



958

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000300028

Der Stoff des Wassers

einem Artikel

Die Wirkung der Sonnen

HANCIKLOTT

x
936

Der Stoß des Wassers

nebst Anhang:

die Wirkung der Buhnen

dargestellt von

DANCKWERTS

Regierungs- und Baurat, Professor an der Technischen Hochschule zu Hannover.

Mit sechsundfünfzig Abbildungen im Texte.

F. Nr. 26 919



C. W. KREIDEL'S VERLAG

1906.

Sonderabdruck
aus der Zeitschrift für Architektur und Ingenieurwesen
Jahrgang 1906.

Alle Rechte vorbehalten.

Uebersetzungen in alle Sprachen
vorbehalten.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW
II 31135

Druck von Gebrüder Jänecke, Hannover.

Akc. Nr. 1989/49

Inhalt.

	Seite
§ 1. Elastische und unelastische, harte und bildsame Körper	8
§ 2. Mittel zur allmählichen Geschwindigkeitsänderung .	11
§ 3. Freier Fall fester und flüssiger Körper	13
§ 4. Schnelle Bewegung unendlich kleiner Körper zwischen zwei langsam bewegten endlich großen Massen . .	17
§ 5. Fortschreiten unendlich kleiner fester Körper auf drei endlosen Gurten	19
§ 6. Wellenförmige, pulsierende Erscheinungen	27
§ 7. Druck des Wassers = Zugkraft der Erde	29
§ 8. Geometrische Beschränkungen des plötzlichen Geschwindigkeitswechsels	31
§ 9. Arbeitswege der wirksamen Zug- und Druckkräfte .	33
§ 10. Mathematische Entwicklungen	34
§ 11. Schluß	42
Anhang. Die Wirkung der Buhnen	53

Kop

„Archimedes schämte sich seiner Maschinen, weil ihm die Verwendung wissenschaftlicher Ergebnisse für gemeine Bedürfnisse eine Entwürdigung der edlen Wissenschaft zu sein schien.“ Grenzböten 1905, S. 131.

„Jede Wissenschaft muß im letzten Grunde dem Leben dienen, wenn sie nicht ein Spiel zur bloßen Befriedigung des Ich sein soll.“

Prof. Ostwald, Salzburger Ferienkurse 1905.

Rühlmann schreibt 1880 (Hydromechanik § 178): „Der Stoß des Wassers gegen feste Körper ist verschieden von dem Stoße, welcher zwischen festen Körpern unter sich stattfinden kann, weil im ersteren Falle, wenn der Beharrungszustand eingetreten ist, der passive feste Körper von den Wasserteilchen ohne Unterbrechung gedrückt wird, während beim Stoße fester Körper unter sich die dabei hervorgerufene Wirkung die Sache eines Augenblicks ist, nach dessen Verlauf der stoßende Körper seine ganze Bewegungsgröße abgegeben hat. Man sollte daher richtiger stets vom Druck, nicht aber vom Stoße bewegten Wassers reden.“

Nach Keck „stellt man sich die Wasserbewegung in einem plötzlich erweiterten Gefäße so vor, als ob die Masse m mit der Geschwindigkeit w_1 auf eine mit der Geschwindigkeit w_2 vorausgehende Masse M_2 stieße“, S. 257, und „übt ein aus einem Gefäße ausfließender Wasserstrahl gegen eine ihn auffangende Fläche einen Druck aus.“ S. 279.

Tallquist schreibt 1904 (Technische Mechanik, Helsingfors): „Die Erscheinung wird Stoß des Wassers genannt, obgleich der Druck zwischen dem Strahl und dem Körper kein augenblicklicher Druck oder Stoßdruck ist, sondern am besten mit einem hydraulischen Druck verglichen wird.“

Zeuner schreibt 1899 (Turbinen § 3): „Die bei der Bewegung einer Flüssigkeit durch plötzliche Gefäß-erweiterungen stattfindenden Vorgänge sind von der Art, daß eine strenge Lösung der Aufgabe beim jetzigen Stande der Hydrodynamik ausgeschlossen erscheint, doch läßt sich, wie die Vergleiche der Rechnungsergebnisse mit den Beobachtungsergebnissen zeigen, die Untersuchung mit hinreichender Genauigkeit auf dem folgenden Wege durchführen usw.“ Er vermeidet dann weiter den Ausdruck Stoß, spricht nur von Druck und leitet S. 22 ff. die Borda-Carnotsche Formel für den Arbeitsverlust (den

Druckhöhenverlust, Gl. 31) $h = \frac{(w - w_x)^2}{2g}$ ab.

Wird diese Formel aber geschrieben:

$$G \cdot h = \frac{G}{g} \frac{(w - w_x)^2}{2},$$

Arbeitsverlust $A_v = m \frac{(w - w_x)^2}{2},$

so stimmt sie mit der Formel für den Arbeitsverlust beim Stoß unelastischer fester Körper, von denen der eine unendlich groß gegen den anderen ist, völlig überein.

Denn diese Formel lautet (vgl. Keck, Hütte usw.)

$$\begin{aligned} A_v &= \frac{m \cdot M_1}{m + M_1} \frac{(c - c_1)^2}{2} \\ &= \frac{m}{1 + \frac{m}{M_1}} \cdot \frac{(c - c_1)^2}{2}, \end{aligned}$$

für $M_1 = \infty$ und $\frac{1}{M_1} = 0$ ist

$$A_v = m \frac{(c - c_1)^2}{2}.$$

Aus dieser Uebereinstimmung beider Formeln läßt sich erwarten, daß bei ihrer Ableitung gewisse gemeinsame Voraussetzungen gemacht sind, und es soll in folgendem versucht werden, diese Gemeinsamkeit klarzustellen und die Auffassung zu begründen, daß es sich

tatsächlich nicht um Druck-, sondern um Stoßwirkungen des Wassers handeln dürfte, die mit der Wirkung der Geschosse eines Maschinengewehrs auf eine ruhende oder bewegte Steinwand wohl verglichen werden können.

Es soll jedoch weniger auf die Durchführung verwickelter Berechnungen mit Hilfe der höheren Mathematik als auf möglichste Anschaulichkeit Wert gelegt werden, um vorzugsweise dem studierenden und dem in der Praxis stehenden Ingenieur die Ueberzeugung zu verschaffen, daß der Stoß des Wassers keine Verlegenheitsbezeichnung ist und daß die Stoßformeln auf die Bewegung des Wassers in demselben Umfange wie auf die Bewegung fester Körper angewandt werden dürfen. Dabei wird der Praktiker die aus der Kohärenz der Wassertropfen und aus der unvollkommenen Elastizität der festen Körper sich ergebenden Einschränkungen bei der Anwendung auf praktische Beispiele unschwer machen können.

Für weitere einschlägige Studien wird u. a. auf Wien, Hydrodynamik (Leipzig 1900) sowie auf den sehr lesenswerten Aufsatz von Krey: „Wasserstoß und stoßfreie Bewegung des Wassers“ in der Zeitschrift für Architektur und Ingenieurwesen 1904, ferner auf die Aufsätze von Lieckfeld im Zentralblatt der Bauverwaltung 1903, S. 497, und von Krey ebenda 1904, S. 625 hingewiesen. Krey kommt zu dem Ergebnis: „Da die Voraussetzungen für den Wasserstoß bei einer Rohrleitung nicht vorliegen, so haben die für diesen Fall bisher gebräuchlichen Formeln irgendwelche wissenschaftliche Berechtigung nicht.“

Wien erklärt Hydrodynamik S. 115 und 126: „In einer Flüssigkeit, die allseitig von festen Wänden in einem einfach zusammenhängenden Raum eingeschlossen ist und keine Drehungen der Teile enthält, können überhaupt keine Bewegungen eintreten, wenn die Geschwindigkeiten überall stetig sind. Dagegen können sich innerhalb der Flüssigkeit geschlossene Flächen ausbilden, an denen die Geschwindigkeiten Sprünge erleiden und die mit den anderen Grenzflächen zusammen einen mehrfach zusammenhängenden Raum einschließen. In diesen mehrfach zusammenhängenden Räumen können dann in sich zurücklaufende Strömungen stattfinden.“

„Während das Ergebnis der Theorie, daß bei kontinuierlicher Bewegung der Flüssigkeit ein Körper in einer reibungslosen Flüssigkeit überhaupt keinen Widerstand erfährt, in schroffem Widerspruch mit der Erfahrung steht, scheint die Annahme, daß ein solcher Widerstand durch die Bildung von Unstetigkeitsflächen hervorgerufen wird, diesen Mangel an Uebereinstimmung erheblich zu verringern.“

§ 1.

Elastische und unelastische, harte und bildsame Körper.

Die in der Natur vorkommenden Körper mögen in üblicher Weise bezeichnet werden als elastisch, wenn sie einen veränderlich großen Raum ausfüllen, eine veränderliche Dichte (spezifisches Gewicht) besitzen „nicht starr“, sondern nachgiebig „zusammendrückbar“ sind. Unter den festen Körpern mögen hierzu in bestimmten Grenzen Kork, Kautschuk, Glas, Holz, Eisen, unter den flüssigen Körpern die Gase gerechnet werden. Die Körper mögen als unelastisch bezeichnet werden, wenn sie einen unveränderlich großen Raum ausfüllen, eine unveränderliche Dichte (spezifisches Gewicht) besitzen, starr, unachgiebig, unzusammendrückbar sind. Unter den festen Körpern mögen hierzu in bestimmten Grenzen die Gesteine (Quarz, Quarzsand, Feldspat, feuchter Ton), Wachs, unter den flüssigen Körpern die tropfbar flüssigen (Wasser usw.) gerechnet werden.

Die nachstehenden Untersuchungen sollen sich nur auf unelastische, starre, unachgiebige, unzusammendrückbare feste und flüssige Körper beziehen.

Diese sind wieder in spröde, harte, allen Formänderungen durchaus widerstehende, in ihren kleinsten Teilen unverschiebliche, unbildsame, unplastische und in weiche, den Formänderungen durchaus nicht widerstehende, in ihren kleinsten Teilen völlig leicht verschiebliche, bildsame, plastische zu unterscheiden. Erstere verändern ihre äußere Gestalt bis zu einer gewissen Beanspruchung überhaupt nicht, werden aber bei einer übermäßigen

Beanspruchung völlig zerstört. (Gesteine, z. B. Quarz, trockener Schneestaub, Eiskristalle.) Letztere verändern ihre äußere Gestalt bei der geringsten Beanspruchung und fügen sich mühelos in jede Form (feuchter, weicher Ton, weiches Wachs, Wasser, Quecksilber und alle sonstigen tropfbaren Flüssigkeiten).

In der Wirklichkeit mögen diese Unterscheidungen nicht völlig scharf durchführbar sein, für die Charakterisierung bei den nachfolgenden technischen Erörterungen dürften sie jedoch ebenso wie für die Charakterisierung des Stoßes fester Körper ausreichen, obgleich es keine absolut elastischen und unelastischen, absolut spröden und bildsamen Körper gibt.

Zur weiteren Einleitung in die nachfolgenden Ausführungen mögen dann noch folgende Forschungsergebnisse der Molekularphysik angeführt werden. (Vgl. Müller-Pouillet, Auflage 1902, und Kayser, Physik.)

„Für unsere Augen scheinen die festen und flüssigen Körper aus kontinuierlicher Masse zu bestehen, so daß in ihnen keine Stelle frei von Masse ist. Aber eine große Reihe physikalischer Vorgänge, wozu namentlich die Wärmeerscheinungen gehören, zwingen uns, anzunehmen, daß alle Körper aus durch Zwischenräume getrennten Partikeln bestehen, welche in fortwährender Bewegung begriffen sind. Die kleinsten denkbaren Teilchen nennt man Molekeln oder Moleküle (gehören dieselben einer chemischen Verbindung an, so müssen sie noch kleinere Teile der Elemente enthalten, welche man Atome nennt). Zwischen den Molekeln müssen zweierlei Kräfte tätig sein: anziehende und abstoßende; wir sehen ja, daß ein Körper sowohl der Kompression als der Dehnung Widerstand leistet, was eben eine Folge der abstoßenden und anziehenden Kräfte ist. Die Molekeln sind so klein — man kann ihren Durchmesser angenähert berechnen, er beträgt einige Milliontel Millimeter —, daß wir selbst mit den besten Mikroskopen nicht instande sein können, sie zu sehen, so daß in der Annahme eines solchen Körperbaues kein Widerspruch mit der Erfahrung liegt.“ (Kayser, Physik § 72.)

„Daß tropfbare Flüssigkeiten porös sind, wird durch die Verminderung ihres Volumens infolge von Druck und

Abkühlung sowie durch die Tatsache bewiesen, daß häufig die Mischung zweier Flüssigkeiten, z. B. von Wasser und Alkohol, ein kleineres Volumen hat als die Summe der einzelnen Volumina vor dem Mischen. Man muß annehmen, daß sie gegenseitig einen Teil ihrer Poren ausfüllen.“ (M.-P. S. 43.)

„1^g Karmin färbt 100 000^g Wasser merklich rot. 1^{kbcem} Indigo läßt sich (im Wasser) in 30 Billionen sichtbare Teile zerteilen.“ (M.-P. 21.)

„Wird Wasser in Dampf verwandelt, so wird sein Volumen um mehr als das Hundertfache vergrößert. Die Wassermoleküle müssen sich voneinander entfernen, so daß sie im Wasserdampf durch große Zwischenräume getrennt sind.“ (M.-P. 23.)

„Flüssigkeiten absorbieren, d. h. ziehen Gase an. Diese verteilen sich dabei gleichmäßig durch das ganze Innere der Flüssigkeit. Die absorbierte Gasmenge hängt vom Druck des Gases und von der Temperatur der Flüssigkeit ab.“ (K. 144.)

„Flüssigkeiten absorbieren Gase entweder rein chemisch, z. B. Kalilauge die Kohlensäure, oder rein physikalisch, z. B. Wasser den Sauerstoff und den Stickstoff, oder auch teils chemisch, teils physikalisch, z. B. Wasser das Ammoniakgas, das Chlorwasserstoffgas, die schweflige Säure und die Kohlensäure.“ (M.-P. 601.)

„Befindet sich ein Gas in einem geschlossenen Gefäße, so stoßen nach der kinetischen Gastheorie von Clausius-Maxwell die Gasmoleküle fortwährend gegen die Gefäßwände und prallen zurück. Die Wirkung der Stöße nehmen wir als den Druck des Gases wahr.“ (K. 212.)

„Jede, dem Einfluß äußerer Kräfte entzogene Flüssigkeitsmasse bildet infolge der Kohäsion seiner Teilchen eine Kugel, z. B. ein Tropfen Olivenöl in einer Mischung von Wasser und Weingeist.“ (M.-P. 421.)

„Die Kohäsion bringt Oberflächenspannung hervor, infolge deren jede kleine Flüssigkeitsmasse eine Kugel ist, weil dann bei gegebenem Volumen die Oberfläche am kleinsten ist.“ (K. 95, 96.)

Nimmt man hiernach an, daß die einzelnen Wassermoleküle als Kugeln in Gestalt einer lockeren

porösen Masse gelagert sind, so bilden ihre Mittelpunkte bei engster Lagerung im Zustande der größten Dichtigkeit die Spitzen von Tetraedern, und es mißt der Zwischenraum zwischen den in einem Volumen (Vol.) enthaltenen Kugeln 0,27 Vol., unabhängig von dem Kugeldurchmesser, also auch für $d = 1 : \infty$. Die gesamte Oberfläche der Kugeln ergibt sich dagegen zu $\frac{4,44 \text{ Vol.}}{d}$, also für $d = 1 : \infty$ zu ∞ . (Vgl. Lueger, Wasserversorgung, S. 123.)

Nach dem Gaulinschen Milchkonservierungsverfahren werden die Fettkügelchen in der Milch so unendlich fein zerrieben, daß der gegen den Auftrieb des Fettes wirkende Reibungswiderstand der Milch unendlich groß wird, daher der Auftrieb nicht mehr bemerkbar ist und die Milch nicht aufrahmt. (Prometheus 1905, S. 78.)

