

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 67 (1949)
Heft: 3: Zum Rücktritt von Schulrats-Präsident Rohn

Artikel: Die Bedeutung der Kristallchemie für den Ingenieur
Autor: Brandenberger, E. / Niggli, P.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-83976>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 18.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

$$(15) \quad \gamma \frac{R_s J_r}{\gamma_s'' d_m} = \gamma \frac{Q_s}{Q} \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} \frac{h J}{\gamma_s'' d_m} \\ = A'' + B'' \left(\frac{\gamma}{g} \right)^{1/3} \frac{g_s''^{2/3}}{\gamma_s'' d_m}$$

mit den dimensionslosen Konstanten

$$A'' = 0,047, \quad B'' = 0,25$$

als *neue Geschiebetransportformel* aufgestellt werden kann. Sie gibt bei der Auswertung der Versuchsergebnisse, die in Bild 5 dargestellt sind, für praktische Bedürfnisse befriedigende Übereinstimmung: Der Wert

$$A'' = \left(\frac{\gamma R_s J_r}{\gamma_s'' d_m} \right)_0 = \frac{\tau_0}{\gamma_s'' d_m}$$

gibt ein Mass für die Schleppspannung beim Beginn des Geschiebetransports. Die Zahl 0,047 entspricht der Extrapolation der in Bild 5 dargestellten linearen Funktion. Die direkte Feststellung dieses Grenzwertes ist, wie diejenige des Geschiebetransports in der Nähe des Grenzwertes, stets recht subjektiv. Als unterste

Grenze für absolute Ruhe muss etwa mit $\frac{\tau_0}{\gamma_s'' d_m} = 0,03$ gerechnet werden, was mit den Versuchen von Shields übereinstimmt [9]. Es mag erwähnt werden, dass Versuche über Kolkwirkung unterhalb von Stauwehren zu der analogen Beziehung führten: $\tau_0 = 0,045 \gamma_s'' d_{90}$, worin nun an Stelle von d_m der Wert d_{90} deshalb zu setzen ist, weil es sich um den Grenzzustand eines infolge der Erosion entstandenen bedeutend gröberen Korngemisches handelt, nämlich um eine natürliche Pflasterung der Sohle der Kolkwanne [10]. In [11] wird speziell versucht, das Erosionsproblem unterhalb von Stauwehren in direkten Zusammenhang mit dem Geschiebetransport Gl. (15) zu bringen.

Die durchgeführten Versuche erstrecken sich über folgende Bereiche: Gefälle J von 0,4 bis 20‰, Korngrösse von 0,0004 bis 0,03 m, Wassertiefen von 0,01 bis 1,2 m, Abflussmengen von 0,002 bis 2,0 m³/s, spezifische Gewichte von 1,25 bis 4,2 t/m³. Die vorhandenen Versuchseinrichtungen gestatteten,

den Wert $\frac{\gamma R_s J_r}{\gamma_s'' d_m}$ vom untern Grenzwert der Ruhe bis auf 0,2 zu steigern. Gegenwärtig wird die Versuchseinrichtung zur weiteren Steigerung dieser Zahl ausgebaut, um den Verhältnissen bei Flachlandflüssen (sehr feines Geschiebe, grosse Wassertiefen, kleines Gefälle) möglichst nahezukommen. Die in Ausführung begriffene Erweiterung der Versuchsanstalt [12], die eine Verdoppelung der Länge des Versuchsgewässers umfasst, wird wegen grösserer Genauigkeit der Gefällsmessung diese Versuchsarbeit wesentlich unterstützen.

