

# SAMMLUNG

## Chemischer und chemisch-technischer

### Vorträge.

Begründet von Prof. Dr. F. B. AHRENS.

Unter Mitwirkung von

Prof. Dr. A. Angeli-Florenz, Prof. Dr. K. Arndt-Charlottenburg, Prof. Dr. H. Bauer-Leipzig, Prof. Dr. E. Baur-Zürich, Prof. Dr. A. Beythien-Dresden, Prof. Dr. N. Bjerrum-Kopenhagen, Dr. S. Bodfors-Drontheim, Prof. Dr. K. Brand-Gießen, Prof. Dr. G. Bruni-Padua, Prof. Dr. C. Bülow-Tübingen, Prof. Dr. G. Carrara-Mailand, Dr. G. Cohn-Berlin, Prof. Dr. E. Comanducci-Neapel, Prof. Dr. E. Donath-Brünn, Prof. Dr. K. Drucker-Leipzig, Prof. Dr. F. Ehrlich-Breslau, Prof. Dr. F. Ephraim-Bern, Prof. Dr. Tad. Estreicher-Krakau, Prof. Dr. H. v. Euler-Stockholm, Prof. Dr. H. Grossmann-Berlin, Dr. E. Hägglund-Bergvik, Prof. Dr. A. Hantzsch-Leipzig, Prof. Dr. G. Heller-Leipzig, Prof. Dr. K. Jellinek-Danzig, Prof. Freiherr H. v. Jüptner-Wien, Prof. Dr. H. Kauffmann-Stuttgart, Prof. Dr. J. Koppel-Berlin, Prof. Dr. R. Kremann-Graz, Prof. Dr. A. Lottermoser-Dresden, H. Lundén-Stockholm, Prof. Dr. W. Marckwald-Berlin, Prof. Dr. B. M. Margosches-Brünn, Prof. Dr. W. Mecklenburg-Aussig, Prof. Dr. Julius Meyer-Breslau, Direktor Dr. M. Mugdan-München, Prof. Dr. S. Nametkin-Moskau, Prof. Dr. W. Nernst-Berlin, M. C. Neuburger-Wien, Prof. Dr. M. Nierenstein-Bristol, Prof. Dr. E. Ott-Münster, Prof. Dr. W. Palmaer-Stockholm, Prof. Dr. G. Pellini-Palermo, Prof. Dr. W. Roth-Cöthen, Prof. Dr. J. Schmidt-Stuttgart, Prof. Dr. G. Schultz-München, Prof. Dr. H. Simonis-Berlin, Prof. Dr. A. Skrabal-Graz, Prof. Dr. A. Thiel-Marburg, Prof. Dr. D. Vorländer-Halle, Prof. Dr. P. Walden-Rostock, Prof. Dr. E. Wedekind-Hann.-Münden, Prof. Dr. F. Weigert-Leipzig, Prof. Dr. H. Wieland-München, u. A.

herausgegeben von Prof. Dr. W. HERZ, Breslau.

*XXX, Band / 5.—6. Heft*

---

## Die Chemie

### des Ziegelmauerwerkes

Von

Dr. techn. h. c. u. Dr. montan. h. c.

**Ed. Donath**

*emer. o. ö. Professor der chem. Technologie  
an der Deutschen Technischen Hochschule in Brünn*



STUTTGART  
VERLAG VON FERDINAND ENKE

1928

115/14

# Sammlung chemischer und chemisch-technischer Vorträge.

Begründet von Prof. Dr. F. B. Ahrens. Herausgegeben von Prof. Dr. W. Herz.

Mit zahlreichen Abbildungen.

Bisher sind erschienen:

Band I—XXVIII je 12 Hefte im Abonnement M. 18.—; das einfache Heft einzeln M. 1.50

Von Band XXIX an je 12 Hefte im Abonnement M. 24.—; das einfache Heft einzeln M. 2.50

Von Band XXX an je 12 Hefte im Abonnement M. 36.—; das einfache Heft einzeln M. 3.75

**I. 1896.** 1: F. B. Ahrens, Die Metallkarbide und ihre Verwendung. — 2: V. Steger, Verdichtung der Metalldämpfe in Zinkhütten. — 3: F. Oettel, Die Entwicklung der elektrochemischen Industrie. — 4: M. Mugdan, Argon und Helium, zwei neue gasförmige Elemente. — 5: M. Scholtz, Die Terpene. — 6: H. Frhr. v. Jüptner, Die Einführung einheitlicher Analysemethoden. — 7/8: H. Benedict, Die Abwässer der Fabriken. — 9/10: L. Grünhut, Die Einführung der Reinhefe in die Gärungsgewerbe. — 11/12: H. Frhr. v. Jüptner, Kohlenstoffformen im Eisen.

**II. 1897.** 1: W. Marckwald, Die Benzoltheorie. — 2: M. Scholtz, Der künstliche Aufbau der Alkaloide. — 3/5: L. Grünhut, Die Chemie des Weines. — 6/7: W. Wislicenus, Ueber Tautomerie. — 8/9: F. B. Ahrens, Die Goldindustrie der Südafrikanischen Republik. — 10/11: S. Aisinman, Die einheitlichen Prüfungsmethoden in der Mineralölindustrie. — 12: H. Frhr. v. Jüptner, Die Bestimmung des Heizwertes von Brennmaterialien.

**III. 1898.** 1/3: Fr. Goose, Die Beziehungen der Benzolderivate zu den Verbindungen der Fettreihe. — 4: Ed. Donath und K. Pollak, Neuerungen in der Chemie des Kohlenstoffes und seiner anorganischen Verbindungen. — 5: W. Roth, Justus v. Liebig. Ein Gedenkblatt zu seinem 25jährigen Todestag (18. April 1898). — 6: Ed. Jensch, Das Cadmium, sein Vorkommen, seine Darstellung und Verwendung. — 7/8: W. Herz, Ueber die wichtigsten Beziehungen zwischen der chemischen Zusammensetzung von Verbindungen und ihrem physikalischen Verhalten. — 9/10: J. Ephraim, Ueber den Neuheitsbegriff bei chemischen Erfindungen. — 11/12: G. Bodländer, Ueber langsame Verbrennung.

**IV. 1899.** 1/3: M. Dennstedt, Die Entwicklung der organischen Elementaranalyse. — 4: J. Schmidt, Ueber die Pyrazolgruppe. — 5: E. Milde, Ueber Aluminium und seine Verwendung. — 6: F. B. Ahrens, Das Acetylen in der Technik. — 7/8: J. Traube, Ueber den Raum der Atome. — 9: M. Scholtz, Der Einfluß der Raumerfüllung der Atomgruppen auf den Verlauf chemischer Reaktionen. — 10: W. Herz, Ueber die Molekulargröße der Körper im festen und flüssigen Aggregatzustande. — 11/12: J. Schmidt, Ueber die Halogenalkylate und quaternären Ammoniumbasen.

**V. 1900.** 1: J. H. van't Hoff, Ueber die Theorie der Lösungen. — 2: A. Ladenburg, Die Entwicklung der Chemie in den letzten zwanzig Jahren. — 3/5: O. Kröhnke, Die Reinigung des Wassers für häusliche und gewerbliche Zwecke. — 6: S. Aisinman, Die destruktive Destillation in der Erdölindustrie. — 7/10: A. Harpf, Flüssiges Schwefeldioxyd. Darstellung, Eigenschaften und Versendung desselben. Anwendung des flüssigen und gasförmigen Schwefeldioxydes in Gewerbe und Industrie. — 11/12: Th. Koller, Die Konservierung der Nahrungsmittel und die Konservierung in der Gärungstechnik.

**VI. 1901.** 1: G. Keppeler, Chemisches auf der Weltausstellung in Paris im Jahre 1900. — 2/4: Ed. Donath und B. M. Margosches, Das Wollfett, seine Gewinnung, Zusammensetzung, Untersuchung, Eigenschaften und Verwertung. — 5/6: A. Lottemoser, Ueber anorganische Kolloide. — 7/8: G. Rohde, Das Chromylchlorid und die Etardsche Reaktion. — 9/11: J. Koppel, Die Chemie des Thoriums. — 12: Giuseppe Bruni, Ueber feste Lösungen.

**VII. 1902.** 1: F. Giesel, Ueber radioaktive Substanzen und deren Strahlen. — 2/4: K. Grauer, Die Preisbewegung von Chemikalien seit dem Jahre 1861. — 5: Jos. Siegrist, Chemische Affinität und Energieprinzip. — 6: R. Nietzki, Die Entwicklungsgeschichte der künstlichen organischen Farbstoffe. — 7/8: F. W. Hinrichsen, Ueber den gegenwärtigen Stand der Valenzlehre. — 9/10: J. Schmidt, Ueber den Einfluß der Kernsubstitution auf die Reaktionsfähigkeit aromatischer Verbindungen. — 11: H. Mennicke, Zur Verwertung des Zinns von Weißblechabfällen. — 12: F. B. Ahrens, Das Gärungsproblem.

**VIII. 1903.** 1/2: A. Hantzsch, Die Diazoverbindungen. — 3/4: Edv. Hjelt, Ueber die Laktone. — 5/7: R. Abegg, Die Theorie der elektrolytischen Dissociation. — 8: G. Rauter, Der gegenwärtige Stand der Schwefelkohlenstoffindustrie. — 9: E. Wedekind, Die Santonin-Gruppe von den Gleichgewichtsgeschwindigkeit. — 10: A. Ladenburg, Ueber Racem

wandtschaftslehre. (Die Lehre in Systemen und von der Reaktionen. — 12: A. Ladenwässriger Lösung.

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000300663

## Vorrede.

Vorliegendes Buch stellt nicht eine, wie gewöhnlich, nach Beginn regelmäßig fortgesetzte Arbeit vor. Die Anregung zu derselben erhielt ich bereits 1871 (siehe die betreffenden Bemerkungen im Inhalt). Ich wollte jedoch alle in Betracht kommenden chemischen Prozesse auf Grund neuerer, durchzuführender experimenteller Untersuchungen studieren und habe mir das Material dazu, Bausande, Kalke, Mörtel und Ziegel sowohl bei meinen Ferienreisen als auch auf schriftlichem Wege durch kompetente Fachmänner des Bauwesens verschaffen müssen. Dabei habe ich bis zum untenstehenden Datum die einschlägigen Veröffentlichungen auf diesem Gebiete verfolgt und verwendet, so daß das Vorliegende eine monographische Behandlung gewissermaßen des ersten und ältesten Kapitels der Chemie der Baumaterialien vorwiegend auf Grund eigener Untersuchungen darstellt.

Brünn, Ende Mai 1927.

Ed. Donath.

III/14



III - 207134



III ~~19572~~

Akc. Nr. \_\_\_\_\_

~~294~~ 51

BPK- B-166/206

# Die Chemie des Ziegelmauerwerkes.

Von

Dr. techn. h. c. u. Dr. montan. h. c. **Ed. Donath**, emer. o. ö. Professor der chem. Technologie an der deutschen technischen Hochschule in Brünn.

## I. Geschichtliche Einleitung.

Geschichtliches<sup>1)</sup>. Die ältesten Baudenkmäler aus Ziegelsteinen sind in Ägypten aufgefunden worden; so wurde durch die neuesten Nachforschungen festgestellt, daß der aus Ziegeln hergestellte Belustempel die Höhe eines Stadiums (200 m) gehabt hat und daß er von einer 8 Meilen langen Mauer umgeben war. Das Alter dieser Bauwerke wird auf 12 000 Jahre geschätzt. Auch einige Pyramiden wurden ganz aus Ziegeln hergestellt; eine solche von König Asychis erbaute trägt eine Steintafel mit folgender Inschrift: „Halte mich nicht gering im Vergleich mit den steinernen Pyramiden, denn ich rage vor ihnen ebenso hervor, wie Zeus vor den Göttern. Denn mit der Stange in den See stehend, sammelten sie, was von Schlamm an der Stange hängen blieb, strichen Ziegel daraus und erbauten mich auf solche Weise.“ — Aus Nilschlamm fertigten die Ägypter ferner keilförmige Ziegel zur Herstellung der ältesten bekannten Gewölbe, deren Alter bis etwa 3000 Jahre v. Chr. hinaufreicht.

Massenhafter noch wurden gebrannte Steine in Babylon verwendet. „Wohlan, lasset uns Ziegel streichen und brennen“ sprachen die Babylonier bei dem bekannten Turmbau (1. Buch Moses, 11. Kap., 3. Vers) und nahmen Ziegel zu Stein und Ton zu Kalk. Nach Herodot (1. Buch, Kap. 178) war Babylon mit einem Graben und einer Mauer von 50 Ellen und 200 Ellen Höhe umgeben. „Während sie den Graben gruben, fertigten sie Ziegel aus der Erde, die aus den Gruben geworfen ward, und nachdem sie eine hinreichende Zahl von Ziegeln gestrichen hatten, brannten sie dieselben in Öfen“. Die Her-

<sup>1)</sup> Nach einer sehr umfassenden Abhandlung von Ferd. Fischer, Über das Brennen von Ziegelsteinen im Ringofen. Dingler, Polytechnisches Journal 1878, S. 65 u. f.

stellung von Backsteinen hatte demnach hier bereits 3000 vor Chr., wie man aus der schönen, lebhaft gefärbten Glasur der in den Ruinen Babylons gefundenen Ziegel schließen muß, eine solche Vollkommenheit erreicht, daß die Erfindung der Ziegelbrennerei um noch einige Jahrhunderte älter sein muß, als die Gründung der Stadt. Auch in China, Japan und Hinterindien sind Ziegelsteine seit undenklichen Zeiten in Gebrauch.

Griechen und Römer verwendeten allgemein Ziegelsteine (vgl. 1842, 85, 389); Vitruv (2. Buch, 3. Kap.) bespricht ausführlich getrocknete Lehmsteine (*laters*) und gebrannte Ziegelsteine (*testae*). Von Rom aus verbreitete sich der Backstein über Italien, Gallien, Britannien, Spanien und Deutschland. Das älteste römische Backsteinmauerwerk ist am Dom zu Trier; die dazu verwendeten Ziegel scheinen aus der Zeit des Augustus zu stammen. Allgemeiner wurde in Deutschland die Herstellung und Verwendung der Ziegelsteine aber erst im 12. Jahrhundert. Von der Hansa wurden Ziegelsteinbauten ausgeführt in Antwerpen, Bergen, Petersburg, und der deutsche Ritterorden begann im Jahre 1276 das Schloß von Marienburg zu bauen. Aber selbst im 17. Jahrhundert war die Ziegelfabrikation in Deutschland noch mangelhaft<sup>1)</sup>; erst der neueren und neuesten Zeit war es vorbehalten, nicht nur den mechanischen Teil derselben sehr zu vervollkommen, sondern auch die Anfänge einer wissenschaftlichen Grundlage zur Beurteilung des Tones und des Brennprozesses zu schaffen. (Geschichtliches siehe auch „Lehrbuch der Keramik“ 1925, S. 125 von Dr. H. Hecht).

Bei den zahlreichen in Griechenland noch heute in Resten erhaltenen Bauwerken unter Verwendung von Kalkmörtel finden wir, daß schon in sehr alter Zeit die Griechen diese Mörtel durch hydraulische Zuschläge (Santorinerde) verbessert haben. Vor einiger Zeit im Materialprüfungsamt ausgeführte Untersuchungen<sup>2)</sup> alter Mörtel von der Insel Thera (Santorin) haben dies bewiesen. Diese Versuche haben nebenbei die Tatsache festgestellt, daß noch heute die Maurer auf dieser Insel in gleicher Weise wie vor 2000 Jahren arbeiten. Sie haben nichts hinzugelern't, aber auch nichts verlernt.

<sup>1)</sup> Bishof, Die feuerfesten Tone, S. 70.

<sup>2)</sup> Mitteilungen aus dem Materialprüfungsamt Jahrg. 25, 1907, S. 11. Nach einem Vortrag von Prof. M. Gary. Dieser Vortrag ist nicht nur in historischer Hinsicht sehr inhaltsreich und wertvoll, sondern gibt auch einen kritischen Überblick über die spätere Entwicklung der Mörteltechnik, die Mängel derselben und zeigt die Wege zur Abhilfe.

Jedenfalls wurden aus Lehm durch Formen und Brennen erzeugte Steine und also auch die zu ihrer Verbindung verwendete Mischung von Kalk und Sand, der Mörtel (Luftmörtel), die Mauerpeise seit den urältesten Zeiten in der Bautechnik verwendet<sup>1)</sup>. Trotzdem ist die Erkenntnis der chemischen Natur der genannten Stoffe, speziell des Mörtels und der mit ihm im Laufe der Zeit eingetretenen Veränderungen trotz mehrfacher Untersuchungen lange sehr unbefriedigend gewesen, und auch jetzt sind dieselben noch nicht vollständig aufgeklärt. Es ist nicht schwer erklärlich, weshalb die Chemie der Baumaterialien verhältnismäßig langsamere Fortschritte gemacht hat, als die mancher anderer chemisch-technischer Gebiete; denn diejenigen, die sich vorzugsweise mit den Baumaterialien in ihrer praktischen Verwendung beschäftigen, die Bautechniker, haben meistens weder Beruf noch Zeit und Gelegenheit zu einschlägigen Studien, dem Chemiker aber, sowohl dem wissenschaftlichen als auch dem technischen, bieten sich eine ungemein große Menge anderer Probleme zur Untersuchung, die seinem Interessenkreise näher liegen.

## II. Der Bausand.

Auf eine Besprechung der verschiedensten Anschauungen und Beobachtungen über die Entstehung und Beschaffenheit der verschiedenen Sande, soll hier nicht näher eingegangen werden, und es sei nur aus der ungemein großen Literatur mit Angabe der Quellen das Wichtigste zusammengefaßt. (Über die Entstehung und Natur des Sandes siehe: Daubrée, Experimentalgeologie, deutsch von Dr. Ad. Gurlt, Braunschweig 1888. Über Verwitterung der Mineralien und Gesteine siehe insbesondere Sachssze, Lehrbuch der Agrikulturchemie, Leipzig 1888; Adolf Mayer, Agrikulturchemie, Heidelberg 1901, 2. Teil: Die Bodenkunde; Dr. E. Weinschenk, Gesteinskunde, Freiburg i. Breisgau.)

Die Gesteine, aus denen durch mechanische Zertrümmerung aus physikalischen Ursachen und durch Verwitterung vorwiegend Quarz enthaltender Quarzsand selbst entstehen kann, sind in erster Reihe: 1. Granit, (enthält Quarz, Orthoklas, Paligoklas, Glimmer; im Granitsyenit tritt der Quarz mehr zurück); 2. Quarzporphyr (enthält Quarz und Orthoklas-kristalle in rötlicher Grundmasse); 3. Liparit oder Quarztrachyt (enthält Quarz, Sanidin, Glimmer und Hornblende); 4. Quarzdiorit (Pla-

<sup>1)</sup> Die Ziegel- und die Töpferscheibe dürften zu den ältesten Inventarstücken der Technik überhaupt gehören.

gioklas, Hornblende, Glimmer, Quarz); 5. Gneis (Orthoklas, Quarz, Glimmer mit Granat, Turmalin usw.); 6. Glimmerschiefer (Glimmer und Quarz). Im Quarzit sind Quarz und wenig Glimmer enthalten. Insbesondere sind zu nennen die Sandsteine, welche aus Quarzsand und Glimmer bestehen.

Nähere Ausführungen über die Beschaffenheit des Sandes siehe Handbuch der gesamten Tonwaren, 3. Aufl., S. 112; Lueger, Technologisches Lexikon, Bd. 7, S. 155; Handwörterbuch der Chemie, Bd. 6, S. 131. Besonders kritisch aber und eingehend ist das langbekannte und vorzügliche Werk von Gottgetreu, Baumaterialien, Bd. 1, S. 103; Knapp, Chemische Technologie, 3. Aufl., S. 755 von Bd. 1. Der neueren Zeit angehörend sind zu nennen Manzella (Chemikerzeitung 1910, S. 1058); Dr. Wilhelm Vaubel, Darmstadt (Verband selbständiger öffentlicher Chemiker Deutschlands von 25. bis 27. September 1910). Auch die äußerst vielfachen und lebhaften Auseinandersetzungen über die Qualifikation des sog. Quarzsandes seien nicht näher besprochen, siehe weiteres Feichtinger, S. 68 in Boleys chemischer Technologie Bd. 6; Zwick, Kalk und Luftmörtel und ebenfalls das schon genannte Werk von Gottgetreu, Physikalische und chemische Beschaffenheit der Baumaterialien.

Aus den verschiedenen Ausführungen ist ersichtlich, daß die Bezeichnung Quarzsand eine meistens mehr sprachgebräuchliche für Sand überhaupt war, ohne daß man damit gewissermaßen in chemischem Sinne reinen Quarzsand versteht. Wenn man aber von reinem Quarzsand spricht, dann ist der Begriff schon genau umschrieben, und es ist anzunehmen, daß wirklich nur Quarzsand, vollständig aus kristallisierter Kieselerde  $\text{SiO}_2$  bestehend, gemeint ist.

Am eingehendsten hat sich schon vor längerer Zeit mit dem Bausand bzw. mit den damit hergestellten Mörteln Dr. Otto Ziurek in Berlin (siehe Berliner Bauzeitung 1861, S. 55—59) beschäftigt, welcher vielfache Versuche über die Widerstandsfähigkeit verschiedener Mörtelsorten gegen das Zerdrücken und gegen die Zerstörung durch die Witterung ausgeführt hat. Mit Rücksicht auf die chemischen Prozesse, welche bei der Einwirkung des Kalkes auf den Sand, bzw. dessen Bestandteile angenommen werden, hat Ziurek aus seinen Versuchen folgende Sätze abgeleitet:

1. Aus denselben Mörtelsubstanzen können je nach ihrer verschiedenen technischen Handhabung und Verwendung und unter verschiedenen atmosphärischen Einflüssen Mörtel mit bloßem Kalkbindemittel und Mörtel mit Ton-Kiesel-Kalk-Bindemitteln entstehen (d. h.

Mörtel aus Kalksilikaten [auch Tonerdesilikaten] und Kieselsäure in verschiedenen Formen Dth.)<sup>1)</sup>.

2. Mörtel mit bloßem Kalkbindemittel sind weniger fest und widerstandsfähig, als Mörtel mit Ton-Kiesel-Kalk-Bindemittel und sind für unvollkommene, unter ungünstigen Verhältnissen entstandene Mörtel zu halten.

3. Daher haben auch nur Mörtel mit Ton-Kiesel-Kalk-Bindemittel als vollkommene und normale Mörtel zu gelten und die Mörtelbereitung muß immer auf die Herstellung dieser gerichtet sein.

Daß nicht reiner Quarzsand der beste Mörtelsand ist und für das Zutreffen der mehrfach ausgesprochenen Anschauung, daß silikathaltiger Sand sich besonders gut zur Mörtelerzeugung eignet, sprechen u. a. die Resultate der Versuche, welche Dr. Böhme 1888 in der königlichen Prüfungsstation für Baumaterialien in Berlin (siehe Mitteilungen usw. Ergänzungsheft 1, 1889) mit dem in der Eifel in großen Mengen vorkommenden vulkanischen Sand in bezug auf seine Verwendbarkeit zur Mörtelbereitung angestellt hat. Dieser Sand hat nach Prof. Dr. Seger folgende chemische Zusammensetzung:

	Grober Sand	Feiner Sand
Kieselsäure . . . . .	52,61 %	52,31 %
Tonerde . . . . .	13,98 „	15,75 „
Eisenoxydul . . . . .	8,49 „	7,22 „
Kalk . . . . .	10,92 „	10,47 „
Bittererde . . . . .	7,81 „	7,04 „
Kali . . . . .	1,69 „	2,26 „
Natron . . . . .	2,36 „	3,10 „
Phosphorsäure . . . . .	Spur	Spur
Schwefelsäure . . . . .	0,52 „	0,38 „
Glühverlust . . . . .	1,57 „	1,43 „
	<hr/>	<hr/>
	99,95 %	99,96 %

Er ist also weit davon entfernt, Quarzsand zu sein.

Die vergleichenden Versuche, welche Dr. Böhme mit Mörtelmischungen aus verschiedenen Kalken und diesem vulkanischen Sand

<sup>1)</sup> Im Jahre 1869/70 war der Verfasser Dr. Ziureks Assistent. Auf dessen Veranlassung wurden vom Verfasser Donath eine Reihe von Analysen alter Mörtel von historischen Bauwerken in Deutschland ausgeführt, deren Resultate später in der Zeitschr. f. angew. Chemie, 1895, Heft 1, veröffentlicht wurden.

einerseits sowie sog. Normalsand<sup>1)</sup> andererseits angestellt hat, haben jedoch ergeben, daß der vulkanische Sand den Normalsand, sog. Quarzsand in sämtlichen Mischungen sowohl bei der Erhärtung der Mörtel über Wasser als bei der Erhärtung in der Luft übertrifft. Aber auch andere Erfahrungen aus der Praxis sprechen dafür, daß das Vorhandensein löslicher Kieselsäure oder durch Salzsäure aufschließbarer Silikate für die Erhärtungsgeschwindigkeit und die Festigkeit des Luftmörtels von großem Einfluß ist; so ist es bekannt, daß ein Mörtel, welchem neben gewöhnlichem Sand auch Hochofenschlackensand zugeführt wurde, sehr bald erhärtet und mitunter eine solche Festigkeit schon nach wenigen Jahren erreicht, daß man das betreffende Mauerwerk nur mit Gewalt sprengen kann, wie mir aus eigenen Beobachtungen bekannt ist. Es ist mir persönlich weiter bekannt, daß man beim Bauen in vorgeschrittenen, schon kälteren Jahreszeiten das Abbinden und Erhärten des Mörtels beschleunigt, wenn man dem Mörtelsand gesiebte Braunkohlenasche, z. B. in der Gegend der obersteirischen Braunkohlen wie Leoben usw. die zerkleinerten Schlacken von der Verbrennung gewisser Braunkohlen, zufügt; bekanntlich zeichnet sich die Asche mancher Braunkohlen durch einen hohen Gehalt an aufgeschlossener Kieselsäure bzw. leicht zersetzbaren Silikaten aus. Wie man sieht, waren demnach die Anschauungen über die zweckmäßigste geognostisch-mineralogische Beschaffenheit und chemische Zusammensetzung des zur Luftmörtelerzeugung verwendeten Sandes durchaus nicht geklärt, und es waren deshalb lange noch keine verlässlichen Anhaltspunkte zur chemischen Bewertung des Mörtelsandes gegeben. Um diese Anhaltspunkte zu gewinnen, wurden in meinem Laboratorium eine Reihe von Untersuchungen über Bausand im Laufe einer längeren Zeit durchgeführt; sie bilden deshalb nicht eine von vornherein nach einem Plane angelegte, gewissermaßen homogene Arbeit, und ich bin mir mancher Mängel derselben bewußt; trotzdem dürften die gewonnenen Resultate die behandelte Frage der Lösung näher zu führen geeignet sein.

---

<sup>1)</sup> Nach Vaubel (Chem. Ztg. 1910, 1058) wird als Normalsand zur Prüfung der Mörtel usw. auf Festigkeit der aus einem tertiären Quarzitlager der Braunkohlenformation in der Nähe von Frauenwalde an der Oder angesehen. Er ist fast weiß, wird gewaschen, getrocknet, gesiebt und kommt in plombierten Säcken zum Versand. Das Litergewicht ist 1,462; das Litergewicht anderer Mörtelsande liegt zwischen 1,25—1,77. Ich habe sog. Normalsand nicht bloß aus  $\text{SiO}_2$  bestehend gefunden.