„Warmes Wasser ist bedeutend weniger zähflüssig, viskos (viscum = die Mistel, aus der Vogelleim bereitet wird) als kaltes, d. h. es zeigt bedeutend geringere innere Reibungswiderstände.“ „Eine viskose Reihe bilden Aether, Wasser, Schwefelsäure, Leinöl, venetianischer Terpentin.“ (M.-P. 450, 451.)

§ 2.

Mittel zur allmählichen Geschwindigkeitsänderung.

Um eine in Bewegung befindliche Masse nicht stoßweise, sondern allmählich zu beschleunigen oder zu verzögern, bedient man sich gewöhnlich eines elastischen Körpers (Stahlfeder, Gummiband usw.), kann dazu aber auch einen unelastischen, aber bildsamen Körper benutzen. Will man z. B. ein fallendes Gewicht allmählich verzögern, so kann man es entweder auf eine Federvorrichtung oder auf einen Ballen plastischen Ton oder Wachs fallen lassen. Indem die einzelnen Tonschichten sich horizontal ausbreiten (Abb. 1), werden sie in lotrechter Richtung mehr und mehr plattgedrückt in der Weise, daß das Gesamtvolumen (die Dichte) nicht geändert wird.

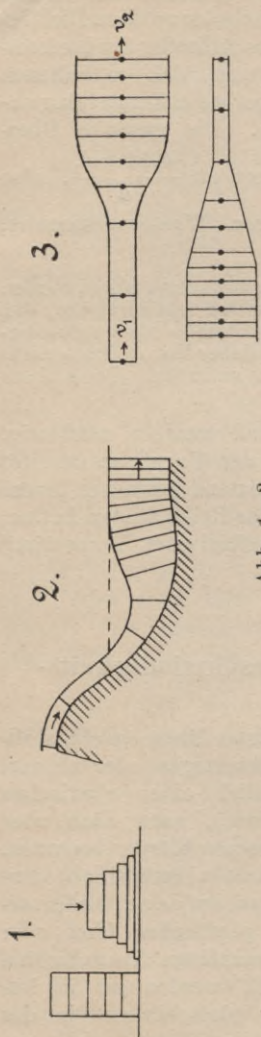


Abb. 1—3

Auch das Wasser wird als Polster zur allmählichen Aufnahme von lebendiger Kraft benutzt. Die lebendige Kraft der über den Rücken eines Wehrs überstürzenden Wassermasse wird durch einen auf dem Sturzbett hergestellten Wasserbehälter unschädlich gemacht, indem die einzelnen hintereinander liegenden Wasserlamellen (Abb. 2) sich in der Kraftrichtung allmählich plattdrücken und dabei nach der freien Oberfläche hin heben. Ebenso wird die lebendige Kraft frei fallender Bleikugeln durch ein Wasserbecken mit freier Oberfläche allmählich vernichtet.

Aber auch in einer geschlossenen Rohrleitung vermag das Wasser als Polster zur allmählichen Verzögerung oder Beschleunigung der in ihm schwimmenden Körper zu dienen, indem es mitsamt diesen Körpern durch ein konisches oder allmählich gekrümmtes Uebergangrohr geleitet wird (Abb. 3). Nach Maßgabe der räumlichen Ausbreitungsmöglichkeit tritt dann die Verzögerung oder Beschleunigung ein und die hierbei verbrauchte oder erzeugte lebendige Kraft ist

$$= \mp \frac{m \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{2g}$$

Dies gilt auch für den Fall, daß der schwimmende Körper ein endlich kleiner Wassertropfen ist und schließlich auch dafür, daß das Rohr durch unendlich viele

solche unendlich kleinen Wassertropfen ausgefüllt wird. Die notwendige Voraussetzung, daß die einzelnen Tropfen keinerlei Kohäsion besitzen, trifft in der Praxis allerdings nicht völlig zu.

§ 3.

Freier Fall fester und flüssiger Körper.

Am Rande eines Stegs (Abb. 4) liege eine dicht an dicht geschlossene Reihe unendlich kleiner Sandkörner. Ein Mann bewege sich mit gleichbleibender Geschwindigkeit w über den Steg und lasse dabei an jeder Stelle des Stegs je ein Sandkorn in den luftleeren Raum hinabfallen. Dann werden in dem Augenblick, wo der Mann in A angelangt ist, die fallenden Sandkörner eine Parabel bilden ($s = \frac{gt^2}{2}$). Während die Sandkörner auf dem

Steg eine dicht geschlossene Reihe bildeten, berühren sie sich im Fallen nicht mehr. Die Kette erscheint auseinandergerissen, die zuerst zu Fall gekommenen Körner eilen den späteren mit der Beschleunigung g voraus und werden von ihnen auch in unendlicher Ferne nicht eingeholt.

Werden die Sandkörner in dicht geschlossener Reihe mit der Geschwindigkeit w über den Steg fortgeschoben, bis sie durch ein Loch C hintereinander herunterfallen, so bilden sie eine lotrechte, auseinandergerissene Kette.

Dieselbe Erscheinung zeigt sich als Tropfenbildung beim Fallen von unendlich kleinen Wasserkörperchen, mögen sie lotrecht aus der Bodenöffnung oder parabolisch aus der Seitenwand eines Gefäßes herausfallen — wenigstens bei größerer Fallhöhe. Diese Tropfenbildung ist bei hohen Wasserfällen deutlich sichtbar und wird dem Auge auch durch einen physikalischen Apparat vorgeführt. Im Volksmund sog. „Bindfadenregen“ ist in Wirklichkeit unmöglich.

Der Umstand, daß das Wasser nahezu „widerstandlos deformierbar“, plastisch, bildsam, aber dabei doch „etwas“ kohärent (klebrig viskos) ist, einer gewissen Molekularanziehung unterliegt, bewirkt allerdings im Anfang der Fallbewegung gemeinsam mit dem äußeren Luft-

druck einen Zusammenhalt der einzelnen Wassertropfen, ein lotrechtes Auseinanderziehen und gleichzeitiges, waggerichtetes Zusammenschnüren, eine Umgestaltung der einzelnen, kugelförmigen Moleküle in längliche Ellipsoide. Dabei hängt die Länge und Gestalt des geschlossenen, glasklaren Wasserstrahls wesentlich von der hier nicht weiter zu erörternden Gestalt der Ausmündung ab.

Umschließt man den fallenden Sprühregen (Abb. 5) in Gedanken durch ein ideales, d. h. völlig reibungsloses zylindrisches Rohr, so entstehen zwischen den einzelnen Tropfen luftleere Räume von nach unten wachsender Länge. Durchbricht man dies Rohr an einer Stelle, so wird hier die äußere Luft hineingedrückt. (Aehnliche Verhältnisse liegen vor beim Anschluß eines seitlichen Klosettrohrs an das lange, lotrechte Fallrohr einer Kanalisation. Beim Herabfallen eines Wasserpfropfens aus großer Höhe tritt ein Absaugen des Wasserverschlusses im Klosett ein).

Wäre ein umschließendes Rohr nicht vorhanden, würde dagegen die Molekularanziehung, die Kohäsion des Wassers unendlich groß und gleichzeitig der äußere Luftdruck wirksam sein, so würden sich die luftleeren Zwischenräume zwischen den einzelnen Tropfen dadurch mit Wasser ausfüllen, daß jeder einzelne Tropfen (selbst noch in unendlicher Tiefe) bis zur Länge des luftleeren Zwischenraumes lotrecht auseinandergezogen und gleichzeitig wagrecht zusammengeschnürt würde. Es müßte dann für jede Stelle (Abb. 6) die Bedingung erfüllt werden:

$$M = f_1 \cdot v_1 = f_2 \cdot v_2 = f_3 \cdot v_3$$

$$\text{oder } f_1 \cdot \sqrt{2gh_1} = f_2 \cdot \sqrt{2gh_2} = f_3 \cdot \sqrt{2gh_3}$$

$$\text{oder } f_1 : f_2 = \sqrt{h_2} : \sqrt{h_1}$$

$$\text{oder } f_1^2 : f_2^2 = h_2 : h_1$$

und für den Kreisquerschnitt

$$d_1^4 : d_2^4 = h_2 : h_1.$$

Daraus würde sich die Gestalt des bis zu unendlicher Tiefe geschlossenen Strahls und des diesen umschließenden reibungslosen Rohrs berechnen lassen. Für $h_1 = 0$ ist indessen $v_1 = 0$, und also $f_1 = \infty = d_1$, und es müßte

also das Rohr am obersten Ende einen ∞ großen Durchmesser erhalten.

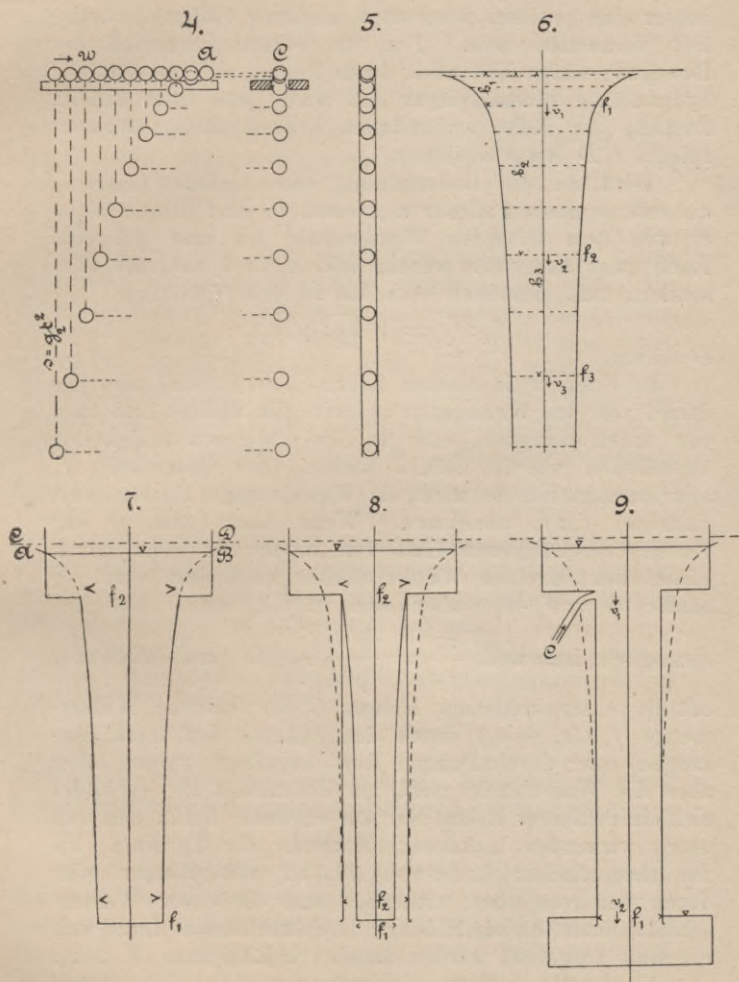


Abb. 4—9.

In der Wirklichkeit wird man deshalb die vorliegenden Verhältnisse nicht genau herstellen können. An der umfänglich begrenzten Wasseroberfläche (Abb. 7) muß immer eine gewisse, wenn auch minimale Fallgeschwindigkeit vorhanden sein. Der im Beharrungszustand der Bewegung einige Zeit nach deren Beginn sich einstellende hydraulische Wasserspiegel AB wird stets unter den im Zustand der Ruhe vorhandenen hydrostatischen Wasserspiegel CD etwas absinken.

Wird an die Bodenöffnung eines Gefäßes (Abb. 7) ein reibungsloses Fallrohr angesetzt, so darf dieses, wenn es von dem fallenden Wasserstrahl bis zum untersten Ende ganz ausgefüllt werden soll, nicht zylindrisch sein, sondern muß sich nach oben hin in dem Verhältnis

$$f_1 : f_2 = \sqrt{h_2} : \sqrt{h_1}$$

erweitern.

In einem zylindrischen Rohre (Abb. 8) wird sich der Strahl von den Wandungen ablösen, die äußere Luft wird von unten eintreten, und da die Fallgeschwindigkeiten unverändert wie in Abb. 7 bleiben, der Querschnitt f_2 aber verengt ist, so wird die Wassermenge in dem Verhältnisse $f_2 : f_1$ abnehmen. Wenn aber (Abb. 9) der Eintritt der äußeren Luft von unten her etwa durch Eintauchen in einen Wasserbehälter verhindert wird, so müßte $Q = f_1 \cdot v_2$, aber auch $= f_1 v_1$ sein. Da dies

unmöglich ist, weil $\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sqrt{h_1}}{\sqrt{h_2}}$, so muß entweder

mittels eines seitlichen Rohres C die fehlende Wassermenge $f_1 \cdot (v_2 - v_1)$ durch den äußeren Luftdruck (Ansaugen) oder durch Pumpen usw. zugeführt werden, oder aber die Wassersäule reißt am Rohransatz ab, es bildet sich ein luftleerer Raum, der nur entweder durch den von unten wirkenden Luftdruck (Saugrohr der Turbinen) bis zur theoretischen Höhe von 10,33 m mit Wasser oder durch den von oben wirkenden und die obere Wasserschicht unter Strudelbildung durchbrechenden Luftdruck mit Luft ausgefüllt werden kann (vgl. Rühlmann, S. 212).

Wird die untere Rohrmündung (Abb. 9) durch einen Schieber bis auf $\alpha \cdot f_1$ geschlossen, so ist die aus-

fließende Wassermenge nur noch $= \alpha \cdot f_1 v_2$. Diese kann dann ohne seitliche Ansaugung bzw. ohne Abreißen der Wassersäule am oberen Ansatz des Rohrs hinzufießen, wenn

$$f_1 \cdot v_1 = \alpha \cdot f_1 v_2,$$

also

$$\alpha = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sqrt{h_1}}{\sqrt{h_2}}$$

ist. Um dieses Maß ist also die Leistungsfähigkeit eines zylindrischen Fallrohres geringer als die eines nach oben erweiterten Rohres.

In einem mit der Geschwindigkeit v_1 aus einem Hydranten emporgeschleuderten Wasserstrahl haben die einzelnen Wasserteilchen nicht das Bestreben, auseinanderzureißen, sondern sie werden durch ihr Gewicht breitgedrückt. Es braucht hier nicht weiter entwickelt zu werden, daß der springende Strahl theoretisch die pilzförmige Gestalt nach Abb. 6 haben müßte. Dabei würde aber vorausgesetzt, daß jeder Wassertropfen, nachdem er die höchste Höhe $\frac{v_1^2}{2g}$ mit der Endgeschwindigkeit $v = 0$ erreicht hat, horizontal seitlich fortgeschleudert würde und nicht wieder in den springenden Strahl zurückfiel. Ebenso würde dabei der niederdrückende Einfluß des Luftwiderstandes außer acht gelassen.

Photographische Momentaufnahmen springender Strahlen, mit deren theoretischen Aufrissen übereinandergetragen, dürften lehrreiche Ergebnisse haben.

§ 4.

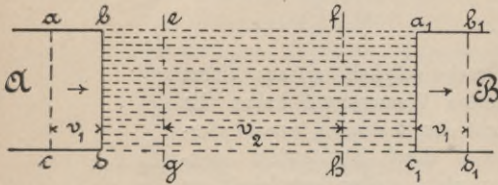
Schnelle Bewegung unendlich kleiner Körper zwischen zwei langsam bewegten endlich großen Massen.

Zwei Kohlenstifte A und B (Abb. 10) mögen durch ein gemeinsames Getriebe mit gleicher Geschwindigkeit v_1 nach rechts bewegt werden. Gleichzeitig bewirke irgend eine, z. B. magnetische Kraft, daß der in jeder Sekunde mit der Länge v_1 vorrückende Teilkörper $abcd$ plötzlich in unendlich vielen und unendlich dünnen, die

Länge $v_1 dt$ besitzenden Scheibchen von A abgerissen, mit der größeren Geschwindigkeit v_2 nach B fortbewegt und an B plötzlich wieder angesetzt werde.

Wird unter dem Sandstrahl (Abb. 4) ein Auffangbrett horizontal mit der Geschwindigkeit w hindurchgezogen, so lagern sich auf ihm die Sandkörner dicht an dicht genau wie auf dem oberen Steg ab. Sie werden dann aber oben allmählich abgelöst und nur unten plötzlich wieder angesetzt.

