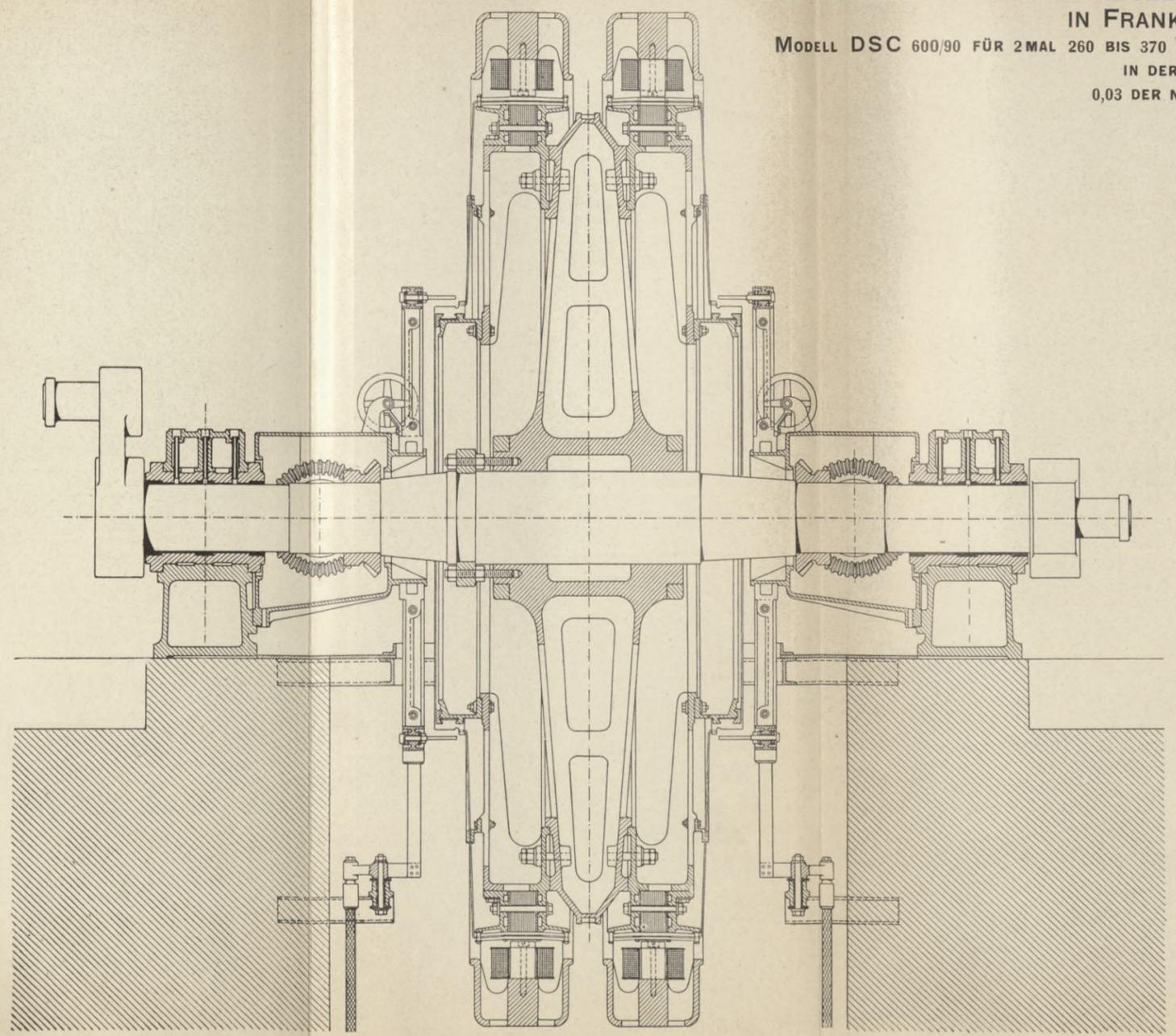


DREIPHASEN-WECHSELSTROMERZEUGER  
DER ELEKTRIZITÄTS-AKTIENGESELLSCHAFT VORMALS SCHUCKERT & CO. IN NÜRNBERG.  
MODELL W N<sup>d</sup>. 65 FÜR 65 KILOWATT GEBAUT BIS 4000 VOLT BEI 600 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.  
0,12 DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.





VIELPOLIGE GLEICHSTROMMASCHINE (DOPPELSCHWUNGRAD-MASCHINE)  
DER ELEKTRIZITÄTS-AKTIENGESELLSCHAFT VORM. W. LAHMEYER & CO.  
IN FRANKFURT A. M.  
MODELL DSC 600/90 FÜR 2 MAL 260 BIS 370 VOLT UND 500 AMPERE BEI 90 UMDREHUNGEN  
IN DER MINUTE.  
0,03 DER NAT. GRÖSSE.



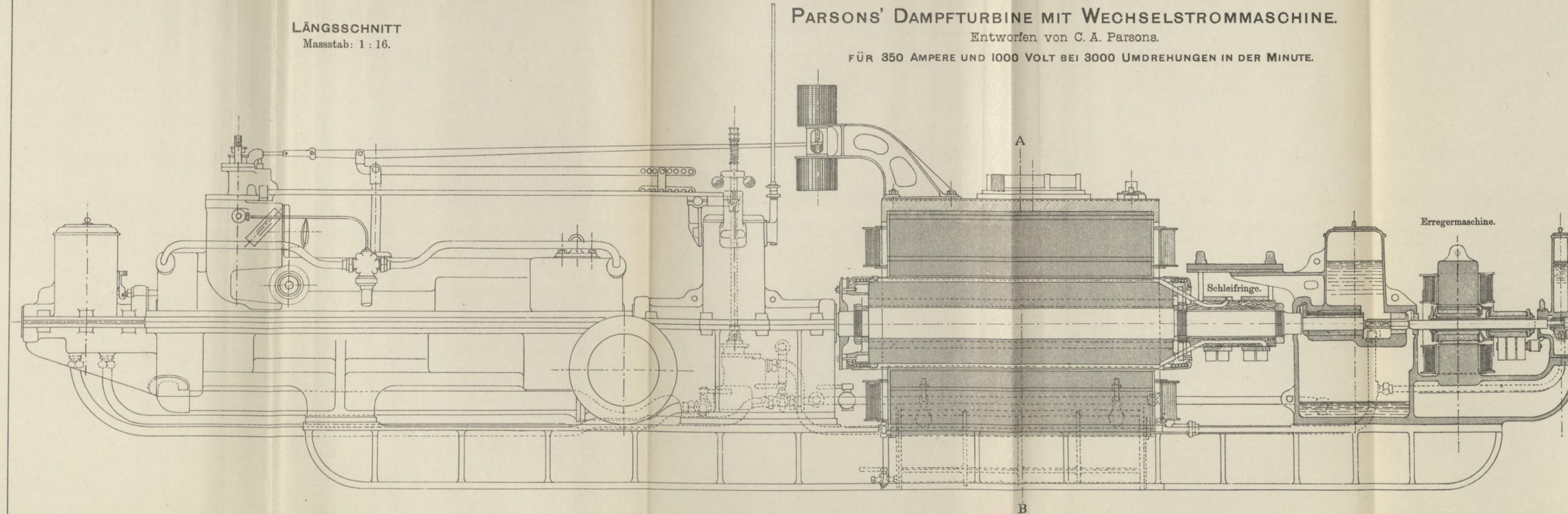


LÄNGSSCHNITT  
Masstab: 1 : 16.

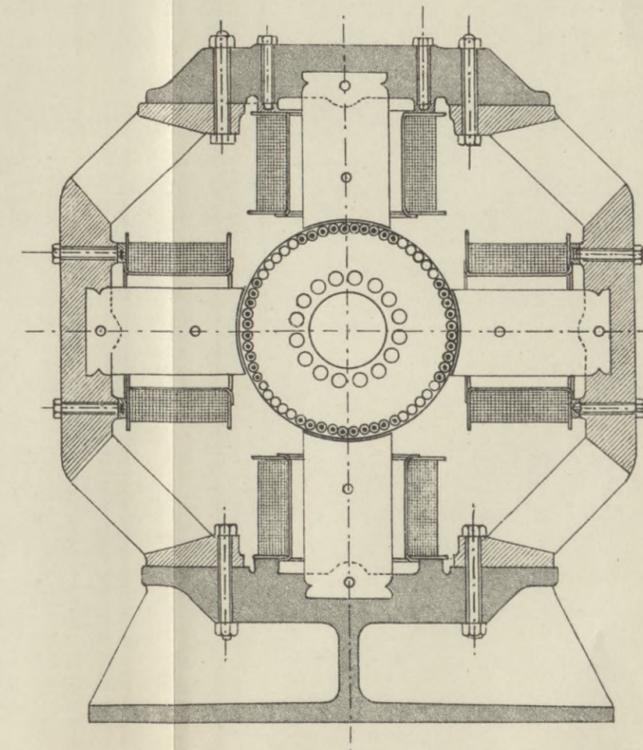
PARSONS' DAMPFTURBINE MIT WECHSELSTROMMASCHINE.