Literaturangaben

- [1] SBZ Bd. 103, Nr. 13, E. Meyer-Peter, H. Favre und A. Einstein: «Neuere Versuche über den Geschiebetransport.»
- [2] Annales des Ponts et Chaussées 1935, H. Favre: «Recherches expérimentales sur les débits solides dans les cours d'eau.»
- [3] SBZ Bd. 103, Nr. 8, A. Einstein: «Der hydraulische oder Profilradius.»
- [4] Mitteilung Nr. 16 des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft 1923. A. Strickler: «Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen...»
- [5] Internationaler Verband für Wasserbauliches Versuchswesen, Bericht über die dritte Tagung, Stockholm, 1948. E. Meyer-Peter und R. Müller: «Formulas for Bed Load Transport.»
- [6] Mitteilung Nr. 4 der Versuchsanstalt für Wasserbau 1943. R. Müller: «Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauungen.»
- [7] Schweizer Archiv 1939, Nr. 8, A. H. Einstein und R. Müller: «Ueber die Ähnlichkeit bei flussbaulichen Modellversuchen.»
- [8] VDI Forschungsheft 361, Berlin 1933. Nikuradse: «Strömungsgesetze in rauen Röhren.»
- [9] Mitteilungen der preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffsbau, Berlin 1936, Heft 26. Shields: «Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung.»
- [10] Mitteilung Nr. 5 der Versuchsanstalt für Wasserbau 1944. «Experimentelle und theoretische Untersuchungen über das Kolkproblem». R. Müller: «Die Kolkbildung bei reinem Unterströmen und allgemeinere Behandlung des Kolkproblems.»
- [11] Internationaler Verband für Wasserbauliches Versuchswesen, Bericht über die dritte Tagung, Stockholm 1948. E. Meyer-Peter und R. Müller: «Affouillements en aval des barrages.»
- [12] SBZ, 66. Jahrgang, Nr. 14, S. 4. 48: «Bauvorhaben der Eidg. Technischen Hochschule in Zürich.»

Die Bedeutung der Kristallchemie für den Ingenieur

Von Prof. Dr. E. BRANDENBERGER und Prof. Dr. P. NIGGLI, Zürich

DK 548 3

Die Wechselbeziehung zwischen reiner und angewandter Forschung, Wissenschaft und Technik ist derartig innig, dass man oft kaum unterscheiden kann, was im Einzelfalle Ursache und was Folgerung genannt werden darf. Das wesentliche Kennzeichen der Entwicklung der Naturwissenschaften im vergangenen halben Jahrhundert ist die zunehmende Bedeutung der Strukturforschung. Atomkernphysik und Atomphysik im allgemeinen haben die mit Massenpunkten operierende klassische Physik ergänzt und vertieft. Die analytische Chemie entwickelte sich auf anorganischem und organischem Gebiet zur Struktur- und Stereochemie. In der Biologie, in Physiologie und Vererbungslehre behauptete die morphologische Richtung ihren bevorzugten Platz. Mannigfache Nutzanwendungen resultierten und beginnen eine Umgestaltung der Technik, Medizin und Energiewirtschaft. Die Ausnützung der neuerkannten Möglichkeiten zwang zugleich zur Verbesserung der Werkstoffe und zur genaueren Kenntnis und Beurteilung der Gebrauchsmaterialien. Viele dieser Stoffe müssen ganz besonderen Zwecken dienen. An sie werden sehr hohe Anforderungen gestellt. Sprunghaft ist die Verantwortung aller derjenigen gestiegen, die mit der Fülle dieser Stoffe zu arbeiten haben; immer neue Probleme werden von der Praxis gestellt und müssen von der wissenschaftlichen Forschung gelöst werden.

Es ist selbstverständlich, dass sich dies auch im Hochschulunterricht fühlbar machen sollte. Im Bau- und Maschineningenieurwesen hat lange Zeit die Materialkunde und insbesondere die Werkstoffchemie eine untergeordnete Rolle gespielt. Man hat die Materialien von bekannten Firmen bezogen oder höchstens vor Gebrauch nach wenigen klassischen Methoden prüfen lassen. Für übliche Routinearbeit bot dies in vielen Fällen eine genügende Sicherheit. Eine technische Hochschule verfolgt jedoch nicht das Ziel, Routinearbeiter auszubilden. Sie will mithelfen, Ingenieure zu formen, die neuartige Aufgaben anpacken können, die, wenn an Werkstoffe erhöhte Anforderungen gestellt werden, nicht versagen, sondern mindestens verantwortungsbewusst zu beurteilen vermögen, was nun vorzukehren ist. Für sie soll das Material,

mit dem sie arbeiten, nicht eine blosse Droge oder Fabrikware sein, voller Geheimnisse, die sie nicht interessieren, sondern ein lebendiger Stoff, der in ihren Händen Neuschöpfungen ermöglicht, weil sie über sein Wesen einigermaßen Auskunft geben können. Nur so wird verhindert, dass fehlerhafte Anwendungen erfolgen, neue Möglichkeiten übersehen werden und nach Formeln gerechnet wird, die nicht mehr werkstoffgerecht sind.