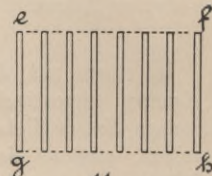
10.



Die Kohlenstifte werden alsdann einen gleichbleibenden Abstand $b-a_1$ behalten (und scheinbar in Ruhe sein). Der Körper $abcd$ möge durch die Kraft nicht nur in unendlich dünne Scheibchen, sondern in unendlich kleine Stäubchen (Molekütle) zerrissen sein und jedes einzelne dieser

Stäubchen sich mit der Geschwindigkeit v_2 fortbewegen. Dann wird der Raum $efgh$ durch diese Stäubchen nicht völlig ausgefüllt werden. Je größer v_2 ist, desto größer ist der Zwischenraum zwischen den Stäubchen, desto durchsichtiger der gesamte Raum bda_1c_1 .

Beim elektrischen Bogenlicht ist die Geschwindigkeit v_2 so groß, daß die glühenden Kohlenstäubchen mit dem Auge nur noch als Lichtschein wahrgenommen werden. Da diese Stäubchen jedoch durch die Verbrennung verzehrt werden, so setzen sie sich nicht in $a_1 b_1 c_1 d_1$ an B wieder an. Der Abstand $b a_1 = d c_1$ wird deshalb dadurch gleichbleibend erhalten, daß B in Ruhelage bleibt und nur A mit v_1 bewegt wird.



11.

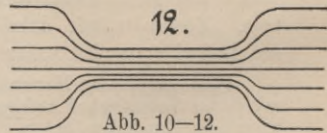
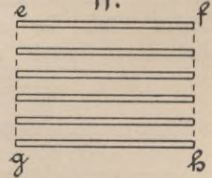


Abb. 10—12.

Man kann sich den Raum $efgh$ (bda_1c_1) dabei durch die Stäubchen so ausgefüllt denken, daß sie sich in unendlich zahlreichen, unendlich dünnen Scheibchen (Abb. 11) entweder, wie oben angenommen, lotrecht auf die Bewegungsrichtung oder aber auch parallel zu dieser Richtung zusammen schließen. Durch die erstere Anschauung wird das Zerreißen des Körpers $abcd$ ersichtlich. Da die Stäubchen aber eine gewisse Kohärenz (molekulare Anziehungskraft) besitzen, wird sich der Zusammenschluß tatsächlich eher nach der zweiten Anschauung vollziehen. Dabei wird sich dann auch teilweise durch den äußeren Luftdruck und teilweise durch die Kohärenz eine Annäherung, Einschnürung (Abb. 12) dieser parallelen Streifen zeigen. Daß bei dieser Bewegung eine Umlagerung aller einzelnen Stäubchen gegeneinander außer ihrer axialen Bewegung erfolgen muß, ist augenscheinlich.

Je nachdem, ob die Umlagerung allmählich, wie z. B. in dem zähflüssigen Faden einer erhitzten Siegelackstange, oder plötzlich, wie im Lichtbogen einer elektrischen Lampe, erfolgt, geht sie mit weniger oder mehr Erschütterungen, Stößen vor sich.

§ 5.

Fortschreiten unendlich kleiner fester Körper auf drei endlosen Gurten.

Die Anschauung wird weiter gefördert durch folgende Betrachtung:

Drei endlose Gurten abc (Abb. 13) mögen mittels Wellen oder Vierkante in der gleichen Richtung von links nach rechts gedreht werden, und zwar a und c mit der gleichen Geschwindigkeit w_1 , b mit erheblich größerer, z. B. mit der doppelt so großen Geschwindigkeit w_2 .

A. Uebergang von Gurt a auf Gurt b .

a. Fester Körper.

Auf dem Gurt a liegen in Reihen (je 8) dicht an dicht Stäubchen — Kugeln oder Würfel — mit der Längenabmessung $w_1 dt$, deren erste Reihe 1—8 beim Verlassen des Gurtes a , ohne sich zu drehen, auf den

zweiten Gurt b plötzlich lotrecht hinunterfällt oder hinüberspringt. Sie werden dann mit der größeren (doppelten) Geschwindigkeit w_2 durch den Gurt b weiter befördert und lagern sich auf b nach Anhalt der Abb. 11 $e f g h$ in parallelen Reihen zu acht mit Zwischenräumen $= (w_2 - w_1) dt$ ab. Soll aber der Gurt b lückenlos bedeckt sein, so müssen die Reihen 1—8, wenn $w_2 = 2 w_1$ ist, in zwei Glieder 1—4 und 5—8 umgestellt

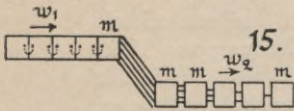
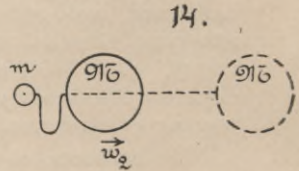
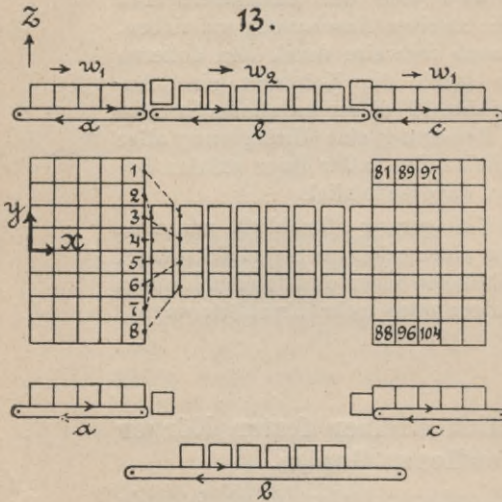


Abb. 13—15.

werden. Hierzu sind seitliche Bewegungen der Würfel in der Y -Achse erforderlich, die beim Berühren des Gurtes b beendet sein und also plötzlich (in der Luft) während des Sprunges erfolgen müssen.

Da w_1 in der unendlich kleinen Zeit dt auf w_2 gesteigert werden soll, so muß die Beschleunigung in dieser

Zeit $w_1 - w_2$, also die sekundliche Beschleunigung $\frac{w_1 - w_2}{dt}$ sein.

Die Stäubchen würden bei Berührung des Gurtes b unfehlbar hintenüberkippen, wenn sie die Geschwindigkeit w_2 nicht schon in der Luft empfangen.

Steigen wir gehend von hinten in einen schnell fahrenden Omnibus oder in ein Karussell ein, so beschleunigen wir den Schwerpunkt unseres Körpers im Augenblick des Einsteigens durch Vornüberbeugen des Oberkörpers.

Die hinter der Reihe 1—8 folgenden Würfel können diesen eine Beschleunigung nicht erteilen, weil sie selbst nur die Geschwindigkeit w_1 besitzen und also keinen Druck von hinten auf 1—8 ausüben können. Dies muß vielmehr durch die auf dem Gurt b mit der Geschwindigkeit w_2 vorauseilenden Würfel geschehen, und zwar muß die von ihnen ausgeübte plötzliche Zugkraft, da die sekundliche Beschleunigung $\frac{w_2 - w_1}{dt}$ unendlich groß ist, gleichfalls unendlich groß werden (Kraft = Masse mal Beschleunigung). Nur wenn die Masse des einzelnen Würfels unendlich klein, d. h. ein Stäubchen ist, wird die Kraft = $0 \cdot \infty$ und hat dann einen bestimmten Wert = $M dt \cdot \frac{w_2 - w_1}{dt} = M (w_2 - w_1)$.

Es kann aber nicht das einzelne mit w_2 vorauseilende unendlich kleine Stäubchen auf die mit w_1 nachfolgenden einzelnen Stäubchen einen endlich großen Ruck (plötzliche Zugkraft) ausüben, sondern hierzu ist die im Verhältnis zum einzelnen Würfel unendlich große Masse M aller mit der lebendigen Kraft $\frac{M w_2^2}{2}$ vorauseilenden Würfel erforderlich ($M = \infty$ gegen $M dt$).

Sind (Abb. 14) zwei Kugeln von unendlich verschiedenen Massen m und M miteinander durch eine Schnur verbunden, so reißt die mit w_2 plötzlich fortgeschleuderte Kugel M die ruhende Kugel m mit der Geschwindigkeit w_2 mit sich fort — vorausgesetzt, daß die Schnur entweder elastisch oder zwar unelastisch ist, aber eine unendlich große Zugbeanspruchung aushält.

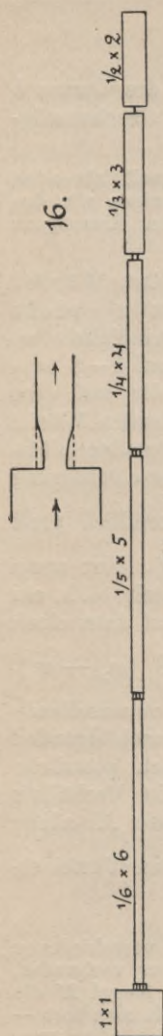


Abb. 16.

Da letztere in der Wirklichkeit nicht vorkommt, so reißt die Schnur, wenn sie nicht mehr oder weniger elastisch ist. Ist die Verschiedenheit der Masse nicht unendlich groß, sondern begrenzt, so kann auch eine unelastische Schnur den Ruck aushalten, die beiden Massen bewegen sich aber alsdann gemeinsam mit einer geringeren Geschwindigkeit als w_2 vorwärts.

Ist die Masse der durch Zugbänder (Abb. 15) verbundenen, plötzlich ruckweise mit w_2 anziehenden Würfel $= n \cdot m$, so wird die Anspannung der Zugbänder in ähnlicher Weise wie bei der Anspannung von n gleich starken Pferden vor einem Geschütz oder von n gleich starken Menschen an einem Tau allmählich gleichmäßig abnehmen. Die mit w_1 nachfolgenden Würfel werden dagegen durch den Ruck zunächst nicht weiter beeinflusst, ihre Zugbänder bleiben schlaff.

Dieselbe Erscheinung zeigt sich beim plötzlichen Anziehen eines Eisenbahnzuges durch eine Anzahl gleichmäßig starker Maschinen.

b. Bildsamer Körper.

Sind die Würfel unelastisch (von unveränderlichem Volumen), aber völlig bildsam, so werden sie (Abb. 16) durch die in der X -Achse wirkenden Zugspannungen auseinandergezogen, durch die gleichzeitig auf die seitliche Verschiebung in der Y -Achse hinwirkenden Druckkräfte dagegen zusammengedrückt und also zu länglichen Prismen umgestaltet. Da die von den anziehenden Würfeln ausgehenden Zugspannungen aber wie in den Zugseilen der obigen n Pferde mit wachsender Entfernung von der Ruckstelle allmählich abnehmen, so wird die Umgestaltung der einzelnen Würfel sich all-

mählich abnehmend vollziehen (Kontraktion, Einschnürung). Der Längsbereich der Zugkraft in der X-Achse kann also durch den Bereich der Einschnürung gemessen werden. Soweit letztere sichtbar ist, soweit wirken auch die Längszugkräfte.

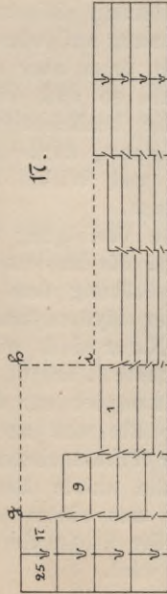
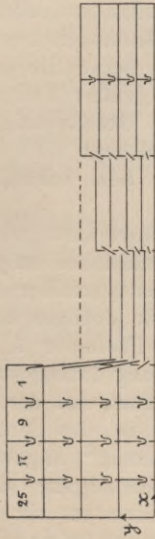
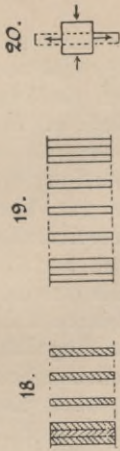
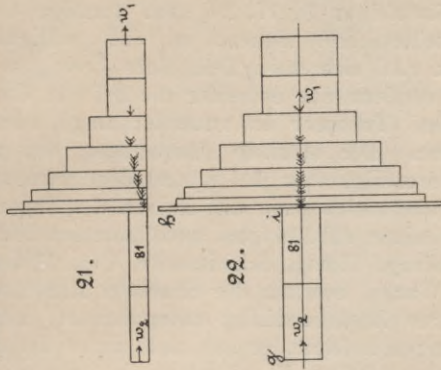


Abb. 17—22.

Indessen ist bei starker Aenderung der Geschwindigkeiten w_1 und w_2 und demgemäß bei starker Verlängerung der Würfel in der X-Achse auch die zu ihrer Zusammen-drückung in der Y-Achse erforderliche Kraft entsprechend groß. Demgemäß wird (Abb. 17) ein bildsamer Würfel 1



auch schon auf dem oberen Gurt a vermöge der schräg gerichteten Zugkraft k sich umzugestalten suchen und auch seine Nachfolger 9, 17, 25 usw. vermöge der Kohärenz in Mitleidenschaft ziehen, so daß schließlich in dem Dreieck ghi sich kein Teil eines bewegten Würfels befindet, sondern nur entweder die bei der Umbildung entstehenden Trümmer in ruhender Lage oder gar keine Trümmer. Die stärkste Anspannung des verbindenden Zugseils erfolgt aber bei i , und dort wird also auch bei einer Ueberanstrengung das Reißen des Zugseils eintreten.

In einer zähflüssigen, unvollkommen bildsamen Masse (z. B. Sirup, Honig, Schmierseife, Oel, heißer Siegelack, heißes Wachs) besitzen die einzelnen Massenteilchen einen sichtbaren Zusammenhang untereinander, sie üben Zugspannungen aufeinander aus und zeigen dadurch auch für das Auge sichtbar die einzelnen, langgezogenen Fäden.

Das Wasser ist viel weniger zähflüssig, ist fast vollkommen bildsam und übt deshalb Zugspannungen — Kohärenz — nur in geringem Maße aus. Ist die Geschwindigkeitsänderung einigermaßen erheblich, so wirkt zwar die Zugspannung auf jedes Massenteilchen in kürzester Entfernung, reißt dann aber an der Stelle der stärksten Beanspruchung ab, so daß ein großer Teil der Massenteilchen nicht die beabsichtigte Geschwindigkeit w_2 erhält, sondern stolpert, zurückgedrängt wird und dadurch Rückströmungen und Wirbel in dem schädlichen leeren Raume ghi erzeugt.

Eine weitere Verfolgung dieser Bewegungen ist hier nicht beabsichtigt. Es handelt sich dabei um geometrische Aufgaben, deren Lösung dem Mathematiker zufällt. (Ob die Aufgaben der Hydrodynamik deshalb ausschließlich mathematischer Natur sind, wie Professor Wien in seiner Hydrodynamik, Seite 1, angibt, mag dahingestellt bleiben.)

Hier handelt es sich nur darum, mit der landläufigen Anschauung, die übrigens auch in des Unterzeichneten „Grundlagen der Turbinenberechnung“ angewandt ist, zu brechen, daß die axiale Beschleunigung des Wassers beim Uebergang aus einem weiten in ein enges Rohr durch Drücke oder Stöße der nachfolgenden Massenteilchen erzeugt wird.

Ebenso kann auch der einem Omnibus folgende lahme, unelastische Fahrgast in diesen nicht mit Hilfe der ihm nachfolgenden gleichfalls lahmen, unelastischen Hintermänner, sondern nur mit Hilfe des in dem Wagen befindlichen Führers hineinbefördert werden. Ist der Wagenführer elastisch, muskulös, so erfolgt die Beförderung allmählich ohne Ruck, ist er unelastisch, steifarmig, so plötzlich mit erheblichem Ruck.

Die axiale Beschleunigung wird vielmehr lediglich durch ruckweise (stoßweise) wirkende Zugkräfte der vorausgehenden Massenteilchen erzeugt, und erst diese axial wirkenden Zugkräfte erzeugen wegen des konstanten Volumens des Wassers lotrecht auf die Bewegungsrichtung gerichtete Druckkräfte, die dann, mit den axialen Zugkräften zu schräg gerichteten Zugkräften vereint, eine Wirkung auch auf die nachfolgenden Massenteilchen durch Kohäsion ausüben (bei der Abb. 18 ist diese Rückwirkung ausgeschlossen).