Tabelle 1.  
Zusammensetzung von Mörtelsanden.

S a n d	Murtal bei Leoben	Gailtal Kärnten	Kirlitz bei Brünn	Branowitz Brünn	Aus der Schwarza	Zum Mörtel des Neubaus der techn. Hochschule
Glühverlust . . . . .	2,64	18,85	2,31	2,20	1,15	1,17
Durch Salzsäure nicht gelöst	63,29	46,72	86,83	90,62	90,44	92,17
Löslich gemachte Kieselsäure	12,09	4,36	3,48	2,49	2,32	2,64
Kupferoxyd . . . . .	0,73	—	0,05	0,14	0,10	—
Eisenoxyd . . . . .	6,02	3,84	1,30	1,36	2,76	1,84
Tonerde . . . . .			4,16	1,98	1,69	1,16
Manganoxydul . . . . .	3,36	Spuren	0,64	0,17	0,69	0,05
Kalk . . . . .	8,18	16,37	0,65	0,23	0,60	0,21
Magnesia . . . . .	3,08	7,68	gr. Sp.	Spuren	Spuren	0,30

Zusammensetzung des durch Salzsäure unzersetzten Anteiles:

Kieselsäure . . . . .	81,82	86,17	83,70	82,38	81,46	81,74
Kupferoxyd . . . . .	0,24	—	Spuren	0,17	0,12	—
Eisenoxyd } . . . . .	12,16	11,07	1,05	0,63	12,37	0,68
Tonerde } . . . . .			9,41	10,74		
Manganoxydul . . . . .	1,08	Spuren	0,10	0,69	0,77	0,15
Kalk . . . . .	0,79	0,52	0,74	0,67	1,06	1,04
Magnesia . . . . .	0,49	Spuren	0,15	0,07	0,22	0,14

Die Art, in welcher die Analysen<sup>1)</sup> durchgeführt wurden, war nicht immer die gleiche. Bei einer Reihe von Sanden war der Gang der Untersuchung folgender: 3 g des feingepulverten und bei 100° getrockneten Sandes wurden mit konz. Salzsäure zur Trockne gebracht und die dadurch aus den zersetzbaren Silikaten ausgeschiedene Kieselsäure in gewöhnlicher Weise unlöslich gemacht und samt den unzersetzten Anteilen abfiltriert. Im Filtrat wurden der Reihe nach die gewöhnlichen Mineralbestandteile nach bekannten Methoden bestimmt. Das Gemisch von Kieselsäure und unzersetzten Gesteinsresten wurde in einer Platinschale wiederholt mit einer Lösung von kohlen-saurem Natron ausgekocht und durch Filtrieren, Ansäuern mit Salz-säure, Eindampfen zur Trockne usw. die Kieselsäure der zersetz-baren Silikate gewonnen. Das Unzersetzbare wurde getrocknet, ge-glüht, gewogen, mit kohlen-saurem Natronkali aufgeschlossen, und

<sup>1)</sup> Sonderabdruck aus der Tonindustrie-Zeitung 1900, XXIV, 21. Meinem verehrten Freunde und Kollegen Prof. Dr. Karl Frenzel statue ich für die damals von ihm als Mitarbeiter mir seinerseits gewordene wertvolle Unter-stützung meinen herzlichsten Dank ab.

darin wurden wieder der Reihe nach die gewöhnlichen Bestandteile bestimmt.

In der ersten der nachfolgenden kleinen Tabellen sind die Mengen des durch Salzsäure unzersetzten Rückstandes, sodann die Mengen der durch Sodalösung (nach der Zersetzung mit Salzsäure) ausziehbaren Kieselsäure und schließlich die der in der ersten salzsauren Lösung enthaltenen Bestandteile angegeben; die zweite Tabelle zeigt die Zusammensetzung des durch Salzsäure unveränderten, anfangs erhaltenen Rückstandes.

Der relativ hohe Mangan Gehalt des Mursandes bei Leoben erklärt sich durch den Umstand, daß durch den Vordernberger Bach von den Vordernberger Hochöfen zuzeiten nicht unbeträchtliche Mengen granulierter Hochofenschlacke (aus dem sehr manganreichen Erzberger Spat-eisenstein erzeugt) in die Mur hineingelangen und ebenso vielleicht auch zerriebene Trümmer dieses Mineralen selbst. Auch der hohe Gehalt an durch Salzsäure größtenteils zersetzbaren Silikaten, deren Kieselsäure dann durch Kochen mit Sodalösung in Lösung geht, ist ebenfalls höchstwahrscheinlich auf die Beimischung von Hochofenschlackensand zurückzuführen, demnach allerdings ein nur vereinzelt vorkommender Fall.

Dagegen rührt bei dem vorzugsweise dolomitischen Sande aus dem Gailtal der verhältnismäßig hohe Gehalt an löslicher Kieselsäure (4,36 %) von beigemengten natürlichen Silikaten oder ihren Verwitterungsprodukten her.

Gewaschener Sand aus den Brünner Wasserwerken hatte folgende Zusammensetzung nach dem Trocknen bei 100°:

Glühverlust . . . . .	1,26 %
Gesamtkieselsäure $\text{SiO}_2$ . . . . .	78,25 „
Kupferoxyd $\text{CuO}$ . . . . .	0,01 „
Eisenoxyd $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . . . . .	2,99 „
Tonerde $\text{Al}_2\text{O}_3$ . . . . .	9,88 „
Manganoxydul $\text{MnO}$ . . . . .	0,56 „
Kalk $\text{CaO}$ . . . . .	1,65 „
Magnesia $\text{MgO}$ . . . . .	0,33 „
Kaliumoxyd $\text{K}_2\text{O}$ . . . . .	4,77 „
Natriumoxyd $\text{Na}_2\text{O}$ . . . . .	0,10 „
	99,80 %

Von verdünnter Salzsäure wurden unmittelbar aus demselben

gelöst 0,76 %, nach vorheriger mehrtägiger Einwirkung von breiigem Ätzkalk mit bestimmtem Kieselsäuregehalt aber 1,16 %.

Ein anderer Sand, von einer großen Mörtelfabrik in Budapest stammend, ergab:

Glühverlust . . . . .	5,30 %
Gesamtkieselsäure . . . . .	78,50 „
Eisenoxyd . . . . .	2,68 „
Tonerde . . . . .	4,84 „
Kalk . . . . .	6,64 „
Magnesia . . . . .	0,69 „
Manganoxydul . . . . .	Spuren
Alkalien (aus der Differenz bestimmt)	
und nicht Bestimmtes . . . . .	1,35 %
	100 %

Nur bei einer kleinen Anzahl dieser untersuchten Sande wurden die Alkalien (nämlich im Sand von Chirlitz mit 5,92 %, im Sand von Branowitz bei Brünn mit 4,15 %, im gewaschenen Sand der Brüner Wasserwerke mit 4,87 %) bestimmt. Da jedoch bei den betreffenden Analysen die meisten Bestandteile zweimal mit sehr übereinstimmenden Resultaten festgestellt wurden, so unterliegt es keinem Zweifel, daß bei den anderen Sanden die Differenz der Summen der Bestandteile bei dem durch Salzsäure nicht zersetzbaren Anteile gegen 100 (abgesehen von nicht bestimmten Spuren anderer Bestandteile) hauptsächlich auf die Alkalien entfällt.

Die Anzahl der untersuchten Mörtelsande ist allerdings nicht groß, doch kann man im Zusammenhange mit den Tatsachen über die Entstehung und Abstammung des Sandes annehmen, daß der Mörtelsand höchstens in den allerseltensten Fällen, wahrscheinlich aber nie aus reinem Quarzsand besteht, sondern tatsächlich zumeist daneben wechselnde Mengen von alkalihaltigen Silikaten und natürlichen Karbonaten enthält; manche Sande sind selbstverständlich entsprechend den betreffenden Gebirgsformationen sogar vorwiegend dolomitischer Natur oder enthalten andere Karbonate.

Beim Studium der einschlägigen Literatur findet man, daß als die Ursache des Auftretens größerer Mengen von löslicher Kieselsäure in vielen untersuchten Mörteln von Seite Petzholdts (Journ. f. prakt. Chemie 16, 96) und anderer der Angriff des reinen Quarzsandes durch Ätzkalk angesehen wird, wobei eine Bildung von Kaliumsilikat erfolgt, welches dann bei der Untersuchung des Mörtels eben

zur Bildung löslicher Kieselsäure Veranlassung gibt. Da Gottgetreu andererseits von dem vorteilhaften Verhalten feldspathaltiger Bausande spricht, so habe ich sowohl über Angreifbarkeit eines Quarzsandes wie eines Feldspatsandes durch breiigen Ätzkalk eine Reihe von Versuchen durchgeführt. Petzholdt hat zu seinen Versuchen teils Quarzpulver aus nach Weißglühhitze abgeschrecktem Quarz, teils weißen Sand <sup>1)</sup>, durch Schlämmen von beigemengten Glimmerblättchen befreit, teils gewöhnlichen braunen eisenhaltigen Kiessand verwendet. Er hat die in diesen Materialien schon vorhandene lösliche Kieselsäure nicht bestimmt, obgleich die beiden letzten Sandsorten gewiß nicht als reiner Quarzsand betrachtet und demgemäß als bloß aus unlöslicher Kieselsäure bestehend angenommen werden durften. Aus dem genannten Sande wurden dann mit entsprechenden Mengen von reinem Kalk (aus karrarischem Marmor durch Brennen usw. hergestellt) Mörtelproben erzeugt, die, nach Verlauf verschiedener Zeiten untersucht, größere Mengen von löslicher Kieselsäure ergaben. Zu meinen Versuchen benutzte ich völlig reine Quarzstücke, welche (ohne Abschrecken) entsprechend zu einem groben Sand zerstoßen wurden. In einem bestimmten Quantum dieses Sandes wurde durch Eintragen in verdünnte Salzsäure (1 : 6), mäßiges Erwärmen, Abfiltrieren, Eindampfen usw. die Menge der löslichen Kieselsäure bestimmt. Darauf wurde ein in der Schale innigst verriebener, äußerst fetter Kalkbrei in zwei genau gewogene Teile geteilt und in dem einen die Menge der löslichen Kieselsäure in gleicher Weise bestimmt; der andere Teil wurde mit dem gewogenen Quarzsande zu einem gleichförmigen Brei angerührt und dieser im offenen Glas durch 14 Tage der Luft ausgesetzt. Nach dieser Zeit wurde nun in diesem künstlichen Mörtel in gleicher Weise die Menge der löslichen Kieselsäure bestimmt: die im angewendeten Quarzsand und dem Kalkbrei enthaltene Menge der löslichen Kieselsäure entsprach 0,0852 g; gefunden wurden nach der 14tägigen Einwirkung 0,0849 g; es hat also absolut keine Vermehrung der löslichen Kieselsäure durch Bildung von Kalksilikat infolge der Einwirkung des Ätzkalks auf die Quarzkieselsäure stattgefunden.

<sup>1)</sup> Als seinerzeit die Aschenbestimmung in Rohzuckern nach Alberti und Hempel durch Veraschen derselben mit Quarzsand (Quarzasche) empfohlen und zum Teil geübt wurde, hatte ich anfangs dabei den zu diesem Zweck empfohlenen käuflichen „Quarzsand“ benutzt, kam aber bei Vergleichen mit den Resultaten mit von mir hergestelltem reinem Quarzsand bald darauf, daß der käufliche reine Quarzsand mit Silikaten stark verunreinigt war (siehe Österr. Zeitschr. f. Zuckerindustrie Bd. 21, 281).

Wenn auch dieser chemische Prozeß eine sehr geringe Geschwindigkeit haben mag, so hätte doch nach 14tägiger Einwirkung eine gewisse chemische Veränderung nachweisbar sein müssen. Auch ohne weitere Wiederholung dieses mit größter Sorgfalt durchgeführten Versuches habe ich die Überzeugung, daß absolut reiner Quarzsand durch Ätzkalk selbst nach sehr langer Zeit keine chemische Veränderung unter Bildung von Kalksilikat und demnach keine Überführung in lösliche Kieselsäure erfährt. Petzholdts Ansichten sind deshalb nicht begründet<sup>1)</sup>.

Trotzdem wird die Petzholdtsche Auffassung in den einschlägigen Arbeiten und Büchern häufig als berechtigt zitiert, obgleich auch Gottgetreu (l. c.) ausdrücklich die Bildung von Kalksilikat aus Ätzkalk und Quarzsand als einen Irrtum hinstellt. Danach sollte diese Annahme Petzholdts jetzt nirgends mehr geteilt werden.

Ich habe nun aber auch über das Verhalten des Ätzkalks gegen amorphe stark geglähte Kieselsäure, wie sie z. B. bei chemischen Analysen in reinem Zustande erhalten wird, einige Versuche angestellt; eine gewogene Menge derselben, über 4 g, wurde in ungefähr  $\frac{1}{2}$  l verdünnter Salzsäure (1 : 5) eingetragen und ungefähr 10 Minuten erwärmt, dann abfiltriert und im Filtrate nach dem Eindampfen in üblicher Weise die Kieselsäure bestimmt. Die in Lösung gegangene Kieselsäure ergab ungefähr 0,2% der angewandten. Eine gleiche Menge dieser geglähten amorphen Kieselsäure wurde nun mit Kalkbrei, wie er zur Mörtelbereitung verwendet wird, zusammen vermischt und diese Mischung 14 Tage in einem geschlossenen Raume unter einer großen Glasglocke stehen gelassen. Sodann wurde die Mischung in ungefähr 660 ccm obiger Salzsäure eingetragen, nach entsprechendem Erwärmen die Mischung filtriert und darin die gelöste Kieselsäure bestimmt. Der Kieselsäuregehalt des gewogenen Kalkbreies, der vorher ebenfalls quantitativ bestimmt worden war, wurde von der gefundenen Menge Kieselsäure abgezogen, und es ergab sich, daß 15,72% der eingewogenen amorphen Kieselsäure dabei in Lösung gegangen waren. Es ist deshalb außer Zweifel, daß Ätzkalk schon bei gewöhnlicher Temperatur auf amorphe, selbst nicht hydratisierte Kieselsäure, also auf  $\text{SiO}_2$  in amorphem Zustande, ziemlich energisch einwirkt.

Darauf wurden weitere Versuche über die Angreifbarkeit von

<sup>1)</sup> Schon A. Bauer (in Wien) hat übrigens 1852 (Dinglers polyt. Journ. 150, 65) darauf hingewiesen, daß die Aufklärung der Silikatbildung im Mörtel „einer weiteren mit reinem Quarz und Kalk vorgenommenen Untersuchung überlassen“ werden müsse.

Feldspat sowie von 3 Zeolithen (Stilbit, Natrolith und Chabasit) durch Ätzkalk in gleicher Weise angestellt. Die genannten Mineralien wurden durch Zerkleinern, Sieben usw. in einen gleichmäßigen mittelgroben Sand überführt, und durch Eintragen in überschüssige Salzsäure, Erwärmen usw. wurde dann die Menge der dabei in Lösung gehenden Kieselsäure bestimmt. Ungefähr gleiche Mengen dieses Mineralsandes wurden mit dem Kalkbrei mittels eines Glasstäbchens verrieben, die Mischung durch 10—14 Tage stehen gelassen und in vorher beschriebener Weise wieder die Menge der in verdünnter Salzsäure löslichen Kieselsäure bestimmt. Dabei ergab sich, daß im Feldspatsand gar keine Zunahme der löslichen Kieselsäure zu finden war, während bei den 3 Zeolithen Chabasit, Stilbit und Natrolith Zunahmen an durch Kalk löslich gemachter Kieselsäure um 0,07%, 0,11% und 0,55% stattfanden. Ein bemerkbarer Angriff des Kalkes hat daher nur beim Natrolith stattgefunden.

In gleicher Weise wurden Versuche über die Angreifbarkeit einiger Sandsorten durch Ätzkalk angestellt<sup>1)</sup>. Dazu wurde verwendet Sand aus dem Gailtal, aus Kirlitz, aus der Schwarza aus Brünn, aus Branowitz und ausgewaschener Sand aus der Schwarza bei Jundorf. In allen Fällen ergab sich hierbei eine allerdings im Verhältnis zu den angewendeten Sandmengen nicht beträchtliche Zunahme an löslicher Kieselsäure, welche am größten bei dem Sand aus Kirlitz war, nämlich für eine Einwage von 54,293 g eine Zunahme von 0,1123 g, während die kleinste Zunahme bei dem Sande aus der Schwarza (bei Brünn) zu konstatieren war, nämlich für 49,853 g Sand 0,013 g  $\text{SiO}_2$ . Wenn auch die angewandte Methode der Versuchsanstellung durchaus nicht unanfechtbar ist, indem ja ein Teil der durch Zersetzung frei gewordenen Kieselsäure sich vielleicht der Lösung durch Salzsäure entzieht, so sind die Resultate doch mit Rücksicht auf eigene diesbezügliche Versuche, sowie insbesondere auf die schon vor längerer Zeit von A. Bauer in Wien (Dinglers Polytechn. Journal **152**, 367) gemachten Beobachtungen<sup>2)</sup> vollständig verwendbar. Es ergibt sich daraus, daß der verwendete Bausand je nach seiner Natur durch den Ätzkalk schon bei gewöhnlicher Temperatur eine chemische Veränderung erfährt, indem das Kalkhydrat sowohl die in dem Sande ent-

<sup>1)</sup> Meinem werten Freunde und Kollegen, Professor Dr. Max Margosches, statue ich für die seinerzeit von ihm mir zuteil gewordene wertvolle Unterstützung meinen herzlichsten Dank ab.

<sup>2)</sup> Ich kann nicht umhin darauf hinzuweisen, welche Bedeutung die mehrfachen Arbeiten A. Bauers für die Aufhellung der Mörtelchemie haben.

haltene amorphe Kieselsäure, als auch bestimmte silikatische Bestandteile zum Teil aufschließt. Da wir es nun tatsächlich fast nie mit reinem Quarzsand zu tun haben, so dürfte beim Luftmörtel aus den angegebenen Gründen stets eine Bildung von Kalksilikat bzw. eines durch Salzsäure zersetzbaren Kalk-Tonerde-Alkali-Silikates eintreten. Dies vorausgesetzt, dürften wir vielleicht schon einigermaßen einen Anhaltspunkt gewinnen, um die Qualifikation eines Bausandes auch vom chemischen Standpunkte aus bewerten zu können, indem wir seine Angreifbarkeit gegen Kalk bei gewöhnlicher Temperatur prüfen. Man bestimmt in dem Sande die an und für sich unter den vorher angegebenen Umständen durch verdünnte Salzsäure in Lösung gehende Kieselsäure, macht aus gewogenen Mengen dieses Sandes mit gewogenen Mengen eines Kalkbreies, dessen Kieselsäuregehalt bekannt ist, eine mörtelartige Mischung und bestimmt nach einer längeren Zeit die Zunahme der durch abermalige Behandlung mit verdünnter Salzsäure in Lösung gehenden Kieselsäure. Je größer ihre Menge ist, je größer also die chemische Einwirkung, die dieser Sand durch Kalk allein erfährt, als desto geeigneter kann man mit Rücksicht auf die vorangegangenen Schlüsse und mit Rücksicht auf die von Gottgetreu ausgesprochenen Anschauungen den betreffenden Sand betrachten.

Ein anderes vielleicht noch zweckmäßigeres Verfahren, die Qualifikation eines Sandes zur Luftmörtelerzeugung zu bewerten, ergibt sich jedoch, wenn man den von Gottgetreu aufgestellten Satz, daß ein Gehalt an Silikaten sich als besonders vorteilhaft erweist, als vollständig begründet ansieht und gleichzeitig eine sehr beachtenswerte Arbeit von G. Lunge und C. Milberg gelegentlich ihrer experimentellen Untersuchungen über das Verhalten der verschiedenen Arten von Kieselsäure zu kaustischen und kohlen-sauren Alkalien in Betracht zieht (Tonindustrie-Ztg. 1897, S. 300). Lunge und Milberg haben nämlich gefunden, daß Trasse und Puzzolane überhaupt nur wenig oder gar keine freie amorphe verbindungs-fähige Kieselsäure enthalten, daß in denselben jedoch neben schwer aufschließbaren Silikaten und Quarz als eigentlich wirksame Bestandteile zeolith-ähnliche oder überhaupt leichter zersetzbare Silikate vorhanden sind, welche schon durch Kalk allein angegriffen werden; diese zeolithischen oder sonst leicht zersetzlichen Silikate erfahren bei der Aufschließung mit Salzsäure und Eindampfen bei 110°, eine derartige Zersetzung, daß nach der Extraktion des mit verdünnter Salzsäure Löslichen fast sämtliche Kieselsäure dieser Silikate durch Kochen mit 5%iger Sodälösung in Lösung gebracht werden kann. Ich habe nun sowohl mit

Quarz als auch mit einigen Silikaten, insbesondere Zeolithen wie Chabasit, Stilbit und Natrolith, Versuche in dieser Richtung angestellt, welche die Angaben von Lunge und Milberg über die Löslichkeit von Quarzpulver in Kalilauge als auch ihre Folgerungen hinsichtlich der Zeolithe zum Teil bestätigen und anderseits ergänzen; diese Resultate sind Gegenstand einer eigenen Veröffentlichung gewesen<sup>1)</sup>. Solche zeolithischen oder wenigstens andere leicht zersetzbaren Silikate dürften, wie aus den Analysen der von mir untersuchten Mörtelsande, insbesondere aus der Menge der nach der Zersetzung mit Salzsäure durch Sodalösung extrahierten Kieselsäure gefolgert werden kann, wenn auch in relativ kleineren Mengen in den Sanden enthalten sein und infolge ihrer Angreifbarkeit durch Kalk denjenigen günstigen Einfluß auf die Qualität des Mörtelsandes ausüben, den Gottgetreu den feldspatartigen Silikaten zuschreibt.

Nach Kiepenheuer setzen manche Maurermeister gerne und mit gutem Recht den kleingeklopften Abfall von Ziegelöfen hinzu, welcher ebenfalls stark hydraulisch ist. Ziegelgrus und Ziegelsand sind häufig auch schon in alten Mörteln gefunden worden; sie enthalten durch das Brennen aufgeschlossene Silikate, welche mit dem Kalk in chemische Wechselwirkung treten. Ein Zusatz von glasigen Hochofenschlacken, von weißem Roheisen herrührend, wirkt ebenfalls sehr günstig. Es ist mir bekannt, daß in Mordernberg in Steiermark (wo sich früher 12 Hochöfen befanden) Mauern von alten Häusern, bei deren Bau dem Mörtel solcher Hochofenschlackensand zugefügt worden war, bei ihrem Abbruch gesprengt werden mußten, da sie auf die sonst übliche Weise nicht abgetragen werden konnten. Gesiebte Braunkohlenschlacke wirkt ebenfalls sehr günstig.

Von sehr kompetenter Seite wurde ich bereits 1895 darauf aufmerksam gemacht, daß man der löslichen Modifikation der Kieselsäure, dem Kieselsäurehydrosol nach Graham und Mendelejeff (siehe des letzteren Grundlagen der Chemie S. 111 und 127, sowie 182) eine sehr wichtige Rolle bei der Bewegung des Wassers in Sandfiltern zuschreibt. Speziell Moormann hat im Journal für Gasbeleuchtung 1894, S. 409, eine ausführliche Abhandlung über die Bewegung des Wassers im Boden veröffentlicht, in welcher er die Bedeutung der Hydrosole für die Durchlässigkeit der Bodenarten, für die Bewegung des Wassers in demselben usw. schildert, z. B. auch die Bildung der mächtigen Schlickablagerungen beim Zusammentreffen von Süßwasser

<sup>1)</sup> Siehe Österr. Chem.-Ztg. 1903, Nr. 24: Ed. Donath, Zur Bestimmung der Kieselsäure in Silikatgemischen.

mit dem salzigen Meerwasser auf das Gerinnen der Hydrosollösungen infolge des Salzgehaltes zurückführt.

Ich habe eine Kieselsäurehydrosollösung nach dem im Mendelejeffschen Werke angegebenen Verfahren dargestellt, welche die dort zitierten Eigenschaften hinsichtlich ihrer Gerinnbarkeit und sonstiger Reaktionen zeigte. Körniger Quarzsand und Marmorsand wurden mit dieser Hydrosollösung befeuchtet und aus dem Gemische mehrere Körper geformt. Nach ihrem Austrocknen zeigten dieselben jedoch keinen festeren Zusammenhang und Widerstand gegen das Zerdrücken, als mit Wasser allein aus den genannten Sanden hergestellte Massen. Sodann wurden je 100 g von 3 Mörtelsanden, sowie auch Kieselgur und Feuersteinsand mit je 100 ccm Wasser durch längere Zeit unter Umschütteln behandelt und die Flüssigkeit dann durch ein Papierfilter filtriert. In den Filtraten, die immer, wenn auch kaum merkbar, opalisieren, wurde die Menge der Kieselsäure bestimmt, wobei 0,5 mg bis 1,5 mg gefunden wurden. Es scheint demnach mit Rücksicht auf die Resultate der vorher angeführten Versuche mit Hydrosollösung, daß bei der Mörtelerhärtung diese Hydrosolform der Kieselsäure, welche beim Zusammenbringen von Mörtelsand in Wasser sich bilden könnte, und die Einwirkung derselben auf den Kalk des Mörtels keine irgendwie wesentliche Rolle spielen.

Zieht man die angeführten, zum Teile auf praktischen Erfahrungen beruhenden Angaben und die wissenschaftlich festgestellten Tatsachen sowie endlich die Resultate der von mir durchgeführten, eingangs beschriebenen und andere von mir später durchgeführte Versuche in Betracht, so ergeben sich hinsichtlich des Mörtelsandes mit Bezug auf seine Beschaffenheit nachstehende Folgerungen:

1. Der zur Mörtelerzeugung verwendete Sand besteht fast nie aus reinem Quarzsand, sondern ist fast immer mehr oder minder mit dem Sande von einfachen und zusammengesetzten Silikaten bzw. deren Zersetzungsprodukten gemischt.

2. Quarzsand als solcher wird von Ätzkalk bei gewöhnlicher Temperatur absolut nicht chemisch angegriffen, dagegen erfahren sowohl amorphe Kieselsäure als auch gewisse natürliche Silikate oder eventuell deren Zersetzungsprodukte und somit auch der Sand, der solche enthält, durch Ätzkalk gewisse Veränderungen.

3. Da wohl anzunehmen ist, daß die Bindung von Kalk und Sand inniger und demgemäß der erhärtete Mörtel fester wird, wenn zwischen den Bestandteilen nicht bloß physikalische, sondern auch chemische Einwirkungen erfolgen, so ist derjenige als der geeignetere

anzusehen, der nicht aus reinem Quarzsande besteht, sondern auch gewisse leichter zersetzliche Silikate, insbesondere zeolithische Silikate, beziehungsweise lösliche Kieselsäure enthält.

4. Mit Rücksicht auf diesen letzteren (auch schon von den Bautechnikern aus der Erfahrung aufgestellten) Satz kann die Qualifikation eines Mörtelsandes vom chemischen Standpunkt aus dadurch geprüft werden, daß man einerseits seine Angreifbarkeit durch Ätzkalk in der vorgeschriebenen Weise untersucht und gleichzeitig die Menge der zeolithischen oder überhaupt silikatischen Bestandteile oder deren Zersetzungsprodukte nach dem von Lunge und Milberg beschriebenen Verfahren mittels aufeinanderfolgender Behandlung mit Salzsäure und Sodalösung ermittelt.