Hält man für den akademisch gebildeten Ingenieur eine derartige Einstellung gegenüber dem von ihm benutzten Konstruktionsmaterial für richtig, so ergibt sich von selbst, dass er in eine innigere Beziehung zur Chemie treten muss, als das bisher der Fall war. Denn ohne Kenntnis der chemischen und besonders der strukturell-chemischen Eigenschaften eines Werkstoffes steht er allen neu auftauchenden Problemen gegenüber hilflos da; er entzieht sich einer Verantwortung, die ihm überbunden ist. Dadurch aber, dass sich die Werkstoffchemie zu einem wesentlichen Teil zur Strukturforschung entwickelt hat, ist sie dem Ingenieurdenken auch näher gerückt, so dass die Neuorientierung erleichtert wird. Aufbau, Struktur, Formgebung und Einfluss der Gestalt auf die Verhaltensweise sind ja an sich für ihn geläufige Begriffe. Er wird Verständnis dafür aufbringen können, dass zur erschöpfenden Charakterisierung eines Werkstoffes die analytisch-chemischen Daten nicht genügen. Sein Interesse am Baumaterial wird sich steigern, wenn er erkennen kann, dass Formgebung und Gestaltung für den inneren Aufbau dieser Materialien und deren Eigenschaften genau so wichtig sind, wie sie es im Grossen gesehen, für das Werkstück oder Bauwerk sind, das er planen hilft.

Dass eine derartige Fassung der Werkstoff-Chemie erst in neuerer Zeit unter einheitlichen Gesichtspunkten entwickelt werden konnte, ist eine Folge der Gesamtentwicklung naturwissenschaftlicher Forschung und des Bedürfnisses nach hochwertigen Baustoffen. Es hat sich zur Beurteilung der Werkstoffe als notwendig erwiesen, abzuklären, welche Verbindungen die Atomarten miteinander bilden, wie die Struktur dieser Verbindungen beschaffen ist und in was für einem Gefüge-

verband sie vorliegen. Dazu reichen im Falle der Bau- und Werkstoffe die Methoden der klassischen und besonders der molekularen Chemie tatsächlich nicht mehr aus. Diese Stoffe sind ja nicht aus kleinen, in sich abgeschlossenen Molekülen aufgebaut, sondern sie gehören zu den Kristallverbindungen im weiteren Sinne (Festkörperverbindungen) mit dem wesentlichen Merkmal, dass bei ihnen die Atome statt zu Molekülen zu an und für sich beliebig grossen und damit stets willkürlich begrenzten Atomverbänden (z. B. zu beliebig langen Atomketten, beliebig ausgedehnten Atomschichten oder -gittern) verknüpft sind. Die Chemie der Werkstoffe hat daher in erster Linie den Anschluss bei der Kristallchemie — der Lehre von den Kristallverbindungen — zu suchen, die morphologisch-architektonischer Prinzipien nicht entbehren kann. Deren Methoden liefern für die Aufklärung der Konstitution der Werkstoffe die besonders geeigneten Verfahren.

Untersuchungen mittels der Röntgen- und Elektroneninterferenzen spielen eine Hauptrolle. Sie ergänzen die analytisch-chemischen und mikroskopisch-kristalloptischen Untersuchungen, die bereits seit langer Zeit hervorragende Dienste geleistet haben. Beispielhaft sei erwähnt, dass es erst röntgenographischen Untersuchungen gelang, die Natur der chemischen Verbindungen in den Zementklinkern endgültig abzuklären und dass eine eindeutige Kennzeichnung der Tonmineralien, die wesentliche Bestandteile vieler technischer Rohmaterialien und des Baugrundes sind, vielfach nur an Hand ihrer Röntgeninterferenzen möglich ist. Gleiches gilt von manchen anderen Kristallverbindungen in zahlreichen keramischen Werkstoffen. Auch die in metallischen Werkstoffen enthaltenen Kristallarten (etwa einfache oder doppelte Karbide, aber auch intermediäre Phasen anderer Zusammensetzung) lassen sich oft allein mittels des Röntgendiagramms sicher charakterisieren. Damit wird auch hier die übliche metallographische Prüfung (Anschnittuntersuchung mittels des Mikroskopes) durch den Röntgeninterferenzversuch ergänzt.