Die pulsierenden Bewegungen und die molekularen Wirbelungen des freifließenden Wassers sind ebenso wie vielleicht das Rauschen auf diese, auf jedes einzelne Wassermolekül ruckweise wirkenden Zugkräfte zurückzuführen.

Ist die Geschwindigkeitszunahme sehr beträchtlich, wie bei Abb. 9, so kann auch das ruckweise durch Einschnürung erfolgende Nachziehen unmöglich werden und ein völlig luftleerer Zwischenraum entstehen.

B. Uebergang von Gurt *b* auf Gurt *c*.

Soweit die Einschnürung auf den Gurt *b* reicht, soweit werden die Würfel in der Richtung der *X*-Achse angespannt. Von dieser Grenze an liegen sie wieder ohne Zusammenhang auf dem Gurt *b* und werden von diesem mit der Geschwindigkeit w_2 vorwärts bewegt.

Soll ein Würfel 81 (Abb. 13) aber plötzlich auf den mit der Geschwindigkeit w_1 bewegten Gurt *c* übergehen, so muß er in der Zeit dt um $w_1 - w_2$ verzögert werden. Die ihm nachfolgenden Würfel können aber keine verzögernde Zugkraft auf ihn ausüben, weil sie die gleiche Geschwindigkeit w_2 wie er selbst besitzen.

Auch die hinteren Wagen eines Eisenbahnzuges können auf die vorderen eine Verzögerung (abgesehen von der Reibung) nicht ausüben, so lange ihre Geschwindigkeit nicht durch Bremsung verzögert wird.

Soll der Uebergang von w_2 auf w_1 wieder während der Schwebelzeit zwischen den beiden Gurten, also in unendlich kurzer Zeit dt erfolgen, so ist die sekundliche Verzögerung

$$\frac{w_2 - w_1}{dt} \text{ und also bei endlicher Größe des einzelnen}$$

Würfels die die Verzögerung hervorrufende und der Bewegung entgegengerichtete Kraft (= endliche Masse \times unendlich große sekundliche Verzögerung) unendlich groß. Es kann also wieder nicht der einzelne mit w_1 abstoppende Würfel 89 (Abb. 13) auf den mit w_2 anspringenden einzelnen Würfel 81 den unendlich großen Stoß ausüben, sondern hierzu ist wieder die im Verhältnis zum einzelnen Würfel unendlich große Masse aller mit

dem Beharrungsvermögen $M \frac{w_1^2}{2}$ abstoppenden Würfel erforderlich. $M = \infty$ gegen m .

Es sei die Masse der plötzlich abstoppenden Würfel = $n \cdot m$, und es möge die Stoßkraft der einzelnen Würfel allmählich gleichmäßig abnehmen.

Der Anprall einer schnell fahrenden Lokomotive gegen eine Reihe (n) langsam vorausfahrender Eisenbahnwagen wird auch entsprechend abgeschwächt, je weiter die Wagen nach vorn stehen. Die Rahmengestelle werden beim vordersten Wagen nur $\frac{1}{n}$ so stark beansprucht als beim letzten Wagen.

Die Lanze, an der sieben Menschen je mit der Kraft k stemmen, wird am vorderen Ende durch $7k$, am hinteren Ende durch $1k$ auf Knicken beansprucht.

Die mit w_2 auf Würfel 81 folgenden Würfel werden durch den Stoß zunächst unmittelbar nicht weiter beeinflusst, wenn der Uebergang von b nach c wie von a nach b in Abb. 13 erfolgt. Sind die vorausgehenden Würfel 89, 97, 105 usw. unelastisch, aber völlig bildsam, so werden sie Abb. 20, 21, 22 durch die in der X -Achse rückwärts wirkenden Druckspannungen zusammengedrückt, durch die gleichzeitig auf die seitliche Verschiebung in der Y -Achse hinwirkenden

Zugkräfte dagegen auseinandergezogen und also zu hochkantigen Prismen umgestaltet.

Da diese von den rückwärtspressenden Würfeln ausgehenden Druckspannungen aber (wie in der obigen Lanze) mit wachsender Entfernung von der Stoßstelle allmählich abnehmen, so wird die Umgestaltung sich allmählich abnehmend vollziehen. (Aufwurf, Brandung.) Die Längserstreckung des Stoßes in der X -Achse ist also durch die Ausdehnung des Aufwurfes zu messen.

Die hinter Würfel 81 (Abb. 13) folgenden Würfel können auf diesen eine hemmende Wirkung zunächst und unmittelbar nicht ausüben, weil sie selbst die Geschwindigkeit w_2 besitzen. Indessen ist bei starker Aenderung der Geschwindigkeiten w_1 und w_2 und demgemäß bei starker Zusammendrückung der Körper in der X -Achse auch die auf ihre Auseinanderbreitung in der Y -Achse wirkende Kraft entsprechend stark. Demgemäß wird ein bildsamer Würfel sich vermöge der Kohäsion auch schon auf dem Gurt b umzugestalten suchen und auch seine Nachfolger 73, 65 usw. durch Kohäsion in Mitleidenschaft ziehen, so daß sich schließlich in dem Dreieck $g h i$ (Abb. 22) ruhende Trümmer (Schaum) befinden.

In einer zähflüssigen, unvollkommen bildsamen Masse zeigen sich für das Auge sichtbar vorwärts und hinterwärts von der Stoßstelle die einzelnen aufgestauchten Druckstäbe.

Das leicht flüssige, fast vollkommen bildsame Wasser wird bei starker Geschwindigkeitsabnahme völlig zu Schaum zertrümmert (Brandung). Nur wenn der Geschwindigkeitswechsel nicht groß ist und die Reibung der Gefäßwandungen außerdem noch bremsend wirkt, bildet sich durch allmähliche Aufstauchung die Staukurve, die man darnach auch als „Stauchkurve“ bezeichnen könnte.

§ 6.

Wellenförmige, pulsierende Erscheinungen.

Auf den Gurten a , b und c (Abb. 23) mögen sich statt der völlig unelastischen Würfel Menschen befinden, die teilweise, d. h. in den Unterkörpern völlig unelastisch,

ungelenkig, hölzern, steifbeinig sind und unbeweglich, aber lose auf den Gurten stehen, teilweise, d. h. in den Oberkörpern elastisch, d. h. biegsam, armgelenkig sind.

Nach den Ausführungen des vorigen Paragraphen wird die Reihe 5 durch die vorauseilenden Reihen etwa 6—10 von Gurt *a* auf Gurt *b* hinübergezogen, wobei die Anspannung der Zugseile von 5—10 allmählich abnimmt. Infolgedessen werden die elastisch federnden Oberkörper der Reihen 5 und 6 zwangsweise stark vornüber gezogen, während diese Neigung in 7 und 8 allmählich geringer und schließlich in 10 = 0 wird. Die hinter 5 folgenden Reihen 1—4, die die tiefe Neigung von 5 sehen, werden sich nicht zwangsweise, sondern freiwillig vornüber beugen, um dadurch ihre Schwerpunkte schon vor dem Sprung von 5 nach 6 allmählich zu beschleunigen.

Die Reihe 14 wird durch die langsam vorausschleichenden Reihen (etwa 15—19) von Gurt *c* aus zurückgestoßen, wobei die Druckbeanspruchung der Stoßstangen von 14—19 allmählich abnimmt. Die elastisch federnden Oberkörper der Reihen 14, 15 werden dadurch zwangsweise stark hintenüber gebeugt, während diese Rückwärtsbiegung in den Reihen 16—19 allmählich geringer und schließlich in 19 = 0 wird. Die hinter 14 folgenden Reihen 11, 12, 13, die die tiefe Rückwärtsbeugung von 14 sehen, werden sich nicht zwangsweise, sondern freiwillig zurückbeugen, um dadurch schon vor dem Anprall von 14 nach 15 ihre Schwerpunkte zu verzögern.

Dadurch bilden die Köpfe von Reihe 1—19 eine wellenförmige Linie wie das wogende Kornfeld. Die Bewegung ist nicht mehr völlig gleichförmig, sondern pulsierend, wogend, schwingend. Gesteigert wird diese Erscheinung noch, wenn die sämtlichen Oberkörper durch ein wenn auch noch so schwaches, elastisches Band oder durch klebrige zähe Bindemittel verbunden sind. Bei der Bewegung des Wassers in Röhren zeigen sich dieselben Erscheinungen, in erster Linie als Folgeerscheinungen (Abb. 24) der von β bis γ abnehmenden Zugkraft und des von ϵ bis ζ abnehmenden Rückstoßes und in zweiter Linie von α bis β , und von δ bis ϵ als Folge-

erscheinungen der Kohäsion der Wasserteilchen. Es wird also hierdurch die theoretische Plötzlichkeit der Geschwindigkeitswechsel an den Stoßstellen praktisch erheblich gemildert. Je zäher die Flüssigkeit ist, um so mehr tritt dies in die Erscheinung.

§ 7.

Druck des Wassers = Zugkraft der Erde.

Für die richtige Auffassung der bei der Wasserbewegung eintretenden Vorgänge ist der Umstand hinderlich,

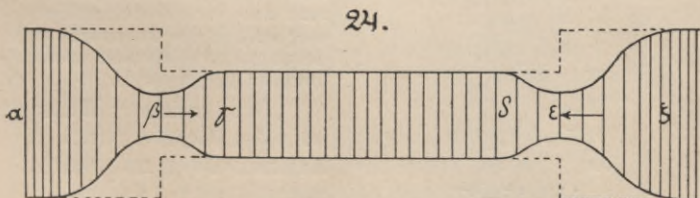
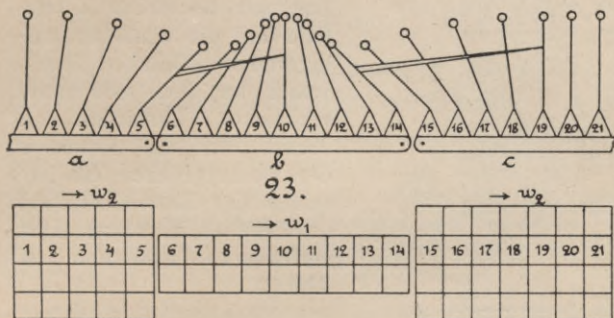


Abb. 23—24.

daß die Zugkraft — die Anziehungskraft der Erde — nicht mittels sichtbarer, sondern nur mittels unsichtbarer Zugseile auf alle Körper, feste und flüssige, wirkt. Diese Zugkraft zieht nicht nur den freifallenden Wasserstrahl

zur Erde, sondern auch den in einem Gefäß ruhenden oder bewegten Wassertropfen. Solange die Bodenöffnung eines Gefäßes geschlossen ist, wird der Zugkraft durch den Gegendruck des Gefäßbodens das Gleichgewicht gehalten. Sobald dieser Gegendruck beseitigt wird, wirkt die Zugkraft allein, und zwar zunächst und unmittelbar

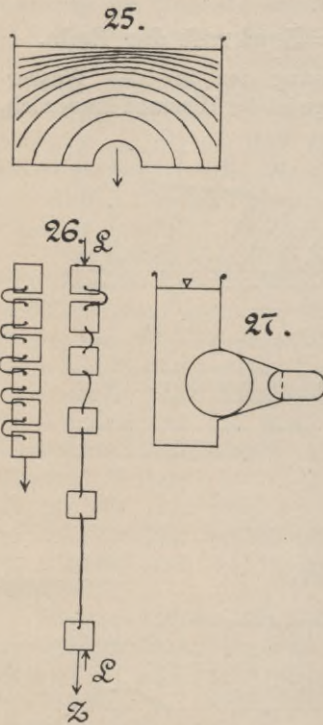


Abb. 25—27.

auf die der Oeffnung (Abbildung 25) nächst liegenden Wasserteilchen. Werden diese abwärts gezogen, so pflanzt sich (Abb. 26) die Zugkraft der Erde Z alsbald auf die zunächst auflagernden Teilchen fort, wobei der oben und unten wirksame Luftdruck L ebenso wie die Kohäsion der Wasserteilchen ein Abreißen der Kette innerhalb des Gefäßes im allgemeinen verhindern (Ausnahme s. Abb. 9).

Beim Ausfließen von Sand oder feinem Bleischrot aus einem Gefäß tritt ein solches Abreißen im Innern des Gefäßes dagegen leicht ein, wie man aus der zeitweisen Unbeweglichkeit der Oberfläche und deren ruckweisem Nachstürzen deutlich erkennen kann.

Bei geringer Wasserhöhe im Gefäße wirkt die Zugkraft so stark, daß zunächst eine flache Absenkung und schließlich eine

trichterförmige Durchbrechung der Oberfläche unter gleichzeitiger Wirbelbewegung eintritt.

Die Bezeichnung „Wasserdruck“ sollte daher durch „Zugkraft der Erde auf das Wasser“ ersetzt werden.

So ist auch der Ausfluß des Wassers aus einem seitlichen konischen Ansatzrohr (Abb. 27) nicht anzusehen

als durch Ueberdruck des auflastenden Wassers, sondern als durch die Zugkraft der Erde entstehend. Das Pascalsche Gesetz, daß sich der Wasserdruck im ruhenden Wasser nach allen Richtungen gleichmäßig fortpflanzt, kann so gefaßt werden, daß sich die Zugkraft der Erde im ruhenden Wasser nach allen Richtungen gleichmäßig fortpflanzt. Jedes einzelne Wassermolekül hat dabei im ruhenden Zustande eine kugelförmige Gestalt, während im Zustande der Bewegung eine Umgestaltung der molekularen Kugeln zu Ellipsoiden erfolgt.

§ 8.

Geometrische Beschränkungen des plötzlichen Geschwindigkeitswechsels.

Die lückenlose, den gegebenen Raum stetig ausfüllende Ueberführung einer Anzahl fester Körper aus einer Geschwindigkeit in eine andere ist eine Aufgabe, die für unelastische Körper durch die Geometrie (Wien, S. 1) für elastische lebendige Körper durch militärische Reglements zu lösen gesucht wird.

Nach Zeitungsmeldungen „werden zurzeit taktische Versuche angestellt, die Infanterie aus der Marschkolonne (Sektionen) unter Ausschaltung der Kompagniekolonne direkt in die Gefechtsformation überzuführen. Hierdurch soll die Schützenentwicklung auf der ganzen Linie beschleunigt werden“.

Für vollkommen bildsame Körper mag die völlige Lösung der Aufgabe Sache der Mathematiker sein. Eine gewisse Anschauung darüber kann man jedoch auch aus der Praxis heraus gewinnen.

Jedenfalls ist die plötzliche Ueberführung ungeordneter Massen das ungeeignetste Mittel, um Quetschungen und Lücken zu vermeiden, wie man vor der Eingangstür eines Theaters (Abb. 28) am eigenen Leibe beobachten kann. Der Instinkt der Volksmasse führt dort dazu, nicht dicht an die Eingangstür heranzudrängen, sondern vor und hinter dieser einen freien Raum offen zu halten, in dem die einzelnen Personen ihren Schritt allmählich zum Lauf beschleunigen und allmählich wieder

verzögern. Ueberzählige Läufer werden in die Ecken gedrückt und zur Umkehr und nochmaligen Wiederholung des Laufs gezwungen. In der Tür selbst ist die Geschwindigkeit am größten und braucht die Tür daher nicht einmal die volle Breite des Innenganges zu haben.

Bildsame Wasserkörper verhalten sich ebenso. Beim Uebergang (Abb. 29) von einem langsam a auf einen schnell laufenden Gurt b von gleicher Breite werden sich die einzelnen Fäden auf dem Gurt b voneinander getrennt erhalten. Ist der Gurt b aber so verschmälert, daß seine Fläche lückenlos bedeckt werden muß, so ziehen sich die einzelnen Fäden zusammen.