Entworfen von C. A. Parsons.

FÜR 350 AMPERE UND 1000 VOLT BEI 3000 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.

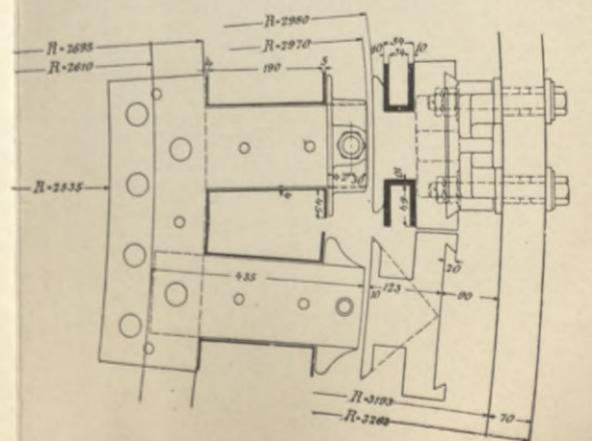
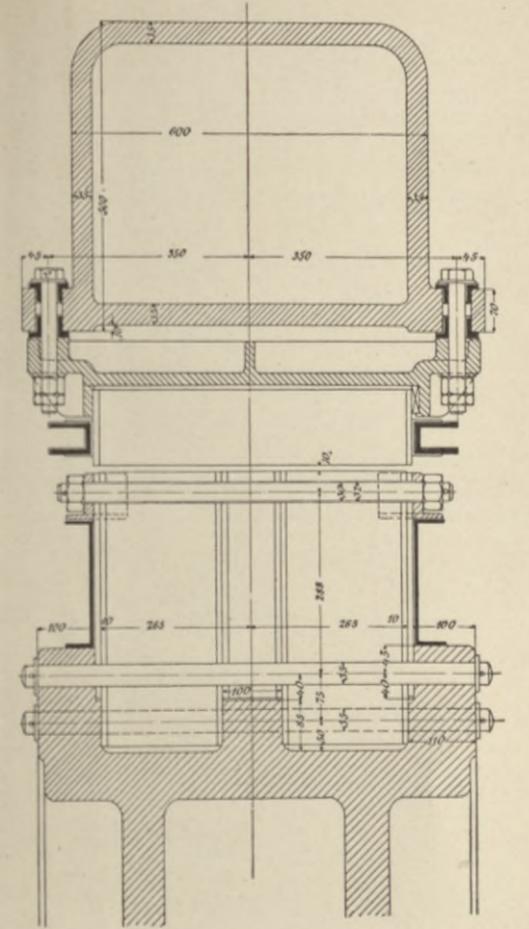
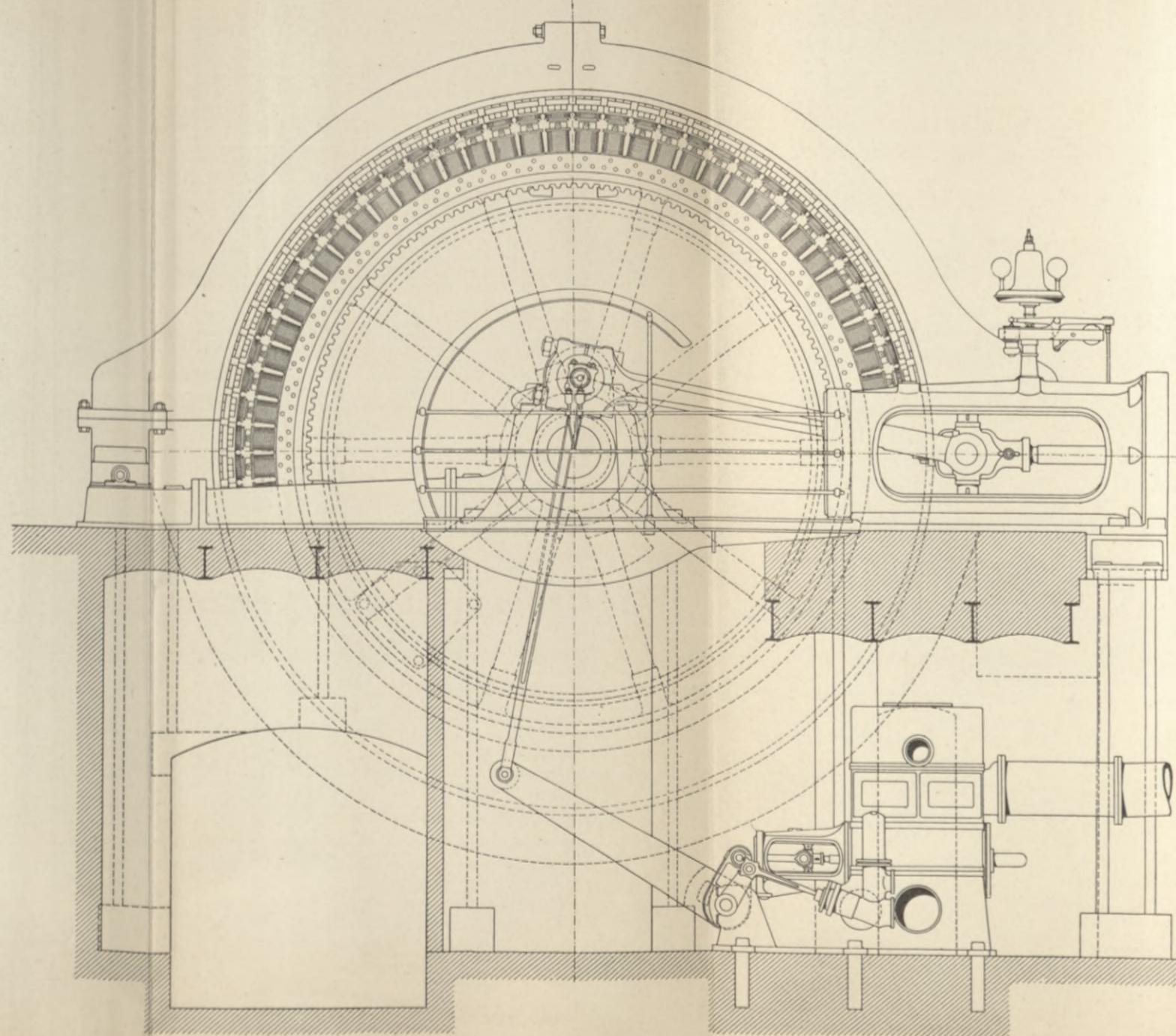
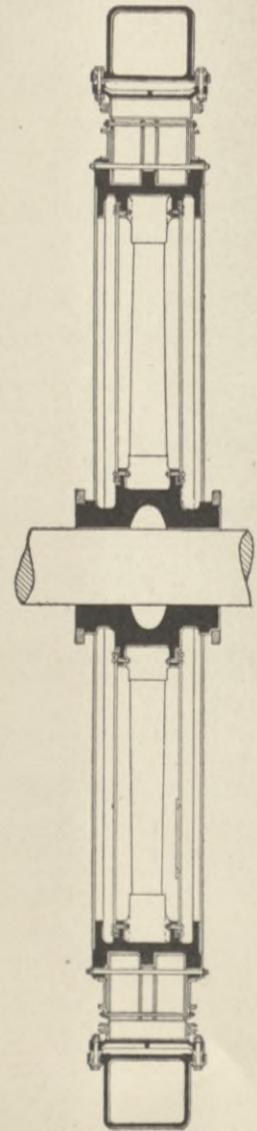


SCHNITT A-B  
Masstab: 1 : 12.





WECHSELSTROMERZEUGER DES HELIOS,  
 ELEKTRICITÄTS - AKTIENGESELLSCHAFT IN KÖLN-EHRENFELD.  
 MODELL ES W FÜR 3000 VOLT UND 220 AMPERE BEI 85 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.  
 $\frac{1}{50}$  DER NAT. GRÖSSE, THEILE IN  $\frac{1}{12}$  DER NAT. GRÖSSE.