### III. Weißkalk (Troddenkalk)<sup>1)</sup>.

Unter Kalk sei im folgenden Kapitel der Weiß- oder Fettkalk (auch mitunter Speckkalk) verstanden. In einem besonderen Kapitel soll dann auf den Dolomitkalk, Magnesiakalk, auch Grünkalk genannt, eingegangen werden.

Von dem Brennen des Kalkes bzw. der Beschaffenheit der dazu verwendeten Kalksteine, der Ofensysteme usw., wird hier nur soweit die Rede sein, als es für die chemische Technologie der Baumaterialien im allgemeinen notwendig erscheint.

Beim Brennen verliert reiner kohlenaurer Kalk nahezu 45 Gewichtsprocente und büßt 10—20 % an Volum ein. Da die anderen mineralischen Bestandteile des Kalks keine solche Gewichtsabnahme beim Brennen erfahren, so ist die größere Gewichtsabnahme beim Brennen eines Kalksteines schon ein gewisser Anhaltspunkt für seine gute Beschaffenheit. Eine noch größere Abnahme wie 45 Gewichtsprocente beim Brennen würde aber andererseits ein Anhaltspunkt dafür sein, daß der verwendete Kalkstein Magnesiumkarbonat (in den meisten Fällen) oder wasserhaltige Silikate enthält, was natürlich nur durch die chemische Analyse genauer festgestellt werden kann.

Die Beschaffenheit des gebrannten Kalkes ist verschieden, bald dicht, fest und körnig, bald locker und leichter zerreiblich, je nach der Qualität des rohen Kalksteines. Ist derselbe rein, frei von größeren Beimengungen, so zeigt das erhaltene Produkt eine weiße Farbe. Gewöhnlich ist jedoch der gebrannte Kalk von graugelber Farbe,

<sup>1)</sup> Geschichtliches über die Einführung des Kalkes in die Bautechnik siehe Gottgetreu a. a. O.

weil der Kalkstein stets etwas Ton, Eisenhydroxyd, Magnesiumkarbonat und Alkalien nebst organischen Substanzen enthält, die zum Teile beim Brande durch chemische Wechselwirkung färbende Bestandteile ergeben. Der Kalkstein wird beim Brennen durch die Abgabe von Kohlendioxyd, die bedeutend größer ist als die Volumschwundung der Masse porös. Der Kalkstein soll nicht zu schwach und nicht zu stark gebrannt sein<sup>1)</sup>.

Kennt man die chemische Beschaffenheit eines Kalksteines noch nicht, so soll vor dem Brennen unbedingt eine nähere chemische Untersuchung durchgeführt werden, da die Führung des Brandes bzw. der Brenntemperatur sowie die Dauer der Maximaltemperatur, welcher der Kalkstein ausgesetzt werden muß, mit der chemischen Zusammensetzung zusammenhängt. Haben die Kalksteinstücke beim Brennen die Gare noch nicht erreicht, also nicht die ganze Kohlensäure verloren, so hat der gebrannte Kalk „ein Herz von Stein“, wie sich Kiepenheuer ausdrückt. Er „löscht“ sich dann nicht vollständig; dies kann aber auch anderseits eintreten, wenn auch nur oberflächlich Verschlackungen oder Sinterungen eingetreten sind, oder der Kalk durch Behandlung bei übermäßig hohen Temperaturen gebrannt ist. Man sagt dann, der Kalk sei hartgebrannt. Reiner Kalk verträgt hohe Temperaturen und löscht sich gebrannt mit Wasser rasch unter starkem Erhitzen. Tonige Kalksteine dagegen müssen vorsichtig gebrannt werden, bei starker Rotglut „sintern“ sie oberflächlich, oft auch durchgreifend unter Bildung von Kalziumsilikaten und -aluminaten: das Produkt ist dann dichter, löscht sich nur noch träge mit Wasser und gibt ein schweres, körniges Hydrat und einen „kurzen“, „mageren“ Teig von grauer Färbung, der zur Mörtelbereitung weniger Sandzusatz verträgt als guter „Fettkalk“. Oberflächliche Verschlackungen können auch durch eine Brandführung mit Kohlen, die tonhaltige Asche ergeben, herbeigeführt werden; auch größere Mengen von vorhandenem Eisenhydroxyd und Alkalien wirken als Sinterungsmittel. Enthält also ein Kalkstein größere Mengen von Begleitkörpern, dann ist demnach immer eine gewisse Vorsicht in der Einhaltung hierfür geeigneter Brenntemperaturen notwendig, damit der gebrannte Kalk sich leicht und „ergiebig“ löscht. Zuviel und zuwenig „Feuer“ drückt das Löschergebnis des Kalkes in solchem Falle, also seine Ergiebigkeit herunter. Verschlackter Kalk löscht sich zudem noch träge und gibt zur Bildung von „Sprengkörnern“ Anlaß, die durch ihr

<sup>1)</sup> Sowohl in diesem Kapitel als auch später wurde mehrfach benützt das Buch von Dr. H. Zwick, Kalk und Luftmörtel, 2. Aufl., Wien und Leipzig.

langsames „Nachlöschen“, das mit einer Volumvergrößerung verbunden ist, das „Treiben des Mörtels“ verursachen.

Über gewisse Ursachen des Schwerlösens einzelner Partien von im Ringofen mit Streufeuerungen gebrannten Kalkes berichtet Ed. Donath in Tonindustrie-Zeitung 1920, S. 1260: Kalkbrennen mit schwefelhaltiger Kohle. Es ist schon lange bekannt, daß ein verhältnismäßig hoher Schwefelgehalt der zum Kalkbrennen verwendeten Steinkohle im allgemeinen manche Nachteile hat. Der Schwefel gibt bei der Verbrennung bei Luftgegenwart mit dem Kalk zusammen Kalziumsulfid und schließlich Kalziumsulfat, und gewisse Teile des gebrannten Kalkes enthalten dann entsprechende relativ größere Mengen der genannten Verbindungen, die sich namentlich an der Oberfläche der die Streufeuerungen umgebenden Kalkstücke konzentrieren und dadurch das gute Löschen dieser Kalkstücke natürlich behindern. (Ausführlicheres über diese Vorgänge siehe oben zitierte Abhandlung. Ein Zusatz zur Kohle von dem in den Zügen des betreffenden Ringofens sich reichlich absitzenden Flugstaubs, der neben Kalk noch fast 10 % verbrennliche kohlige Substanz enthielt, soll vorteilhaft gewirkt haben.)

Der Fettkalk, oder auch Weißkalk genannt, der nicht mehr als 10 % fremde Bestandteile enthält, löscht sich dagegen mit dem zweifachen Volum Wasser und gibt einen fetten Brei, der unter Wasser gar nicht, an der Luft erst nach längerer Zeit fest wird. Obwohl dieser Löschprozeß werktätig schon seit den ältesten Zeiten von den verschiedensten Kulturvölkern nach empirischen Erfahrungen geübt wird, sind wir über den genauen Verlauf der physikalischen und chemischen Vorgänge, die sich beim Ablöschen von gebranntem Kalke abspielen und die zur Entstehung des „Löschbreies“ führen, nur sehr unvollständig aufgeklärt. Wenn nun im folgenden zur Kennzeichnung der Anschauungen, die man sich über den geschilderten Prozeß in bezug auf die Wesensbeschaffenheit und die Entstehung des Kalkbreies gemacht hat, in Kürze eingegangen wird, so kann dies leider nach dem Stande der Untersuchungsergebnisse derzeit noch nicht zum Zwecke einer völligen Klärung der sehr geteilten und oft einander ausschließenden Anschauungen geschehen. Immerhin vermögen die diesbezüglich geäußerten Ansichten, wengleich sie zum Teile noch hypothetischer Natur sind, einigermaßen zur Erklärung der Entstehung von charakteristischen und zum Teile sehr erwünschten Eigenschaften des Löschbreies beizutragen. Nach W. Michaelis<sup>1)</sup> besteht der Kalk-

<sup>1)</sup> C. Schoch, Die Aufbereitung der Mörtelmaterialien S. 321.

brei aus einem Gemenge von Kalkmonohydrat und einem irreversiblen Kolloid (d. h. es wird, wenn einmal eingetrocknet, durch Wasser nicht wieder aufgequellt), dem Kalkhydrogel, und ist keineswegs das, als was derselbe öfters angesprochen wird, ein Gemenge von Kalziummonohydrat und Wasser. Aus der Gelnatur des Kalkbreies ergeben sich nun auch seine Eigenschaften, nämlich große Geschmeidigkeit und Plastizität, welche eine große Magerung mit Bausand zum Zwecke der Mörtelbereitung erlauben und dadurch eine beträchtliche Verminderung der Mörtelschwindung bedingen. Dieses Kalkhydrogel vermag nun, wie a. o. O. ausgeführt, lediglich durch Wasserentziehung eine Erhärtung herbeizuführen, der zu Beginn der Kohlensäureerhärtung immerhin eine nennenswerte Bedeutung für die Mörtelanfangserhärtung zukommt. W. Kohlschütter<sup>1)</sup> und G. Walter, die sich ebenfalls mit dem Wesen der Kalkhydratbildung beschäftigt haben, kommen ebenso wie Georg Lenart<sup>2)</sup> in ihren Ausführungen zu der gleichen Anschauung, daß bei der Ablöschung von Ätzkalk mit Wasser sich zunächst Kalkmonohydrat bildet. Beim Hinzufügen weiterer Mengen Wasser entstehen wohl Hydrate von höherem Wassergehalte, jedoch nur als Erzeugnisse mechanischen Eindringens von Wasser oder als Zustände weiterer „physikalisch-morphologischer“ Zerteilung. Um solche Wirkung der Wasseraufnahme wahrscheinlich zu machen, werden von Kohlschütter und Walter im Kalke kleinere Primärteilchen und größere Sekundärteilchen angenommen und auf Grund der mittels Dampfablöschung erhaltenen ungleichen Körnung der Satz geprägt: „Im gelöschten Kalk liegen im wesentlichsten die Sekundärteilchen vor; deren Größe und Beschaffenheit bestimmt das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Kalkarten“. Außer der Bildung von Hydraten tritt für die Moleküle der Primärteilchen auch eine Art von Quellung ein, so daß im gelöschten Kalkbreie sich auch gequollene Gelkörner vorfinden, die die Voraussetzung dafür sind, daß ein schlüpfriger Brei gebildet wird, welcher Zustand solange bestehen bleibt, als fortgesetzte Wasserzuführung den Zusammenhang der gequollenen Teilchen nicht trennt.

Das wesentlichste in den Anschauungen dieser Forscher liegt in der Vorstellung, daß die Hydratbildung ein „morphologisch-physikalischer“ Prozeß ist, wobei die Sekundärteilchen des entstandenen Kalziumhydroxydes Wasser in wechselnden Mengen in kolloidem Bestande aufgesogen enthalten.

<sup>1)</sup> Zeitschr. f. Elektrochemie Nr. 11/12, 1. Juli 1919.

<sup>2)</sup> Zeitschr. des Vereins d. Deutsch. Zuckerindustrie 1919, Januarheft.

Kosmann<sup>1)</sup> ist dagegen der Ansicht, daß nach den Ergebnissen der Untersuchungen des Kalkprüfungsausschusses des Vereins deutscher Kalkwerke, an denen derselbe mit beteiligt war, im Löschbrei ein Gemenge von Polyhydraten vorliegt, die nach molekularstöchiometrischen Gesetzen aus Wasser und Kalziummonohydrat gebildet wurden und die bis zu 8 Mol Wasser in „chemischer“ Bindung enthalten können, und zwar kommen diese Hydrate in Auswirkung und im Ausgleich der bei der chemischen Verbindung von CaO mit H<sub>2</sub>O gebildeten Wärme zustande. Der freiwerdenden Wärmemenge beim Löschprozesse, die immerhin pro Grammolekel Ätzkalk 15,500 Wärmeeinheiten oder pro Gramm Ätzkalk 277 Wärmeeinheiten beträgt, legt er eine besondere Bedeutung bei, indem nach seiner Anschauung die Wasseraufnahme bei der Polyhydratbildung durch die freiwerdende Wärmeenergie eingeleitet und unterstützt wird, so daß auf Kosten der freiwerdenden Wärmemenge Molekül für Molekül Wasser in die chemische Verbindung mit CaO gerät und in molekularer Umlagerung dem vorhergebildeten, bereits vorhandenen Hydratmolekül angegliedert und eingefügt wird. Parallel geht damit, durch die rollende Bewegung hervorgerufen, eine mechanische Zertrümmerung des CaO-Molekülbestandes vor sich, „indem der Umfang desselben in steter Vergrößerung der Wasseraufnahme wächst, seine Hülle sprengt und mittels der Oberflächenvergrößerung zur Quellung geführt wird“. Bei Anwendung einer zu geringen Wassermenge wird wohl der gebrannte Kalk vermöge der Reaktionsfähigkeit gegen Wasser zur Wärmeentbindung angeregt, jedoch geht ein großer Teil der Wärme durch übergroße Hitze und Dampfentwicklung verloren, und es hinterbleibt eine griesig-pulverige Masse, die ihr weiteres Löschvermögen mangels Wärmeenergie vollständig eingebüßt hat, so daß es nach abermaliger Zugabe von Wasser zu keiner weiteren Hydratbildung mehr kommen kann. In diesem Zustande nennt man den Kalk verbrannt. Gibt man jedoch von Anbeginn schon große Mengen Wasser in einem Gusse zum Ätzkalke hinzu, so tritt die Reaktionsfähigkeit des Ätzkalkes erst gar nicht in Wirkung, weil das Übermaß von Wasser der Wärmeentwicklung der Massen in dem Maße entgegenwirkt, daß die Erwärmung gar nicht bis zu dem kritischen Wärmepunkte, der etwa bei 50° C gelegen ist, steigt, bei welchem die Reaktion der Wasseraufnahme bei Wärmeaustritt sich einstellt. Der Kalk ist in solchem Falle „ersäuft“. Daraus kann man

---

<sup>1)</sup> Tonindustrie-Zeitung 1920, Heft 58, 59, 60, 63, 65.

folgen, inwiefern eine ungleichartige Behandlung ein und desselben Ätzkalkproduktes mit verschiedenen Wassermengen die Eigenschaften des Löschergebnisses beeinflussen kann<sup>1)</sup>.

### Der Trockenkalk oder Sackkalk.

Im folgenden sei noch auf die Herstellung von Sackkalk oder auch Trockenkalk genannt eingegangen, da derselbe als ein der jüngeren Zeit angehöriger Mörtelstoff besonders in der Gegenwart mit Rücksicht auf die in verschiedener Hinsicht weit entwickelte Putztechnik und für die Naß- und Trockenmörtelfrage ein mannigfaches Interesse besitzt. Der Fabrikationsvorgang für Trockenkalk ist durch eine Reihe von in- und ausländischen Patenten festgelegt und geschützt; ihnen allen liegt folgender gemeinsamer Arbeitsvorgang zugrunde. Zum Zwecke der Herstellung von Trockenkalk geht man von einem möglichst reinen gebrannten Kalke aus und setzt unter Einhaltung besonderer Vorsichtsmaßregeln, um einem Verbrennen des Kalkes vorzubeugen, gerade nur genug Wasser hinzu, daß eine trockene, mahlfähige Löschemasse, hauptsächlich aus Kalkhydrat bestehend, entsteht<sup>2)</sup>.

Der gewöhnliche Weißkalkmörtel, wie er durch Ablöschen mit gebranntem Kalk auf nassem oder trockenem Wege entsteht, wird für gewöhnlich als „Kalkhydrat“ angesprochen, wobei man stillschweigend von der Annahme ausgeht, daß er praktisch nur aus der Verbindung Kalziumhydroxyd besteht, was wiederum zur Voraussetzung hat, daß der gebrannte Kalk seinerzeit reines Kalziumoxyd von der Formel  $\text{CaO}$  ist.

Aber wie so manche stillschweigende Annahme trifft auch diese in der Technik niemals zu. Die Kalksteine, die zur Herstellung von gebranntem Kalk dienen, enthalten neben ihrem Hauptbestandteil, Kalziumkarbonat, stets mindestens einige Hundertstel fremder Beimischungen toniger Natur, und wenn auch der Brennvorgang des Kalksteins der Hauptsache nach darin besteht, daß aus dem kohlen-sauren Kalk des natürlichen Gesteines die Kohlensäure ausgetrieben und dieser so in Kalziumoxyd umgewandelt wird, so laufen doch stets Vorgänge nebenher, bei welchen sich unter Mitwirkung der

<sup>1)</sup> Über die Wertbestimmung und das Gedeihen des Kalkes hat seinerzeit J. Stingl in Wien eingehende Studien veröffentlicht. Es sei hier auf deren Wiedergabe in Wagners Jahresbericht über die chem. Technologie 1878, S. 721 verwiesen.

<sup>2)</sup> Dr. Hans Küh1, Tonindustrie-Ztg. 1918, 42. Jahrg., S. 17.

tonigen Bestandteile neue Verbindungen bilden, die wir als Kalziumsilikate und Kalziumaluminat anzusprechen haben. Wird nun der gebrannte Kalk mit Wasser abgelöscht, so findet zwar in der Hauptsache eine Umwandlung des Kalziumoxydes in Kalziumhydroxyd statt. Neben dem Kalziumhydroxyd enthält das Löschgut aber immer die im Feuer entstandenen Kalziumsilikate und Kalziumaluminat, und zwar teilweise im unveränderten Zustande, teilweise in Verbindung mit Wasser als Kalziumhydroxilicate und Kalziumhydroaluminat.

Der Umstand nun, daß die Bildung der Kalziumsilikate und Kalziumaluminat durch den Brennvorgang mit einer gewissen Verdichtung der gebrannten Masse einhergeht, führt dazu, daß beim Trockenlösch neben feinst verteiltem, staubförmigem Kalkhydrat Grieße verbleiben, welche vorwiegend aus Aluminaten und Silikaten des Kalkes bestehen, daneben aber auch gewisse Mengen unangegriffenen Kalziumoxydes enthalten, welches sie umschließen und so vor der sofortigen Einwirkung des Löschwassers schützen. Die Gegenwart dieser Grieße hat immer die besondere Aufmerksamkeit der Mörtelstofferzeuger auf sich gezogen, weil sie einen unerwünschten und gefährlichen Bestandteil im gelöschten Kalk darstellen. Infolge ihres Gehaltes an freiem Kalk haben sie, wie schon angeführt, die Neigung sich nachträglich abzulöschen, und da diese nachträgliche Ablöschung unter Bläherscheinungen vor sich geht, so verleihen sie dem Kalkhydrat, dem sie beigemischt sind, die unangenehme Eigenschaft des Treibens. Aus diesem Grunde sind mannigfache Verfahren erdnen und in die Praxis eingeführt worden, um diesen Grieben die Treibneigung zu nehmen oder diese zu entfernen. Im Jahre 1900<sup>1)</sup> gewann schon die Königshofer Zementfabrik Akt.-Ges. Wien in ihrer Werkanlage in Königshof ein reines Kalkhydrat aus trockengelöschtem Kalk unter Gewinnung und Vermahlung der nicht abgelöschten Grieße mittels Pfeifferscher Windsichter. Erzeugt wurde ein sog. „Baukalkhydrat“ aus einem hydraulischen Kalk, ferner ein „Weißkalkhydrat“ aus einem fast chemisch reinen Weißkalk. Ein weiteres Verfahren zur Gewinnung von reinem Kalkhydrat neben Sackkalk, welches letzterer besonders für die Verwendung im Baugewerbe gedacht ist, wurde Johannes Mühlen Wiesbaden als D.R.P. 293 825 geschützt<sup>2)</sup>. Dieses Patent arbeitet in der Weise, daß der gebrannte Kalk zunächst durch Benetzen mit Wasser trocken abgelöscht und nach dem Zerfall der Masse einem Windsichter zugeführt wird, der das

<sup>1)</sup> Tonindustrie-Ztg. 1918, 42, 141.

<sup>2)</sup> Tonindustrie-Ztg. 1918, S. 18, Nr. 5.

staubfeine reine Kalkhydrat von den unreinen Grieben trennt. Das auf diese Weise gewonnene reine Kalkhydrat stellt ein Gut dar, das bisher im Handel überhaupt nicht zu haben war und das daher als ein für die Technik neuer Mörtelstoff bezeichnet werden muß; es wird sich wegen seiner hervorragenden Eigenschaften voraussichtlich eine herrschende Stellung auf dem Baustoffmarkt erringen.

Dr. H. Kühl hatte Gelegenheit, Kalkhydrat, das nach dem Verfahren D.R.P. 293 825 hergestellt war, zu untersuchen, und er konnte sich überzeugen, daß dasselbe frei von jeglicher Treibneigung war. Kalksandsteine, die mit Hilfe dieses Kalkhydrats von ihm hergestellt wurden, erreichten die gleich hohe Festigkeit, wie er sie sonst nur mit lange gesumpftem Normalkalk erzielte, während Kalksandsteine aus einem gewöhnlich gelöschten Kalk, der nach älterem Herstellungsverfahren und unter sorgfältiger Behandlung der Griebe aus dem gleichen Rohstoff gewonnen war, in ihrer Festigkeit weit hinter den Steinen der ersten Art zurückblieben.

Es ergibt sich daraus, daß das D.R.P. 293 825 imstande ist, ein Kalkhydrat zu liefern, das den höchsten Anforderungen in bezug auf seine Güte entspricht. Solches Kalkhydrat ist aber nicht nur für die Herstellung von Kalksandsteinen geeignet, sondern es hat ein weites Verwendungsgebiet auch für alle besseren Putzmörtel. Jeder Fachmann wird ohne weiteres ermessen können, wie groß die Bedeutung dieser Tatsache ist. Wer die Verhältnisse in der Mörtelindustrie kennt, weiß, daß die Ausführung von Putzarbeiten auch heute noch nicht allzu selten zu Fehlschlägen führt, weil der benutzte Kalkmörtel, wenn er auch den Ansprüchen, die man an gewöhnlichen Mauermörtel stellt, durchaus genügt, doch für Putzarbeiten nicht hinreichend treibfrei war.

Es drängt sich die Frage auf, was mit den Grieben zu geschehen hat, die bei der Arbeitsweise nach D.R.P. 293 825 bei der Windsichtung von dem reinen Kalkhydrat geschieden werden.

Auch hier weist die Patentschrift den Weg, indem sie angibt, daß die Griebe mit frischen Mengen gebrannten Kalkes zu vermahlen und dann als Sackkalk in den Handel zu bringen sind. Dieser Sackkalk enthält also neben fein gemahlenem Kalziumoxyd die in dem Zusatzkalk und in den Grieben enthaltenen Mengen von Kalziumsilikaten und Kalziumaluminaten in staubfeinem Zustande. Beim Anmachen des Sackkalkes mit Wasser tritt infolge der Gegenwart großer Mengen freien Kalziumoxydes ein lebhaftes Löschen ein, bei dem auch die Kalkaluminat- und Kalksilikat-hydratisiert und so in der

Regel von der ihnen innewohnenden Treibneigung befreit werden. Auf diese Weise entsteht ein Gut, das zumeist für alle gewöhnliche Mauerzwecke ohne weiteres genügt.

In besonderen Fällen aber — wenn nämlich die zur Verwendung gelangenden natürlichen Kalksteine verhältnismäßig stark mit tonigen Verunreinigungen durchsetzt waren — kann es vorkommen, daß der nach dem beschriebenen Verfahren gewonnene Sackkalk durch das einfache Anmachen mit Wasser und durch den sich dabei abspielenden Löschvorgang noch nicht völlig hinreichend beruhigt wird. In solchen Fällen muß die gemahlene Mischung aus gebranntem Kalk und den durch Sichtung gewonnenen Grieben einem intensiven Löschverfahren unterworfen werden. Man übt dasselbe in der Weise aus, daß man das gemahlene Gut fabrikmäßig im großen mit Wasser behandelt, wobei entweder das einfache Siloverfahren Platz greifen oder eine Behandlung mit gespanntem Wasserdampf in Löschtrommeln durchgeführt werden kann.

Ob der gemahlene Sackkalk ohne weiteres der Bauindustrie zuzuführen ist oder ob ein Löschen in der einen oder anderen Weise vorher stattzufinden hat, hängt durchaus von der Eigenart der Rohsteine ab, und es wird in jeden einzelnen Falle die Aufgabe eines nach dem neuen Verfahren arbeitenden Kalkwerkes sein, darüber zu entscheiden, welches Verfahren unter den obwaltenden Verhältnissen für die Herstellung von Sackkalk neben dem reinen Kalkhydrat am Platze ist.

Trockenkalk kann man auch nach den D.R.P. 208 181 und 226 934<sup>1)</sup>, Verfahren von Schroeder, herstellen, bei denen der vorzerkleinerte, gebrannte Kalk unter gleichmäßiger Zuführung der erforderlichen Wassermenge und nachfolgender maschineller Mischung in ein großes Löschsilob gefördert wird, um in diesem eine vollkommene Löschung herbeizuführen. Der gelöschte Kalk wird alsdann auf einer sieblosen Kugelmühle in bekannter Weise fein gemahlen. Dieses insbesondere für den Großbetrieb bestimmte Verfahren bietet zweifellos große Vorzüge, indessen kann damit ein vollkommen reines Kalkhydrat, wie es z. B. beim Mühlenschen Verfahren resultiert, nicht erzielt werden, da auch alle Aschen- und Schlackenteile mit zur Vermahlung gelangen. Das mittels eines wirklich geeigneten Kalklöschapparates besonders mit Zuhilfenahme eines Windsichters aus gutem Weißkalk gewonnene griebfreie Kalkhydrat besitzt wegen seiner großen Ausgiebigkeit, seiner bequemen Anwendungsweise und leichten

<sup>1)</sup> Betrachtungen über das Verfahren zur Herstellung von Kalkhydrat von Ziv.-Ing. Schoot, Tonindustrie-Ztg. **43**, 77 [1919].

Versandfähigkeit große Vorzüge. Es findet für die verschiedensten Zwecke Verwendung, sowohl für Mauer- und Putzarbeiten, als auch für zahlreiche industrielle Zwecke. Aber auch in anderen Staaten, so in der Schweiz und besonders in Amerika, wird schon seit vielen Jahren Kalkhydrat erzeugt und verwendet, das sich wegen seiner Vorzüge einer großen Beliebtheit bei den Abnehmern erfreut. Auf die Herstellung von reinem Kalkhydrat in den Vereinigten Staaten und Kanada sei hier nur hingewiesen.

#### IV. Magnesia- oder Dolomitkalk

(Bitterkalk, Graukalk, Braunkalk, Schwarzkalk).

Das Rohmaterial zur Gewinnung dieses Kalkes ist der Dolomit, dessen kristallisierte Abart der Dolomitspat, eine chemische Doppelverbindung von äquimolekularen Mengen von  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$  entsprechend 54,3%  $\text{CaCO}_3$  und 5,7%  $\text{MgCO}_3$  ist. Für Zwecke der Gewinnung von technisch verwendbarem Magnesiakalk hat dieses Mineral jedoch keine größere Bedeutung, vielmehr verwendet man hiezu Dolomite, die wohl dieser Zusammensetzung nahekommen, aber immerhin geringe Mengen von Tonerde, Kieselsäure, mitunter Eisenoxyd, welches letzterem die Ursache der verschiedenen Färbung der Dolomite zugesprochen wird, enthalten und die nach einem „geeignet geführten Brande“ das Material für den „Magnesia- oder Dolomitmörtel“ liefern. Nach Vaubel<sup>1)</sup> bewegt sich die Zusammensetzung von hiezu brauchbaren Dolomitkalken innerhalb nachstehender Grenzen:  $\text{CaO}$  55 bis 64%,  $\text{MgO}$  28 bis 41,67%,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  0 bis 4%, Unlösliches 0 bis 3%; die Farbe ist sehr verschieden, taubengrau, schmutzig violett, braun, dunkel und schwarzblau.