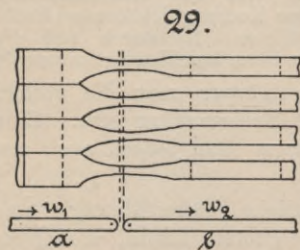
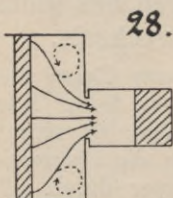
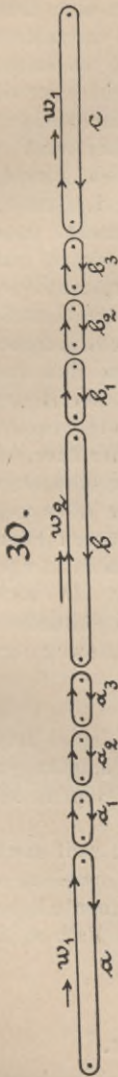


Abb. 28—29.

Jedenfalls ist ein mathematisch plötzlicher und dabei doch den Raum stetig füllender Uebergang von einer Geschwindigkeit zur anderen praktisch weder für flüssige noch auch für feste Körper möglich. Elastische feste Körper vermitteln den Geschwindigkeitswechsel durch Veränderung ihrer Dichte. Für unelastische feste Körper kann man den allmählichen Uebergang zwischen den Gurten a , b und c (Abbildung 30) durch Einschaltung von Zwischengurten a_1 , \dots , a_n , b_1 , \dots , b_n vermitteln, deren Geschwindigkeiten allmählich von w_1 bis w_2 wachsen bzw. abnehmen. Vollkommen unelastische feste Körper gibt es in der Natur

jedoch so wenig, wie vollkommen unelastische flüssige Körper; denn selbst Steine zeigen ebenso wie Wasser einen wenn auch in engen Grenzen schwankenden Wechsel der Dichtigkeit.



30.

Abb. 30.

31.

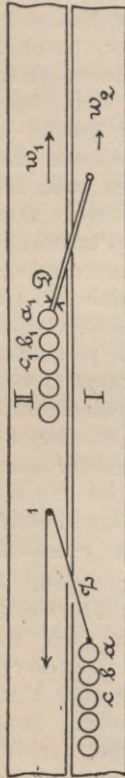


Abb. 31.

§ 9.

Arbeitswege der wirksamen Zug- und Druckkräfte.

Ein steifgliedriger, „hölzerner“, also unelastischer Mann a (Abbildung 31) soll von der langsam mit w_2 vorwärtsgehenden Plattform I einer Stufenbahn (trottoir mobile) auf die schnell mit w_1 vorwärts laufende Plattform II hinüber befördert werden.

Wenn die hinter ihm stehenden Leute b, c usw. gleichfalls unelastisch sind, so können sie ihm zu seinem Zweck nicht dienlich sein, weil sie dieselbe Geschwindigkeit w_2 besitzen wie er. Hülfe kann ihm dagegen dadurch kommen, daß er mittels eines Seils mit der auf der schnelleren Plattform vorbei passierenden Eisenstange 1 verbunden wird. Ist das Seil elastisch (etwa eine Gummischnur) oder wird es nur lose um die Stange 1 geschlungen, im ersten Augenblick losgelassen und

erst allmählich angezogen, so gelangt der Mann ohne Ruck allmählich auf die Plattform II. Ist das Seil unelastisch und sofort fest um die Stange 1 geschlungen, so erfolgt der Uebergang ruckweise. In beiden Fällen geht aber die Zugkraft, die den Mann befördert, von der Eisenstange 1 bzw. der Plattform II aus. Diese hat dabei eine so große Masse gegenüber der Masse des einzelnen Mannes, daß ihre Geschwindigkeit w_1 durch die obige Zugkraft Z nicht verringert wird. Diese Kraft Z macht dabei sekundlich den Weg w_1 und leistet, da sie in der Bewegungsrichtung wirkt, die Arbeit $(+Z) \cdot (+w_1) = Z \cdot w_1$.

Soll derselbe Mann a_1 von der Plattform II auf I zurückbefördert werden, so muß seine Geschwindigkeit w_1 auf w_2 verringert werden. Dazu können ihm aber wieder seine mit w_1 auf Plattform II folgenden Hintermänner nicht helfen, sondern nur ein auf I angebrachter Widerstand. Ist dieser eine elastische Bufferfeder, so erfolgt die Verzögerung allmählich, ist er aber eine steife starre Stange, so dagegen plötzlich. Wieder aber geht die Druckkraft, die ihn verzögert, von der anderen Plattform I aus. Deren Geschwindigkeit wird dabei wegen ihrer großen Masse durch die Druckkraft D nicht beschleunigt. Der Kraftäußerer macht dabei sekundlich den Weg w_2 , wird aber, da die Kraft der Bewegungsrichtung entgegengerichtet ist, die Arbeit

$$(-D) \cdot (+w_2) = -D \cdot w_2$$

nicht leisten, sondern empfangen. Dieses Beispiel zeigt deutlich, daß auf alle Fälle die geleistete oder empfangene Arbeit = dem Produkt aus der Kraft (= Gegenkraft) mal dem Weg des Kraftspenders ist.

Es erscheint notwendig, dies klarzustellen, weil merkwürdigerweise bisweilen Zweifel darüber laut werden, ob nicht der sekundliche Weg der nachfolgenden unbeteiligten Leute also im ersten Fall w_2 und im zweiten Fall w_1 in das Arbeitsprodukt einzusetzen sei.

§ 10.

Mathematische Entwicklungen.

Für eine richtige Anschauung der besprochenen Vorgänge dürften die vorhergegangenen Erörterungen

nützlich sein. Die Wirksamkeit des fließenden Wassers ist danach vergleichbar mit einer fortlaufenden Kette von Stoßwirkungen, die durch dicht aufeinanderfolgende unendlich kleine Kugeln eines Maschinengewehrs (oder durch wirbelnde Trommelschläge) erzeugt werden, wofür im Gegensatz zu dem durch eine einzelne Kugel (einen einzelnen Trommelschlag) erzeugten Einzelstoß der Begriff des Dauerstoßes eingeführt werden kann. Dann kann man keinen Anstand nehmen, die mathematischen Entwicklungen, die für den Dauerstoß unendlich kleiner, unelastischer fester Körper gegen eine endlich große bewegte oder feste Masse unter bestimmten Einschränkungen gültig sind, auch für den Dauerstoß unendlich kleiner unelastischer flüssiger Körper gegen eine endlich große Masse unter entsprechenden Einschränkungen gelten zu lassen und in der Praxis zur Anwendung zu bringen. Diese Einschränkung geht dahin, daß in der Natur völlig unelastische und völlig feste — festzusammenhängende Körper ebensowenig wie völlig unelastische und völlig kohäsionslose tropfbare Flüssigkeiten vorhanden sind.

Nachfolgend soll also die mathematische Ableitung der Formeln für den Dauerstoß fester und flüssiger Körper gleichzeitig gegeben werden.

Ein aus zwei getrennten unelastischen Massen (Abb. 32), nämlich aus einem einzelnen unendlich kleinen Sandkorn oder Wassermolekül m und einer im Verhältnis zu m endlich großen Steinmasse oder Wassermasse M bestehendes Massensystem besitze vor dem Zusammenstoß die lebendige Kraft = das Arbeitsvermögen

$$\frac{m \cdot w_1^2}{2} + \frac{M \cdot w_2^2}{2},$$

wobei $w_1 > w_2$ ist, und nach dem Zusammenstoß, weil M seine Geschwindigkeit w_2 beibehalten, m aber die Geschwindigkeit w_2 angenommen hat, das Arbeitsvermögen

$$\frac{m \cdot w_2^2}{2} + \frac{M \cdot w_2^2}{2}.$$

Das beim Stoß verlorene Arbeitsvermögen ist dann

$$= \frac{m \cdot w_1^2}{2} - \frac{m \cdot w_2^2}{2}.$$

Die geleistete Gesamtarbeit setzt sich zusammen aus der auf die Deformation, Lockerung, von m und M verwendeten inneren Arbeit (Stoßverlust) A_i und der äußerlich in die Erscheinung tretenden Arbeit A_a . Letztere zeigt sich darin, daß die Masse m in der unendlich kurzen Zeit dt die Verzögerung $w_1 - w_2$ und also die sekundliche Verzögerung $\frac{w_1 - w_2}{dt}$ erleidet, daß also m während der Zeit dt die Kraft (= Masse mal sekundliche Verzögerung) = $m \cdot \frac{w_1 - w_2}{dt}$ auf M und ebenso (Aktion = Reaktion) M auf m die Kraft $-m \frac{w_1 - w_2}{dt}$ ausübt und daß Kraft und Gegenkraft dabei den gemeinsamen Weg $w_2 dt$ zurücklegen.

An der Bewegung der Masse M ist eine äußere Veränderung nicht sichtbar, äußerlich sichtbar ist nur die Arbeit der Masse m

$$A_a = m \frac{w_1 - w_2}{dt} w_2 dt = m (w_1 - w_2) w_2,$$

$$\frac{m w_1^2}{2} - \frac{m w_2^2}{2} = A_i + A_a = A_i + m (w_1 - w_2) w_2.$$

Also ist der auf innere Arbeit (Zerdrücken, Lockerung der Kohäsion, des Gefüges) verwendete Teil des Arbeitsvermögens, der Stoßverlust

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{m (w_1^2 - w_2^2)}{2} - \frac{2 m (w_1 - w_2) w_2}{2}, \\ &= \frac{m}{2} (w_1^2 - 2 w_1 w_2 + w_2^2), \\ &= \frac{m}{2} (w_1 - w_2)^2. \end{aligned}$$

Wird der Einzelstoß in einer Sekunde unendlich oft wiederholt, so daß in einer Sekunde unendlich viele unendlich kleine Massen m von dem Gesamtgewicht G ($\Sigma m = \frac{G}{g}$) zeitlich hintereinander mit unendlich kleinen

Zwischenzeiten gegen M stoßen, so ist der gesamte Verlust des Dauerstoßes in einer Sekunde

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{\Sigma m}{2} (w_1 - w_2)^2. \\ &= \frac{G}{2g} (w_1 - w_2)^2. \quad (\text{Borda-Carnotsche Formel.}) \end{aligned}$$

Besitzt M (Abb. 33) die größere Geschwindigkeit w_1 und m die kleinere Geschwindigkeit w_2 , so reißt M das unendlich kleine m in dem unendlich kleinen Augenblick, in dem der unelastische Faden gespannt wird, mit der Geschwindigkeit w_1 mit sich fort und die dadurch gewonnene lebendige Kraft (Arbeitsvermögen) des ganzen Systems ist

$$\begin{aligned} &\left[\frac{M \cdot w_1^2}{2} + \frac{m \cdot w_1^2}{2} \right] - \left[\frac{M \cdot w_1^2}{2} + \frac{m w_2^2}{2} \right] \\ &= \frac{m}{2} (w_1^2 - w_2^2). \end{aligned}$$

Dieser Gewinn an Arbeitsvermögen wird dadurch erzeugt, daß m die äußerlich sichtbare, von M geleistete Arbeit $m \cdot (w_1 - w_2) w_1$, gleichzeitig aber die äußerlich nicht sichtbare auf Lockerung des Fadens verwendete Arbeit, den Reißverlust A_i aufnimmt. Es ist also

$$\frac{m}{2} (w_1^2 - w_2^2) = A_i + m (w_1 - w_2) w_1,$$

$$\begin{aligned} A_i &= -\frac{m}{2} (w_1^2 - 2 w_1 w_2 + w_2^2) \\ &= -\frac{m}{2} (w_1 - w_2)^2, \end{aligned}$$

d. h. der Reißverlust ist dem Stoßverlust gleich, aber entgegengesetzt gerichtet.

Wird der Einzelruck (Riß) in einer Sekunde unendlich oft wiederholt, so daß in einer Sekunde unendlich viele unendlich kleine Massen m von dem Gesamtgewicht G

($\Sigma m = \frac{G}{g}$) zeitlich hintereinander mit unendlich kleinen

Zwischenzeiten durch M fortgerissen werden, so ist der gesamte Verlust des Dauerruckes in einer Sekunde

$$A_i = - \frac{G}{2g} (w_1 - w_2)^2.$$

Kommt (Abb. 34) ein fester oder flüssiger Körper von der Masse $m = \frac{G dt}{g}$ auf horizontaler Bahn bei a mit der kleinen Geschwindigkeit w_2 an, wird von dort aus durch Vorspannung von M unter Einschaltung eines elastischen Seils (mit Spiralfeder), also unter allmählicher Anspannung und mit allmählich von w_2 bis w_1 wachsender Geschwindigkeit nach b heruntergezogen und bewegt sich von b aus auf horizontaler Bahn mit w_1 weiter, so erhält er einen Zuwachs an äußerem Arbeitsvermögen

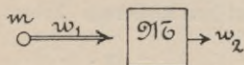
$$= m \cdot \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}.$$

Nur diesen selben und keinen größeren Zuwachs erhält der Körper m aber auch, wenn er auf horizontaler Bahn bei a_1 mit w_2 ankommt, von dort aus durch M unter Einschaltung eines unelastischen Seils (ohne Spiralfeder), also unter plötzlicher Anspannung und mit plötzlich von w_2 bis w_1 zunehmender Geschwindigkeit nach b heruntergerissen wird und sich von b aus auf horizontaler Bahn mit w_1 weiter bewegt. Denn allerdings muß M alsdann die äußere Arbeit $m (w_1 - w_2) w_1$ leisten, aber hiervon wird der Teil $m \cdot \frac{(w_1 - w_2)^2}{2}$ auf innere Lockerungen oder Zerreißen (Reißverlust) und nur der Rest $m \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$ auf die Vermehrung des äußeren Arbeitsvermögens verwendet.

Das zur Erzeugung von w_1 erforderliche Gefälle (Abb. 35) ist im ersten Falle $= \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g}$, im zweiten Falle $= \frac{(w_1 - w_2)}{g} w_1$ und der dabei gegenüber dem ersten Fall erlittene Gefällverlust $\frac{(w_1 - w_2)^2}{2g}$.

Kommt der feste oder flüssige Körper von der Masse $m = \frac{G dt}{g}$ nach Abb. 36 auf horizontaler Bahn bei c mit

32.



33.

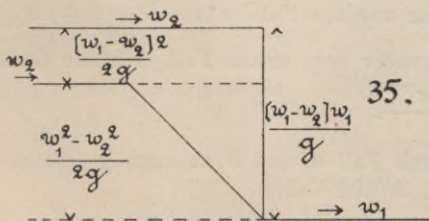
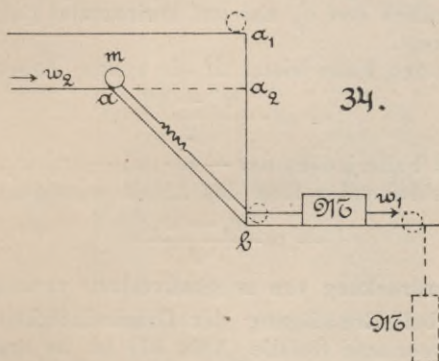
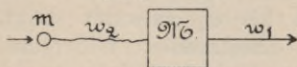


Abb. 32-35.

der großen Geschwindigkeit w_1 an und steigt von dort aus durch sein Arbeitsvermögen allmählich bis d auf-

wärts, wobei er jedoch durch M einen allmählich anwachsenden Widerstand (etwa durch Bufferfedern) erfährt und dadurch seine Geschwindigkeit allmählich von w_1 auf w_2 verringert; bewegt er sich dann schließlich von d aus auf horizontaler Bahn mit w_2 weiter, so erleidet er einen Verlust an äußerem Arbeitsvermögen

$$= m \cdot \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}.$$

Diesen selben Verlust erleidet der Körper m aber auch schon, wenn er von c aus durch sein Arbeitsvermögen bis d_1 aufwärts steigt, dabei durch M einen plötzlich einsetzenden Widerstand (durch ein starres Gestänge ohne Bufferfedern) erleidet, dadurch seine Geschwindigkeit plötzlich von w_1 auf w_2 verringert und sich schließlich von d_1 aus auf horizontaler Bahn mit w_2 weiter bewegt.

Im ersten Falle leistet M die äußere Arbeit

$$= m \cdot \frac{w_1^2 - w_2^2}{2},$$

im zweiten Falle jedoch nur $= m \cdot (w_1 - w_2) w_2$, während es den verbleibenden Rest des Arbeitsvermögens

$$= m \frac{(w_1 - w_2)^2}{2}$$

auf die Zerdrückung von m (Stoßverlust) verwendet.