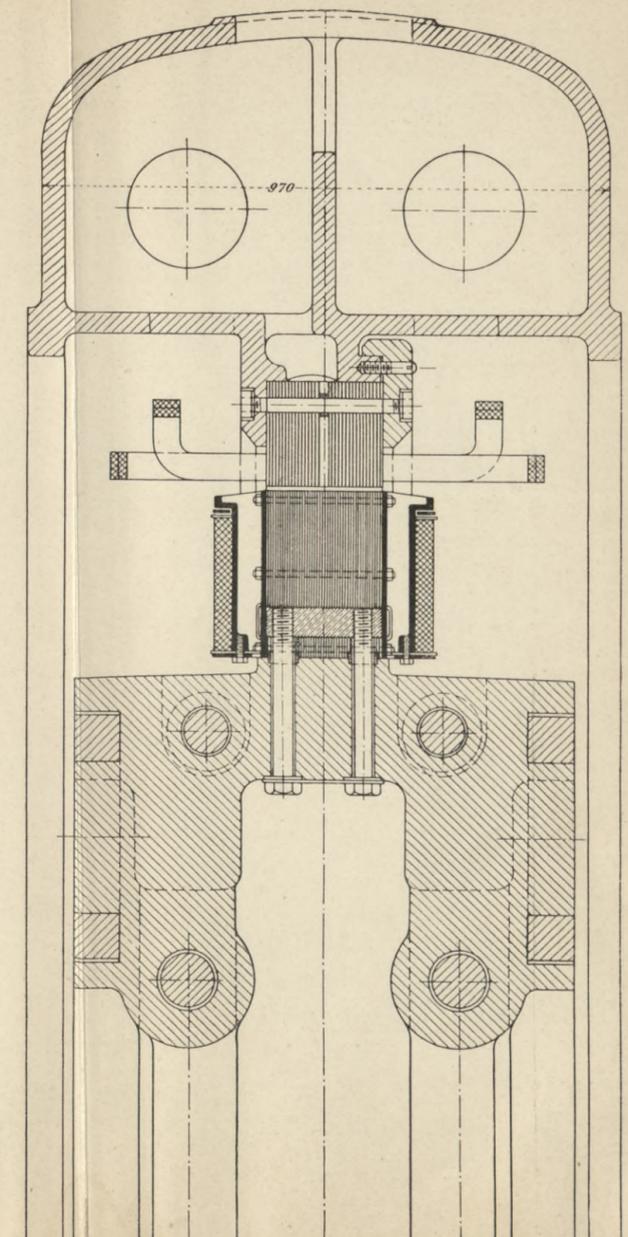
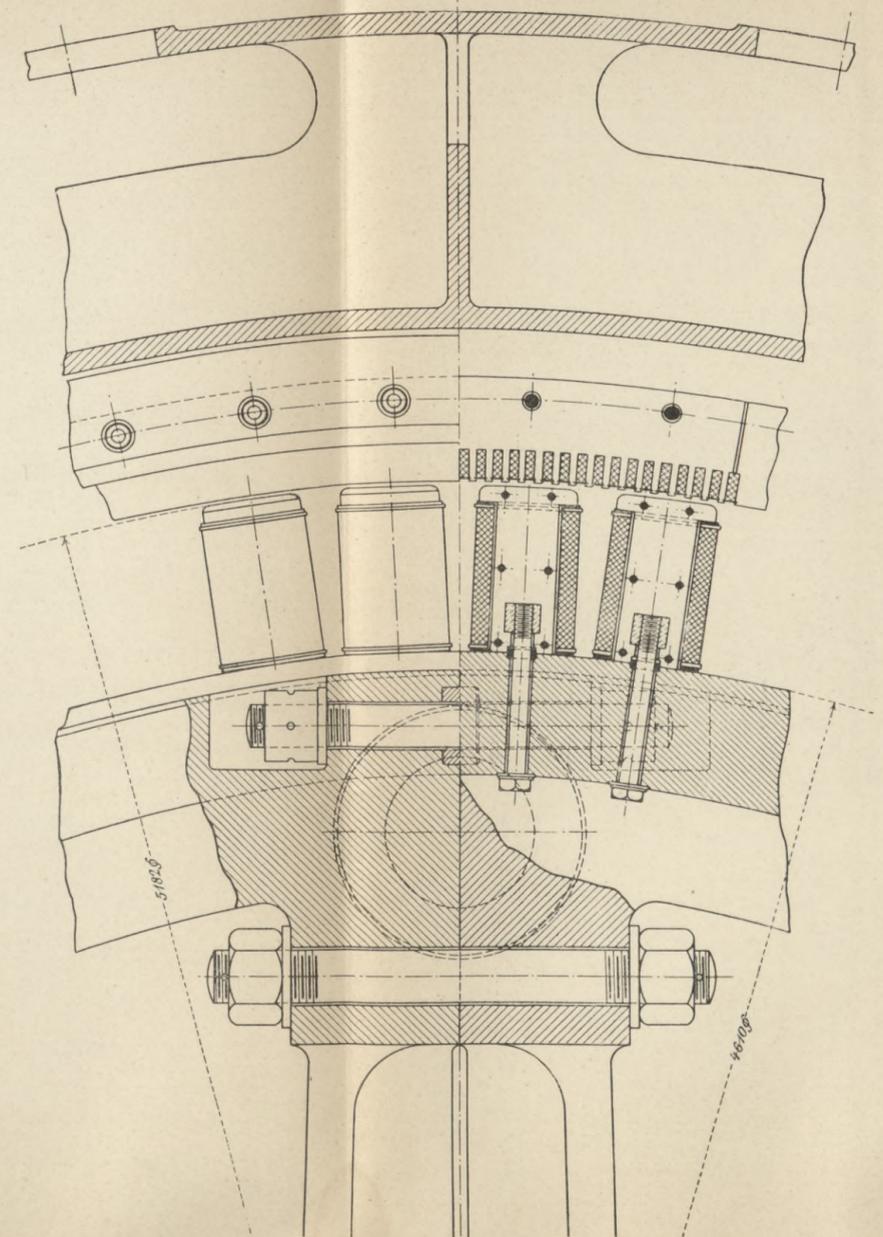