Die Verwendung von Magnesiakalk oder magnesiahaltigen Kalken als gute Luftmörtelstoffe, bei welchen also der Erhärtungsprozeß unter Aufnahme von Kohlensäure aus der Luft sich hauptsächlich vollzieht, setzt, wie schon vorausgeschickt, einen entsprechend geführten Brennvorgang voraus, der sich, um den gewünschten Zweck zu erreichen, unter Einhaltung ganz bestimmter Temperaturverhältnisse vollziehen muß. Es ist deshalb von Interesse, um eine kritische Stellungnahme zu den mannigfachen in der einschlägigen Literatur zahlreich sich vorfindenden Widersprüchen und Angaben über das chemische Verhalten von magnesiahaltigen Kalksteinen und Dolomiten beim Brande

<sup>1)</sup> Chem.-Ztg. 1910, S. 1058.

zu ermöglichen, eine wichtige Arbeit von O. Kallauner<sup>1)</sup> über die thermische Zersetzung des Dolomites folgen zu lassen.

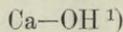
„Der Beginn der merklichen Zersetzung des Dolomites bei der Erhitzung (15 Min.) in Kohlendioxyd wurde gravimetrisch bei etwa 500° C nachgewiesen. Die Geschwindigkeit dieser Zersetzung steigt anfangs langsam an, nimmt über 650° C stark zu und erreicht zwischen 710 bis 730° C ihr erstes Maximum. Dann steigt sie wieder bis zu 870° C langsam an, wo sie wieder stark zunimmt und zwischen 900 bis 915° C ihr zweites Maximum erreicht. Durch wäßrige Digestion des bei bestimmter Temperatur während derselben Zeit (15 Min.) geglühten Dolomites wurde erst bei 875° C die merkliche Anwesenheit von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in der Lösung festgestellt und dadurch bewiesen, daß das Kalziumkarbonat erst bei dieser Temperatur sich merklich zersetzt. Der Fortgang der thermischen Zersetzung des Dolomits läßt sich daher folgendermaßen auffassen: Der Dolomit — Doppelsalz  $\text{MgCO}_3, \text{CaCO}_3$  — spaltet sich bei etwa 500° C (auch Beginn der merklichen Zersetzung des  $\text{MgCO}_3$ ) merklich in seine Komponenten:  $\text{MgCO}_3, \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{MgCO}_3 + \text{CaCO}_3$ . Dieser Prozeß erreicht seine maximale Geschwindigkeit zwischen etwa 710 und 730° C. Mit diesem Prozeß läuft die augenblickliche Zersetzung des Magnesiumkarbonats einher. Das zurückgebliebene Kalziumkarbonat zersetzt sich dann merklich erst bei 875° C; die maximale Zersetzungsgeschwindigkeit liegt zwischen 900 und 915° C. Der Erhärtungsprozeß des Magnesiakalkmörtels ist noch lange nicht so klar erforscht wie der unseres viel bekannteren Luftkalkmörtels. Nicht zum geringen Teile ist dieser Umstand durch die Zwittereigenschaft des Magnesiakalkes bedingt, der eine Art Fettkalk mit mehr oder weniger stark ausgeprägten hydraulischen Eigenschaften ist, die zunächst besonders von den Temperaturverhältnissen und ihrer Andauer beim Brennprozesse abhängen, da diese bestimmte chemische Eigenschaftsänderungen zur Folge haben. Von weiterem Einflusse für die spätere hydraulische Erhärtung sind dann Begleitminerale silikatischer Natur, die durch thermische Behandlung beim Brennprozesse aufgeschlossen werden und später hydraulisch abbindende Silikate ergeben. Vom theoretischen Standpunkte aus behandelt würde der Lufterhärtungsprozeß eines Magnesiakalkes zunächst erfordern, daß die Brenntemperatur des Dolomites nach dem Vorhergegangenen über 915° C gesteigert und solange andauern gelassen wird, bis sämtliche Kohlensäure des  $\text{CaCO}_3$  unter Hinterlassung von  $\text{CaO}$  frei gemacht

<sup>1)</sup> Chem.-Ztg. 1913.

ist. Das  $MgCO_3$ , das ja seine optimale Zersetzungstemperatur schon bei 710 bis 730° C hat, würde also schon vor dem Eintritte der  $CaCO_3$ -Spaltung als  $MgO$  vorliegen und wird chemisch nicht weiter mehr verändert. Das Gemisch von  $CaO + MgO$ , das technisch gewöhnlich noch 4 bis 7% Kohlensäure, vielleicht durch Vorhandensein geringer Mengen an unverändertem  $CaCO_3$  enthält, wäre somit das geeignete Produkt für die Magnesia-Luftmörtelherstellung. Der Lufterhärtungsprozeß würde sich dann derart abspielen, daß zunächst das  $Ca(OH)_2$  durch Vermittlung von Feuchtigkeit Kohlensäure aus der Atmosphäre aufnimmt unter Bildung von Kalziumkarbonat, ähnlich wie bei der gewöhnlichen Luftmörtelherhärtung, da der Prozeß der Kohlensäurebindung viel energischer zwischen Kalkhydrat und Kohlensäure verläuft, als zwischen  $Mg$ -Hydrat und letzterer. Daß auch schließlich das Magnesiumhydrat vollständig karbonisiert werden kann, bezeugen a. o. O. Mörtelanalysen magnesiahaltiger Mörtel, bei denen auf Grund von Kohlensäurebestimmungen das ursprünglich vorhandene Magnesiumhydrat als vollständig in  $MgCO_3$  umgewandelt vorgefunden wurde. Diese theoretischen Ausführungen über die Erhärtung von Magnesiakalken treffen allerdings nur teilweise zu. Bedingt ist dieser Umstand durch das gleichzeitige Vorwalten oft sehr nennenswerter hydraulischer Eigenschaften der durch höhere Temperaturen veränderten Magnesiakalke, die neben dem Lufterhärtungsprozesse zur Auswirkung gelangen und unter Umständen in der ersten Zeit weit mehr zur Anfangserhärtung beitragen, als dies der Erhärtung des Magnesiakalkes durch Kohlensäureaufnahme entspricht. Aber selbst in dem Falle, wenn man mit der Brenntemperatur nicht so hoch hinaufgegangen ist, daß die silikatischen Begleitmaterialien chemisch verändert wurden, können Magnesiakalke hydraulische Eigenschaften besitzen. Darüber spricht sich namentlich Klehe in einem Vortrage über hydraulische Kalke aus, den er in der Tonindustriezeitung 1906, Nr. 41, veröffentlicht hat. Magnesiahaltige Kalke sollen bei niedrigeren Brandtemperaturen, bei welchen nicht die ganze Kohlensäure ausgetrieben wird, Kalke mit hydraulischen Eigenschaften geben. Nach Klehe ist dies dadurch zu erklären, daß basische Karbonate des Kalkes sowie der Magnesia sich bilden konnten und nebeneinander vorhanden sind, welche die Träger der Erhärtung sind. Kiepenheuer tritt auch den Angaben Feichtingers in seinem Lehrbuch „Die chemische Technologie der Mörtelmaterialien“ über die geringere Aufnahmefähigkeit des gebrannten Dolomites für Wasser entgegen und bemerkt im Gegenteil, daß der in Gruben gelöschte Graukalk (Magnesiakalk) viel mehr Sand „mei-

stert“ wie der eigentliche Weißkalk. Kiepenheuer führt weiter die Analysen einiger guter alter Mörtel an, welche größere Mengen von Magnesia enthielten. Die mitunter gemachte Angabe, daß die Magnesia bei der Erhärtung des Mörtels überhaupt nicht in Karbonat übergeht, ist nach meinen eigenen Erfahrungen nicht gerechtfertigt, da in meinem Laboratorium alte Mörtel untersucht wurden, deren Gehalt an Kohlensäure nur durch ihre teilweise Bindung durch Magnesia erklärt werden konnte.

Zur Beurteilung der auftauchenden Fragen wurde das Verhalten der Magnesia für sich sowie bei gleichzeitiger Gegenwart von Kalziumoxyd in meinem Laboratorium untersucht. Zunächst wurde chemisch reines Magnesium- und Kalziumoxyd hergestellt: ersteres durch Glühen von Magnesia alba (chem. reinst. Schering), letzteres durch Glühen von gefällttem kohlenurem Kalk vor dem Gebläse bis zur Gewichtskonstanz. Eine gewogene Menge Magnesia wurde mit Wasser stark befeuchtet und die Masse bei 120° bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Aus der Gewichtszunahme war zu ersehen, daß die Magnesia in  $Mg(OH)_2$  übergegangen war. Die Masse blieb pulvrig. Nun wurden Magnesia und Kalk in äquivalenten Mengen miteinander aufs innigste gemischt und diese Mischung abermals vor dem Gebläse anhaltend geglüht. Die geglühte Masse wurde darauf mit Wasser stark befeuchtet, wobei sie sich, wie vorauszusehen war, stark erwärmte. Nach 3 bis 4 Stunden war die Masse vollständig kompakt und hart geworden. Sie hatte also tatsächlich hydraulische Eigenschaften. Da sie sich also wesentlich anders verhielt als Magnesia und Kalk für sich allein, so muß in diesem Fall eine Umlagerung erfolgt sein, nach der ich annehme, daß sowohl Kalk wie Magnesia im Molekül der neuen Substanz enthalten sind. Nach meiner Anschauung erfolgt dies auf folgende



Weise:  $CaO + MgO + H_2O = \begin{matrix} Ca-OH^1) \\ >O \\ Mg-OH \end{matrix}$ ; es handelt sich demnach um

ein Kalziummagnesiumhydroxyd. Über das Verhalten dieser Verbindung gegen Kohlensäure konnten Versuche infolge mehrfacher Gründe nicht abgeschlossen werden.

Dolomitischer Kalk wird in den verschiedensten Teilen Deutschlands, besonders in Sachsen und Thüringen, alljährlich in vielen

<sup>1)</sup> Beim Glühen äquivalenter Mengen von  $CaO$  und  $MgO$  entsteht zunächst  
 $\begin{matrix} Ca-O \\ | \quad | \\ Mg-O \end{matrix}$ , welche Verbindung durch Einwirkung des Wassers in obige Verbindung übergeht.

Tausenden von Ladungen verwendet. Namentlich in den sächsischen Großstädten, in denen bekanntlich umfangreiche industrielle Anlagen vorhanden sind, wird dieser Kalk schon seit vielen Jahrzehnten mit dem besten Erfolge verarbeitet. Auch das alte Leipziger Rathaus, das im 16. Jahrhundert errichtet wurde, ist mit dolomitischem Kalk hergestellt und mit derselben Kalksorte erneuert worden. Jeder Unbefangene wird zugestehen müssen, daß sich dieser ehrwürdige Bau in einem tadellosen Zustande befindet.

So sind im Laufe der Jahrzehnte und Jahrhunderte eine große Menge von Bauten mit dolomitischem Kalk ausgeführt worden, ohne daß man jemals hätte feststellen können, daß nur ein einziger davon durch die Wirkung der Magnesia zerstört worden sei.

### Wasser zum Kalklösen.

Nach Gottgetreu sind Fluß-, Teich-, Regenwasser, also im allgemeinen möglichst weiche Wässer zum Löschen des Kalkes und zur Mörtelbereitung zu verwenden, weniger gut trinkbare Brunnenwässer, dann Solwasser oder Seewasser, sowie alles Wasser mit bedeutenden Gehalten an Chlormetallen, Säuren, kohlensauren Salzen und Ammonverbindungen.

Nach Knapp ist zum Löschen des Kalkes oder zum Anmachen des Mörtels besonders kochsalzhaltiges Wasser zu vermeiden; läßt man ein Gemisch von Kochsalz und gelöschtem Kalk an der Luft liegen, so zeigen sich nach einiger Zeit Auswitterungen von kohlensaurem Natron. Daneben bildet sich aber auch Chlorkalzium, das als zerfließliches Salz die Wände und Mauern feucht hält. Auf die Bildung des sogenannten Mauerfraßes, der auf die Entstehung von Kalziumnitrat zurückzuführen ist, braucht hier nicht eingegangen zu werden, da dieselbe nur unter ganz bestimmten Umständen, bei gleichzeitiger Gegenwart von stickstoffhaltigen Substanzen, erfolgt. Es können jedoch bei Ziegelmauern und auch bei Kalksandsteinmauern Auswitterungen entstehen, welche aus Natriumsulfat und -karbonat, aus Kalziumkarbonat oder aus Chlornatrium und Chlorkalium bestehen. Nach Knapp sind die Hauptquellen der Alkalien die Kalksteine selbst; dieselben sind nicht aus dem Brennstoff beim Brennen aufgenommen worden, da der gleiche Kalk, in geschlossenen Gefäßen gebrannt, auch Alkali enthält. Es kann ja übrigens auch vorkommen, daß aus dem Boden lösliche Alkalisalze bei Gegenwart von Feuchtigkeit in die Mauern aufsteigen und durch Verdunstung und Kristallisation zu Auswitterungen Veranlassung geben.

## V. Mörtelzusammensetzung.

Bevor die Anschauungen über die Vorgänge bei der Härtung des Mörtels näher erörtert werden, sei zunächst eine Übersicht über die Zusammensetzung von Mörteln verschiedenen Alters und verschiedenen Ursprungs gegeben. In der folgenden Tabelle sind eine Anzahl von Mörtelanalysen zusammengestellt, die ich auf Veranlassung von Dr. O. Ziurek in Berlin als Assistent an dessen Laboratorium 1869 ausgeführt habe und die in der Zeitschrift f. ang. Chem., 1895, Heft 1, veröffentlicht sind.

Die Untersuchung der Mörtel wurde zu diesem Zwecke in folgender Weise durchgeführt. Gegen 20 g des grob zerstoßenen Mörtels wurden in 400 bis 500 ccm verdünnte Salzsäure (1:6) eingetragen und gelinde erwärmt, bis kein Entweichen von Gasblasen mehr zu bemerken war. Der ungelöste Rückstand wurde aufs Filter gebracht und ausgewaschen, dann vom Filter abgespült und nun durch entsprechendes Abschlämmen Ton und Sand voneinander getrennt. Ersterer wurde auf einem gewogenen Filter, letzterer in einem Schälchen bei 110° getrocknet und gewogen. Das als Ton Gewogene bestand allerdings nicht aus reinem Ton, sondern zum kleinen Teile aus Fragmenten verschiedener Mineralien, aus denen der Ton entstanden sein dürfte. Von der erhaltenen salzsauren Lösung wurde ein bestimmtes Volum zur Bestimmung von gelöster Kieselsäure, Eisenoxyd und Tonerde, Kalk und Magnesia benutzt; die Kohlensäure wurde in der üblichen Weise durch Entbinden mit verdünnter Salzsäure und Absorption durch Natronkalk usw. bestimmt. Auf der nächsten Seite sind die Resultate der so durchgeführten Analysen tabellarisch zusammengestellt (Tabelle 2).

Die Tabelle 3 enthält eine Zusammenstellung von Mörtelanalysen, wie sie in dem bekannten Handbuch der technischen Chemie Musspratts, bearbeitet von F. Stohmann und Bruno Kerl, 2. Bd., S. 395 enthalten sind<sup>1)</sup>.

a) Von der Mauer der Rotenturmtorbastei in Wien nach A. Bauer, früher Professor an der technischen Hochschule in Wien; b) Dresdener Festungsturm; c) Dresdener Haus; d) Ruine Weißenfels bei Preßburg, nach Bauer (Polyt. Journ. 150, 62; 152, 366), mit Kohlensäureüberschuß; e) Bastei in Wien nach Professor Schrötter,

<sup>1)</sup> Die Zahl der veröffentlichten Mörtelanalysen ist bedeutend und es ist hier nur ein kleiner Teil aufgenommen worden.

Tabelle 2.

Abstammung und Alter	Tabelle 2.										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Von einer Stadtmauer 600 Jahre alt	Von einer Kirche 620 Jahre	Von einer Kirche 880 Jahre	Von einer Kirche 640 Jahre	Von einer Kirche 610 Jahre	Von einer Burg-ruine gegen 600 Jahre	Von einem Kirchturm 440 Jahre	Kirche unbekannt	Kirche unbekannt	Kirche unbekannt	Kloster unbekannt
Wasser . . . . .	3,53	4,68	0,96	2,53	0,94	2,23	0,90	1,61	0,52	0,88	0,75
Sand . . . . .	59,14	56,97	59,95	67,90	64,80	26,03	64,97	53,72	61,08	76,62	79,94
Ton . . . . .	3,49	2,51	5,17	5,98	5,13	6,00	3,89	12,03	5,67	1,98	3,10
Lösliche Kieselsäure . . . . .	1,24	1,65	1,29	1,93	1,44	5,07	2,41	3,76	1,97	1,33	3,45
Kohlensäure . . . . .	12,80	13,59	12,60	8,78	12,30	26,18	11,40	11,28	11,48	8,05	5,51
Kalk . . . . .	15,58	16,15	15,97	10,41	13,40	21,23	13,77	8,41	15,08	10,20	5,71
Magnesia . . . . .	0,26	0,68	0,27	Spuren	0,13	6,78	0,24	2,70	0,36	0,10	0,19
Eisenoxyd und Tonerde . . . . .	2,68	2,61	2,64	1,99	2,10	6,73	1,95	5,78	2,87	0,94	1,74
Alkalien, Spuren von Schwefelsäure, Phosphorsäure u. dgl. . . . .	1,28	1,16	1,33	0,48	—	—	0,47	0,71	1,02	0,40	—
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,30	100,25	100,00	100,00	100,00	100,00	100,39
Kohlensäure aus Kalk und Magnesia gerechnet . . . . .	12,34	13,43	12,69	8,19	10,67	24,14	11,08	9,63	12,19	8,13	4,69



f) Bürgerkavalier daselbst, von demselben; g) desgl. h) Aus Hannover nach Vogel; i) Karlsturm in München nach Vogel; k) Universität in München, nach demselben (Polyt. Journ. 147, 190); l) abgebrochenes Kärntnertor in Wien nach Latzko (Chem. Zentralblatt 1859, S. 818); m) derselbe Mörtel nach Abzug des Sandes; n) phönizischer Mörtel von Zypern, nach Wallace, außerordentlich hart und fest, mit 0,52 löslicher Kieselsäure (Polyt. Journ. 177, 372); o) und p) altgriechischer Mörtel nach Wallace, erstere Sorte von der Pnyx in Athen, stets der Luft ausgesetzt gewesen, sehr hart und graulich, letztere Sorte aus dem Inneren eines alten Tempels in einer Höhle im Pentilikon bei Athen, der Luft nicht ausgesetzt gewesen; q) von altrömischen Bauten in Burgh nach Spiller (Deutsche Industrie-Ztg. 1868, S. 397).

Analyse des Kalkmörtels von den 300 Jahre alten Grundmauern des Pfarrhauses in Bergstedt in Holstein<sup>1)</sup>.

In Salzsäure Unlösliches . . . . .	45,05 %
In Salzsäure Lösliches . . . . .	
Kieselsäure . . . . .	0,85 „
Tonerde . . . . .	0,78 „
Eisenoxyd . . . . .	0,26 „
Kalkhydrat . . . . .	1,30 „
Kohlensaurer Kalk . . . . .	38,95 „
Schwefelsaurer Kalk (Gips) . . . . .	12,08 „
Kohlensaure Magnesia . . . . .	geringe Mengen
Zusammen . . . . .	99,87 %

Die im betreffenden Aufsatz ausgesprochene Meinung, daß es sich hier um einen Kalk-Gipsmörtel handelt, fand also ihre Bestätigung.

Analyse des Mörtels von dem Unterbau eines Hauses aus Morcote am Luganer See<sup>2)</sup>.

Das Ergebnis war:

Feuchtigkeit . . . . .	1,6 %
Unlösliches . . . . .	76,51 „
Lösliches . . . . .	
SiO <sub>2</sub> . . . . .	0,98 „
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	0,75 „
	<hr/>
	79,84 %

<sup>1)</sup> Tonindustrie-Zeitung 1912, Nr. 148, S. 1956.

<sup>2)</sup> Tonindustrie-Zeitung 1911, S. 614, Nr. 48.

	Übertrag:	79,84 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .		1,11 „
CaCO <sub>3</sub> . . . . .		9,09 „
MgCO <sub>3</sub> . . . . .		5,00 „
Ca(OH) <sub>2</sub> . . . . .		4,08 „
MgSO <sub>4</sub> . . . . .		0,30 „
K <sub>2</sub> O . . . . .	unbestimmt	
		<u>99,72 %</u>

Berechnet man aus den Zahlen die Zusammensetzung des Kalkes, so besteht er aus:

SiO <sub>2</sub> . . . . .	4,38 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	3,30 „
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	4,89 „
CaCO <sub>3</sub> . . . . .	64,61 „
MgCO <sub>3</sub> . . . . .	22,82 „

Es liegt hier also dolomitischer Kalk vor, welcher an den Ufern des Sees vielfach auftritt. Auffallend ist es, daß trotz des hohen Alters des Mörtels in ihm noch ein erheblicher Gehalt an Ätzkalk vorhanden ist. Erklärt kann dies durch den Umstand werden, daß die Mauer nur von einer Seite von der Luft umspült war, während die andere Seite sich unmittelbar an den Felsen anlehnte.

(Chemisches Laboratorium für Tonindustrie Prof. Dr. H. Seger und E. Cramer G.m.b.H.)

Prof. Karl Thiel (Festschrift der Techn. Hochschule in Darmstadt, 1886, 49) hat den Mörtel der Klosterkirche in Lorsch, erbaut im 9. Jahrhundert (also etwa 1000 Jahre alt), untersucht.

Die Analyse des lufttrockenen Mörtels ergab nachstehende prozentische Zusammensetzung als Mittel von je zwei Bestimmungen:

Wasser bei 100 bis 110° C entweichend . . . . .	0,38 %
In Salzsäure unlöslicher Anteil:	
Sand und Ton . . . . .	69,41 „
In Salzsäure löslicher Anteil:	
Kalk . . . . .	14,98 „
Magnesia . . . . .	0,17 „
Tonerde und Eisenoxyd . . . . .	0,78 „
Kohlensäure . . . . .	11,64 „
Kieselsäure . . . . .	0,16 „
	<u>97,52 %</u>

	Übertrag: 97,52 %
Alkalien, Wasser des Tons, organische Substanz und Verlust . . . . .	2,48 „
	100,00 %

Der in Salzsäure unlösliche Anteil bestand hauptsächlich aus einem grobkörnigen Quarzsand, dem vereinzelte Glimmerblättchen sowie eine geringe Menge tonartiger, leicht abschlämmbarer Substanz beigemischt war; auch enthielt er ein wenig organische Substanz, wie man aus seiner vorübergehenden Schwärzung beim Glühen im Platintiegel schließen muß. Die gefundene Kohlensäure reicht zur vollständigen Sättigung des Kalkes und der Magnesia nicht aus, etwa 0,2% Kalk und die Magnesia oder eine weitere ihr äquivalente Kalkmenge sind demnach in anderer Weise gebunden; beachtenswert ist ferner der geringe Gehalt des Mörtels an in Salzsäure löslicher Kieselsäure.

Das Verhältnis zwischen Kalk oder Kalkhydrat und Sand in diesem tausendjährigen Mauermörtel läßt sich mit Sicherheit nicht berechnen, da es unbekannt ist, ob und wieviel kohlen-sauren Kalk der verwendete Sand enthielt. Nimmt man an, daß in dem frischen Mörtel sämtlicher Kalk als Hydrat vorhanden war, so kommen auf einen Teil wasserfreien Kalk 4,63 Teile trockener Sand, während bei den heutigen Luftmörteln die Menge des letzteren durchschnittlich größer ist; Ziurück fand z. B. in einem Gemisch von 1 Volum Kalkbrei mit 2 Volum feuchten Sand auf 1 Teil wasserfreien Kalk 5,66 Teile trocknen Sand, ein Verhältnis, welches auch bei dem vorliegenden alten Mörtel wenigstens annähernd eingehalten sein dürfte, indem wohl ohne Zweifel der verwendete Sand kohlen-sauren Kalk enthielt.

Das Chemische Laboratorium für Tonindustrie (Prof. Dr. H. Seger und E. Cramer, Berlin) untersuchte einen Mörtel des Diokletianpalastes mit folgendem Ergebnisse:

Wasser . . . . .	1,90 %
In HCl Unlösliches . . . . .	4,99 „
In HCl Lösliches:	
SiO <sub>2</sub> . . . . .	4,20 „
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	3,86 „
CaCO <sub>3</sub> . . . . .	68,20 „
MgCO <sub>3</sub> . . . . .	5,14 „
CaSO <sub>4</sub> . . . . .	0,77 „
Kalkhydrat . . . . .	10,96 „
	100,02 %

Nach obenstehendem Befund handelt es sich also um einen Mörtel, der aus einem etwas dolomitischen, silikathaltigen Kalk und Ziegelbrocken hergestellt ist.

### Mörtel im Altertum.

Rathgen<sup>1)</sup> wies in einem Vortrage (gehalten im „Deutschen Verein für Ton-, Zement- und Kalkindustrie“ am 21. März 1911) über „Mörtel im Altertum“ auf einen 4500 Jahre alten ägyptischen Mörtel hin, der bei den Ausgrabungen am Grabmale des Königs Sahure gefunden wurde. Der Mörtel hat sich als gipshaltiger Kalkmörtel erwiesen. Weiter wurde ein Mörtel von Pergamon besprochen, bei dem Muscheln als Magerungsmittel gedient haben.

Tabelle 4<sup>2)</sup>.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Wasserleitung Grabdenkmal des Sahure	Pyramide des Chefred Äg. Inv. Nr. 1334 und 1342 Außenseite			Pyramide des Chefred außen innen Analysen von Lucas		Sphinx-Analyse von Lucas		Pergamon ohne mit größeren Kieseln	
Unlösliches . . .	9,95	5,06	3,29	9,99	7,48	1,62	9,97	15,31	57,98
Lösliches SiO <sub>2</sub> .	0,30	0,78	0,17	0,64	0,36	0,40	2,67	0,26	1,97
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> } Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> }	0,70	1,23	0,12	3,29	2,16	0,75	1,48	0,60	9,59
								inkl. 0,2 H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	
CaO . . . . .	38,19	34,38	52,93	36,49	35,31	32,45	35,60	45,83	15,55
MgO . . . . .	—	Spur	Spur	Spur	Spur	Spur	0,53	—	—
SO <sub>3</sub> . . . . .	21,18	34,71	0,61	20,52	25,26	41,53	21,79	0,24	0,19
CaO . . . . .	18,20	7,18	39,98	16,72	11,73	Spur	16,34	35,65	11,57
H <sub>2</sub> O . . . . .	10,89	16,15	2,93	12,31	17,40	23,25	11,59	2,53	3,41
					aus der Differenz				
Summe:	99,89	99,79	100,03	99,96	100,00	100,00	100,00	100,42	100,26

Nach allem kann man wohl sagen, daß die alten Ägypter im allgemeinen Gips als Mörtel verwendeten, dessen Gehalt an kohlen-saurem Kalk, wenn dieser aus Ätzkalk stammte, meistens vielleicht ein zufälliger war, daß aber die Verwendung des kalkhaltigen

<sup>1)</sup> Tonindustrie-Zeitung 35 (1911) I, 389.

<sup>2)</sup> Tonindustrie-Zeitung 46 (1911). I, 587.