Das bei Ermäßigung der Geschwindigkeit von w_1 auf w_2 gewonnene Gefälle (Abb. 37) ist im ersten Falle $\frac{w_1^2 - w_2^2}{2g}$, im zweiten Falle nur $\frac{(w_1 - w_2)}{g} w_2$ und der alsdann gegenüber dem ersten Fall erlittene Gefällverlust also $\frac{(w_1 - w_2)^2}{2g}$.

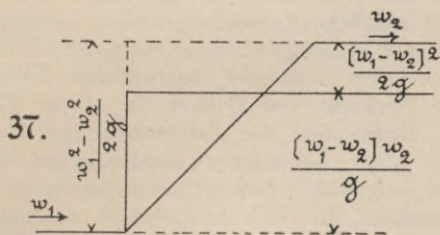
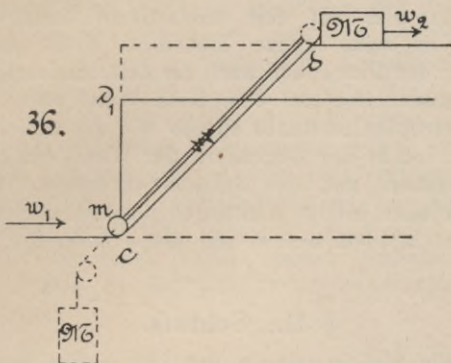
Der durch Fall a und b zusammen erlittene Gefällverlust (Abb. 38) ist daher

$$= 2 \cdot \frac{(w_1 - w_2)^2}{2g} = \frac{(w_1 - w_2)^2}{g}.$$

Die während unendlich kurzer Zeit dauernde Stoß- (Reiß-) Kraft eines einzelnen Sandkorns und eines einzelnen

Wassermoleküls ist = der Masse mal der sekundlichen Geschwindigkeitsänderung

$$= \frac{G dt}{g} \cdot \frac{w_1 - w_2}{dt} = \frac{G}{g} (w_1 - w_2).$$



38.

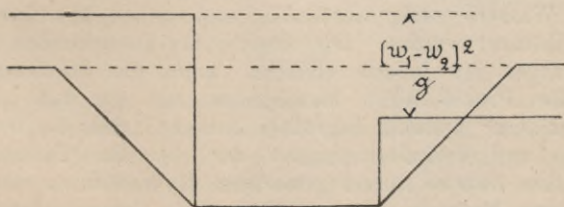


Abb. 36—38.

Die dauernde, d. h. mit unendlich kurzen Unterbrechungen wirkende Stoß-(Reiß-)Kraft der dicht auf-

einanderfolgenden Sandkörner und Wassermoleküle ist gleichfalls $= \frac{G}{g} (w_1 - w_2)$ und wenn $w_2 = 0$ ist $= \frac{G}{g} w_1$.

Stößt ein Strahl von Sandkörnern (Sandgebläse) oder von Wassertropfen auf eine unelastische Steinplatte, so verwendet er seine ganze lebendige Kraft zur Aus-hämmerung der Platte und auch zur Zertrümmerung seiner eigenen Masse. Der auf eine feste Wand aufschlagende Quecksilbertropfen zerstäubt ebenso wie der aufschlagende Schneeball, indem der Gegenstoß der Wand die Kohäsion des Quecksilbers und des Schnees vernichtet. Ruhende Gewichte können solche Wirkungen niemals hervorbringen (*gutta cavat lapidem non vi sed saepe cadendo*).

§ 11. Schluß.

Daß die Stoßformeln in der Praxis des Wasserbauingenieurs nützliche Anwendung finden können, soll durch die im Anhang beigefügte Lösung einer von den Studierenden mit besonderem Interesse bearbeiteten Übungsaufgabe über die Wirkung von Buhnen in einem Fluß gezeigt werden. Dabei sind die Zahlenunterlagen des Beispiels allerdings dem besonderen akademischen Zweck entsprechend so gewählt, daß sie Rechnungswerte von solcher Größe ergeben, die sich zeichnerisch deutlich darstellen lassen. In der Praxis werden diese Rechnungsergebnisse meistens erheblich kleinere Differenzen aufweisen und müssen auch noch mit den durch die Kohäsion (Kontraktion) des Wassers nötig werdenden empirischen Koeffizienten multipliziert werden. Die Absicht der vorstehenden Ausführungen ist jedoch erreicht, wenn die Studierenden in die Praxis nicht hinausgehen mit der von „Nur-Praktikern“ beifällig begrüßten Ansicht, „daß die Grundlagen und Schlußfolgerungen der von den Technikern für ihre Zwecke zurechtgemachten Hydraulik so viel an strenger Methode zu wünschen übrig lassen, daß die meisten Ergebnisse keinen höheren Wert als den rein empirischer Formeln mit sehr beschränkter Gültigkeit besitzen.“

Es möge noch darauf hingewiesen werden, daß die Anstellung von Versuchen mit Sand oder verschieden gefärbtem feinsten Bleischrot für die richtige Anschauung der Wasserbewegung nützlich sein kann und wegen ihrer Anschaulichkeit gegenüber der Unsichtbarkeit der einzelnen Wasserteilchen sich für Lehrzwecke wohl empfiehlt. Ob diese Versuche auch für die wissenschaftliche Forschung Nutzen bringen können, mag dahingestellt bleiben. Neben der auf den technischen Hochschulen jetzt üblich werdenden Wasserrinne würde ein Apparat, der (Abb. 39) aus einer Anzahl untereinander liegender, verschieden schnell laufender Gurten mit unelastischer, festliegender Unterlage besteht und mit Sand oder Bleischrot beschickt wird, meiner Ansicht nach für den Unterricht in der praktischen Hydraulik wohl am Platze sein.

Der in Abb. 40 in verzerrtem Maßstab dargestellte Apparat ist zur Veranschaulichung der Druckhöhenverluste

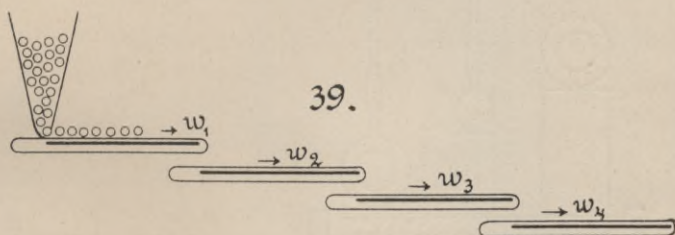


Abb. 39.

in Rohrleitungen zusammengestellt. Behufs Beschränkung der Längsentwicklung ist die Rohrleitung in drei hintereinander liegende und von einem gemeinsamen Teiltopf abzweigende Teile zerlegt. Der mittlere Teil $a-b$ ist ein zylindrisches Rohr. Der vordere, untere Teil 1—6 zeigt bei 2 und 3 allmähliche und bei 4 und 5 plötzliche Erweiterungen und Verengungen. Der hintere, obere Teil 7—13 zeigt bei 9 eine allmähliche Verengung und Er-

weiterung (Venturimesser) und bei 11 und 12 Diaphragmen. Zur Regulierung des Zu- und Abflusses sind alle drei Teile an den Enden mit Gummimuffen und (durch gekreuzte Pfeile dargestellten) Klemmschrauben und außerdem in ihrer ganzen Länge an zahlreichen Stellen mit

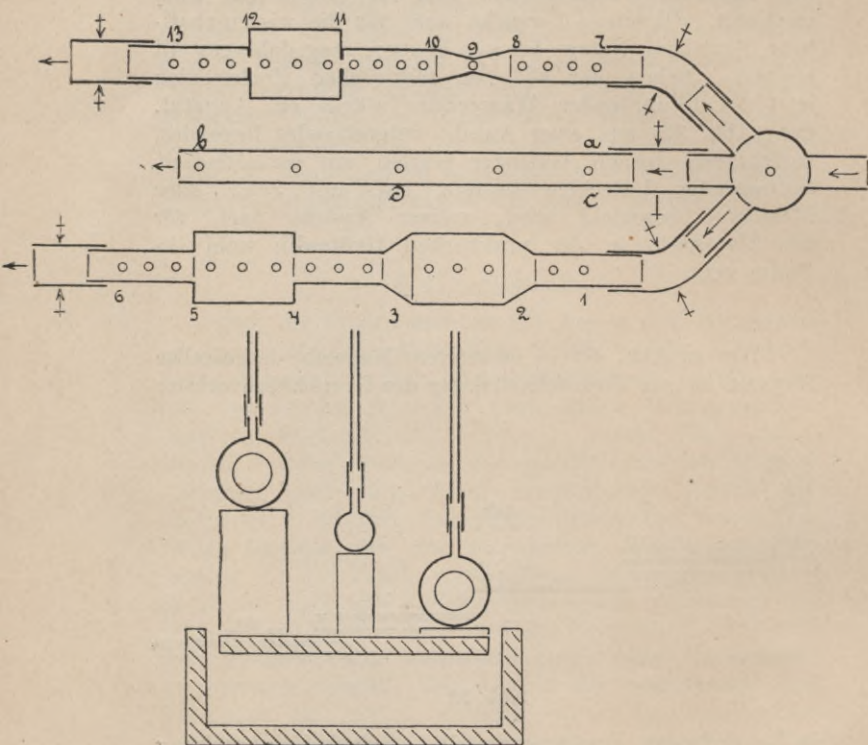


Abb. 40.

lotrechten Glasröhren zur Sichtbarmachung und Messung des Drucks (Piezometern) versehen. Durch Regulierung des Zu- und Abflusses können die mannigfachsten Druckhöhen sichtbar gemacht und die entsprechenden Drucklinien dem Auge an den horizontal in 20^{cm} Abstand

gespannten Fäden veranschaulicht werden. (Das aus den Rohrleitungen abfließende Wasser gelangt in den Holzuntersatz und wird von da durch ein Ablaufrohr beseitigt.)

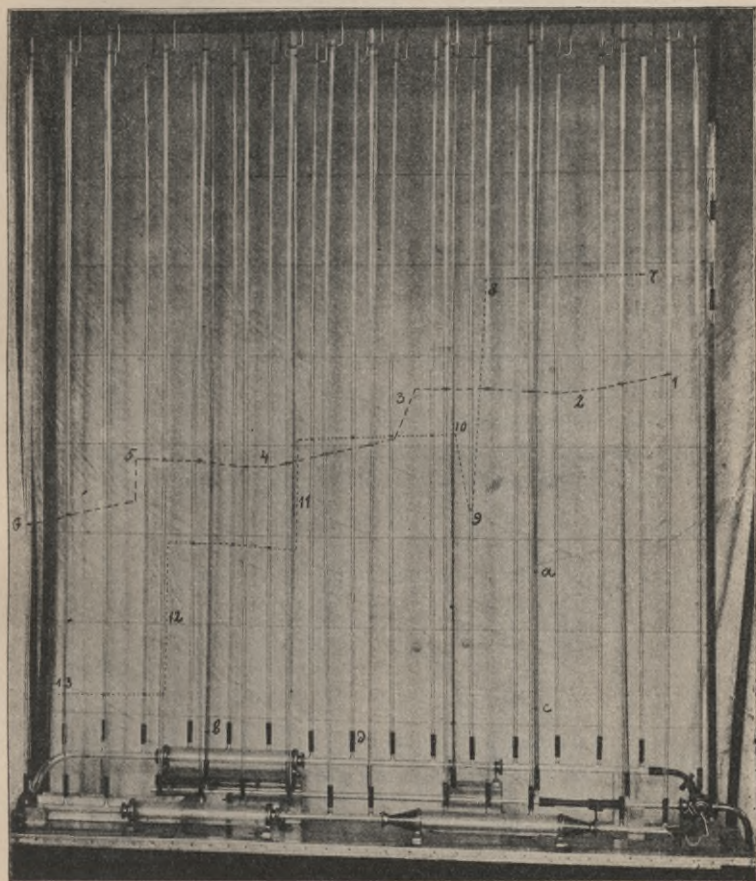


Abb. 41. *Druckröhrenapparat.*

In dem beigegebenen photographischen Bilde (Abb. 41) sind die Druckhöhen für einen beliebigen Beharrungszustand

durch schmale Gummiringe, und die Drucklinien 1—6, 7—13, $a—b$, $c—d$ durch Verbindungslinien festgelegt. Augenfällig ist vor allem in Punkt 9 (Venturimeter) der Ab- und Aufsprung, der jedoch durch die Reibung des Wassers an den Rohrwandungen sichtbar beeinflusst wird. Der Aufsprung in dem noch stärker reibenden Metallkegel bei 2 ist deshalb noch weniger, aber doch in der Ansteigung bis 3 noch deutlich zwischen den Horizontalfäden sichtbar. Ebenso ist auch bei 4—5 und in dem Diaphragma bei 11—12 der Aufsprung erkennbar.

Weitere Erläuterungen zu den Drucklinien zu geben, würde an dieser Stelle zu weit führen. Es soll hier nur gezeigt werden, daß der Aufbau eines ähnlichen größeren Apparates, d. h. einer Rohrleitung mit den verschiedenartigsten Uebergangs- und Verbindungsstücken unter Verwendung von zahlreichen Glasröhren als Druckmesser nicht nur für Lehrzwecke, sondern auch für wissenschaftliche Untersuchungen von Nutzen sein würde.

An dem mittleren zylindrischen Rohr (Abb. 40) ist folgende Messung gemacht: Die bei einer bestimmten Druckhöhe sekundlich durchfließende Wassermenge ist durch Eichung zu $\frac{4}{10\,000}$ kbm bestimmt. Der lichte Durchmesser des Mündungsquerschnitts beträgt 14 mm , dessen Inhalt $\frac{1,54}{10\,000}$ qm , also die Ausflußgeschwindigkeit

$$v = \frac{Q}{F} = \frac{4}{1,54} = 2,6\text{ m}.$$

Wird in den Ausflußstrahl eine ruhende Platte ininigem Abstand von der Mündung eingeschoben, so wird v dadurch nicht geändert, was sich aus den gleichbleibenden Druckhöhen in den sehr feinfühligen Druckröhren sehr genau ersehen läßt. Erst wenn die Platte bis auf einen Abstand von 13 mm der Mündung genähert ist, steigen die Druckhöhen plötzlich an und verringert sich die Neigung der Drucklinie und also die Ausflußgeschwindigkeit v . Also auf einem Wege von $\frac{13}{1000}\text{ m}$ wird v von $2,6\text{ m}$ auf 0 verzögert.

Augenscheinlich hat aber der ausfließende Strahl nicht einen trapezförmigen, sondern ähnlich der Abb. 6 einen aufgestauchten Längenschnitt. Daß die ruhende Platte auf alle einzelnen Moleküle des Strahls — einerlei ob in 13^{mm} oder in 0^{mm} Abstand



Abb. 42.

Staubfall bei Lauterbrunnen.

— den gleichen Reaktionsdruck ausübt, ist zwar nicht wahrscheinlich, möge jedoch in Ermangelung von Beobachtungen über diese Druckverteilung angenommen werden. Dann ist für jedes Molekül auch die sekundliche Verzögerung $q = \frac{\text{Kraft}}{\text{Masse}}$ konstant, und es wird analog der Einwirkung, welche die als konstant angenommene Anziehungskraft der Erde auf einen lotrecht emporgeworfenen Körper ausübt, das Gesetz gelten:

$$h = \frac{v^2}{2q} = \frac{qt^2}{2},$$

$$\text{also } 0,013 = \frac{2,6^2}{2q},$$

daraus $q = 260 \text{ m/sek.}$ und

$$t = \frac{1}{100} \text{ sek.},$$

während für den Wurf gilt

$$h = \frac{2,6^2}{2g} = 0,345 \text{ m}$$

$$t = \frac{26,6}{100} \text{ sek.}$$

Der von der Platte ausgehende Gegendruck bringt also 26,6 mal so große Wirkungen auf die ausströmenden

Moleküle hervor als die Erdanziehung auf die hochgeworfenen Körper.

Der Abstand h oder die Zeit t oder die sekundliche Verzögerung q können vielleicht für die Bildung eines anschaulichen Maßstabes zur Bestimmung der Kohärenz — Klebrigkeit, Zähigkeit — von Flüssigkeiten verschiedener Zusammensetzung, Mischung und Temperatur benutzt werden.