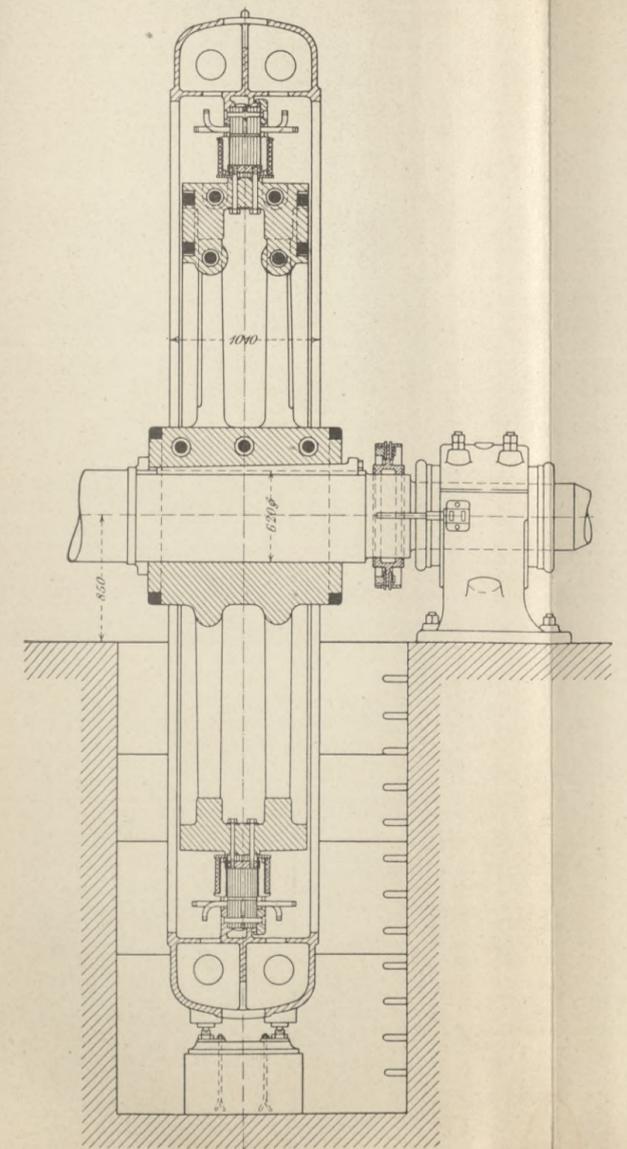
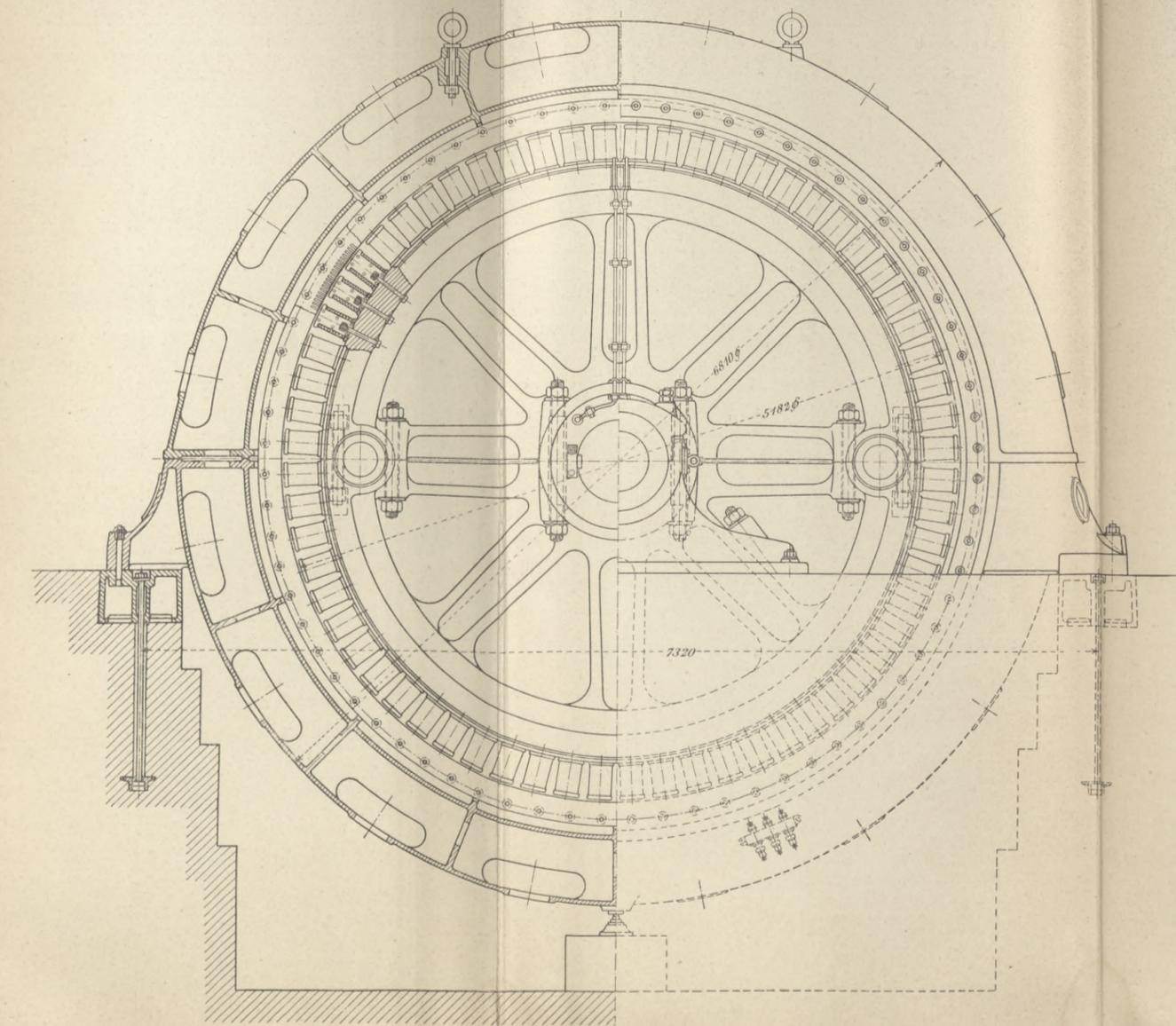