Gipses sie veranlaßt haben mag, oft absichtlich vor dem Brennen dem Gips Kalk zuzusetzen, und daß sie unter Umständen selbst Kalkstein allein brannten. Als Magermittel haben sie zerkleinerten ungebrannten Gips und Kalksteinstücke benutzt, meistens wohl derart, daß sie einfach den Grus ihrer Arbeitsstätte verwendeten, woraus sich auch der geringe und schwankende Betrag an Unlöslichem erklärt.

Nun kommt eine Anzahl von im Laboratorium des Verfassers für Chem. Technologie I an der Deutschen Techn. Hochschule in Brünn durchgeführten Analysen von Mörteln, welche Prof. Dr. Hrach als derzeitiger Konservator zur Erhaltung der Baudenkmäler im ehemaligen Österreich gesammelt und mir zur Verfügung gestellt hat. (Hierfür und für manche andere Förderung dieser Arbeit stattete ich hiermit meinen wärmsten Dank ab. Donath.)

Der Gang der Analyse der untersuchten Mörtel war folgender:

Zunächst wurde von den verschiedensten Stücken der erhaltenen Mörtel<sup>1)</sup> eine größere Durchschnittsprobe unter Ausscheidung der nur sporadisch eingebetteten, mitunter größeren Gesteinstücke genommen. Diese Durchschnittsprobe wurde dann bis zu sehr grobem Sand zerkleinert; eine größere gewogene Quantität, mindestens 20 g, wurde nun in ungefähr 660 ccm verdünnter Salzsäure (1:5) eingetragen und so lange erwärmt, bis jede Gasentwicklung aufgehört hatte. Die Lösung wurde abfiltriert und in der Gesamtmenge die gelöste Kieselsäure in bekannter Weise bestimmt.

Das Filtrat wurde auf ein bestimmtes Volum gebracht und in aliquoten Mengen desselben Eisenoxyd, Tonerde, Kalk und Magnesia bestimmt. Ferner wurden in verschiedenen feinst geriebenen Teilen der Durchschnittsprobe Kohlensäure, Feuchtigkeit sowie Gesamtglühverlust ermittelt. Das beim Erwärmen in verdünnter Salzsäure ungelöst Gebliebene wurde abfiltriert und ausgewaschen. Dasselbe wurde dann vom Filter herabgespritzt und nach wiederholtem periodischem Aufschlämmen in einem schmalen, sehr hohen Becherglase absitzen

---

<sup>1)</sup> Der Sand beziehungsweise die zerkleinerten Gesteinsfragmente des Mörtels wurden mit der Lupe und durch geeignete chemische Reaktionen auf seinen mineralogischen bzw. geognostischen Charakter geprüft. — Für sachkundige Unterstützung bei diesen Mörteluntersuchungen bin ich insbesondere meinem seinerzeitigen Assistenten Herrn Ing. Max Haissig, später Laboratoriumsvorstand-Stellvertreter der Eisenwerke, Kokereien usw. in Witkowitz, zu Dank verpflichtet.

gelassen; durch Dekantieren wurden der Ton und Gesteinschluff vom Sand getrennt und auf demselben Filter gesammelt. Nach dem Trocknen bei  $110^{\circ}$  wurde der feine Schluff mit dem Ton als Sand gewogen. Der abgeschiedene Sand wurde mit der Lupe, soweit es ging, auf seine mineralogische bzw. geognostische Beschaffenheit geprüft und in mehreren Fällen außerdem in einer feingepulverten Probe desselben durch Aufschließen mit kohlensaurem Natrium-Kalium usw. die Menge der Kieselsäure quantitativ bestimmt, um daraus einen Schluß auf die Beschaffenheit des Sandes ziehen zu können bzw. zu ersehen, ob der Sand überwiegend aus Quarz bestand, oder in welchem Verhältnis er ungefähr mit silikatischen Mineralien oder Gesteinen vermischt war.

Allerdings ist diese Bestimmung nicht ganz genau, indem ein Teil des Tones und Gesteinsschluffes auch von dem vollendeten Mörtelkalk herrühren kann; doch lassen die erhaltenen Resultate sehr annähernd auf die Mengen des eigentlichen zur Bereitung des betreffenden Mörtels verwendeten Sandes schließen. Andererseits stammt die Menge des in verdünnter Salzsäure Gelösten fast vollständig von dem zur Mörtelbereitung verwendeten Kalkbrei her. In dem gebrannten Kalk sind auch die im Kalkstein enthaltenen Silikate im aufgeschlossenen Zustande und werden durch die verdünnte Salzsäure beim Erwärmen zersetzt bzw. in Lösung gebracht. Aus den Mengen von Sand, Schluff und Ton einerseits sowie andererseits aus den Summen des in Salzsäure Gelösten ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ), läßt sich ein Schluß auf das Mischungsverhältnis des verwendeten Mörtels ziehen. Allerdings ist die Menge des eigentlichen Kalkbreies bedeutend größer, da noch das Hydratationswasser beim Löschen des gebrannten Kalks sowie das Wasser im breiig-speckigen Zustand dazukommt. War der verwendete Sand Karbonatsand, wie dies häufig bei alten römischen Bauten der Fall war, dann läßt sich auf das Mischungsverhältnis des Mörtels aus einer so durchgeführten Analyse kein Schluß ziehen.

Mörtel von der Schellenburg bei Jägerndorf in Schlesien, angeblich aus dem 14. bis 15. Jahrhundert stammend. Beschaffenheit desselben hart und fest, keine größeren Gesteinsfragmente enthaltend. Der Sand, wahrscheinlich einer mächtigen Sandablagerung am Fuße der Burg entstammend, enthielt:

Quarz, Feldspat, Glimmer, Tonschiefer, Granit und Porphyrfragmente.

## Zusammensetzung:

Sand . . . . .	60,50 %
Ton und Schluff . . . . .	2,98 „
Kieselsäure . . . . .	0,79 „
Eisenoxyd . . . . .	1,20 „
Tonerde . . . . .	1,14 „
Kalk . . . . .	13,62 „
Magnesia . . . . .	1,84 „
Kohlensäure . . . . .	12,24 „
	<hr/>
	94,31 %
Hygroskopisches Wasser . . . . .	1,62 „
Verbrennliches und sonstiger Verlust beim Glühen . . . . .	1,71 „
	<hr/>
	97,64 %
Alkalien und Schwefelsäure, Phosphor- säure u. sonstiges nicht Bestimmtes	2,36 „
	<hr/>
	100,00 %

Verhältnis der Bestandteile des Sandes zu den des Kalkes wie 63,48 : 18,59.

Der Sand enthielt 91,4 % Kieselsäure. Der Rest 8,53 % entfällt also auf die Basen der vorhandenen Silikatgesteine.

Dem Kalke entsprechen . . . 10,71 %  $\text{CO}_2$

Der Magnesia entsprechen . . . 1,84 „  $\text{CO}_2$

Zusammen 12,55 %  $\text{CO}_2$

gegenüber der gefundenen Menge von 12,24 %.

Mörtel von der alten Dreifaltigkeitskirche  
in Teschen (Schlesien):

Beschaffenheit: Hart und wenig zerreiblich, von größeren Gesteinsfragmenten, auch Ziegelbrocken, stark durchsetzt. Der Sand bestand vorzugsweise aus sehr feinen Quarzkörnern, sowie Feldspat und Glimmer in sehr geringen Mengen.

## Zusammensetzung:

Sand . . . . .	43,55 %
Ton und Schluff . . . . .	3,60 „
Kieselsäure . . . . .	0,47 „
Eisenoxyd . . . . .	1,25 „
Tonerde . . . . .	0,20 „
	<hr/>
	49,07 %

	Übertrag:	49,07 %
Kalk . . . . .		27,80 ..
Magnesia . . . . .		0,61 ..
Kohlensäure . . . . .		20,40 ..
Hygroskopisches Wasser . . . . .		0,70 ..
Verbrennliches und sonst Flüchtiges		0,80 ..
		<hr/> 99,38 %
Nicht bestimmte Substanzen . . . . .		0,62 ..
		<hr/> 100 %

Die Sandbestandteile verhalten sich zu denen im Kalke wie 47,15 : 30,33, weisen demnach auf ein relativ kalkreiches Mörtelgemisch.

Dem Kalke würden entsprechen	22,21 % CO <sub>2</sub>
Der Magnesia „ „	0,66 „ CO <sub>2</sub>
	<hr/> 22,87 % CO <sub>2</sub>

gegenüber der gefundenen Menge von 20,40 % CO<sub>2</sub>. Demnach waren die alkalischen Erden nicht vollständig in Karbonate umgewandelt.

#### Mörtel von der alten Stadtmauer in Salona (aus dem zweiten Jahrhundert).

Beschaffenheit: Nicht sehr dicht, sondern etwas porös, breccienartig, aber ziemlich fest. Die geringe Menge des eigentlichen Sandes enthielt Seesandkörner, Ziegelgrus und einzelne Magnesitstückchen. Als Vertreter des Sandes figurieren hier vorwiegend Brocken und Bruchstücke eines sehr dichten Kalksteines, also eines Karbonatsandes. Von Interesse ist die Mitverwendung von Ziegelgrus.

#### Zusammensetzung:

Sand . . . . .	1,59 %
Ton . . . . .	0,88 ..
Kieselsäure . . . . .	0,34 ..
Eisenoxyd . . . . .	0,36 ..
Tonerde . . . . .	0,96 ..
Kalk . . . . .	51,12 ..
Magnesia . . . . .	0,94 ..
	<hr/> 56,19 %
Kohlensäure . . . . .	40,22 ..
Feuchtigkeit . . . . .	0,73 ..
Verbrennliches und sonst Flüchtiges	1,02 ..
	<hr/> 98,16 %

	Übertrag: 98,16 %
Sonst nicht Bestimmtes . . . . .	1,84 „
	100 %
Dem Kalke entsprechen . . . . .	40,16 % CO <sub>2</sub>
Der Magnesia „ . . . . .	1,02 „ „
	41,18 % CO <sub>2</sub>

gegenüber der gefundenen Menge von 40,22 % CO<sub>2</sub>. Demnach ist ein Teil der Erden nicht völlig karbonisiert, d. h. in normale Karbonate umgewandelt. Der Zusatz von Ziegelgrus hatte zweifellos eine raschere Erhärtung zum Zweck, da die Ziegelmasse, durch das Brennen aufgeschlossene Silikate enthaltend, bekanntlich mit Ätzkalk in chemische Wechselwirkung tritt.

Mörtel aus dem wahrscheinlich römischen Kernturm  
(Pulverturm) in Meran.

Beschaffenheit: Scheinbar kompakt, doch ziemlich leicht zerreiblich, kleine Gesteinsfragmente enthaltend. Der Sand bestand aus Quarz und Glimmer mit geringen Mengen Feldspat.

Zusammensetzung:

Sand . . . . .	62,90 %
Gesteinsschluff und Ton . . . . .	6,12 „
Kieselsäure . . . . .	0,50 „
Eisenoxyd . . . . .	2,61 „
Tonerde . . . . .	1,78 „
Kalk . . . . .	10,97 „
Magnesia . . . . .	1,09 „
Kohlensäure . . . . .	10,82 „
Feuchtigkeit . . . . .	0,73 „
Verbrennliches usw. . . . .	1,20 „
	98,72 %
Nicht bestimmte Substanzen . . . . .	1,28 „
	100 %
Dem Kalk entsprechen . . . . .	8,59 % CO <sub>2</sub>
Der Magnesia „ . . . . .	1,19 „ „
	9,78 % CO <sub>2</sub>

gegenüber der gefundenen Menge von 10,82 %. Es ist demnach ein Überschuß an CO<sub>2</sub> vorhanden; über die Form, in welcher dieser Überschuß im Mörtel enthalten sein dürfte, siehe später. Die Menge

der Sandbestandteile verhält sich zu denen im gebrannten Kalk wie 69,02:16,95, entspricht daher einer sandreichen Mörtelmischung.

Mörtel von dem St. Veitsdom (alter Turm) in Prag, niedere zweite Galerie, etwa aus dem Jahre 1390 stammend.

Beschaffenheit: Nicht sehr dicht, aber ziemlich fest, wenige größere Gesteinsbruchstücke enthaltend. Der Sand bestand aus Quarz- und Feldspatkörnern sowie Glimmerschuppen.

Zusammensetzung:

Sand . . . . .	69,84	%
Schluff und Ton . . . . .	1,92	„
Kieselsäure . . . . .	0,23	„
Eisenoxyd . . . . .	1,04	„
Tonerde . . . . .	0,52	„
Kalk . . . . .	10,93	„
Magnesia . . . . .	1,74	„
	<hr/>	
	86,22	%
Kohlensäure . . . . .	10,29	„
Feuchtigkeit . . . . .	1,35	„
Verbrennliches usw. . . . .	0,29	„
	<hr/>	
	98,15	%
Nicht bestimmte Substanzen . . . . .	1,85	„
	<hr/>	
	100	%
Dem Kalk entsprechen . . . . .	8,58	% CO <sub>2</sub>
Der Magnesia „ . . . . .	1,91	„ „
	<hr/>	
	10,49	% CO <sub>2</sub>

gegenüber der gefundenen Menge von 10,29 % CO<sub>2</sub>. Die Menge der Sandbestandteile verhält sich zu der Menge der Kalkbestandteile wie 71,76:14,46 entsprechend einer sehr sandreichen Mörtelmischung.

Mörtel vom alten christlichen Friedhof in Salona  
aus dem 6. Jahrhundert.

Zusammensetzung:

Sand und Ton (Sand nur spurenweise)	1,86	%
Kieselsäure . . . . .	0,36	„
Eisenoxyd . . . . .	0,69	„
Tonerde . . . . .	2,77	„
Kalk . . . . .	50,50	„
	<hr/>	
	56,18	%

	Übertrag:	56,18 %
Magnesia . . . . .		0,35 "
Kohlensäure . . . . .		38,82 "
Feuchtigkeit . . . . .		0,55 "
Verbrennliches und sonst Flüchtiges		2,23 "
		<hr/> 98,13 %
Nicht bestimmte Substanzen . . . . .		1,87 "
		<hr/> 100 %
Der Kalk entspricht . . . . .		39,68 % CO <sub>2</sub>
Die Magnesia entspricht . . . . .		0,39 " "
		<hr/> 40,07 % CO <sub>2</sub>

gegenüber der gefundenen Menge von 38,82 % CO<sub>2</sub>.

Ein Teil des Kalks war demnach noch nicht karbonisiert und als Silikat im Mörtel enthalten. Der benutzte Sand war Karbonat-sand. Da derselbe sich größtenteils ebenfalls in verdünnter Salzsäure gelöst hat, so kann das Verhältnis des eigentlichen Kalkbreies zum verwendeten Kalksteinsand nicht ermittelt werden.

#### Mörtel von der Stadtmauer in Zlabings (Mähren).

Kies und Sand . . . . .	65,98 %
Schluff und Ton . . . . .	7,88 "
Kieselsäure, gelöst . . . . .	0,39 "
Eisenoxyd und Tonerde . . . . .	3,18 "
Kalk . . . . .	9,82 "
Magnesia . . . . .	2,29 "
Kohlendioxyd (CO <sub>2</sub> ) . . . . .	6,15 "
Hygroskopisches Wasser . . . . .	1,38 "
Verbrennliches und Flüchtiges . . . . .	0,72 "
	<hr/> 97,79 %
Dem Kalk (9,82 %) entsprechen an	
Kohlendioxyd . . . . .	7,71 % CO <sub>2</sub>
Der Magnesia (2,29 %) . . . . .	2,50 " "

Es ist demnach ein beträchtlicher Teil der Erdkarbonate noch nicht karbonisiert. Sand, Schluff und Ton betragen 73,86 gegenüber 15,58 durch verdünnte Salzsäure Gelöstem; es lag demnach ein sehr sandreiches Mörtelgemisch vor.

## Mörtel aus Trient (Mura Briamascu).

Sand . . . . .	48,74 ‰
Schluff und Ton . . . . .	1,81 „
In Salzsäure gelöste Kieselsäure . . . . .	0,89 „
Tonerde . . . . .	2,97 „
Eisenoxyd . . . . .	1,49 „
Kalk . . . . .	17,47 „
Magnesia . . . . .	1,48 „
Kohlendioxyd . . . . .	15,45 „
Feuchtigkeit . . . . .	1,46 „
Verbrennliches aus dem Glühverlust	1,58 „
	<hr/>
	93,34 ‰

Der Sand des Mörtels enthielt bloß 81,09 ‰  $\text{SiO}_2$ ; wahrscheinlich sind aus demselben doch größere Mengen von nicht bestimmten Alkalien gelöst worden, weshalb die Summe der bestimmten Bestandteile 93,34 ‰ relativ klein ist.

Dem gefundenen  $\text{CaO}$  (17,47 ‰) entsprechen

13,37 ‰ $\text{CO}_2$ , der Magnesia (1,48 ‰)
1,61 „ „
<hr/>
14,98 ‰ $\text{CO}_2$

gegenüber der gefundenen Menge von  $\text{CO}_2$  15,45.

Die Sandbestandteile verhalten sich zu den Kalkbestandteilen wie 50,55 : 24,30, die Mörtelmischung war relativ kalkreicher.

## Mörtel von dem Turme des Stephansdomes in Wien.

Mehr kreidiger Beschaffenheit, keine größeren Gesteinsfragmente enthaltend. Der Sand enthielt:

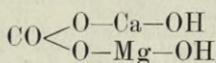
## Zusammensetzung:

Sand . . . . .	44,40 ‰
Ton und Schluff . . . . .	2,51 „
Kalk $\text{CaO}$ . . . . .	21,15 „
Magnesia . . . . .	5,18 „
Tonerde $\text{Al}_2\text{O}_3$ . . . . .	1,42 „
Eisenoxyd $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . . . . .	1,01 „
Gelöste Kieselsäure als $\text{SiO}_2$ . . . . .	0,57 „
Kohlendioxyd . . . . .	14,52 „
	<hr/>
	90,76 ‰

Feuchtigkeit . . . . .	2,27 %
Gebundenes Wasser und Verbrenn- liches . . . . .	6,61 „
	8,88 %

demnach  $90,76 + 8,88 = 99,64$  %. Der Gesamtglühverlust durch Glühen der fein gepulverten Mörtelprobe vor dem Gebläse bis zur Gewichtskonstanz war nämlich 23,40 %; davon abgezogen 14,52  $\text{CO}_2$  und 2,27 Feuchtigkeit ergibt 6,61 % gebundenes Wasser und Verbrennliches, von welchem letzterem jedoch nur Spuren vorhanden waren.

Die Menge an gebundenem Wasser (Konstitutionswasser) erscheint in diesem Falle ziemlich hoch. Berechnet man die für den vorhandenen Kalk zur Bindung notwendige Menge von Kohlendioxyd, so erhält man für 21,15 %  $\text{CaO}$  16,62 %  $\text{CO}_2$ , während nur 14,52 %  $\text{CO}_2$  gefunden wurden. Es erscheint demnach schon das vorhandene  $\text{Ca(OH)}_2$  trotz des relativ hohen Alters des Bauprojektes nicht vollständig in normales Karbonat umgewandelt. Es müßten demnach die 5,18 % Magnesia als solche in dem Mörtel neben basischem Kalkhydrokarbonat enthalten sein. Man gelangt dadurch zu der Anschauung, daß vielleicht in diesem Falle sich ein basisches Kalziummagnesiumkarbonat gebildet hat, dem man die Zusammensetzung



zuschreiben könnte. Nachdem durch frühere Untersuchungen schon, zuletzt aber durch die von mir und Dr. Lang ausgeführte Arbeit „Zur Existenz basischer Kalziumkarbonate, Österr. Chemiker-Ztg. 1917, Nr. 18“ solche basischen Kalziumkarbonate nachgewiesen sind, gewinnt die Existenz derartiger basischer Doppelkarbonate von Kalzium und Magnesium durchaus an Wahrscheinlichkeit<sup>1)</sup>.

Der Gehalt des Sandes an  $\text{SiO}_2$  betrug 89,75 %. Das Verhältnis des Sandes zu den gelösten Bestandteilen des Kalkes war 46,91 : 29,33; es liegt demnach ein sehr kalkreicher Mörtel vor. Um über die relativ große Menge an Konstitutionswasser (6,61 %) einige Aufhellung zu erhalten, wurde der Mörtel, nachdem beim Trocknen bei 120° bis zur Gewichtskonstanz 2,27 % sich verflüchtigten, bei 170° anhaltend erhitzt; der Gewichtsverlust stieg nun auf 3,60 %; es bleiben somit 5,28 % Konstitutionswasser. Dieses Verhalten entspricht dem von mir und Dr. Lang (siehe oben) beobachteten Verhalten gewisser Niederschläge, welche basisches Kalziumhydrokarbonat enthalten.

<sup>1)</sup> Siehe darüber später beim Kapitel „Erhärtung“.

## Mörtel von der alten Stadtmauer in Teschen.

Sand und Ton . . . . .	51,78 %
In Salzsäure Gelöstes, vom Kalkbrei stammend . . . . .	35,50 „

## Mörtel von Curzola in Dalmatien.

Sand und Ton 39,23 % gegenüber dem in Salzsäure Gelösten 36,28 %. (Der Kieselsäuregehalt des Sandes war bloß 78,02 %.)

## Mörtel aus Hard in Vorarlberg.

Sand, Schluff und Ton 37,84 %, die Summe des in Salzsäure Gelösten 39,90 %, aus dem Kalke stammend; deshalb ein besonders auffallend kalkreiches Mörtelgemisch.

## VI. Die Erhärtung des Mörtels.

Der wesentlichste Vorgang beim Erhärten des Luftmörtels besteht in der Aufnahme von Kohlensäure aus der Luft durch das Kalkhydrat. Dabei bildet sich nach Verlauf einer bestimmten, von örtlichen Verhältnissen und Umständen abhängigen Zeit in der Hauptsache kristallinisches Kalziumkarbonat, dessen Adhäsion am Bausande und am Bausteinmaterialen und schließlich auch der entstandenen Kristalle aneinander Ursachen der eintretenden Festigung sind<sup>1)</sup>. In seinen Anfangsercheinungen macht sich dieser Prozeß schon nach kürzerer Zeit, oft schon nach einigen Stunden bemerkbar, so daß guter Luftmörtel bereits nach einigen Tagen seiner Anwendung einen gewissen festeren Zusammenhang im Bausteinverbände zeigt, der mit der Zeit immer größer wird, so daß, wie man schließlich beobachten konnte, beim Sprengen gewisser Jahrhunderte alter Bauwerke eher die Steine loslassen, als der sie verbindende Mörtel, wenn letzterer die entsprechende Beschaffenheit hatte.

Was den engeren Verlauf des Erhärtungsprozesses anbelangt, so erfolgt dieser in 2 Stufen: Man spricht zunächst vom „Anziehen“ und „Abbinden“ des Mörtels, dem das „Erhärten“ folgt, welches letzterer Prozeß Jahre, ja, wie a. a. O. mitgeteilt, unter Umständen sich Jahrhunderte lang vollziehen kann und mitunter auch nach dieser Zeit

<sup>1)</sup> Über Erhärtung des Mörtels siehe von den älteren Zusammenfassungen besonders Bruno Kerl, Muspratts Techn. Chemie, IV. Aufl., II. Bd., S. 392, sowie Knapp (noch früher) 1866, Lehrbuch der Chem. Technologie, III. Aufl.

noch nicht beendet zu sein braucht. Die erste Phase der Erhärtung, das „Anziehen“ oder „Abbinden“ des Mörtels, stellt sich, wie bereits gesagt, schon beim Vorwalten geeigneter Witterungsverhältnisse in einem neu aufgeführten Bauobjekte bereits nach Verlauf weniger Stunden oder Tagen ein. Eine wesentliche Vorbedingung für das baldige Anziehen oder Abbinden des Mörtels ist eine Abnahme seines Feuchtigkeitsgehaltes, was zum Teile durch Verdunstung und Abgabe von Feuchtigkeit an die porösen Mauerziegel herbeigeführt wird, wobei, begünstigt durch den Druck der Mauersteine, das Kalkhydratgel in eine innigere Berührung mit dem Mörtelsande und den Ziegelsteinen kommt. Gleichzeitig tritt in geringem Maße Schwindung und Schrumpfung des Kalkhydratgels ein, ähnlich wie bei der Festwerdung von Ton, doch hat diese Erscheinung keine besondere ausschlaggebende Bedeutung für die Festigkeitszunahme der Bausteinmörtelverbindung. Schließlich kommt die Schwindung des Kalkhydratgels, die für sich allein sehr beträchtlich werden kann, im Mörtel nicht wesentlich zur Geltung, da man durch entsprechende Magerung des gelöschten Weißkalkes mit hierzu geeignetem Bausande zum Zwecke der Herstellung eines guten, schwindungsarmen Mörtels der zu weitgehenden Schwindung der Mörtelmasse einigermaßen vorbeugt. Das Anziehen des Mörtels ist also eine ledigliche Folge des Austrocknens, also des langsamen Wasserverlustes, d. h. eines Vorganges, den alle fein zerteilten brei- oder schlammartigen Massen (Ton, Torfmasse, die meisten Niederschläge) erleiden, wenn sie allmählich ihr Wasser verlieren. Dies kann am sinnfälligsten dadurch bewiesen werden, daß frisch bereiteter Mörtel in einer Glasröhre eingeschmolzen, auch nach längerer Zeit hinsichtlich seiner Festigkeits- und Zusammenhangeigenschaften fast unverändert bleibt, wenn man hier von der geringen Einwirkung des Kalkhydrates auf Feldspatgesteine und ähnlich zusammengesetzte Silikate absieht<sup>1)</sup>. Bringt man ihn jedoch in einen Raum, den man bis zu einem gewissen Grade luftverdünnt hält, oder setzt ihn längere Zeit einem trockenen, kohlenstofffreien Luftstrom aus, sorgt man also dafür, daß er seinen Wassergehalt vermindern kann, so „zieht“ er an. Durch diese Versuche kann somit der Beweis erbracht werden, daß das „Anziehen“ des Luftmörtels nur eine unmittelbare Folge der Abnahme des Feuchtigkeitsgrades, also des teilweisen Austrocknens, ist. Der eigentliche Erhärtungsprozeß beginnt mit der ersten Aufnahme und Bindung von Kohlendioxyd

<sup>1)</sup> A. a. O.

aus der Luft durch das Kalkhydrat. Auch im Verlaufe dieses Prozesses hat in der ersten Zeit die Abnahme der Feuchtigkeit des Mörtels auf die Größe der in gleichen Zeitabschnitten aufgenommenen Kohlensäuremengen einen besonderen Einfluß. Von Interesse und Bedeutung in dieser Hinsicht sind die Versuche von Wolters<sup>1)</sup>, der feststellen konnte, daß die Aufnahme von Kohlensäure aus der atmosphärischen Luft, wobei also Wasser des Mörtels verdunsten konnte, weit bedeutender war als in reiner Kohlensäureatmosphäre, daß ferner frischer Mörtel fast gar keine Kohlensäure absorbierte und daß dasselbe auch stattfand, wenn man bloßen Kalkbrei ohne Sand angewendet hatte. Es findet somit Aufnahme von Kohlensäure durch den Mörtel hauptsächlich im Zustande des Trocknens statt, und zwar am lebhaftesten, wenn der Wassergehalt des Mörtels auf 5—2% gesunken ist. Ein Mörtel, der „angezogen“ hatte und noch etwa drei Fünftel des anfänglichen Wassergehaltes besaß, absorbierte in gleichen Zeiträumen etwa 4 mal soviel Kohlensäure, jedoch nur dann, wenn er weiter austrocknen konnte. Wurde ihm letzteres nicht gestattet, so verhielt er sich weiter wie frischer Mörtel. Scharf ausgetrockneter, frischer Mörtel, der mit Wasser bis zur Sättigung getränkt wurde (90 Teile Wasser auf 10 Teile Kalk), zeigt in der Luft dasselbe Verhalten wie frischer Mörtel, nimmt aber in reiner Kohlensäureatmosphäre die Kohlensäure kräftiger auf; scharf getrockneter Mörtel, in atmosphärische Luft oder feuchte Kohlensäure gebracht, nimmt die Kohlensäure sehr rasch auf, damit auch gleichzeitig Wasser. Wasserfreier, absolut trockener Mörtel in eine trockene Kohlendioxidatmosphäre gebracht nimmt dagegen kein CO<sub>2</sub> auf; er kann also unter diesen Umständen nicht erhärten. Kalkbrei zeigt unter gleichen Umständen dasselbe Verhalten.