Je geringer die Kohärenz ist, um so kleiner wird die Aufstauchungslänge, d. i. die Entfernung h zwischen Mündung und Platte sein. Für eine völlig kohäsionslose Flüssigkeit wird sie $= 0$ und für einen völlig starren Körper $= \infty$ sein.

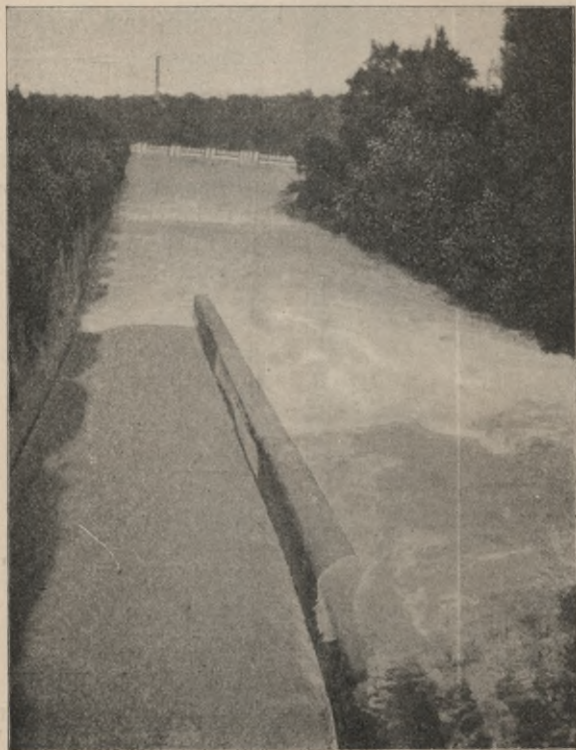


Abb. 43. Hochwasser der Isar.

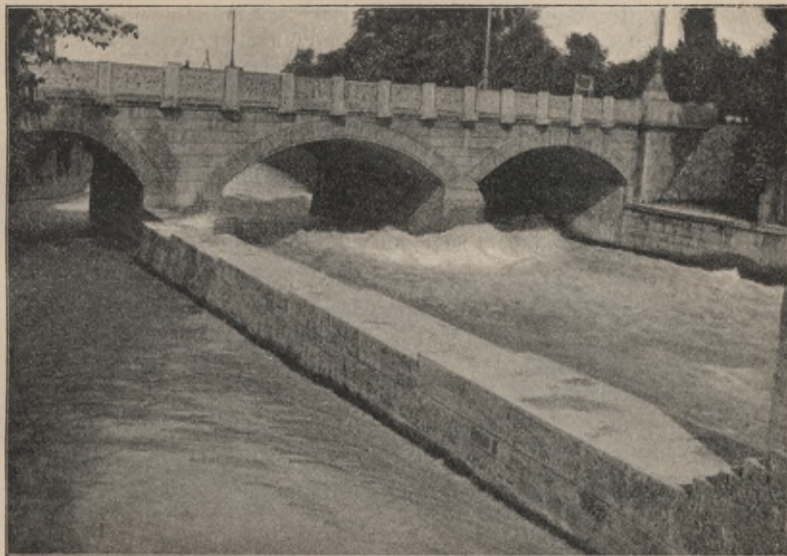


Abb. 44. *Hochwasser der Isar.*

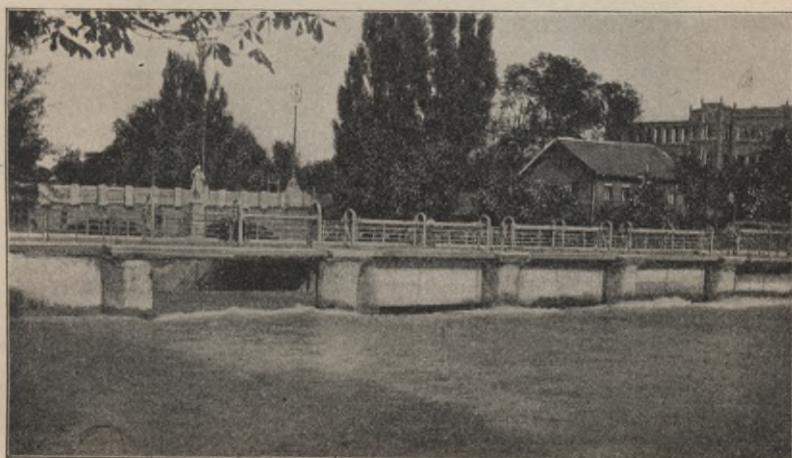


Abb. 45. *Hochwasser der Isar.*

Die Untersuchung der Frage, ob die Aufstauchungslänge zu der in der Physik eingeführten Kohäsionskonstanten $\frac{\text{Milligrammgewicht}}{\text{Millimeter}}$ (Kayser, Physik, § 74) sowie auch zum Randwinkel der Kapillaradhäsion in bestimmter Beziehung steht, dürfte meines Erachtens von praktischem Interesse sein. Dabei sind, um die Gestalt des aufgestauchten Strahles genau festzustellen, kleinphotographische Aufnahmen vielleicht durchführbar.

Die beigegebene Abbildung des Staubfalls bei Lauterbrunnen (Abb. 42) wird mit Bezug auf § 3, Abb. 4—9, Interesse erwecken.

In den drei Abbildungen eines Arms der Isar (Abb. 43 bis 45) an der Maximiliansbrücke in München — links die Floßgasse und rechts das Freiwasser — tritt der Wasserstoß

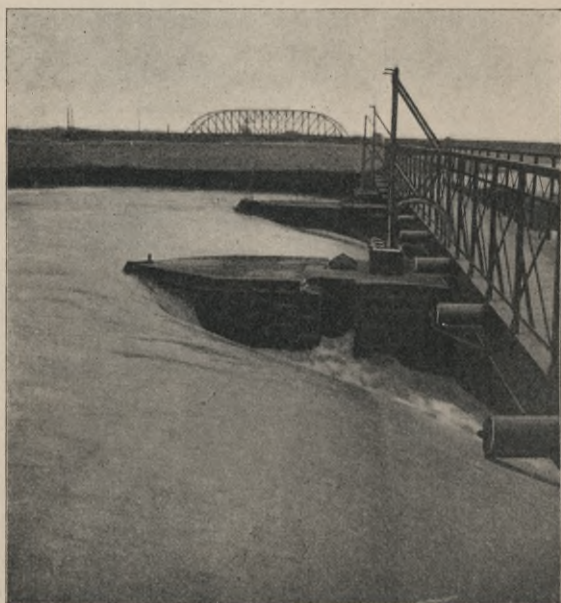


Abb. 46. Hochwasser des Schnellengrabens.

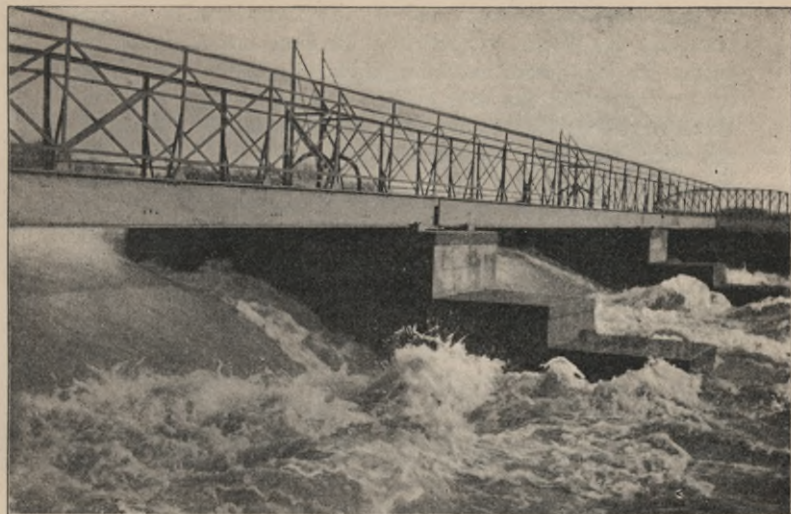


Abb. 47. Hochwasser des Schnellengrabens.



Abb. 48. Hochwasser des Schnellengrabens.

in dem starken Aufwurf und der Zertrümmerung — Zerstäubung des Wassers deutlich in die Erscheinung, und zwar einmal an dem Brückenpfeiler (Abb. 44) und sodann beim Zusammentreffen des sehr schnell und dabei doch mit vollkommen glatter Oberfläche fließenden Stromes der Floßgasse mit dem langsamer fließenden Unterwasser (Abb. 43). Die Sperrschleuse der Isar (Abb. 45) zeigt links zwei Oeffnungen für die Floßgasse und rechts vier Oeffnungen für das Freiwasser.

Die drei Abbildungen eines Hochwassers der Leine am Schnellengrabenwehr bei Hannover (Abb. 46 — 48) zeigen einerseits die plötzliche Zertrümmerung des Unterwassers und andererseits die starke Oberflächenspannung des Oberwassers am oberen Wehrkopf in solchem Maße, daß man zu einem Vergleich mit der bekannten Erscheinung des Bologneser Fläschchens angeregt wird.

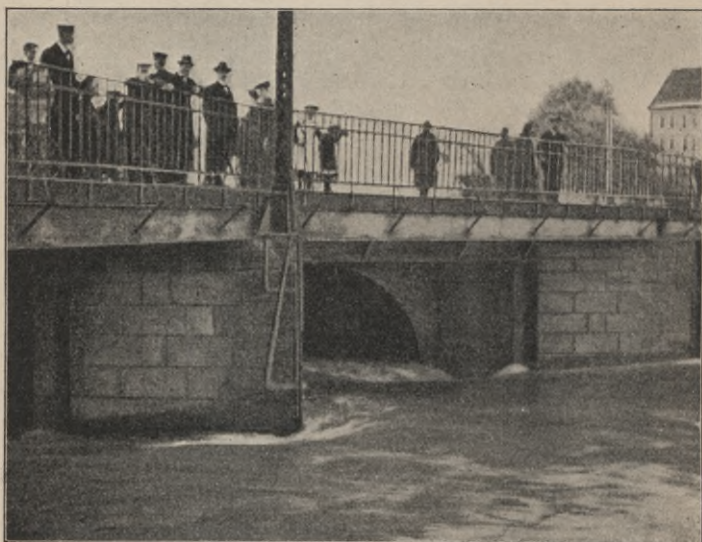


Abb. 49. Hochwasser der Leine an der Ihmebrücke.

Auch die Abbildung eines großen Hochwassers der Leine an der, voraussichtlich einem Neubau demnächst weichen- den Ihmebrücke in Hannover dürfte mit Rücksicht auf die vorangegangenen Ausführungen von Interesse sein (Abb. 49).

Anhang.

Die Wirkung der Buhnen.

Plötzliche Querschnitts- und Geschwindigkeitsänderungen werden in der Praxis wegen der daraus entstehenden Druckhöhenverluste = Gefällverluste zwar möglichst vermieden, sind aber in manchen Fällen unvermeidbar.

Für den Wasserbauingenieur sind sie besonders bedeutungsvoll in offenen Wasserläufen, die (vgl. des Verfassers Tabelle zur Berechnung der Stauweiten) als Röhren angesehen werden können, deren Oberflächen mit lauter einzelnen, völlig reibungslosen Spiegelglasscheiben lose abgedeckt sind.

Hierher gehört u. a. der Aufstau durch Brücken oder Wehre, deren Land- und Mittelpfeiler ohne Abschrägung oder Abrundung rechtwinklig gegen die Stromrichtung eingebaut sind.

Von besonderem praktischen Interesse ist der Aufstau, der durch die Anlage einer größeren Anzahl Buhnen in einem Flusse erzeugt wird. Von Laien wird meistens gefolgert, wenn eine Buhne einen Aufstau von 1^{cm} erzeuge, daß dann 100 Buhnen einen solchen von 100^{cm} erzeugen. Und auch Wasserbauingenieure, die in Prozessen als Sachverständige gehört sind, haben schon diese Ansicht als „theoretisch richtig, wenn auch durch die Praxis einzuschränken“ verfochten.

Es erscheint mir deshalb von praktischem Nutzen, die vorhergegangenen Ausführungen auf dieses Beispiel anzuwenden.

Dabei sollen jedoch, um die — natürlich möglichst mit dem Rechenschieber auszuführenden — Berechnungen nicht zu umständlich und unübersichtlich zu gestalten, an dieser Stelle einige auch sonst übliche Einschränkungen und Vereinfachungen gemacht werden, die im praktischen Einzelfalle dem Bedürfnis entsprechend ausgemerzt werden können.

Ein Fluß (Abb. 50) von rechteckigem Querschnitt mit 100^m Sohlbreite und $\frac{9}{10\,000}$ Gefälle führe bei 2^m Wassertiefe 400^{cbm}/_{Sek.} und besitze also eine mittlere Geschwindigkeit = 2^m.

Dabei werde, um die Rühlmannschen Zahlen über Stauweiten (vgl. Tabelle usw.) anwenden zu können, eine raue Sohle, aber glatte Seitenwände, also

$$R = \frac{F}{P} = \frac{100 \cdot 2}{100} = 2^m$$

angenommen.

Dann ergibt sich der Koeffizient k der Formel

$$v = k \cdot \sqrt{R \cdot J} = 2 = k \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{9}{10\,000}}$$

zu 47, also mit dem Darcy-Bazinschen Wert (46,9) fast genau übereinstimmend.

Der Fluß werde auf seiner oberen Strecke durch ein Parallelwerk mit glatten Seitenwänden auf 70^m eingeschränkt, und es werde k auch für diese Strecke trotz größerem $R = t$ zu 47 beibehalten. Dann ergibt sich durch Versuchsrechnungen $t = 2,54^m$, denn

$$v = 47 \sqrt{\frac{2,54 \cdot 9}{10\,000}} = 2,245^m$$

$$F \cdot v = 2,54 \cdot 70 \cdot 2,245 = 400 = Q.$$

Wird das Parallelwerk am unteren Ende durch zwei rechtwinklige Buhnen abgeschlossen, so entsteht hier durch den Stoß ein Aufsprung (Abb. 37) des Wassers = $\frac{(w_1 - w_2) \cdot w_2}{g}$

nach Versuchsrechnungen = 0,262^m, eine Geschwindigkeit $w_1 = 3,29^m$ und eine Wassertiefe $t_1 = 1,738^m$, denn

$$Q = 400 = 1,738 \cdot 70 \cdot 3,29$$

$$s_1 = 0,262 = \frac{(3,29 - 2) \cdot 2}{9,81}.$$

In den von $f = 2,54 \cdot 70^m$ bis $1,738 \cdot 70^m$ abnehmenden Querschnitten des Absenkungsbereichs (Abb. 50) muß eine Beschleunigung des Wassers eintreten und dazu muß in jedem einzelnen Querschnitt ein Arbeitselement

$$G \cdot dh = \frac{G}{g} \frac{dv}{dt} v dt = G \frac{dv \cdot v}{g}$$

geleistet und ein Druckhöhenelement

$$dh = \frac{dv \cdot v}{g}$$

$$= \left[\frac{1}{g} \frac{v_1 - v_2}{dt} \frac{v_1 + v_2}{2} dt \right]$$

aufgewendet werden. (Tabelle usw.) Außerdem ist zur Ueberwindung des Reibungswiderstandes der Flußsohle ein Druckhöhenelement

$$dh = \zeta \frac{p_x dx}{F_x} \cdot \frac{v_x^2}{2g}$$

$$= \frac{\zeta}{2g} \cdot \frac{b \cdot dx}{b(a-z)} \cdot \frac{Q^2}{b^2(a-z)^2} = \frac{\zeta}{2g} \frac{Q^2}{b^2} \frac{dx}{(a-z)^3}$$

erforderlich. (Tabelle usw.) Wird mit Rühlmann das erstere Element vernachlässigt und nur das letztere berücksichtigt, so ergibt sich für die Wasserstände auf der Senkungstrecke eine Kurve, die aus der Tabelle S. 35 wie folgt zu berechnen ist:

$$\frac{a-z}{a} = \frac{1,738}{2,540} = 0,686 = \sim 0,69$$

$$J = \frac{9}{10\,000} \quad \frac{a}{J} = 2830 \text{ m.}$$

$n =$	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,05	0,03	0
Abszisse $\frac{n \cdot a}{J}$	2830 m	2260 m	1695 m	1130 m	565 m	283 m	142 m	85 m	0
Ordinate \dots	2,00 a	1,78 a	1,57 a	1,34 a	1,08 a	0,92 a	0,82 a	0,77 a	0,69 a
" \dots	5,08 m	4,54 m	3,98 m	3,40 m	2,74 m	2,33 m	2,08 m	1,95 m	1,738 m
Wassertiefe $t =$	2,54 m	2,51 m	2,46 m	2,37 m	2,23 m	2,08 m	1,95 m	1,87 m	1,738 m

Diese Kurve (Abb. 51) ist in Abb. 56 mit der Linie
+ — + — + — aufgetragen.