BIBLIOTEKA  
KRAKÓW  
politechniczna

DREIPHASEN-STROMERZEUGER FÜR HOHE SPANNUNG DER SIEMENS & HALSKE AKTIEN-GESELLSCHAFT IN BERLIN-CHARLOTTENBURG.

MODELL R 260/20 FÜR 850 KILOWATT BEI 50 PERIODEN IN DER SECUNDE UND 94 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.

HAUPTZEICHNUNG IN 1/40, NEBENZEICHNUNG IN 1/10 DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.



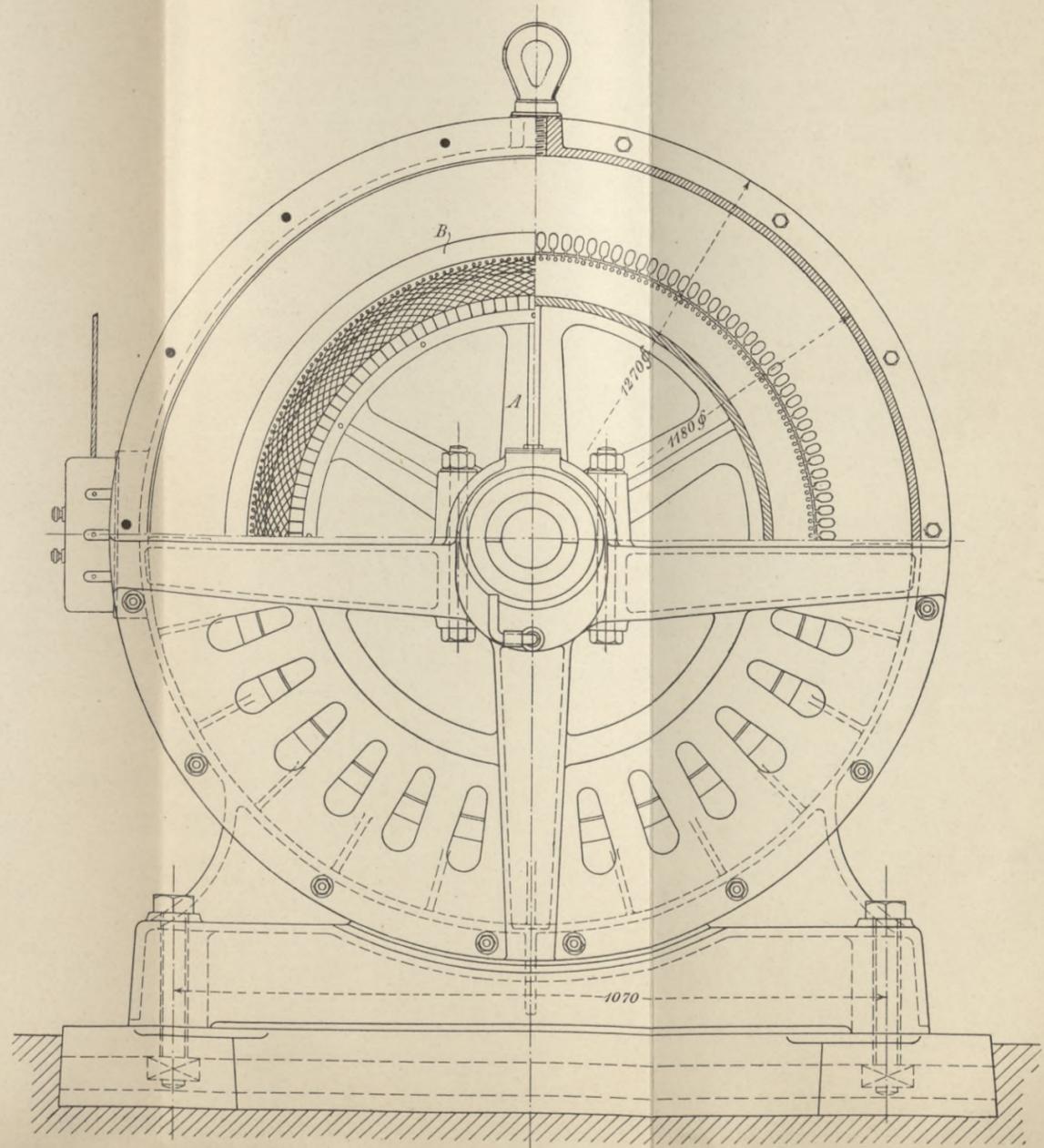
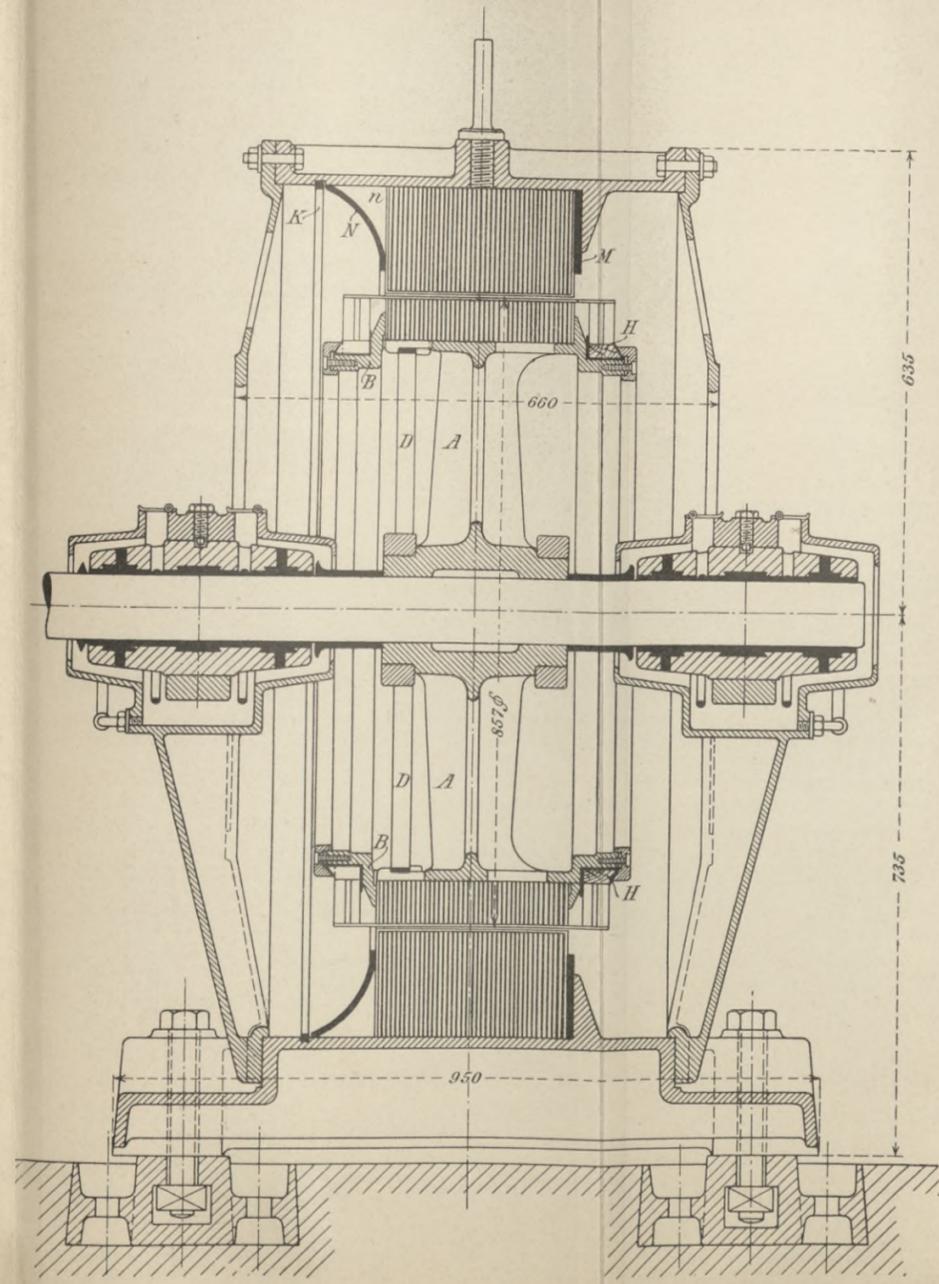
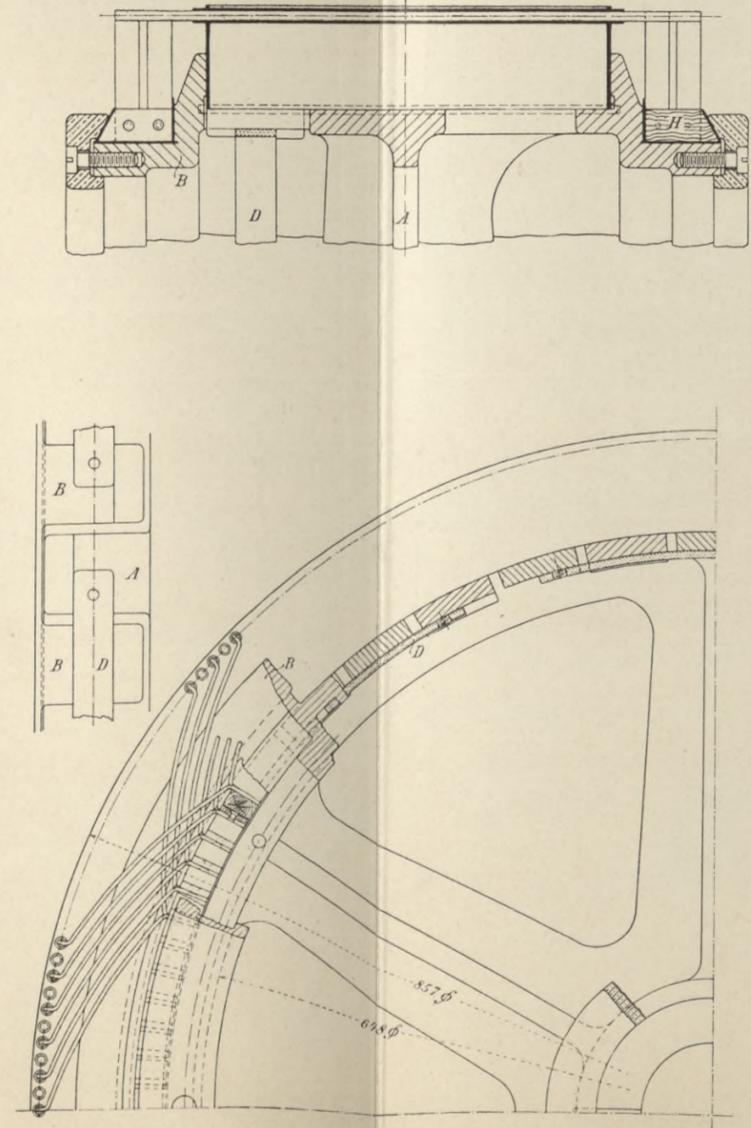