Überträgt man nun zusammenfassend diese zum Teile rein experimentellen Beobachtungen auf den Gesamterhärtungsprozeß, wie er sich in der Natur abspielt, so können wir den Verlauf desselben etwa folgendermaßen darstellen:

Zu Anfang findet nur Trocknung des Mörtels statt und dies entweder durch Verdunstung des Wassers oder Abnahme des Feuchtigkeitsgrades dadurch, daß ein Teil des Wassers dem Mörtel durch die porösen Ziegel entzogen wird. Das Trocknen des Mörtels an der Luft geschieht zunächst an den Außenflächen des Mauerwerkes und von da allmählich nach innen hinein, und zwar umso langsamer, je

<sup>1)</sup> Zwick, Kalk und Mörtel, S. 185.

dicker die Mauer ist. Durch die Abnahme des Feuchtigkeitsgrades und durch den Alterungsprozeß bilden sich nun aus dem Kalkhydratgel durch Dispersionsvergrößerung Kalkhydratteilchen, die immer mehr und mehr durch kapillarchemische Kräfte, die hier auftreten, aneinander rücken und in den Bereich gegenseitiger Anziehung gelangen. Dieses Stadium bezeichnet man als das „Anziehen“ des Mörtels. Gleichzeitig beginnt nun die lebhaftere Aufnahme von Kohlensäure aus der Luft, die bisher nur unbedeutend und oberflächlich war. Der Mörtel tritt hiermit in das eigentliche Erhärtungsstadium. Dabei wird als Folge der Bindung von Kohlensäure ein äquivalenter Teil Wasser aus dem Kalkhydrat abgeschieden, welches unter Umständen das Feuchtwerden der Wände Neubewohnter Räume veranlassen kann. Die Bildung von kohlenurem Kalk, welcher anfangs den Mörtel erst oberflächlich überzieht und wegen seiner Unlöslichkeit in Wasser verhütet, daß ihn atmosphärische Feuchtigkeit und Regen aufweichen, trägt neben dem Trockenwerden anfangs zum Festwerden des Mörtels bei. Man befördert dasselbe durch anhaltendes Streichen mit der Mauerkelle, durch Luftzug, abwechselndes Heizen und Lüften, auch wohl Aufstellen von Kohlenbecken, alles, um mehr Kohlensäure herbeizuführen und das vorhandene und freigemachte Wasser zu entfernen. Stets ist aber immer eine gewisse Zeit zum ersten Erhärten erforderlich. Wollte man dasselbe durch ein Austrocknen bei erhöhter Temperatur sehr beschleunigen, so wird der Mörtel wohl trocken, bleibt aber zerreiblich und locker und erhärtet bedeutend weniger. Lebhafterer Luftzutritt bei einem gewissen Grad von Feuchtigkeit bedingt somit sein erstes Hartwerden.

Der beste Mörtel, unter Wasser getaucht oder damit überschwemmt, zerfällt, zerschlämmt auseinander, bindet nicht und zeigt keine Erhärtung; ebensowenig, wenn man ihn nach dem Auftragen rasch, etwa durch Zuführung von künstlicher Wärme austrocknet. Die Mitwirkung eines mäßigen Wassergehaltes (Feuchtigkeit), und zwar auf eine gewisse Dauer, ist daher eine weitere Bedingung für seine günstige Erhärtung.

Mit dem Schwinden der Feuchtigkeit und dem Poröswerden der Masse dringt die Kohlensäure durch die Poren in das Innere und wandelt allmählich immer tiefere Schichten in Karbonat um. Daß aber diese Bedingungen nicht die einzigen für das Erhärten des Mörtels sind, zeigt der Umstand, daß sehr dicke, alte und feste Mauern im Innern oft kristallinischen halbkohlenurem Kalk und selbst noch Kalkhydrat enthalten, worauf später noch ausführlicher eingegangen werden soll.

Die Erstarrung („das Anziehen“) des Mörtels tritt alsbald nach dem Auftragen desselben ein. Wenn auch nur wenige Tage hinreichen, während welcher die Mauer ein bestimmtes Maß an Widerstand gegen Druck u. dgl. annimmt, so erreicht doch die steinartige Erhärtung, nach welcher die Masse einer Mauer sich wie aus einem Steinstück zu verhalten beginnt, erst nach Jahren, oft vielleicht erst nach Jahrhunderten ihren Höhepunkt; sie gibt sich unter allen Umständen als ein Vorgang zu erkennen, der sich sehr allmählich und in langer Dauer fortschreitend vollzieht, so daß eigentlich keine bestimmte Grenze ihres Abschlusses nachweisbar ist. Die scheinbar so überwiegende Güte der Mörtel der alten Bauten gegen die der neueren beruht fast lediglich in dem beträchtlichen Vorsprunge an Erhärtungszeit letzterer zugunsten der ersteren, und dies umso wahrscheinlicher, da sich bei vielen Mörteln verschiedener Herkunft kein wesentlicher Unterschied in dem Mischungsverhältnisse oder in den Bestandteilen, aus welchen diese Mörtel bereitet wurden, nachweisen läßt. Es unterliegt keinem Zweifel, daß die soliden Bauten unseres Zeitalters in einer späteren Zukunft gerade so fest und dauerhaft sein werden, als es die des Mittelalters und der Griechen und Römer in der Jetztzeit sind.

Während der Umwandlung des Mörtels in eine feste, steinige Masse verliert er allmählich, wie a. a. O. angeführt, sein überschüssiges Wasser und zugleich treten verschiedene chemische Veränderungen ein. Die auffallendste und am weitesten gehende ist, wie jetzt erörtert wurde, die Aufnahme von Kohlensäure aus der Luft und ihre Bindung durch das Kalkhydrat, wobei der Mörtel nach einiger Zeit die Eigenschaft annimmt, lebhaft mit stärkeren Säuren versetzt aufzubrausen. Bei dieser steinigen Erhärtung wirkt die Kohlensäure lediglich in der Art, daß sie die noch getrennten aber aneinander adhärierenden und in unmittelbarer Berührung befindlichen Teilchen des Kalkhydrates zu einer einzigen zusammenhängenden Masse von kohlensaurem Kalk bzw. basisch kohlensaurem Kalk verbindet. Dazu tritt die starke Adhäsion des kohlensauren Kalkes an andere Gesteine, also auch an die Sandteile und Mauersteine, als ein weiteres bedingendes Moment hinzu. Die Aufnahme der Kohlensäure an sich gibt dem Mörtel keinen Zusammenhang, aber wenn der Mörtel vorher einen gewissen Zusammenhang (durch Abtrocknen) gewonnen hat, so verbindet sie die Kalkteilchen zu einer einzigen festen, harten Masse von kohlensaurem Kalk, welche an dem Sand und den Steinen innigst anhaftend auch diese noch verkittet. Das Anziehen des Mörtels ist die unerläßliche Vorbedingung der Erhärtung zu Stein; Zu-

fuhr von Kohlensäure vor dem Anziehen (z. B. durch Anmachen des Mörtels mit Lösung von kohlenurem Ammoniak) ist ein Hindernis der Erhärtung für immer; sie erhält den Mörtel für alle Folge im Zustande des Breies. Die Teilchen des Kalkhydrates liegen dann zu weit auseinander, um durch den Übergang in kohlenurem Kalk zu einer zusammenhängenden Masse zu verschmelzen<sup>1)</sup>. Der oft sehr bedeutende Druck der auflagernden Mauerschichten bringt die Teilchen beim Anziehen näher und wirkt fördernd auf die Erhärtung. Die Versteinerung des Mörtels ist somit die Folge zunächst physikalischmechanischer Vorgänge bei der Erhärtung, welche die Kalkteilchen in unmittelbare Berührung bringt; dann eines chemischen Prozesses (der Kohlensäuerung), welcher die nahe gebrachten Teilchen zu einem Ganzen verkittet.

Es gehört nicht weniger zu dem Wesen der Erhärtung, daß sie nur langsam und allmählich sich vollzieht. Selbst unter den in hohem Grade günstigen Bedingungen des Versuches (also bei kleinen freihängenden Proben) sind in Kohlensäure noch drei Tage, in der Luft nicht unter fünf Tage zur Sättigung erforderlich, im Großen bei mehreren Fuß dicken Mauern aber Wochen, Monate, Jahre. Ja in zahlreichen Fällen findet sich der Mörtel nach Jahrhunderten im Innern der Mauern sogar noch stark kaustisch. Für dicke Mauern und Grundmauern unter dem Erdboden wird man daher aus Sicherheitsgründen der Verwendung hydraulischer Bindemittel gegenüber dem Luftmörtel den Vorzug geben.

Während heute unumstritten die Bildung von Kalziumkarbonat durch Einwirkung von Kohlendioxyd der atmosphärischen Luft auf das Kalkhydrat des frischen Mörtels als der wesentlichste Prozeß der Luftmörtelerhärtung angesehen wird, hatte man früher (vor etwa siebzig Jahren) der Anschauung zugeneigt, daß mit Rücksicht auf die stets in Mörteln, die bereits in baulicher Verwendung standen, gefundenen Mengen von in kohlenurem Alkalien löslicher Kieselsäure, die man sich durch Einwirkung von Kalkhydrat auf quarzige Kieselsäure entstanden dachte, und die man im Mörtel unter Bildung von Kalksilikaten an Kalk gebunden annahm, diesem Prozesse neben der „Karbonatbildung“ eine besondere, für die Erhöhung der Festigkeit und Härte des Mörtels hervorzuhebende Bedeutung beizumessen sei<sup>2)</sup>. Insbesondere sei in dieser Hinsicht auf die Ansichten Petzholdts

<sup>1)</sup> Dinglers polyt. Journ. 1870.

<sup>2)</sup> Journ. f. prakt. Chem. [1] 16, 96.

hingewiesen, der die Mörtelerhärtung sogar lediglich als eine Silikatbildung erklären wollte. Die Ansicht, daß der Kalk des Mörtels mit einem Teile seines quarzigen Zuschlages in eine chemische Verbindung eingeht und dieser Silikatbildung ein bedeutender Anteil der spätern Gesamtfestigkeit, namentlich diejenige sehr alter Mauerwerke zuzuschreiben ist, wurde durch die in der damaligen Zeit erweiterten Kenntnisse über die immer allgemeiner angewendeten hydraulischen Kalke im hohen Grade wahrscheinlich gemacht. Man fand in einigen alten Mörteln von alten Mauerwerken einen größeren Gehalt an aufgeschlossener Kieselsäure als in jüngeren und benützte dies als Bestätigung jener Ansicht<sup>1)</sup>, obgleich wie Vogel selbst a. f. O. weiter ausführte, „die gänzliche Abwesenheit von Silikaten in nichtsdestoweniger sehr festen Mörteln, sowohl jüngerer als älterer Mauerwerke, immerhin als ein schlagender Einwurf entgegengehalten werden konnte.“ Dieser Widerspruch veranlaßte auch Vogel unter anderem einige Versuche in dieser Richtung anzustellen, bei denen er insbesondere Wert auf das Verhältnis des gefundenen Ätzkalkes zur Menge der Kohlensäure und der Menge aufgeschlossener Kieselsäure legte, und er fand, daß die Quantitäten aufgeschlossener Kieselsäure in den ihm vorgelegenen Mörtelanalysen so unbedeutend waren, „daß man sie wohl schwerlich“, wie er anführt, „als Stütze einer Silikatbildungstheorie wählen möchte“. Nichtsdestoweniger fand man anderseits in verschiedenen Mörteln wenn auch kleine, so doch nicht zu vernachlässigende Mengen von aufgeschlossener Kieselsäure, von der man in solchen Fällen annahm, wie schon vorangeschickt, daß sie an Kalk gebunden im Mörtel sich vorfand, welcher Umstand wiederum für eine Silikatbildung sprach. Um diese Verhältnisse im Luftmörtel zu klären, hatte sich vielleicht als erster A. Bauer in Wien bemüht<sup>2)</sup>. Anlaß zu diesen Untersuchungen gab auch mittelbar die Tatsache, daß man bei den Mörtelanalysen nach Abzug jener Kalkmenge, die man an die gefundene Menge löslicher Kieselsäure gebunden annahm, in solchen Fällen immer einen Überschuß an Kohlendioxyd fand, der selbst nicht einmal von der gefundenen Menge Magnesia gesättigt werden konnte. Bauer<sup>3)</sup> stellte sich nun die Frage, ob denn die lösliche Kieselsäure im Mörtel wirklich mit dem Kalk verbunden angenommen werden kann, oder ob sie nicht als solche im Verlaufe des Karbonisierungsprozesses durch die Einwirkung der Kohlensäure

<sup>1)</sup> Vogel, Dinglers polyt. Journ. 1858, **149**, 191.

<sup>2)</sup> Dinglers polyt. Journ. 1858, **150**, 69, 152; 1859, 366.

<sup>3)</sup> Polyt. Journ. **63**, 369.

abgeschieden wird, so daß sie allerdings anfangs, wenn überhaupt vorhanden, mit dem Kalke verbunden war, später aber durch die fortgesetzte Einwirkung der Kohlensäure der Luft wieder ausgeschieden wurde und in einen vollständig mit Kohlensäure gesättigten Mörtel in freiem Zustande sich vorfindet. Der direkte von Bauer durchgeführte Versuch, wonach kieselsaurer Kalk durch Kohlensäure zerlegt wurde, unter Abscheidung von Kieselsäure, bestätigte seine Annahme. Nachträglich fand er in Pettenkofers Bemerkungen zu Hopfgartners Analyse eines englischen und eines deutschen hydraulischen Zementes, daß auch Fuchs dies schon früher einmal bewiesen hatte. Nimmt man nun in einem Mörtel, der vollkommen mit Kohlensäure gesättigt ist, sämtlichen Kalk und Magnesia mit Einschluß der wenigen Mengen vorhandener Alkalien an Kohlensäure gebunden und die gefundene lösliche Kieselsäure in freiem Zustande an, so klärt sich der von Vogel gefundene „Überschuß“ an Kohlensäure auf, der sich dann, wie man rechnerisch ermitteln kann, nur noch in Grenzen von Analysenfehlern bewegt, wie jeder, der mit der Analyse von Mörteln und mit der Schwierigkeit ihrer Durchführung unter Berücksichtigung der Homogenitätsverhältnisse und der Natur des Materials vertraut ist, zugeben wird. Durch diese von Bauer durchgeführte rechnerische Auswertung der Resultate von Mörtelanalysen unter Hinzuziehung der von ihm abermals gefundenen experimentellen Tatsachen über die Einwirkung von Kohlensäure auf Kalksilikate klärte sich der von Vogel gefundene Überschuß an Kohlensäure in vollständig karbonisierten Mörteln auf, ohne daß es nötig wäre, den Kohlensäureüberschuß noch durch „Kontaktwirkung“ im Mörtel zurückgehalten anzusehen. Ist also in den Mörtel, etwa durch verwitterte Mineralien feldspatartiger Natur des Bausandes oder durch Aufschluß toniger Mineralien beim Kalkbrande, lösliche Kieselsäure gekommen, dann bilden sich wohl zunächst bei der Mörtelbereitung Kalksilikate, später werden diese jedoch durch die Einwirkung von Kohlensäure der Luft auf die Kalksilikate unter Bildung von Kalziumkarbonat wieder zerlegt, wobei die Kieselsäure als solche abgeschieden wird. Es erübrigt noch, auf die Frage der Einwirkung von Kalkhydrat auf quarzige Kieselsäure des Bausandes einzugehen, da diesem Umstande ebenfalls eine Bedeutung für die Bildung und Vermehrung der löslichen Kieselsäure in Mörteln beigelegt wurde. Obgleich Bauer durch seine angeführten Untersuchungen Bedeutendes zur Klärung der Frage über die Rolle der Kalksilikate bei der Erhärtung des Luftmörtels nach einer Richtung beigetragen hatte, neigte er selber

doch noch der Anschauung zu, daß die Möglichkeit der Bildung von Kalksilikaten durch Einwirkung von Kalkhydrat auf Quarzsand besteht, daß diesem Vorgange jedoch der Kohlensäureprozeß durch Herabminderung der Kalkhydratmengen infolge Karbonatbildung entgegenwirkt. Daß jedoch diese von ihm vertretene Anschauung nicht außer jedem Zweifel liegt, bestätigen seine Ausführungen (Dinglers polyt. Journ. **150**, 65), wo er zur Aufklärung dieser Frage die Untersuchung der Einwirkung von reinem Kalk auf reinen Quarz für notwendig erachtete. Donath hat nun diesen direkten Versuch mit einem aliquoten Teile eines fetten Kalkbreies, dessen Gehalt an löslicher Kieselsäure bestimmt war, und zerkleinertem reinem Quarz (Bergkristall) ausgeführt und selbst nach 14tägiger Versuchsdauer und Wiederholung der Versuche keine Zunahme an löslicher Kieselsäure durch Einwirkung des Kalkhydrates auf die eingebetteten Quarzpulver von Bergkristall feststellen können<sup>1)</sup>. Er hat auf Grund dieses Versuches die Anschauung ausgesprochen, „daß absolut reiner Quarzsand durch Ätzkalk auch nach sehr langer Zeit keine chemische Veränderung unter Bildung von Kalksilikat und demnach keine Überführung in lösliche Kieselsäure erfährt.“ Interessant in dieser Hinsicht ist eine kleine Arbeit „Untersuchungen alter Mörtel“ aus dem Chem. Laborat. für Tonindustrie Berlin, 1894<sup>2)</sup>, das damals unter der bewährten Leitung von Seger und Cramer stand, und die sich genötigt sahen, in einer treffenden Weise den Ausführungen von Oscar Mothes in der „Töpfer- und Zieglerzeitung 1884“ zu erwidern, der an einer Reihe von Untersuchungen mit Mörteln von verschiedenem Alter nachzuweisen versuchte, daß das Kalkhydrat bzw. der kohlen saure Kalk im Mörtel mit dem Sand nach längerer Zeit eine Verbindung eingeht, die eine Silikatbildung zur Folge hat.

Der Grund dieser von Mothes gebildeten Anschauung lag in dem steigenden Gehalte an löslicher Kieselsäure mit dem Alter der von ihm untersuchten Mörtel. Abgesehen davon, daß die Zusammenstellung der Analysen dieser Mörtel ganz willkürlich war, da ja Mörtel von 1 bis 2000 Jahren in Vergleich gesetzt wurden, die selbstverständlich aus verschiedenen Ausgangsmaterialien hergestellt waren, so daß das Wachsen des Gehaltes an löslicher Kieselsäure als rein zufällig angesehen werden muß, „war es unrichtig, aus dieser Tabelle wissenschaftliche Folgerungen zu ziehen, weil absolut kein Anhaltspunkt dafür vorhanden“ war, „daß nicht der ursprüngliche Mörtel

<sup>1)</sup> Zeitschrift f. ang. Chem. 1895, Heft 1.

<sup>2)</sup> Tonindustrie-Zeitung 1894, **18**, 296.

bereits lösliche Kieselsäure enthalten hat, sei es durch Verwendung von schwach hydraulischem Kalk oder durch Zusatz von Puzzolanerde, die schon von den Baumeistern der Römer geschätzt wurde.“ Für ihre Beweisführung ziehen Seger und Cramer die Ergebnisse der Untersuchungen zweier Mörtel heran, die aus derselben Fuge von dem inneren und äußeren Mauerwerke der ehemaligen kurfürstlichen Waschküche, der nachherigen Küsterwohnung des Domes zu Berlin stammten, welche nachweislich schon 1688 erbaut ist, somit schon über 200 Jahre alt waren. „Den nachfolgenden Analysen glauben“ sie „um deßwillen einen größeren Wert beilegen zu dürfen, weil der Ursprung des zum Mörtel verwandten Kalkes bekannt ist, denn in früheren Jahren wurde in Berlin ausschließlich Rüdersdorfer Kalk vermauert. Die Untersuchung des über 200 Jahre alten Mörtels ergab:

	von der inneren Mauer	von der äußeren Mauer
In Salzsäure Unlösliches	82,7 %	84,4 %
Kalkhydrat	2,2 „	1,9 „
Kohlensaurer Kalk	12,0 „	10,1 „
Kieselsäure, löslich	0,3 „	0,5 „
Tonerde und Eisenoxyd	0,6 „	0,5 „
Magnesia	0,4 „	0,3 „
Wasser	2,1 „	1,9 „

Die lösliche Kieselsäure beträgt also hier bei gleichalten Mörteln 0,3 und 0,5 %. Das Vorhandensein derselben läßt sich aber sehr gut daraus erklären, daß der Rüdersdorfer Kalk diese Mengen enthielt, da es nicht selten ist, daß in Kalk aus Rüdersdorf 2 bis 4 % Kieselsäure vorkommen. Es liegt deshalb kein Grund vor, eine Silikatbildung beim Luftmörtel anzunehmen.“ War also durch die Arbeiten von Bauer der Einfluß der Kohlensäure auf primär gebildetes Kalksilikat bzw. dessen Nichtexistenz in vollständig karbonisierten Mörteln und durch die Arbeiten von Donath die Unrichtigkeit der bisher angenommenen Anschauung der Einwirkung von Kalkhydrat auf quarzige Kieselsäure des Bausandes unter Bildung von Kalksilikat bewiesen, so ermöglicht uns die angeführte Arbeit des Chem. Laborat. f. Tonindustrie, für diese rein experimentell gefundenen Tatsachen ein Beispiel an in baulicher Verwendung gestandenen und hierzu sehr geeigneten Mörtelproben zu erbringen, das uns gestattet, die Frage hinsichtlich der Rolle der Silikatbildung bei der Luftmörtelerhärtung einer befriedigenden Lösung zuzuführen.

Behufs anderer chemischer Prozesse, die bei der Einwirkung des Kalkes auf gewisse Bestandteile des Sandes (zeolithische Mineralien, amorphe Kieselsäure usw.) eintreten, wenn sie auch eine mehr untergeordnete Rolle spielen, siehe einige Stellen im Kapitel „Sand“.

## VII. Basisch-kohlensaurer Kalk.

Es erübrigt noch, eine Erhärtungserscheinung näher zu besprechen, die man schon seit sehr langer Zeit beobachtet hat, deren chemischen Prozeß zu klären aber erst der neueren Zeit vorbehalten blieb. Es handelt sich hier um die Bildung und die Rolle von basisch-kohlensaurem Kalk bei der Luftmörtelerhärtung. Im folgenden soll nun zunächst auf die Beobachtungen über das Auftreten von solchem basisch-kohlensaurem Kalk in der Mörtelstofftechnik und auf dessen Verhalten im allgemeinen eingegangen werden.

Schon um das Jahr 1813 bemerkte Vicat<sup>1)</sup>, daß Stücke gebrannten Kalkes, die von einem Schwachbrande herrührten und die noch Kalziumkarbonat enthielten, sich schwer löschten. Wurden diese Stücke zu Pulver gemahlen und dann mit Wasser in entsprechenden Mengen zusammengebracht, so erhärtete dieser Mörtel selbst bei geringem Luftzutritt, welches Verhalten das Vorliegen von hydraulischen Eigenschaften kennzeichnete. Zehn Jahre darauf veröffentlichte er neue Beobachtungen, welche er zufällig beim Brennen von Kreide auf einem rotglühenden Eisenbleche gemacht hatte. Es ergab sich, daß schwach gebrannte Kreide, aus welcher noch nicht die gesamte Kohlensäure entfernt war, bei Bereitung eines Mörtels aus derselben im Wasser hart wurde. In demselben Jahre, einige Monate später, wurden die Resultate publiziert, welche der französische Ingenieur Minard erhalten hatte, als er in verschiedener Weise Kalksteine brannte. Minard gab an, daß alle Kalksteine, nicht bloß die tonhaltigen, sondern auch die reinen, zur Darstellung von hydraulischen Zementen tauglich seien, welche an Güte englischem Romanzemente nicht nachstehen, falls dieselben nur nicht vollständig gebrannt wurden. Minard nahm an, daß beim unvollständigen Brande sich basisch-kohlensaurer Kalk<sup>2)</sup>  $\text{CaO} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{CaO}$  bilde, welcher die Fähigkeit besitzt, bei seiner Verwandlung in Hydrat  $\text{CaO} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$ <sup>2)</sup> im

<sup>1)</sup> Der hier gegebene historische Überblick ist nach einer Arbeit von Schulatschenko: „Über den basisch-kohlensauren Kalk in hydraulischen Zementen“, Dingl. Journ. 1872, S. 206 und 235 verfaßt.

<sup>2)</sup> Der Verfasser gibt hier die Formeln des Originaltextes wieder und

Wasser zu erhärten. Die Annahme, daß die Bildung basisch-kohlensauren Kalkes Ursache des Auftretens hydraulischer Eigenschaften von Kalkmörteln ist, hatte zur gleichen Zeit auch heftige Gegner gefunden. So bestritt Berthier die hydraulischen Eigenschaften des basisch-kohlensauren Kalkes, indem er behauptete, daß, wenn auch beim unvollständigen Brennen des Kalksteines wirklich eine dem basisch-kohlensauren Kalke ähnliche Verbindung sich bilden könne, dieselbe beim Anrühren mit Wasser in Kalkhydrat und kohlensauren Kalk zerfallen müsse. Rivot und Chatoney, welche sich mit umfassenden Untersuchungen über die Widerstandsfähigkeit der Mörtel gegen den Einfluß von Seewasser beschäftigten und ihre Resultate in der schätzbaren Schrift: „Les matériaux employés dans les constructions à la mer“ im Jahre 1856 veröffentlichten, bestritten sogar die Existenz des basisch-kohlensauren Kalkes<sup>1)</sup> „Es ist in letzter Zeit viel von den hydraulischen Eigenschaften des basisch-kohlensauren Kalkes die Rede gewesen. Man hat auf viele Bauten hingewiesen, welche im Meere, unter Anwendung eines Mörtels aus unvollständig gebranntem, noch viel Kohlensäure enthaltendem Kalk hergestellt waren und im Laufe vieler Jahre sich wohlerhalten hatten; man schrieb den Erhärtungsprozeß der Hydratation des basisch-kohlensauren Kalkes zu — einer Verbindung, deren Existenz die Chemie nicht kennt. Es ist uns keine einzige einigermaßen gut untersuchte Tatsache bekannt, welche uns nötigen könnte, die Existenz einer solchen Verbindung vorauszusetzen, und wir glauben, daß die Erhärtung der Mörtel in diesem Falle genügend geklärt ist durch folgende Erwägungen: Die benützten Kalksteine konnten in geringem Verhältnisse Ton und Kieselerde in Form von feinem Quarzsand enthalten. Bei unvollständigem Brande verliert der Kalk nur einen Teil seiner Kohlensäure und verbindet sich mit Kieselerde und Tonerde, wobei er ein Kalksilikat und -aluminat bildet. Der in solcher Weise gebrannte Kalkstein enthält folglich Kalksilikat und -aluminat, eine bedeutende Menge Ätzkalk und kohlensauren Kalk. Der unvollständige Brand war daher die Hauptbedingung der Hydraulizität des Kalksteines, denn er beließ den größeren Teil des Kalkes in Verbindung mit Kohlensäure und stellte das erforderliche Verhältnis zwischen dem geringeren Quantum an Ton und dem in geringer Menge sich bildenden Ätzkalk her; ein solcher Kalkstein stellt nach dem unvollständigen Brennen somit ein

bemerkt hierzu, daß dies kein Grund dafür ist, daß sich der Verfasser der Richtigkeit derselben anschließt.