Das Parallelwerk kann als eine Reihe dicht aneinander gelegter Bühnen angesehen werden und gibt so den äußersten Grenzfall für die Erhöhung des Wasserspiegels. Dieser erreicht in 2830 m Abstand vom unteren Ende des

Parallelwerkes die von da ab flüßaufwärts konstant bleibende Höhe $t = 2,54$ m.

Der andere Grenzfall tritt (Abb. 52) dann ein, wenn die Buhnen in solchem Abstand l voneinander angeordnet werden, daß die obere Buhne außerhalb der Stauweite der unteren Buhne liegt. Der durch die Buhnen erzeugte Aufstau h ist dann überall gleich groß und dicht unterhalb jeder Buhne ist die ursprüngliche Wassertiefe $t = 2$ m nicht geändert.

Je näher die Buhnen aneinander gerückt werden, je tiefer also jede obere Buhne in den Staubereich der unteren hineinreicht, um so höher klettert der Wasserspiegel auf der Stautreppe in die Höhe — bis zu der äußersten durch das Parallelwerk gegebenen Höhe ($t = 2,54$ m).

Allgemein ergeben sich (Abb. 53) folgende Formeln für den rechteckigen Querschnitt, wenn B die Flußbreite und b die Breite zwischen den Buhnenköpfen bezeichnet:

1. Für die Berechnung des Aufsprungs s_1 und der Wassertiefe t_1 zwischen den Buhnenköpfen: $Q = w_1 t_1 b$.

$$s_1 = t_2 - t_1 = t_2 - \frac{Q}{w_1 b} = \frac{(w_1 - w_2) w_2}{g},$$

daraus $w_1^2 - \frac{w_2^2 + g t_2}{w_2} w_1 = -g \frac{Q}{w_2 b}$.

Daraus ist w_1 und dann s_1 und t_1 zu rechnen, wobei $Q = w_1 t_1 b$ als Kontrolle dient.

2. Für die Berechnung des Absprungs s_3 und der Wassertiefe t_3 oberhalb der Buhnenköpfe: $Q = w_3 t_3 B$.

$$s_3 = t_3 - t_1 = \frac{Q}{w_3 \cdot B} - t_1 = \frac{(w_1 - w_3) w_1}{g},$$

daraus $w_3^2 - \frac{w_1^2 + g t_1}{w_1} w_3 = -\frac{g Q}{w_1 B}$.

Daraus ist w_3 und dann s_3 und t_3 zu rechnen, wobei $Q = w_3 t_3 B$ als Kontrolle dient.

3. Für die Berechnung der Wassertiefe t'_2 unterhalb der nächst oberen Buhne bei einem Abstand der Buhnen $= l$ ergibt sich Folgendes:

Solange nur die unterste Buhne (Abb. 54) vorhanden ist, erzeugt sie durch den Aufstau $t_3 = a + Z$ eine Staukurve, die sich nach der Formel $\frac{Jx}{a} = f\left(\frac{Z}{a}\right) - f\left(\frac{z}{a}\right)$ (Tabelle usw.) asymptotisch an den ursprünglichen Wasserspiegel mit

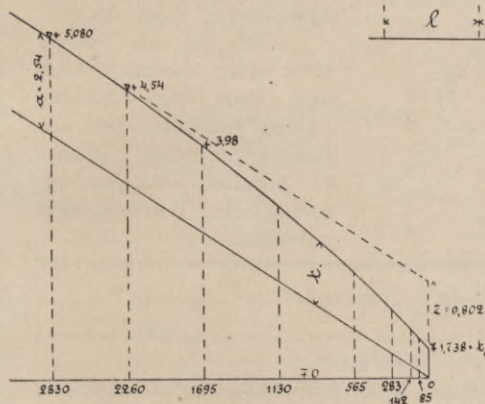
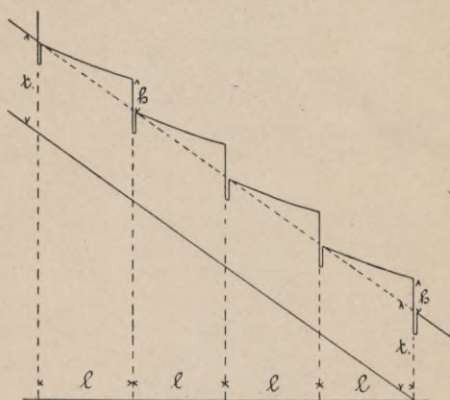
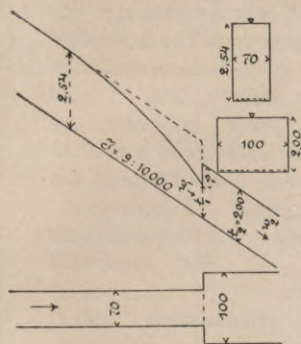


Abb. 50—51.

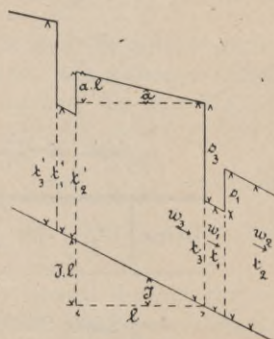


Abb. 52—53.

der Tiefe $t_2 = a$ anlegt und an der Buhne selbst ein Gefälle $\alpha = J \left(\frac{a}{a + Z} \right)^3$ (Tabelle usw.) aufweist.

Wird im Abstand l eine zweite Buhne weiter oberhalb eingebaut, so bleibt die Staukurve und das Gefälle

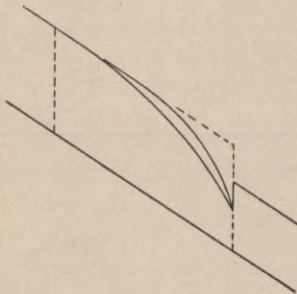
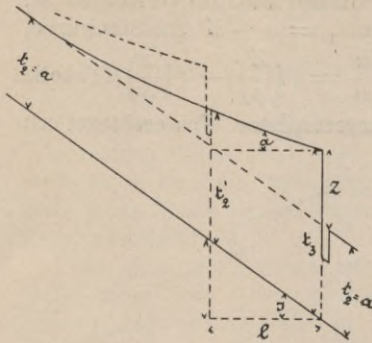


Abb. 54—55.

unterhalb derselben doch unverändert, und es ergibt sich

$$t'_2 = t_3 + l \cdot \alpha - l \cdot J \\ = t_3 - l (J - \alpha).$$

Unter Anwendung der vorstehenden Formeln sind für die Bühnenabstände $l = 100 \text{ m}$, 200 m und 300 m von der untersten Bühne anfangend und flussaufwärts fortschreitend die folgenden Zahlenwerte mittels Rechenschiebers und mit der Kontrolle $Q = w \cdot t \cdot b$ berechnet und zeichnerisch aufgetragen (siehe nachfolgende Tabelle und Abb. 56).

Von da an, wo α nicht mehr abnimmt, bleiben auch die übrigen Zahlen konstant, und die Stautreppe steigt von hier ab parallel mit dem ursprünglichen Wasserspiegel aufwärts.

Bühne	t_2	w_2	s_1	t_1	w_1	s_3	t_3	w_3	α
$l = 100 \text{ m}$.									
1	2,000	2,000	0,264	1,736	3,295	0,506	2,238	1,788	0,713 J
2	2,212	1,810	0,202	2,010	2,840	0,330	2,340	1,710	0,623 "
3	2,306	1,735	0,186	2,120	2,690	0,290	2,410	1,660	0,572 "
4	2,372	1,685	0,162	2,210	2,590	0,240	2,450	1,630	0,543 "
5	2,404	1,660	0,147	2,257	2,530	0,230	2,480	1,615	0,524 "
6	2,437	1,640	0,144	2,295	2,500	0,220	2,500	1,600	0,512 "
7	2,456	1,630	0,142	2,314	2,470	0,205	2,500	1,600	0,512 "
12	2,456	1,630	0,142	2,314	2,470	0,205	2,500	1,600	0,512 "

Buhne	t_2	w_2	s_1	t_1	w_1	s_3	t_3	w_3	α
$l = 200 \text{ m.}$									
13	2,000	2,000	0,264	1,736	3,295	0,506	2,238	1,788	0,713 <i>J</i>
14	2,186	1,830	0,201	1,985	2,885	0,345	2,330	1,715	0,630 „
15	2,260	1,770	0,180	2,080	2,750	0,299	2,379	1,685	0,596 „
16	2,306	1,735	0,168	2,138	2,680	0,272	2,410	1,660	0,571 „
17	2,333	1,715	0,162	2,171	2,640	0,260	2,410	1,660	0,571 „
20	2,333	1,715	0,162	2,171	2,640	0,260	2,410	1,660	0,571 „
$l = 300 \text{ m.}$									
21	2,000	2,000	0,264	1,736	3,295	0,506	2,238	1,788	0,713 <i>J</i>
22	2,160	1,852	0,215	1,945	2,940	0,355	2,300	1,740	0,658 „
23	2,208	1,815	0,200	2,008	2,850	0,332	2,340	1,710	0,625 „
24	2,238	1,790	0,188	2,050	2,795	0,310	2,360	1,695	0,608 „
25	2,254	1,775	0,182	2,065	2,770	0,300	2,365	1,690	0,605 „
26	2,259	1,770	0,179	2,080	2,750	0,300	2,380	1,680	0,595 „
27	2,271	1,760	0,174	2,097	2,730	0,290	2,387	1,675	0,588 „
28	2,276	1,760	0,174	2,097	2,730	0,290	2,387	1,675	0,588 „

Oberhalb der Buhnen 12, 20 und 28 sind Parallelwerke angeschlossen, um zu zeigen, wie zwischen diesen der Wasserstand wieder weiter ansteigt bis zur Wassertiefe von 2,54 m. Die Berechnungen der Senkungskurven sind für $\frac{a - Z}{a} = \frac{2,295}{2,54}, \frac{2,150}{2,54}$ und $\frac{2,097}{2,54}$ nach der

Tabelle usw. ausgeführt, aber hier nicht weiter beigefügt.

[Um die verschiedenen Wasserspiegel deutlich hervortreten zu lassen, werden sie zweckmäßig mit verschiedenen Farbstreifen unterzogen.]

Der Zweck der vorstehenden Rechnungen ist der Nachweis, daß mit Hilfe der Borda-Carnotschen Formel für den Wasserstoß und der Formeln und Tabellen für die ungleichförmige Bewegung des Wassers ohne allzu weitläufige Berechnungen Ergebnisse erzielt werden, die der Wirklichkeit und der Beobachtung entsprechen.

Der Praktiker wird sich der im Laufe der Rechnungen gemachten Einschränkungen bewußt bleiben und demgemäß auch die Zahlenergebnisse nur mit solchen Einschränkungen anwenden, wie sie dem praktischen Bedürfnis entsprechen. Insbesondere ist die Absenkungskurve zwischen den Parallelwerken durch

$$\int_{v=2,245}^{v=3,295} \frac{v dv}{g} = \frac{v^2 - v_1^2}{g} = 0,295 \text{ m}$$

zu korrigieren und wird also (Abb. 55) weiter nach oben ausbauschen, als sie gezeichnet ist. Diese Korrekturen an dieser Stelle auszuführen, erscheint jedoch mit Rücksicht auf den Zweck des Aufsatzes und den verfügbaren Raum nicht angezeigt.



Wirkung von Brunnen
und Parallelwerken
in einem Flusslauf.

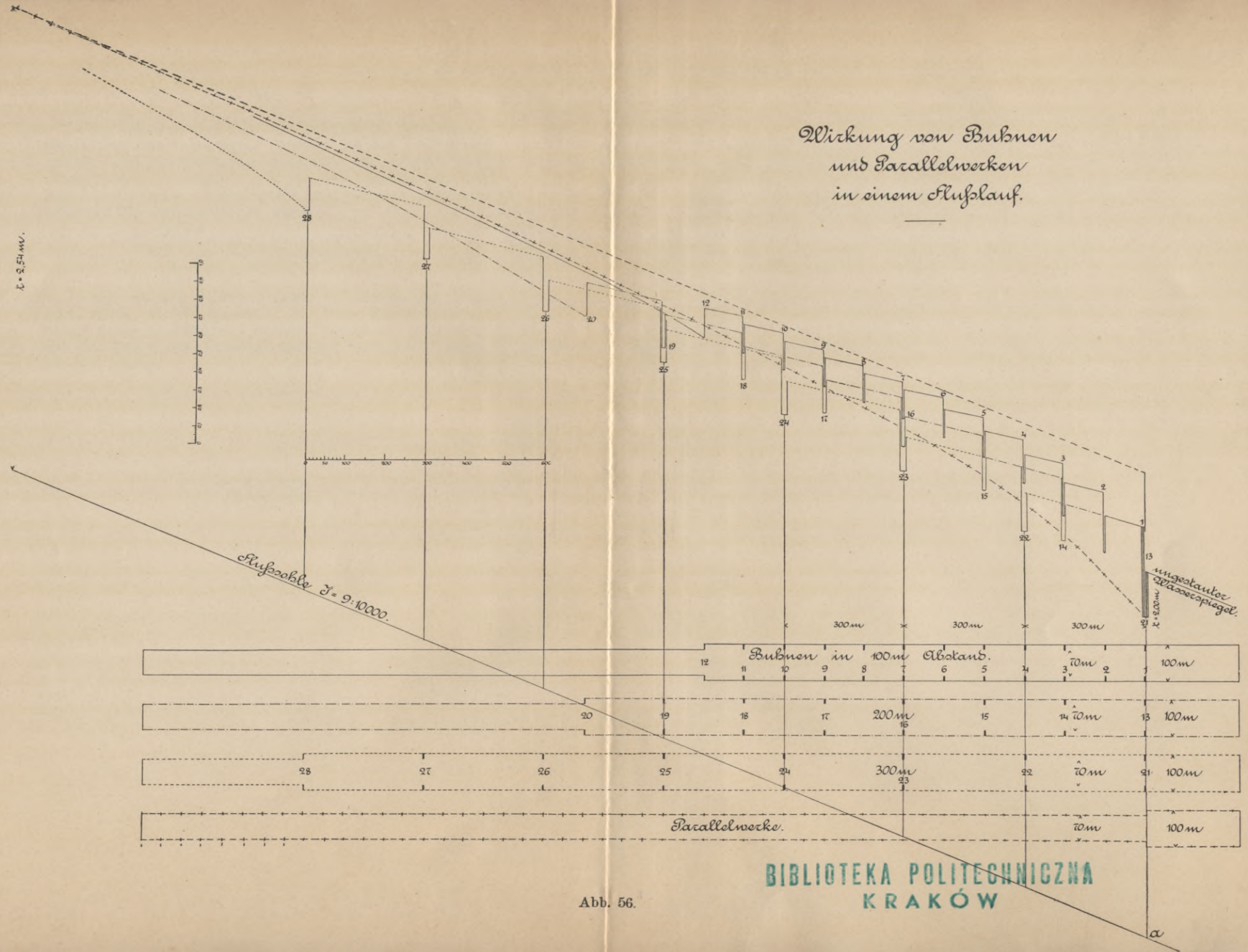


Abb. 56.

S. 61

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA



L. inw.

31135

Kdn., Czapskich 4 — 678. 1. XII. 52. 10.000

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000300028