BIBLIOTEKA

KRAKÓW

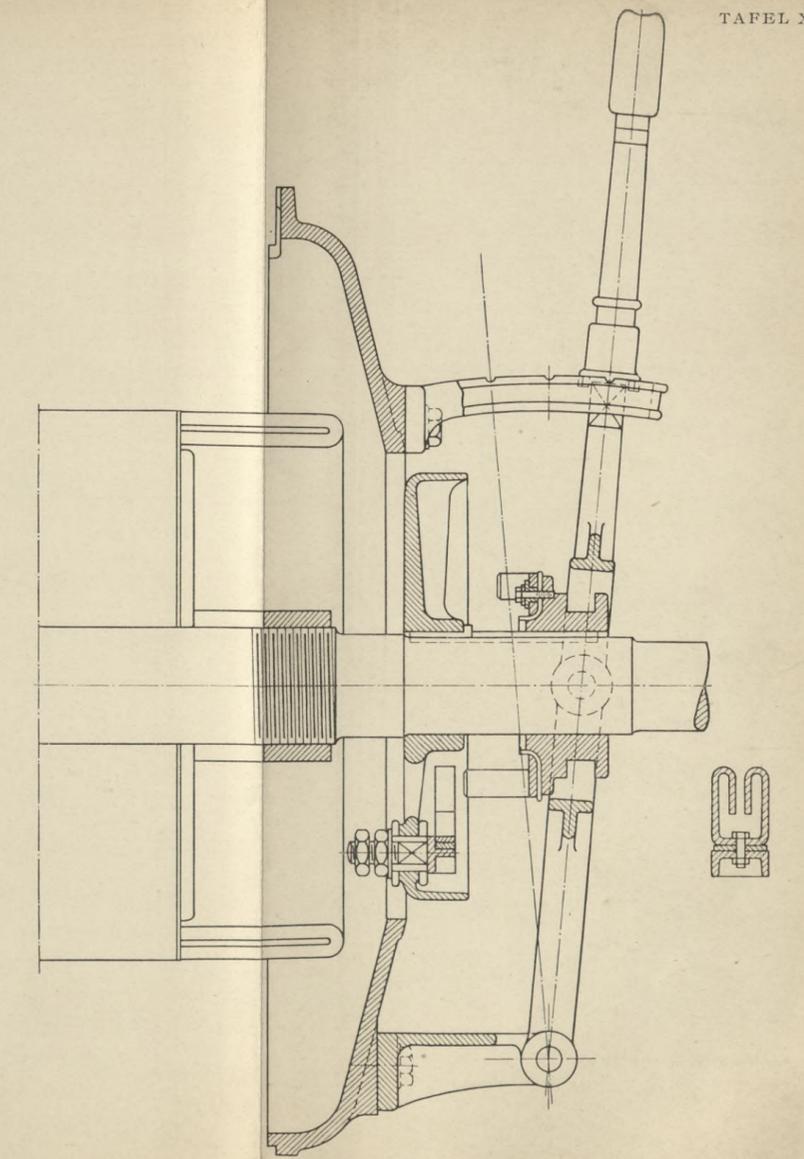
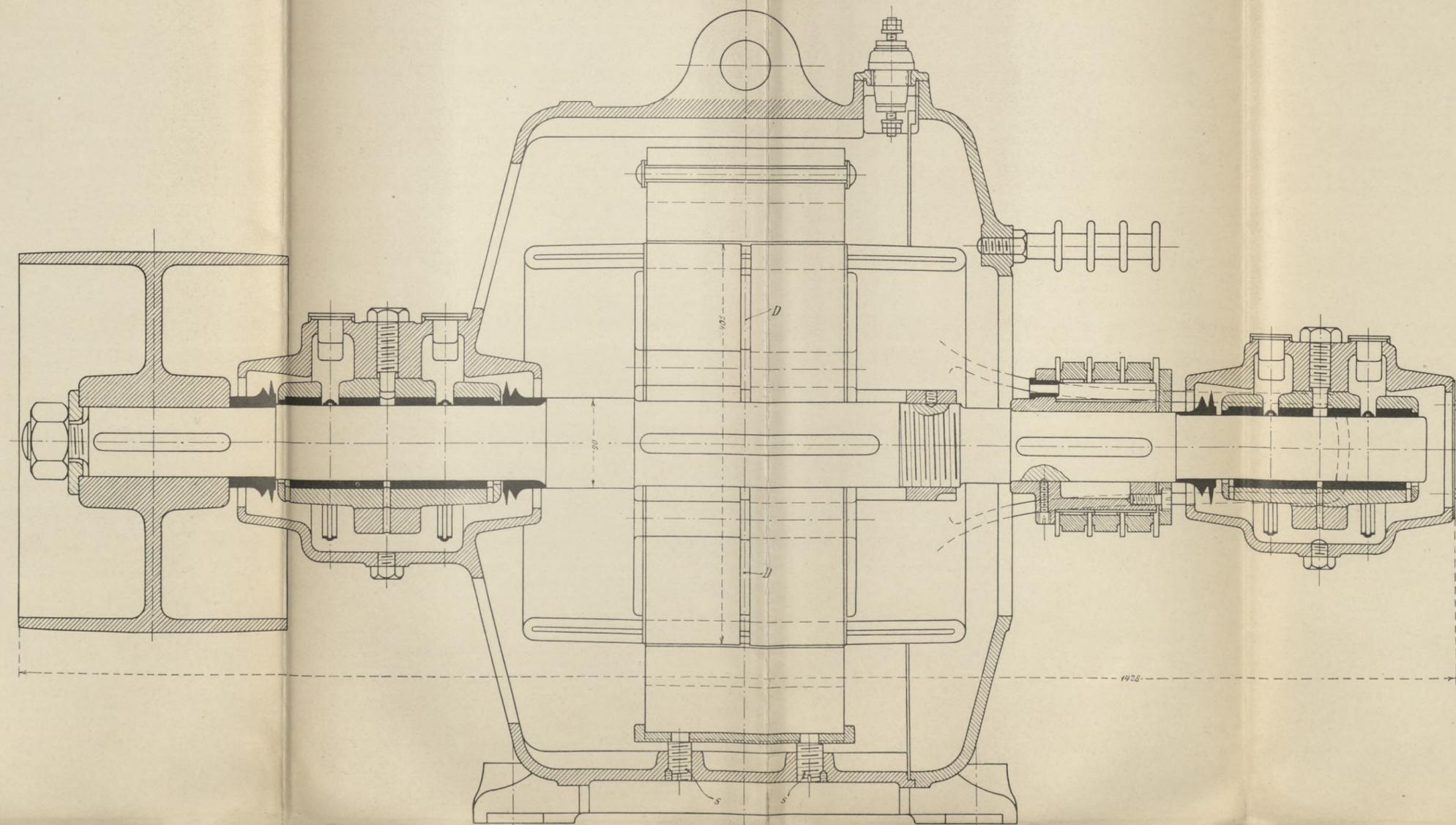
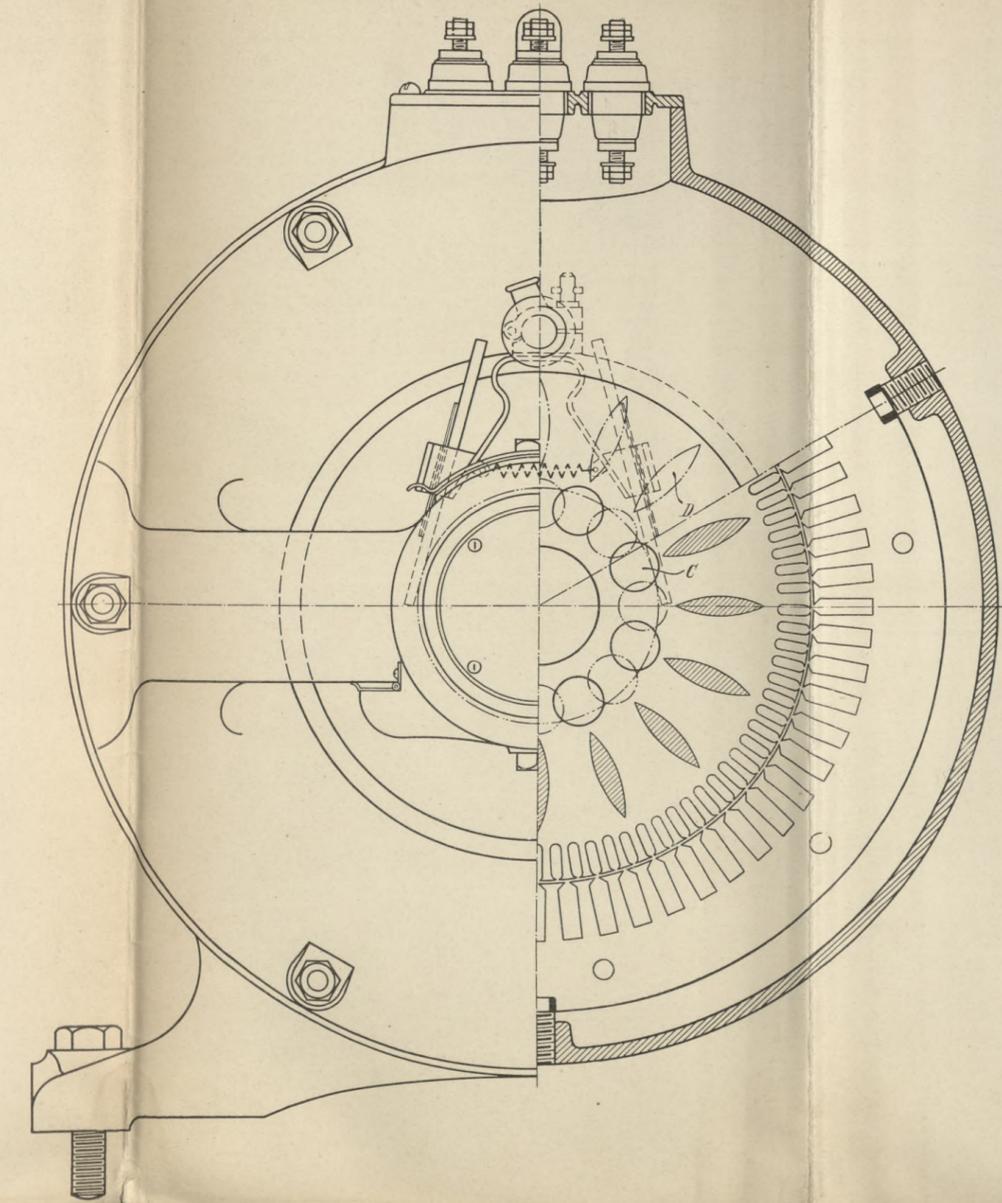
Politechniczny

DREIPHASENMOTOR DER ALLGEMEINEN ELEKTRICITÄTS-GESELLSCHAFT IN BERLIN,  
 MODELL ND 800 FÜR 80 P BEI 575 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE  
 $\frac{1}{10}$  DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.