<sup>1)</sup> Rivot et Chatoney.

Gemisch von freiem kieselsauren Kalk und hydraulischem Kalk dar; ein derartiges Gemisch kann aber unter günstigen Bedingungen unter Wasser erhärten. Diese Erklärung“, fährt Rivot fort, „könne nur durch genaue Analysen unvollständig gebrannter Kalksteine widerlegt werden, falls durch dieselben die vollständige Abwesenheit von Kieselerde dargetan würde, und selbst in diesem Falle wird man dem basisch-kohlensauren Kalke keine hydraulischen Eigenschaften zuschreiben können“<sup>1)</sup>. Dem Gedankengange Minards folgend hatte auch Schulatschenko auf verschiedenem Wege die Darstellung von basisch-kohlensaurem Kalk versucht, und zwar durch unvollständiges Brennen von Kalkstein, und kam zu dem Resultate, daß kein basisch-kohlensaurer Kalk als chemische Verbindung bei unvollständigem Brande von Kalksteinen sich bildet<sup>2)</sup>. Diese zur Existenzfrage eines basisch-kohlensauren Kalkes, der als chemische Verbindung im unvollständig gebrannten Kalke gesucht wurde, ablehnende Stellungnahme, die ja in diesem Sinne aufgefaßt zu Recht besteht, schließt nach meiner Meinung nicht die Möglichkeit aus, daß basisch-kohlensaurer Kalk als chemische Verbindung sich aus den Komponenten eines nicht vollständig gebrannten Kalksteines, der also noch Kalziumkarbonat neben Kalziumoxyd enthält, sich beim geeigneten Zusammenbringen derselben mit entsprechenden Mengen Wasser bilden kann

<sup>1)</sup> Anm. des Verfassers: Die Ausführungen Chatoney-Rivots, die ja im ersten Augenblicke viel Wahrscheinlichkeit an sich haben, fußen auf der unrichtigen Annahme, daß Kalziumoxyd, Tonsubstanz und Quarz unter Bildung von aufgeschlossenen Silikaten schon bei Temperaturen aufeinander wirken können, bei denen das Kalziumkarbonat noch zum größten Teile, wie sie anführen, erhalten ist. Hierzu muß bemerkt werden, daß die kritische Temperatur für das Bestehen von Kalziumkarbonat bei 1 Atm. Druck bei 908° C gelegen ist. In Kalköfen, die Kalk für Mörtelzwecke brannten und die stets von Luft und Verbrennungsgasen durchströmt sind, die bloß ungefähr 10 Vol.-% Kohlendioxyd enthalten und die somit nur 0,1 Atm. Kohlensäurepartialdruck entsprechen, genügen bereits anhaltende Temperaturen von 800—900° C, um selbst große Stücke Kalksteines garzubrennen.

Die Untersuchungen Cobbs über den Chemismus des Brandes von tonhaltigen Kalksteinen zum Zwecke der Romanzementfabrikation (J. Ch. I, 29, S. 69, 250, 335, 399, 608 [1910] haben jedoch ergeben, daß sich Kalziumsilikate und -aluminat erst aus entsäuertem Kalke bilden, und zwar ohne zu erweichen von 1000° C an, bei welcher Temperatur Kalziumkarbonat unter gewöhnlichem Atmosphärendrucke nicht mehr existenzfähig ist.

<sup>2)</sup> Anm. des Verfassers: Basisch-kohlensauren Kalk als chemische Verbindung in unvollständig gebranntem Kalke zu suchen, ist von vornherein eine Unmöglichkeit, da aus Kalziumkarbonat beim Brande, also bei Abwesenheit von Wasser, solches sich überhaupt nicht bilden kann.

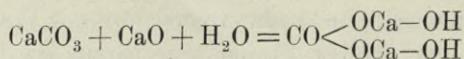
und dann beständig ist. Sollen Versuche in dieser Richtung überzeugend sein, dann müssen die Ausgangsstoffe überdies frei von Kieselsäure und Tonerde sein. Donath und Lang<sup>1)</sup> haben sich nun der Aufgabe unterzogen, die Bildung von basisch-kohlensaurem Kalk aus Kalziumkarbonat und Kalziumoxyd beim Zusammenbringen mit entsprechenden Mengen Wasser nachzuweisen und ferner festzustellen, daß dessen Entstehen mit hydraulischen Erscheinungen verknüpft ist. Die Durchführung des experimentellen Nachweises gestaltete sich folgendermaßen:

Kalziumkarbonat purissimum „Kahlbaum“, welches schon durch seine Provenienz als chemisch rein angesehen werden konnte, wurde noch auf die völlige Abwesenheit von Kieselsäure und Tonerde genau geprüft. Aus diesem Kalziumkarbonat wurde dann im Quarzrohr im elektrischen Ofen durch Glühen bis zur Gewichtskonstanz reines Kalziumoxyd erzeugt. Das Kalziumkarbonat selbst wurde nun mit einer äquivalenten Menge des daraus erzeugten Kalziumoxyds möglichst gut gemischt und sodann vorsichtig mit Wasser überspritzt. Nach ungefähr einer halben Stunde war bereits die Erhärtung unter Bildung einer kompakten Masse ganz deutlich wahrnehmbar. Die Masse wurde nun pulverisiert und mit größeren Mengen Wasser so lange unter fortwährendem Aufschlännen mit Dekantation behandelt, bis eine Probe der abfiltrierten Flüssigkeit mit Ammonoxalat nicht die geringste Reaktion auf Kalk gab. Da Kalziumhydroxyd, wenn auch schwer, in Wasser schließlich löslich ist, so konnte angenommen werden, daß der Rückstand der so mit Wasser behandelten Masse keinen freien Ätzkalk mehr enthielt. Dieser Rückstand wurde abfiltriert, auf dem Filter weiter gewaschen, schließlich getrocknet, um ihn vom Filter herabbringen zu können, und endlich 2 Stunden bei 150° getrocknet.

Diese Versuche wurden nun in der Weise abgeändert, daß durch entsprechend langes Glühen von reinem Kalziumkarbonat im Platinschiffchen im Quarzrohr eines elektrischen Ofens Gemische hergestellt wurden, welche entweder einen Überschuß an Kalziumoxyd oder einen Überschuß an Kalziumkarbonat enthielten. Solche Gemische erhärteten dann beim Zusammenbringen mit Wasser weniger gut oder bei größerem Überschuß an Kalziumoxyd sehr schlecht, da die nun eintretende Bildung einer größeren Menge von Kalziumhydroxyd,

<sup>1)</sup> Ed. Donath und A. Lang: „Zur Existenz basischer Kalziumkarbonate“, Österr. Chem. Zeitung 1917, Nr. 18.

das dabei sein Volum vergrößert, das Erhärten verhinderte. Die verschiedenen erhaltenen Produkte wurden schließlich in entsprechender Weise auf einen Gehalt von Kalziumoxyd, Kohlendioxyd und Wasser untersucht, nachdem sie vorher — wie schon einmal erwähnt wurde — durch zwei Stunden im Trockenschrank bei 150° erhitzt worden waren. Dabei ergab sich, daß immer ein Überschuß von Kalziumoxyd über das vorhandene Kalziumkarbonat vorhanden war. Die diesem Überschuß an Kalk entsprechende Menge von Wasser wurde durch den vorhandenen Wassergehalt immer etwas überschritten. Bei 150° weiter anhaltend getrocknet, nahm die Menge des Wassers immer ab. Wenn wir nun auch nicht Substanzen von bestimmter Zusammensetzung erhielten, so dürfen wir aus diesen Versuchen wohl den Schluß ziehen, daß Kalziumkarbonat tatsächlich imstande ist, gewisse Mengen gleichzeitig vorhandenen Kalziumoxyds beim Zusammenbringen mit Wasser chemisch nach folgender Gleichung unter völliger Erhärtung zu binden:



daß demnach durch weitere Behandlung oder Auslaugung mit Wasser dieses Kalziumhydroxyd nicht mehr entzogen werden kann; deshalb können wir wohl die Existenz solcher basischer Kalziumhydrokarbonate als sehr wahrscheinlich annehmen<sup>1)</sup>; obiges Gemisch besitzt also tatsächlich, wie früher schon mehrfach angegeben, hydraulische Eigenschaften. Bemerkenswert ist vielleicht, im Anhang die absichtliche fabrikmäßige Herstellung eines Sackkalkes für mörteltechnische Zwecke aus einem nicht silikathaltigen Kalk zu erwähnen, der wassererhärtende Eigenschaften besitzt, die wohl, wie nach seiner Zubereitung zu schließen ist, auf das Entstehen von basisch-kohlensaurem Kalke der letzt angeführten Zusammensetzung bei seiner Anwendung zurückzuführen sind. Das Verfahren stammt von Gustav Dralle, Großhartmannsdorf bei Bunzlau, *Tonindustrie-Zeitg.* S. 541, 1. Bd. [1920] und ist durch das D.R.P. 302319 diesem geschützt. Die betriebsfähige Ausnützung hat zu folgendem Vorgehen geführt: Frisch gebrannter Weißkalk wird im Freien auf einen Haufen ge-

<sup>1)</sup> Donath und Lang beschreiben a. a. O. auch einen zweiten Weg zur Bildung von basischen Kalkkarbonaten und sagen am Schlusse ihrer Abhandlung, daß in neuerer Zeit mehrfach auf die Existenz und Bildung basischer Kalziumsalze hingewiesen wurde, z. B. von Bussold in *Zeitschr. f. anorganische Chemie* 98, 202 nach *Chem. Centr.-Blatt* 1917, 479.

schüttet. Etwa nach einjährigem Lagern wird er wagenweise mit frischem Kalke, der zunächst mit Wasser getränkt wurde, in eine Tasche über einen Mischrost gestürzt und in der Lagertasche durch ein Rührwerk mit auf- und abwärts bewegbaren Rührarmen gemischt. Nach jedem Abkippen eines Wagens werden die Rührarme höher gestellt, damit nur die neu eingebrachte Masse durchgerührt wird. Nach etwa 24 Stunden hat sich diese Mischung stark erhitzt; durch diese Erhitzung verbindet sich der alte, jetzt zum größten Teile kohlen saure Kalk von dem Haufen mit dem frischen Ätzkalk. Während der Lagerung, die zweckmäßig mehrere Tage, beispielsweise 8 Tage andauert, bildet sich ein Kalk von neuen Eigenschaften. Das neue Erzeugnis wird abgezogen und durch Sieben von Kohle und Steinen befreit. Das Siebgut wird fein gesichtet, während die grießigen Bestandteile entsprechend gemahlen und dem gesichteten Gute beigefügt werden. Das Feinmehlgemisch wandert nochmals in die Lagertaschen und ist nach einigen Wochen versandfertig. Bei dieser Behandlung des Mischgutes von bereits karbonisiertem Kalke und frischem, gebranntem Kalke mit nur geringen Mengen Wasser ist es immerhin möglich, daß ein Teil des gebrannten Kalkes mit der unzureichenden Wassermenge zu trocken gelöschtem Kalkhydrate sich verbindet, daß jedoch das überschüssige Kalziumoxyd (gebrannter Kalk) dann nach Feinmahlung mit dem vorhandenen Kalziumkarbonate bei der baulichen Mörtelverwendung Anlaß zur Bildung von basisch-kohlensaurem Kalk gibt, der dem Mörtel hydraulische Eigenschaften verleiht. Würde man ein teilweises Löschen des gebrannten Kalkes in besprochener Weise unterlassen, so würde bei der Mörtelbereitung mit Hilfe dieses Sackkalkes nicht nur die Heftigkeit, mit der in diesem Falle der Löschprozeß sich abspielen würde, sondern auch die Bildung von größeren Mengen Kalziumoxyd, das sein Volum dabei ständig vergrößert, das Erhärten auf hydraulischem Wege verhindern. Basisch-kohlensaurer Kalk kann auch als Produkt teilweiser Karbonisierung des Mörtels in Mauerwerken entstehen. So hat namentlich Alexander Bauer<sup>1)</sup> in Wien beobachtet, daß bei alten Mörteln sich im Innern kristallinischer halbkohlensaurer Kalk ( $2\text{CaOCO}_2\text{H}_2\text{O}$ ) manchmal vorfindet. Ist demselben der weitere Zutritt von Kohlensäure aus der Luft durch das Mauerwerk verwehrt, so ist derselbe beständig und bleibt in der Mörtelfuge erhalten, andernfalls geht er in normalen, kohlen sauren Kalk über. Ob sich zunächst immer bei der Luftmörtelerhärtung halb-

<sup>1)</sup> Dr. A. Bauer, Dingl. Journ. 152, 372.

kohlensaurer Kalk bildet und solcher auch vorhanden war, wenn bei der Analyse in Mörtelresten alter Mörtel sich nur noch normaler, kohlen-saurer Kalk feststellen läßt, bedarf noch eingehender Untersuchungen.

### VIII. Ziegel. Ziegel und Mörtel.

Ziegel sind aus Lehm geformte und dann bei bestimmten Temperaturen gebrannte Mauersteine, die von rechteckigen Flächen begrenzt werden. Das Formen kann entweder durch Handstrich oder maschinell ausgeführt werden. Lehm ist ein Material, welches vorwiegend aus Tonsubstanz besteht, welche immer gewisse Mengen kohlensaurer Erden, vorwiegend Kalziumkarbonat und daneben Magnesiumkarbonat, dann Eisenoxydverbindungen und eine gewisse Menge organischer Substanzen sowie in der Masse beigemischt Sand enthält. Die Tonsubstanz ist durch Verwitterung einer Reihe feldspatartiger Mineralien, insbesondere des Feldspates selbst, entstanden. Die Zusammensetzung des Feldspates entspricht folgender empirischer Strukturformel: Feldspat<sup>1)</sup> =  $K_2O, Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ . Durch Frost und mechanische Zerkleinerung und nachherige Verwitterung durch die Atmosphärien  $H_2O$  und  $CO_2$  erfolgt Umsetzung in  $K_2CO_3$  und  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ . Das Kaliumkarbonat ist wasserlöslich, während das Aluminiumsilikat zurückbleibt; ist letzteres ganz rein, so stellt es den Kaolin, bekanntlich das Hauptmaterial der Porzellanfabrikation, vor. Dieses Aluminiumsilikat gibt beim Erwärmen bei mäßiger Temperatur zuerst 1 Molekül Wasser ab, und erst bei höherer wird 1 weiteres Molekül Wasser abgespalten, wodurch eine nicht mehr plastische, mit Rücksicht auf unsere Ofentemperaturen als feuerfest zu bezeichnende Masse zurückbleibt.

In Kürze sei hier über die Erzeugung von Ziegeln nur folgendes gesagt. Man verwendet in Ziegeleien kalkhaltige und magere Tone, welche beim Brennen weniger schwinden und reißen als die fetten Tone. Kalkgehalt befördert die Schmelzbarkeit des Tones und gestattet mithin die Anwendung niederer Temperaturen beim Brennen. Immerhin muß die Temperatur genügend gesteigert werden, um eine Verbindung des Kalkes mit der Kieselsäure herbeizuführen, weil nach unzureichendem Brennen der seiner Kohlensäure beraubte Kalk bei Einfluß von Feuchtigkeit sich löscht und das Zerfallen des Ziegels bewirkt. Kalk-

<sup>1)</sup> Der Feldspat kommt bekanntlich nicht nur als solcher in der Natur vor, sondern ist häufig ein Bestandteil vieler Gesteine; z. B. Granit ist Feldspat mit Quarz und Glimmer.

knollen wirken stets sehr schädlich. Gips verliert beim Brennen sein Wasser, löscht sich später wieder und zersprengt ebenfalls die Steine. Eisenoxyd färbt den Ton, eisenarmer Ton wird erst bei hoher Temperatur gelblich, eisenreicher gibt im allgemeinen rote Mauersteine, und da solcher gewöhnlich auch Kalk enthält und Eisenoxyd wie letzterer als Flußmittel wirkt, so schmelzen derartige Steine leichter. Kieselknollen verschwinden nicht wie der Ton beim Brennen durch Aufschluß, sie dehnen sich vielmehr aus und sprengen den Stein oder machen ihn beulig. Schwefelkies wird beim Brennen zersetzt, das zurückbleibende schwefelärmere Schwefeleisen verwittert später an der Luft und zerstört den Stein. Kommt Magnesia neben Gips vor, so entsteht schwefelsaure Magnesia, welche auswittert und zur Bildung einer Art von Mauerfraß Veranlassung gibt. Im folgenden seien zwei Tabellen wiedergegeben, die Beispiele von Zusammensetzungen einer Reihe von Ziegeltonen und der Brennfarbe derselben enthalten.

Tabelle 5<sup>1)</sup>.

	Gute Ziegeltonen		Geringerer Ziegelton
	gelbbraun brennend	rot brennend	gelb bis mißfarbig brennend
SiO <sub>2</sub> . . .	64,4%	68,4%	47,9%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . .	21,9 "	16,3 "	11,9 "
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . .	3,0 "	5,6 "	5,2 "
CaO . . .	0,7 "	—	14,7 "
MgO . . .	1,4 "	1,5 "	1,7 "
K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	3,0 "	3,8 "	3,7 "
H <sub>2</sub> O + Org. .	4,7 "	4,3 "	4,6 "
—	—	—	CO <sub>2</sub> 10,4 "
	99,1%	99,9%	100,1%

Es sei hier auch noch ein Beispiel eines Ziegeltons angeführt, der eine bemerkenswert hohe Menge an Kalk, Quarz und Mineraltrümmer enthält.

Derselbe bestand aus 46% Quarz und Mineraltrümmer, 31% kohlen-saurem Kalzium und nur 12% Tonsubstanz. Infolge des hohen Gehaltes an Quarz, der sich beim Glühen bekanntlich ausdehnt, zeigten diese Steine auch keine Schwindung beim Brennen, sondern eine Längenausdehnung von 1%. Dieser Ziegelton nachstehender Zusammen-  
setzung

<sup>1)</sup> Ost, Lehrbuch der Chem. Technologie, 14. Aufl., 324.

Tabelle 6<sup>1)</sup>.

	Ton von																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12													
Tonwaren	Velten		Birkenwerder		Neuhof I		Neuhof II		Rathenow		Bockhorn		Schwarze Hütte bei Osterrode am Harz		Ulm		Senftenberg		Neuwied		Hainstedt I		Hainstedt II		
	Kieselsäure (SiO <sub>2</sub> )	47,86	48,34	61,42	69,75	61,30	70,22	79,43	56,33	62,50	56,05	67,45	85,30	67,45	79,43	56,33	62,50	56,05	67,45	85,30	67,45	85,30	67,45	85,30	67,45
	Tonerde	11,90	11,63	10,31	14,42	18,87	13,67	10,07	22,37	21,30	25,05	23,22	10,33	23,22	10,07	22,37	21,30	25,05	23,22	10,33	10,33	10,33	10,33	10,33	10,33
	Eisenoxyd	5,18	4,59	3,68	5,40	6,66	6,80	5,35	7,64	3,06	4,68	1,19	0,99	1,19	5,35	7,64	3,06	4,68	1,19	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	Kalkerde	14,96	15,87	9,17	1,59	0,85	—	—	—	1,46	0,58	0,98	0,98	0,98	—	1,46	0,58	0,97	1,23	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
	Magnesia	1,71	1,79	Spur	0,85	1,20	1,30	1,40	1,40	1,86	0,53	1,23	0,20	—	1,40	1,86	0,53	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
	Kali	2,65	2,78	4,67	3,78	3,20	3,37	2,36	2,22	2,22	2,18	2,46	—	—	2,36	2,22	2,18	2,46	2,46	—	—	—	—	—	—
	Natron	1,01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Wasser u. organische Bestandteile	4,64	5,28	3,13	4,10	8,28	5,30	—	—	8,10	8,57	9,10	6,72	3,20	—	8,10	8,57	9,10	9,10	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
	Kohlensäure (CO <sub>2</sub> )	10,44	11,71	7,21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		100,35	100,99	99,60	99,89	100,36	100,66	100,23	99,98	99,98	99,53	99,54	100,27	100,28	100,28	99,98	99,53	99,54	99,54	100,28	100,28	100,28	100,28	100,28	100,28

Brennfarben der Tone:

Schwachbrand: fleischfarben  
 Hartbrand: gelblichweiß  
 bis schwefelgelb  
 Klinker: gelbgrün bis grün

gelb bis lederbraun  
 hellgelb  
 hellgelb  
 gelb

Die Analysen 1, 2 und 5 bis 10 sind von Seger, diejenigen von 3, 4, 11 und 12 vom Verfasser.  
<sup>1)</sup> Dr. O. Dammer, Handbuch der Chem. Technologie, Bd. I. S. 858.

Unzerlegbarer Rückstand, Sand . . .	47,88%
Chemisch gebundene Kieselsäure . . .	8,89 „
Tonerde . . . . .	3,71 „
Eisenoxyd . . . . .	1,23 „
Eisenoxydul . . . . .	0,86 „
Kalk . . . . .	17,91 „
Magnesia . . . . .	1,28 „
Kali . . . . .	0,68 „
Natron . . . . .	0,17 „
Phosphorsäure . . . . .	0,16 „
Schwefelsäure . . . . .	0,06 „
Kohlensäure . . . . .	14,39 „
Wasser . . . . .	2,88 „
	100,10% <sup>1)</sup>

hatte vermöge der großen Mengen Quarz und Mineraltrümmer beim Brennen die Eigenschaft zu zerfallen oder zu reißen, und zwar so hochgradig, daß die Menge der brauchbaren Steine selbst bis auf 5% herunterging. In diesem Falle konnte ein Zusatz von 10 bis 20% eines fetten Tones den Übelstand beheben.

Während über die Zusammensetzung<sup>2)</sup> der zur Ziegelfabrikation verwendeten Tone in den einschlägigen Werken ausführliche Mitteilungen enthalten sind, findet man über die Zusammensetzung und Beschaffenheit gebrannter Ziegel selbst auch in den ausführlichen keramischen Handbüchern verhältnismäßig wenig Angaben.

Nur deshalb sehe ich mich veranlaßt, im folgenden die Ergebnisse einiger schon vor Jahren durchgeführten Untersuchungen besonders charakteristischer Mauerziegel mitzuteilen.

A. Zwei aus derselben Ziegelfabrik herrührende, jedoch verschiedenen Stellen des Lagers entnommene Ziegel von besten Eigenschaften, mit der charakteristischen roten Ziegelfarbe, gut klingend, zeigten folgende Zusammensetzung:

	I	II
Glühverlust . . . . .	0,42%	0,28%
Kieselsäure . . . . .	70,31 „	70,10 „
	70,73%	70,38%

<sup>1)</sup> C. Holthof, Tonindustrie-Zeitung 1877, S. 447.

<sup>2)</sup> Donath, Zur Kenntnis der Zusammensetzung gebrannter Mauerziegel. Österr. Wochenschrift f. den öffentl. Baudienst, 1911, 38. — Derselbe, Tonindustrie-Zeitung 1925, S. 1204.

	Übertrag:	70,73 <sup>o</sup> <sub>o</sub>	70,38 <sup>o</sup> <sub>o</sub>
Tonerde . . . . .		15,87 „	14,68 „
Eisenoxyd . . . . .		3,87 „	3,54 „
Manganoxydul . . . . .		0,84 „	0,79 „
Kalk . . . . .		6,18 „	7,24 „
Magnesia . . . . .		0,42 „	1,19 „
		<u>97,91<sup>o</sup><sub>o</sub></u>	<u>97,82<sup>o</sup><sub>o</sub></u>

außerdem Alkalien und andere nicht bestimmte Bestandteile  
2,09<sup>o</sup><sub>o</sub>                      2,18<sup>o</sup><sub>o</sub>

B. Roter, ziemlich fester harter Ziegel, jedoch weniger gut klingend:

Glühverlust . . . . .	0,72 <sup>o</sup> <sub>o</sub>
Kieselsäure . . . . .	56,58 „
Tonerde . . . . .	15,93 „
Eisenoxyd . . . . .	6,55 „
Manganoxydul . . . . .	1,54 „
Kalk . . . . .	13,57 „
Magnesia . . . . .	1,19 „
Alkalien (als K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O) . . . . .	<u>3,22 „</u>
	Zusammen 99,30 <sup>o</sup> <sub>o</sub>

C. Roter Ziegel von etwas geringerer Festigkeit und Härte, vom Material zum selben Hausbau wie der frühere:

Glühverlust . . . . .	0,96 <sup>o</sup> <sub>o</sub>
Kieselsäure . . . . .	57,16 „
Tonerde . . . . .	15,15 „
Eisenoxyd . . . . .	6,30 „
Manganoxydul . . . . .	0,95 „
Kalk . . . . .	13,95 „
Magnesia . . . . .	1,40 „
Alkalien . . . . .	<u>3,43 „</u>
	Zusammen 99,30 <sup>o</sup> <sub>o</sub>

D. Tiefroter Ziegel, sehr hart und klingend, stark gebrannt, an den Rändern vieler Ziegel stark gesintert und dunkler gefärbt, aus Leoben in Steiermark:

Gesamtkieselsäure . . . . .	63,19 <sup>o</sup> <sub>o</sub>
Glühverlust . . . . .	2,41 „
Tonerde . . . . .	<u>16,04 „</u>
	81,64 <sup>o</sup> <sub>o</sub>

	Übertrag:	81,84 %
Eisenoxyd . . . . .		8,37 „
Manganoxydul . . . . .		2,91 „
Kalk . . . . .		3,07 „
Magnesia . . . . .	nicht bestimmt	
Alkalien . . . . .		3,89 %
	Zusammen	99,88 %

## E. Mürber gelber Ziegel, durch Trockenpressung erzeugt:

Glühverlust . . . . .	2,45 %
Kieselsäure . . . . .	56,70 „
Tonerde . . . . .	15,27 „
Eisenoxyd . . . . .	6,81 „
Manganoxydul . . . . .	0,51 „
Kalk . . . . .	13,78 „
Magnesia . . . . .	1,05 „
Alkalien . . . . .	3,20 „
	Zusammen 99,77 %

F. Ziegel, der durch die Eigenschaft, eine Ablenkung der Magnetnadel eines Kompasses herbeizuführen, in einem Markscheidelokale sich bemerkbar macht. Farbe dunkelziegelrot:

Glühverlust . . . . .	0,50 %
Kieselsäure . . . . .	67,94 „
Tonerde . . . . .	17,24 „
Eisenoxyd . . . . .	8,82 „
Eisenoxydul . . . . .	0,57 „
Manganoxydul . . . . .	nicht bestimmt
Kalk . . . . .	1,93 %
Magnesia . . . . .	0,39 „
	Zusammen 97,19 %

G. Schwach gelblich gefärbter, sehr lichter Ziegel von dem Bau eines Wohnhauses in Lans bei Innsbruck:

Glühverlust . . . . .	0,53 %
Kieselsäure . . . . .	36,18 „
Tonerde . . . . .	21,65 „
Eisenoxyd . . . . .	4,84 „
Kalk . . . . .	22,03 „
Magnesia . . . . .	14,20 „
	Zusammen 99,43 %

Da die angeführten Analysen nicht zu einem bestimmten Zwecke gleichzeitig sondern in längeren Zwischenräumen ausgeführt wurden, so kam ich erst später auf den Gedanken, daß bei der so verschiedenen Zusammensetzung des Rohmaterials die Qualität der gebrannten Ziegel selbst in einem Zusammenhange mit der in denselben enthaltenen aufgeschlossenen Kieselsäure stehen könne. Darunter ist jene Kieselsäure zu verstehen, welche bei der Maximaltemperatur des Brandes auf die vorhandenen Alkalien und alkalischen Erden eingewirkt hat und nun in Form von Silikaten vorhanden ist, die durch Salzsäure zersetzbar sind. Soweit das untersuchte Material noch vorhanden war, wurde die Menge dieser aufgeschlossenen Kieselsäure nach dem Verfahren von G. Lunge und C. Milberg, „Zeitschrift für angewandte Chemie“ 1897, S. 393, bestimmt. Das feinst gepulverte Ziegelmehl wurde mit mäßig konzentrierter Salzsäure zur Trockne verdampft und der Verdampfungsrückstand wie zur Abscheidung der Kieselsäure behandelt. Das nach dem Aufnehmen mit verdünnter heißer Salzsäure ungelöst Bleibende wurde abfiltriert und ausgewaschen, vom Filter vollständig herabgespritzt und mit einer ungefähr 10%igen Sodalösung in der Platinschale dreimal ausgekocht, wobei die durch Salzsäure in Freiheit gesetzte Kieselsäure in Lösung geht, die Sodalösung filtriert und nun mit Salzsäure zersetzt, worauf die gelöste Kieselsäure in bekannter Weise bestimmt wurde.