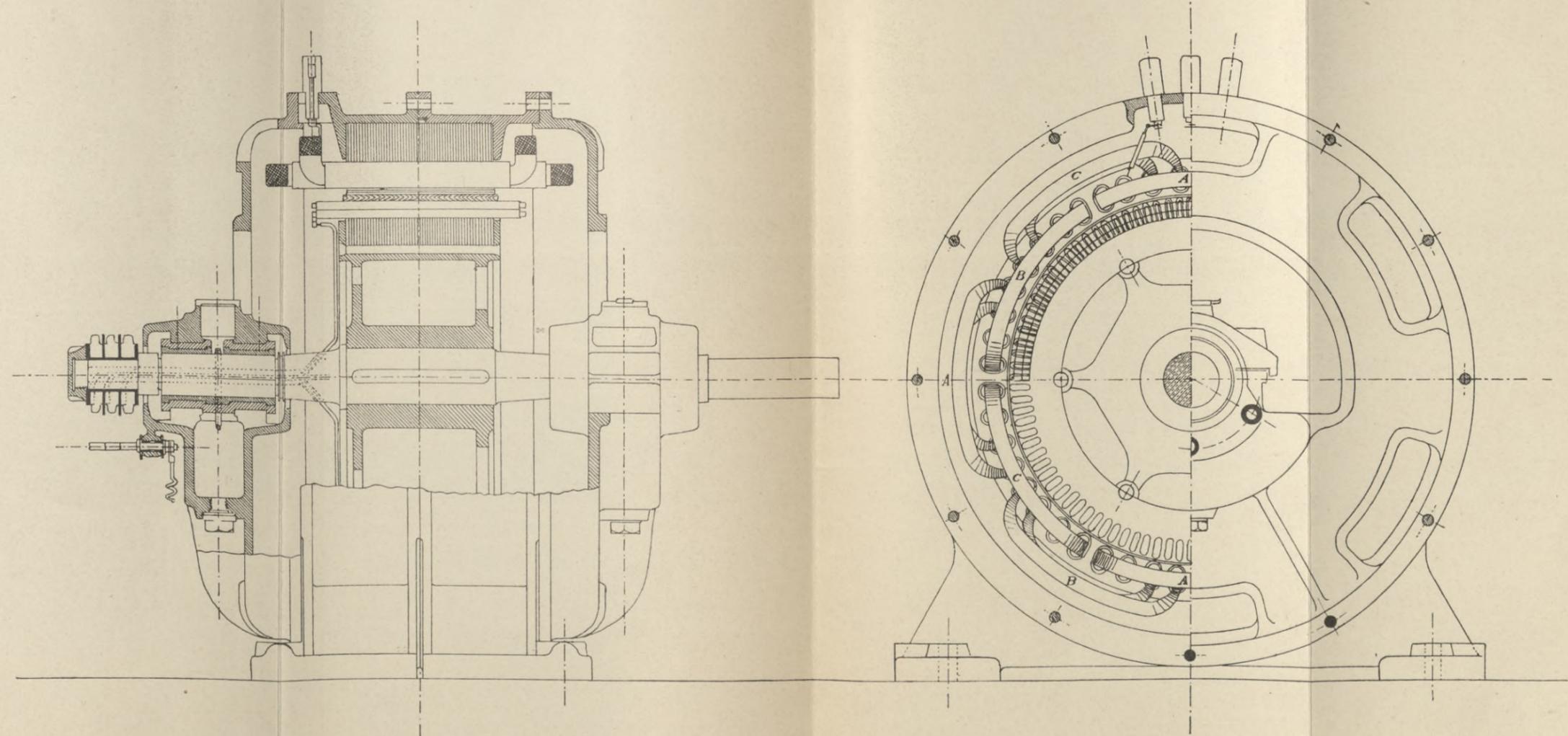


DREIPHASENMOTOR DER SIEMENS & HALSKE AKTIENGESELLSCHAFT IN BERLIN-CHARLOTTENBURG,  
MODELL DM 20-1000 FÜR 40 P UND 980 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.  
AUSFÜHRUNG MIT SCHLEIFRINGEN UND MIT GEGENSCHALTUNG.  
 $\frac{1}{4}$  NATÜRLICHER GRÖSSE.



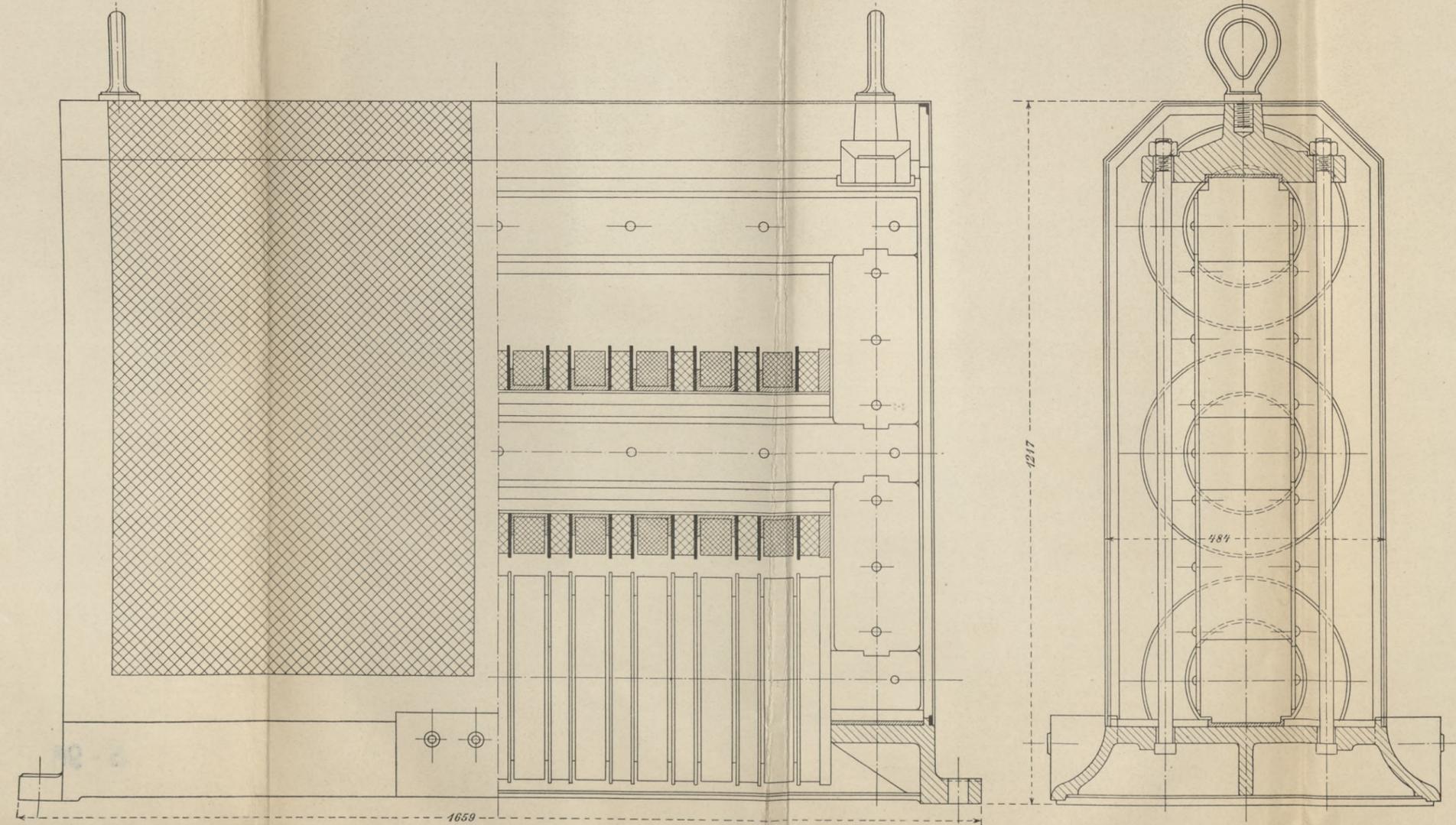
BIBLIOTEKA  
KRAKÓW  
Politechniczna

DREIPHASIGER WECHSELSTROMMOTOR VON BROWN, BOVERI & CO. IN BADEN (SCHWEIZ),  
FÜR 100 P, 5000 V UND 600 UMDREHUNGEN IN DER MINUTE.  
 $\frac{1}{10}$  DER NATÜRLICHEN GRÖSSE.

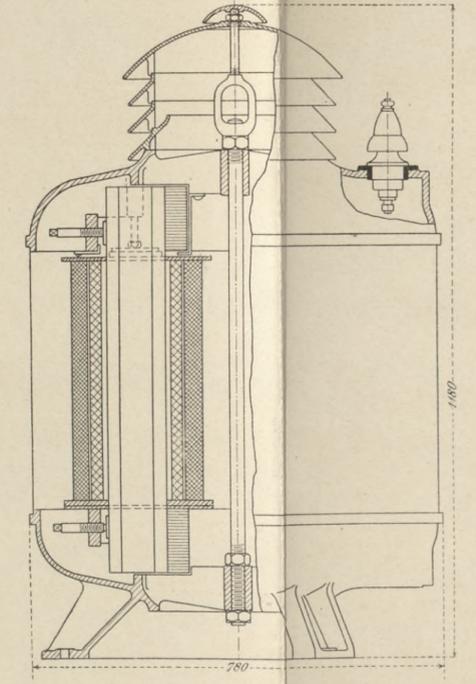


BIBLIOTEKA  
KRAKÓW  
Politechniczna

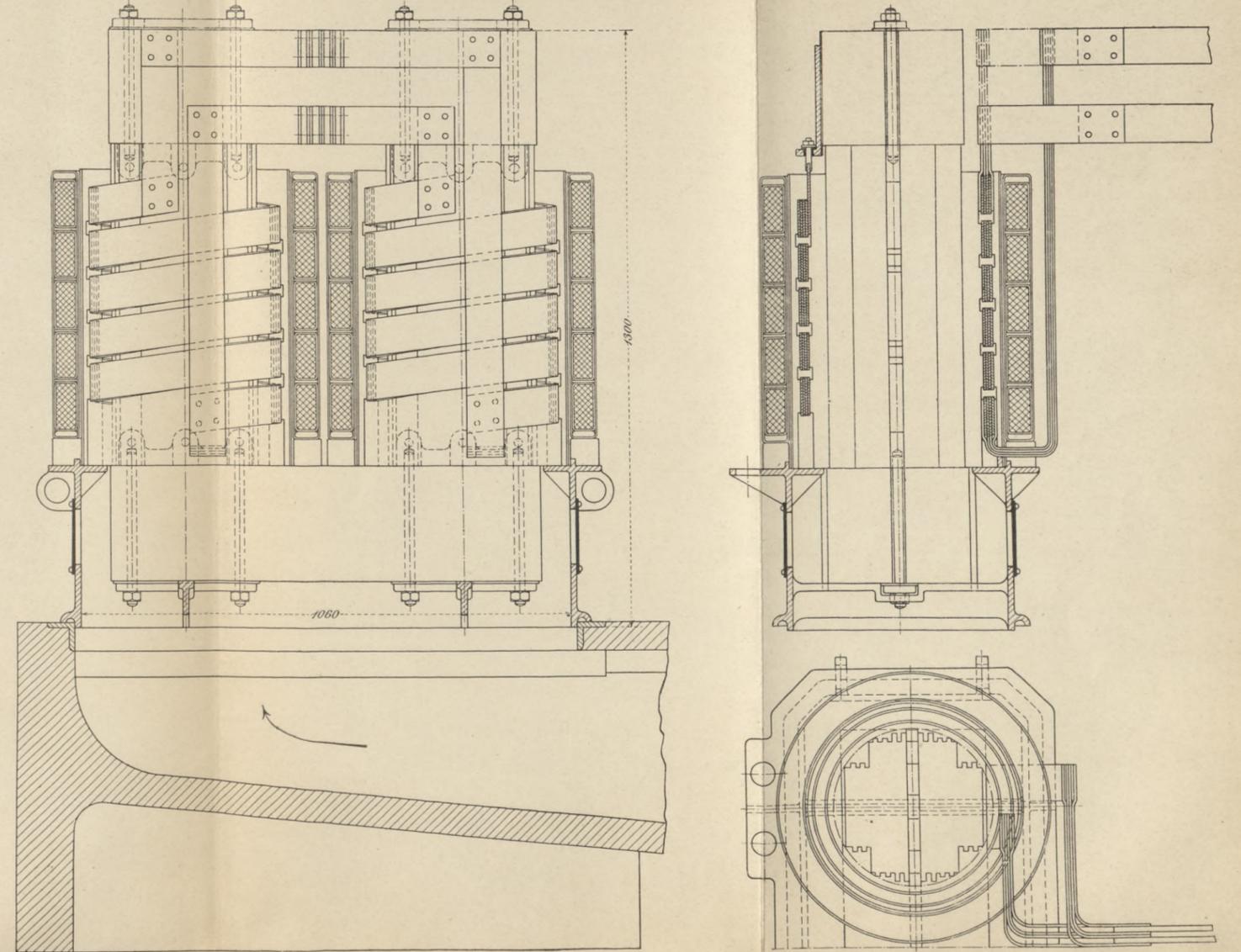
DREIPHASEN-TRANSFORMATOR DER ALLGEMEINEN ELEKTRICITÄTS-GESELLSCHAFT IN BERLIN,  
MODELL D B 100 FÜR 100 KW BEI 50 PER/SEC.  
 $\frac{1}{8}$  NATÜRLICHER GRÖSSE.



DREIPHASEN-TRANSFORMATOR DER SIEMENS & HALSKE AKTIENGESELLSCHAFT  
IN BERLIN-CHARLOTTENBURG,  
FÜR 20 KW BEI 50 PER/SEC.  
ZUR AUFSTELLUNG IM FREIEN.  
 $\frac{1}{10}$  NATÜRLICHER GRÖSSE.



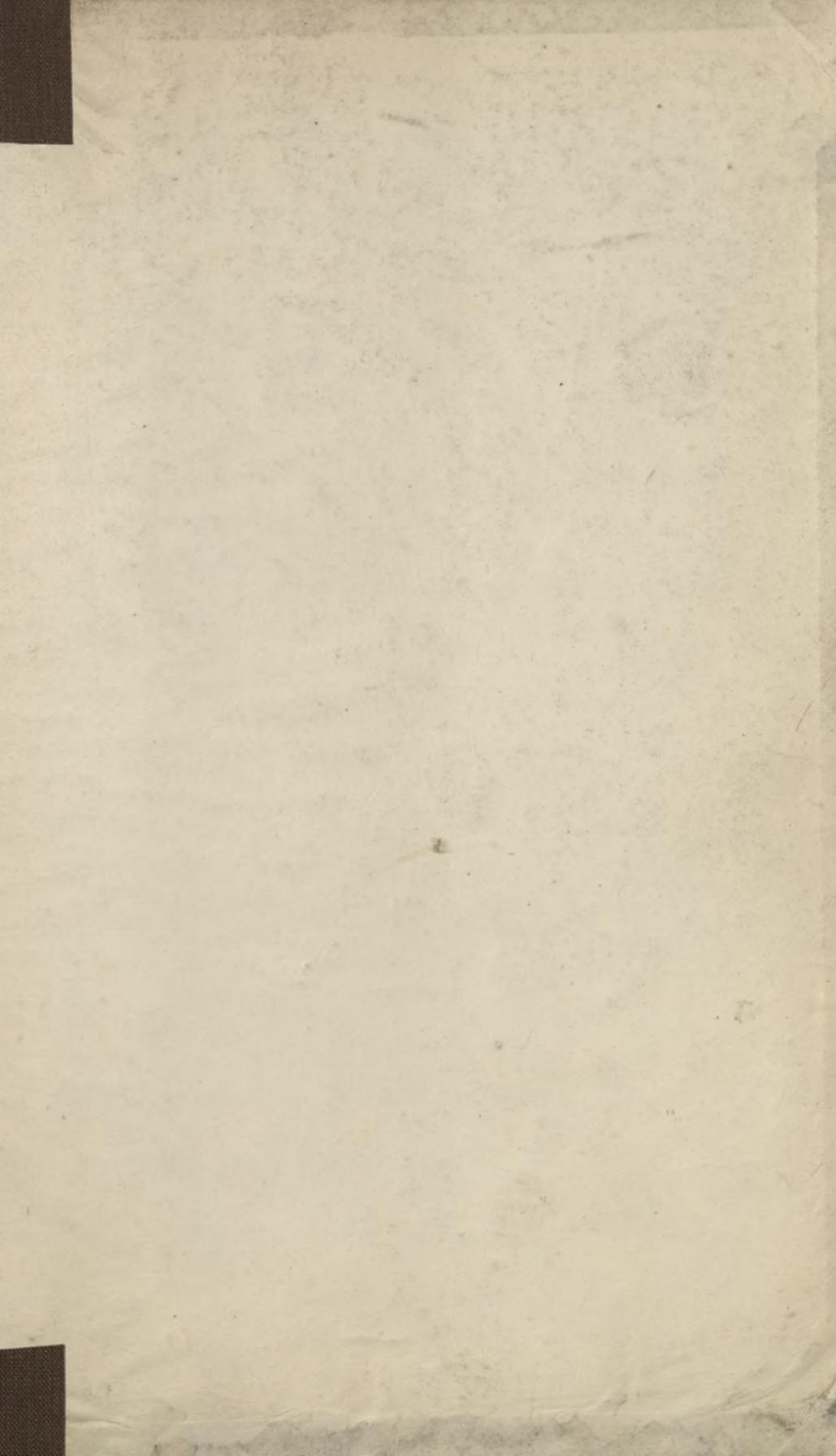
WECHSELSTROM-TRANSFORMATOR DER MASCHINENFABRIK OERLIKON IN OERLIKON BEI ZÜRICH,  
MODELL DER ANLAGE IN RHEINFELDEN FÜR 200 KW BEI 50 PER/SEC MIT KÜNSTLICHER LÜFTUNG.  
 $\frac{1}{10}$  NATÜRLICHER GRÖSSE.





S-98

S. 61



WYDZIAŁY POLITECHNIKI

BIBLIOTEKA

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-349380

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-5364

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000305975

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000294760