Dabei wurden erhalten bei Ziegel A I, einem vorzüglichen Fabrikate: 6,12 %, A II 6,82 %, D 3,18 %, F 1,65 % und bei dem ganz abnorm zusammengesetzten Ziegel, der anscheinend aus einem dolomitischen Mergel und nicht aus Ton hergestellt war, 25,47 %.

Wenn man die angegebene Zusammensetzung dieser wenigen Ziegelmuster und dasjenige, was über die chemische Beschaffenheit der gebrannten Ziegel bekannt ist, ins Auge faßt (am ausführlichsten zusammengestellt im „Handbuch der gesamten Tonwarenindustrie“ von Eduard Cramer und Hermann Hecht 1907) so kann man folgende Schlüsse ziehen, die allerdings schon mehr oder minder ausgesprochen wurden:

1. Die Zusammensetzung gut brauchbarer, gebrannter Ziegel ist innerhalb sehr weiter Grenzen schwankend; dementsprechend kann auch die Zusammensetzung der zur Erzeugung brauchbarer Ziegel zu verwendenden Ziegeltone und ähnlicher Materialien sehr schwankend sein. (Siehe übrigens Dammer, „Handbuch der chemischen Technologie“, Bd. I, S. 858.)

Diese Ziegeltone können mitunter vorzugsweise aus Ton und

Sand mit sehr geringen Beimengungen von Karbonaten der alkalischen Erden oder aber aus Ton, Sand und so großen Beimengungen von Erdalkalikarbonaten bestehen, daß sie im letzteren Falle einen mergelartigen Charakter annehmen. Das Material z. B., aus dem die sehr guten Ziegel aus Lans bei Innsbruck erzeugt wurden, unterscheidet sich in seiner Zusammensetzung sehr wesentlich von demjenigen, aus welchem die Ziegel I und II hergestellt waren. Es könnte als ein dolomitischer Mergel angesprochen werden.

2. Für die Beschaffenheit des fertigen Ziegelfabrikates ist die Dauer und Temperatur des Brandes viel mehr von Bedeutung, als die Zusammensetzung des Ziegelmaterials innerhalb gewisser Grenzen. Beim Brande müssen sämtliche Karbonate ihre Kohlensäure abgeben und die zurückbleibenden Basen mit den als Säure auftretenden Bestandteilen des Brenngutes in chemische Verbindung getreten sein. Diese entstandenen Verbindungen müssen bis zum beginnenden Erweichen gelangen und dadurch die unveränderten Bestandteile miteinander fest verkitten. Je größer die Menge der Karbonate in dem ursprünglichen Material war, desto größer muß die Menge der aufgeschlossenen, demnach nach der Zersetzung des Materials mit Salzsäure in Sodalösung löslichen Kieselsäure sein.

Bezüglich der über die Färbung der Ziegel namentlich von Remelè (siehe obengenanntes Handbuch der Tonwarenindustrie S. 512) ausgesprochenen Anschauung stimmen die Resultate der angegebenen Analysen mit denselben überein. So z. B. ist der Ziegel A bei einem Eisengehalt von nicht ganz 4% charakteristisch tiefrot, Ziegel B und C trotz des höheren Gehaltes an Eisenoxyd von über 6% jedoch nicht stark rot, weil in letzterem ein hoher Kalkgehalt, gegen 14%, vorhanden war, bei vorauszusetzendem hinreichend starkem Brand; Ziegel E ist ebenfalls trotz des relativ hohen Eisenoxydgehaltes nur gelb gefärbt. Der nur schwach gelblich gefärbte Ziegel von Lans hatte einen Eisenoxydgehalt von 4,84%, dessen färbender Einfluß jedoch durch den hohen Kalkgehalt von 22,03 und durch verhältnismäßig hohe Temperatur beim Brennen abgeschwächt wurde.

Die charakteristische rote Ziegelfarbe rührt jedenfalls nicht nur von der Menge des vorhandenen Eisenoxydes, sondern auch von dem Verhältnis desselben zur Kieselsäure und Kalk her. Je höher der Gehalt an Kieselsäure bei gewissem Gehalte an Eisenoxyd ist, desto dunkler ist die Färbung, während bei gleich hohem Gehalte an Eisenoxyd mit abnehmendem Kieselsäure- und zunehmendem Kalkgehalte die Tiefe der roten Färbung abnimmt. Der Kalkgehalt macht sich

bei noch höherer Brenntemperatur mehr geltend, weil dann nicht nur Tonerdesilikate vorhanden sind, sondern bei höherer Brenntemperatur, bis zur Sinterung der Masse, sich komplexe Tonerde-Kalksilikate von sehr leichter Färbung bilden. Ein höherer Mangengehalt wirkt zweifellos, wie aus obigen Analysen der Leobener Ziegel hervorgeht, bedeutend verstärkend auf den Farbton.

Ich möchte bei diesem Anlasse einige Worte über die mitunter überaus feste Adhäsion des Mörtels an dem Ziegelmaterial sagen. Eine integrierende Eigenschaft eines gut gebrannten Ziegels ist seine Porosität<sup>1)</sup>. Dieselbe ist im allgemeinen bedingt durch die Entwicklung von Kohlendioxyd beim Brande infolge Einwirkung von Tonsubstanz und Erdalkal karbonaten aufeinander, vielleicht auch durch die Verbrennung geringer Mengen organischer Substanzen innerhalb des Ziegelmaterials. Mischt man der Ziegelmasse vor dem Brennen feine Sägespäne oder gebrauchte gemahlene Gerberlohe zu, so wird nach dem gut geführten Brande der Ziegel grobporig, und man kann unter gewissen Verhältnissen die grobporigen leichten Ziegel erhalten, die sofort dadurch auffallen. Infolge dieser Porosität dringt der dünne breiig aufgetragene Mörtel bis zu einem gewissen Grade in das Innere der Ziegelmasse ein, und nun treten Prozesse auf, die rein physikalischer, aber auch chemischer Natur sind. Das von außen eindringende und auch in den Ziegelporen befindliche Kohlendioxyd fällt sofort einen gewissen Teil des Kalkes als Kalziumkarbonat heraus. In diesem Entstehungszustande haftet es aber viel fester an jedem Körper. Ich möchte diese Tatsache an einigen Erscheinungen illustrieren. Wenn man in Kalkwasser bis zur Sättigung Kohlendioxyd einleitet, so fällt der ganze Kalk als Kalziumkarbonat nieder. Schlemmt man denselben auf und taucht einen dicken Glasstab hinein, so bleibt nur sehr wenig oder gar kein kohlenaurer Kalk an dem Glasstabe haften, und derselbe läßt sich durch etwas Bespritzen mit Wasser vollständig abspülen. Taucht man jedoch den Glasstab in starkes Kalkwasser und überläßt ihn dann nach dem Herausziehen der Luft, so überzieht sich der Glasstab mit kohlenaurer Kalk, der jetzt mehr oder minder fester haftet. Darauf beruht ja auch das Festhaften von langsam innerhalb eines geschlossenen Gefäßes heraus-

<sup>1)</sup> Die Porosität der Ziegel ist eine in hygienischer Beziehung sehr wichtige Eigenschaft und kann sehr leicht durch den Pettenkoferschen Versuch nachgewiesen werden. Deshalb sollen die Wände, insbesondere in Schulen und Amtsgebäuden, nicht tapeziert werden, um nicht den notwendigen Luftaustausch durch die Mauern zu hindern.

gefällten Silbers aus einer ammoniakalischen Silberlösung auf Glasflächen (Versilberung).

Diese durch Flächenadhäsion bewirkte Fixierung wird aber noch stärker, wenn zwischen den beiden adhärierenden Körpern eine gewisse chemische Spannung besteht. Siehe darüber A. Bauer, *Dingl. polyt. Journ.* 1858, 65. Der Verfasser macht am Schlusse dieser Abhandlung auf eine Bemerkung Ottos aufmerksam, welcher angibt, daß der kalkige Überzug, der entsteht, wenn man die zur Straßenbeschotterung dienenden Steinhaufen teilweise mit Kalkmilch begießt, sehr fest haftet, und er vermutet, daß dies ebenfalls in der erst eingetretenen Bildung von kohlen saurem Kalk seinen Grund hat. A. Bauer hat sehr oft Gelegenheit gehabt, dies auch zu beobachten, hat sich aber überzeugt, daß dieser kalkige Überzug weit besser auf Quarzschotter haftet als auf Dolomitschotter, wie er in der Umgebung Wiens häufig verwendet wird. In diesem Falle haben also sowohl der Status nascens als auch die größere chemische Spannung zwischen Kalk und Kieselsäure (Quarz) als zwischen Kalk und Dolomit ihren Anteil an dem Festhaften.

Da im Ziegelmaterial durch den Brand gewisse Mengen hydraulischer Tonerdesilikate entstanden sind, so wirken diese ebenfalls chemisch bindend auf den Kalk ein. Es wird also die Adhäsion noch durch chemische Bindung wesentlich unterstützt. Dadurch ist die Verbindung des Mörtels mit den Ziegeln von einer chemischen Veränderung des Ziegels an seiner Oberfläche begleitet. An gebrauchten Ziegeln eines Mauerwerkes, an dessen Oberfläche diese beschriebene Wechselwirkung nicht mehr eintreten kann, haftet neuer Mörtel nicht gut, weshalb gebrauchte Ziegel zur Aufführung eines neuen guten Mauerwerks nicht mehr verwendet werden sollten. Auch wenn durch zu starken Brand andere Silikate entstanden sind, welche mit Kalk andere Komplexsilikate nicht bilden können, also nicht angreifbar sind, und außerdem die Ziegel die Porosität durch die vollständig eingetretene Sinterung verloren haben, haftet der Mörtel nur sehr schlecht, so daß diese auch kein festes Mauerwerk geben. Sind alle Materialien zu einem Ziegelmauerwerk in entsprechender Beschaffenheit verwendet worden, also Mörtel und Ziegel mit den besprochenen Eigenschaften, so kann ein Mauerwerk entstehen, welches die Festigkeit und das Alter eines gewachsenen Steines erreichen kann.

Ich habe seinerzeit in meiner Abhandlung „Beiträge zur Kenntnis des Luftmörtels“, *Zeitschrift für angew. Chemie* 1895, Heft 1, die Anschauung ausgesprochen, daß auch manche Färbungen von

Fasern vorwiegend auf den Status nascens zurückzuführen sind, indem nämlich gewisse Farbstoffe erst durch doppelte Umsetzung sich bilden. Der jüngst uns entrissene Altmeister der chemischen Technologie, H. Bunte in Karlsruhe, hat mir schon nach Erscheinen obengenannter Abhandlung einen ausführlicheren Brief geschrieben (Karlsruhe, 6. 1. 1895), auf den ich bereits in einer Abhandlung „Zur chemischen Bewertung des Mörtelsandes“, Tonindustrie-Zeitung 1900, Nr. 21, hinsichtlich der Bedeutung des Kieselsäurehydrosols und seiner Einwirkung auf Quarzsand usw. aufmerksam machte. Ich muß nun jetzt auf diesen Brief Buntens zurückkommen, um den Anschauungen Buntens Ausdruck zu geben, die ich für vollständig begründet halte. Bunte hält nicht den Status nascens für die Ursache gewisser Färbungen, sondern den Umstand, daß die färbenden Substanzen erst in der Zelle der Fasern entstehen und innerhalb derselben festgehalten werden; das sei auch bei der Einwirkung des Mörtels auf den porösen Ziegel der Fall. Die löslichen Bestandteile, speziell der Kalk, dringen in die Poren der Ziegel ein, werden dort in unlösliche Verbindungen überführt, welche so innig festgehalten werden, wie die innerhalb der Zelle oder der Gefäße der Faser erzeugten Farbstoffe von der letzteren. Deshalb haftet bekanntlich, wie Bunte hervorhebt, auf verglasten Klinkern, die eben gar keine Porosität besitzen, der Mörtel trotz des Status nascens sehr schlecht. Ja selbst auf den dichteren Maschinenziegeln ist das Anhaften des Mörtels schon erheblich schlechter. Ich sah mich verpflichtet, diese zutreffenden Anschauungen Buntens wiederzugeben.

Der Einfluß des Alters auf das Ziegelmauerwerk<sup>1)</sup>: Die Festigkeit des Ziegels nimmt mit dem Alter nicht zu, wohl aber beim Mörtel. Folglich ist es klar, daß das Alter nur durch die Erhärtung des Mörtels auf die Mauerwerksfestigkeit Einfluß haben kann. Es gilt daher zu untersuchen, in welcher Weise Mörtel mit dem Alter an Festigkeit zunimmt. Man darf jedoch hierbei nicht unmittelbare Schlüsse aus den Zahlen ziehen, welche man durch Versuche mit Probewürfeln aus Mörtel erhält, da die Luft- und Kohlensäureaufnahme hier nicht die gleiche ist wie bei Mörtel in Mauerwerksfugen. Der Luftmörtel erhärtet umso schneller, je dünner das Mauerwerk ist und je poröser die Ziegel sind. Versuche haben gezeigt, daß bei einer in Luftkalkmörtel ausgeführten gewöhnlichen Ziegel-

<sup>1)</sup> Vgl. die über den gleichen Gegenstand veröffentlichten Arbeiten von Professor Wawrzyniok, Tonindustrie-Zeitung 1909, Nr. 111, S. 1202; Nr. 47, S. 623.

mauer der Kohlensäuregehalt nach 7 Tagen an der Außenkante etwa 2,1 % und nach 1 Jahre etwa 5 % war. In der Mitte der Mauer waren die entsprechenden Zahlen 0,18 nach 7 Tagen und 3,3 % nach 1 Jahr.

Die Festigkeit des Mörtels ist also in den verschiedenen Teilen der Mauer ungleich.

Der Einfluß der Mörtelfestigkeit auf die Mauerwerksfestigkeit ist bei normalen Fugen (10—12 mm) weit geringer als der Einfluß der Ziegelfestigkeit. Bei stärkeren Fugen wird dagegen der Unterschied in der Mauerwerksfestigkeit bei gleichzeitigem großen Unterschied in der Mörtelfestigkeit ziemlich groß.

Von größter Bedeutung dürfte die Frage sein, welchen Einfluß bei normaler Fugenstärke der Mörtel ausübt. Hierfür wurden Normalpfeiler mit Ziegeln von gleicher Güte, aber mit verschiedenen Mörtelsorten aufgeführt, deren Druckfestigkeit an Würfeln von 7 cm Seitenlänge untersucht worden war. Aus den Versuchen geht hervor, daß die Mauerwerksfestigkeit mit der Mörtelfestigkeit zunimmt, aber nicht im bestimmten Verhältnis. Im allgemeinen kann man den Satz aufstellen: je dünner die Fugen sind, desto weniger Einfluß hat die Mörtelfestigkeit und umgekehrt.



## Inhaltsübersicht.

---

	Seite
I. Geschichtliche Einleitung . . . . .	153
II. Der Bausand . . . . .	155
III. Weißkalk (Trockenkalk) . . . . .	168
IV. Magnesia- oder Dolomitkalk . . . . .	177
V. Mörtelzusammensetzung . . . . .	182
VI. Erhärtung des Mörtels . . . . .	198
VII. Basisch-kohlensaurer Kalk . . . . .	208
VIII. Ziegel. Ziegel und Mörtel . . . . .	214

---

**IX. 1904.** 1/2: G. Rudolf, Die Lichtabsorption in Lösungen vom Standpunkt der Dissociationstheorie. — 3/5: F. Ephraim, Das Vanadin und seine Verbindungen. — 6/7: G. Rauter, Das Deutsche Patentgesetz und die Vorschläge des Deutschen Vereins für den Schutz des gewerblichen Eigentums. — 8: H. Kauffmann, Ueber den Zusammenhang zwischen Farbe und Konstitution bei chemischen Verbindungen. — 9/10: W. Bertelsmann, Der Stickstoff der Steinkohle. — 11/12: H. Frhr. v. Jüptner, Beiträge zur Theorie des Generator- (oder Luft-) und des Wassergases.

**X. 1905.** 1/2: K. Drucker, Die Anomalie der starken Elektrolyte. — 3/4: J. Schmidt, Die organischen Magnesiumverbindungen und ihre Anwendung zu Synthesen. — 5/6: W. Vieweg, Die Chemie auf der Weltausstellung zu St. Louis 1904. — 7/9: B. M. Margosches, Der Tetrachlorkohlenstoff unter besonderer Berücksichtigung seiner Verwendung als Lösungs- bzw. Extraktionsmittel in der Industrie der Fette und verwandter Gebiete. — 10: J. Meyer, Die Phasentheorie und ihre Anwendung. — 11/12: P. Cohn, Die Verwendung von Chemikalien als Heilmittel.

**XI. 1906.** 1/2: H. Kauffmann, Die Beziehungen zwischen Fluoreszenz und chemischer Konstitution. — 3: W. Herz, Die Lehre von der Reaktionsbeschleunigung durch Fremdstoffe (Katalyse). — 4: H. W. Fischer, Der Auerstrumpf. — 5: H. Frhr. v. Jüptner, Beiträge zur Theorie der Eisenhüttenprozesse. Ein Versuch zur Einführung der physikalisch-chemischen Anschauungen in die Technik. — 6/7: H. Rühle, Die Kennzeichnung (Deklaration) der Nahrungs- und Genußmittel. — 8/9: Fr. N. Schulz, Allgemeine Chemie der Eiweißstoffe. — 10/11: J. Schmidt, Ueber Chinone und chinoiden Verbindungen. — 12: M. Scholtz, Die optisch-aktiven Verbindungen des Schwefels, Selens, Zinns, Siliziums und Stickstoffs.

**XII. 1907.** 1/3: H. Kauffmann, Die Anochrome. — 4/6: C. G. Schwalbe, Neuere Färbetheorien. — 7/8: W. Bertelsmann, Die Entwicklung der Leuchtgaszerzeugung seit 1890. — 9/10: D. Vorländer, Kristallinisch-flüssige Substanzen. — 11: G. Carrara, Elektrochemie der nichtwässrigen Lösungen. Uebersetzt von K. Arndt. — 12: Edv. Hjelt, Berzelius — Liebig — Dumas. Ihre Stellung zur Radikaltheorie 1832—1840.

**XIII. 1908.** 1/2: A. Angeli, Ueber einige sauerstoffhaltige Verbindungen des Stickstoffs. Experimentelle Untersuchungen. Uebersetzt von K. Arndt. — 3/9: K. Brand, Die elektrochemische Reduktion organischer Nitrokörper und verwandter Verbindungen. — 10: A. Skrabal, Die industriellen Methoden der Gewinnung von Ammoniak. — 11: Reaktion Ferrosal. — 12: nischen Magnesium

**XIV. 1909.** Basen. — 4: S. M. von Wilhelm Ort. Stereochemie des I. Ueber die Anwendung. — 8/10: L. Spieg. H. Wieland, Die

**XV. 1910.** 1. wichtigsten Verteilung. Die Allotropie der I. läufer. Eine histo. — 8/12: P. Wald

**XVI. 1911.** 1/ Bekämpfung. — 4/7 A. Thiel, Der Star der Farbe. — 11/12 Chemie. Mit Geneh

**XVII. 1911.** kalischen Chemie de 6/8: F. Weigert, D deutung des Eiweiß Neue Studien in de litzner, Die Berechn

**XVIII. 1912.** nische und technische tationserforschung amine und ihre Isom



III-307134

Kdn 452/57

**XIX. 1913.** 1: P. Ruggli, Die Valenz-  
Standpunkt. — 2/3: M. Nierenstein, Orga-  
nische Bedeutung. — 4/6: E. Donath,  
niaks zu Salpetersäure und salpêtriger Säure  
Substitutionstheorie 1834—1845. — 8/10: R. L.  
in der Chemie. — 11: W. Herz, Verbindungs-  
Darstellung. Giacomo Ciamician, Die  
H. Grossmann. — 12: Angelo Angeli,  
dungen. Experimentelle Studien. Deutsch von W. Roth.

**XX. 1913.** 1/4: St. Cannizzaro †, Historische Notizen und Betrachtung  
die Anwendung der Atomtheorie in der Chemie und über die Systeme der Konsti-  
formeln von Verbindungen. Aus dem Italienischen mit einer biographischen Ein-  
Von B. Lino Vanzetti und M. Speter. — 5/7: G. Grube, Die elektrolytische  
stellung des Ferricyankaliums. — 8/9: H. Bauer, Analytische Chemie des Meth-  
hols. — 10: Tad. Estreicher, Ueber die Kalorimetrie der niedrigen Temperatur  
11/12: G. Fester, Die chemische Technologie des Vanadins.

**XXI. 1914.** 1/3: Niels Bjerrum, Die Theorie der alkalimetrischen und  
metrischen Titrierungen. — 4: E. Hägglund, Hefe und Gärung in ihrer Abhän-  
von Wasserstoff- und Hydroxylionen. — 5/7: J. Lifschitz, Die Aenderungen der  
absorption bei der Salzbildung organischer Säuren. — 8/11: G. Pellini, Ueb  
Atomgewicht des Tellurs und seine Beziehungen zu den Gruppenhomologen. I  
von B. L. Vanzetti. — 12: Victor Samter †, Physikalische Chemie und Paten  
Aus dem Nachlaß herausgegeben und eingeleitet von H. Grossmann.

**XXII. 1915.** 1/2: G. Cohn, Geschmack und Konstitution bei organischen Verbind  
— 3/10: A. Hesse und H. Grossmann, Englands Handelskrieg und die Chemisch  
strie. — 11: Erik Hägglund, Die Hydrolyse der Zellulose und des Holzes. — 12: F  
mann, Die Chemie der Cerealien in Beziehung zur Physiologie und Pathologie.

**XXIII. 1916.** 1/6: R. Kremann, Die Eigenschaften der binären Flüssig-  
gemische. — 7/8: W. Palmaer, Elektrolyse von Kochsalzlösungen in Verbindung  
der Zelluloseindustrie. Vortrag in der Versammlung schwedischer Chemiker in G  
burg 1913. — 9/10: G. Heller, Ueber die Konstitution des Anthranils. —  
Englands Kampf um den naturwissenschaftlichen Unterricht. Aus dem Englischen  
tragen und eingeleitet von H. Grossmann.

**XXIV. 1917.** 1/7: V. K. Löflfl, Die chemische Industrie Frankreichs. Eine ind  
wirtschaftliche Studie über den Stand der chemischen Wissenschaft und Indust  
Frankreich. — 8/12: H. Simonis, Die Chromone.

**XXV. 1919.** 1/6: Prof. Dr. C. Bülow, Eine neue Theorie vom Bau chemische  
bindungen. — 7: G. Schuchardt, Die technische Gewinnung von Stickstoff, Amn  
und schwefelsaurem Ammonium nebst einer Uebersicht der deutschen Patent  
8/12: Prof. Dr. A. Hesse und Prof. Dr. H. Grossmann, Englands Handelskrieg u  
Chemische Industrie. III.

**XXVI. 1920/21.** 1: Dr. E. Ott, Neuere Untersuchungen über Laktone. (1907—191  
2/4: Prof. Ed. Donath und Dr. techn. A. Lissner, Kohle und Erdöl. — 5/6: Dr. S.  
forss, Die Aethylenoxyde. Ihre Darstellung und Eigenschaften. — 7: Dr. M. C.  
burger, Neuere Ergebnisse der Forschung über die Radioaktivität des Kaliums und  
diums im letzten Dezennium. A. Chaston Chapman, Einige Fortschritte auf dem G  
der analytischen Chemie. Deutsch von Dr. O. Baudisch. — 8/9: Prof. Dr. H. Gross  
und Dr. M. Wreschner, Die anomale Rotationsdispersion. — 10/11: Dr. M. C. Ne  
ger, Das Problem der Genesis des Actiniums. — 12: Dr. F. V. v. Hahn, Ueber die  
stellung und Stabilität kolloider Lösungen anorganischer Stoffe. (Mit besondere  
rücksichtigung der Sulfidsole.)

**XXVII. 1922/24.** 1: Dr. W. Fuchs, Der gegenwärtige Stand des Gärungsproblem  
2/6: Prof. Dr. R. Kremann, Die Restfeldtheorie der Valenz auf Grund der organi  
Molekülverbindungen. — 7/9: Dr. R. Müller, Elektrochemie der nichtwässrigen Lösun  
11: Dr. M. C. Neuburger, Kristallbau und Röntgenstrahlen (4.—). — 12:  
Ed. Donath und Ing. Otto Burian, Die Kohlenoxyde (—50).

**XXVIII. 1924/26.** 1: Prof. Dr. Angelo Angeli, Die Analogien zwischen  
Verhalten einiger Derivate des Benzols und dem der entsprechenden Derivate der  
phatischen Reihe. — 2: Prof. Dr. S. Nametkin, Die Umlagerung alizyklischer Kern  
einander. — 3/5: Dr. techn. Karl Kürschner, Zur Chemie der Ligninkörper. — 6/7:  
Dr. H. v. Euler, Enzyme und Co-Enzyme als Ziele und Werkzeuge der chemischen Forsch  
— 8/9: Prof. Dr. H. Grossmann, Stickstoffindustrie und Weltwirtschaft. — 10/11:  
Dr. R. Kremann, Elektrolyse geschmolzener Legierungen. — 12: Dr. Josef Holl  
Die neueren Anschauungen über die Dynamik und Energetik der Kohlensäureassimila

**XXIX. 1926/27.** 1/3: Dr. W. Schroeder, Die Geschichte der Gashydrate. — 4/7: Dr.  
Walther Herzog, Die Verwertung der Nebenprodukte der Saccharinfabrikation  
8/9: Dr. E. Baars, Ueber den Zustand der Ammoniaklösungen. — 10/12: D  
Garzuly, Organometalle.

**XXX. 1928.** 1/4: Dr. Robert Müller, Die Chemie der Ammoniumsalze (Mole  
ban). — 5/6: Ed. Donath, Die Chemie der Ammoniumsalze (Mole