Es kommt hinzu, dass nicht wenige der Kristallverbindungen, wie sie in den Bau- und Werkstoffen auftreten, keine einfachen, dem Gesetz der multiplen Proportionen gehorchende Zusammensetzungen besitzen, sondern infolge Mischkristallbildung über einen grösseren oder kleineren chemischen Variationsbereich verfügen. Das Ausmass der Mischkristallbildung (also die Ermittlung der sog. Löslichkeitsgrenzen und ihrer Abhängigkeit von der Temperatur), die Art der im Einzelfall auftretenden Mischkristalle, sowie die Lösung der Frage, ob sich in ihnen unter bestimmten Bedingungen Ordnungsprozesse abspielen, ist für das technische Verhalten eines Werkstoffes mitbestimmend und verlangt röntgenographische Untersuchungsverfahren.

Noch wichtiger ist die Rolle der Untersuchungen mit Röntgenstrahlen für die eigentliche Kristallstrukturbestimmung. Wenn heute von sehr vielen Verbindungen, die Werkstoffe aufbauen oder doch wesentliche Bestandteile solcher bilden, ein experimentell gesichertes Bild des strukturellen Aufbaues besteht, so ist dies der erfolgreichen Anwendung röntgenographischer Methoden zur Strukturanalyse zu verdanken. Aus der hinreichend genauen Kenntnis dieser zahlreichen Kristallstrukturen liessen sich nicht nur eine ganze Reihe allgemeiner kristallchemischer Grundgesetze und Regeln ableiten, sondern es ergab sich auch die Möglichkeit einer in sich geschlossenen Systematik der Bau- und Werkstoffe nach konstitutionellen Gesichtspunkten. Dabei ist es von besonderer Bedeutung, dass mit der Struktur einer Kristallverbindung ihre möglichen Erscheinungsformen als fester Körper in unmittelbarer Beziehung stehen. Während zahlreiche Kristallverbindungen — darunter viele von technischem Interesse — nur in Form des Kristallzustandes bekannt sind, gibt es andere, die praktisch nur als amorph-feste Körper denkbar sind, und daneben wieder andere, die in einer ganzen Reihe verschiedener fester Erscheinungsformen auftreten können, so zum Beispiel auch als gemischt kristallisiert-amorphe Phasen. Solche Phasen treten besonders häufig auf bei vielen organischen Faserstoffen, die bekanntlich technisch bedeutsame Materialien wie Holz, Hanf, Baumwolle, Wolle und Seide bilden.

Manche Kunstfasern bevorzugen eindimensionale (also z. B. kettenförmige) Atomverbände und diese Eigenschaft bestimmt das strukturelle Wesen und Verhalten dieser Werkstoffgruppe. Demgegenüber ist bei den anorganischen Werkstoffen der nach drei Dimensionen beliebige Grösse errei-

chende Atomverband besonders verbreitet. Ueberwiegend besitzt er eine Architektur, die nur mit einer periodisch-regelmässigen (hier also gitterhaften) Anordnung der Atome verträglich ist. Diesen ausgesprochen kristallinen Charakter findet man bei den metallischen Werkstoffen (seien es Reinelemente oder irgendwelche Legierungen), den meisten Materialien von auserlesener Härte, den Stoffen grosser Feuerfestigkeit und beträchtlicher chemischer Widerstandskraft, sowie bei manchen Stoffen mit erheblichem elektrischem Isoliervermögen. Seltener ist der bei manchen anorganischen Gläsern verwirklichte Fall, bei dem dreidimensionale Atomverbände sowohl in regelmässiger Form wie auch in unregelmässiger Bauweise erscheinen können, dementsprechend im ersten Fall Kristalle, im zweiten dagegen amorph-feste Körper bilden. Sie leiten über zu jenen Stoffen, die infolge ihrer nur in unregelmässiger Form denkbaren Atomverbände im Festkörper nur die amorphe Erscheinungsform annehmen. Vor allem gilt dies für eine grosse Zahl von organischen Kunststoffen (plastics).

Selbstverständlich interessieren den Ingenieur in erster Linie die Beziehungen zwischen dem Aufbau der Werkstoffe und ihren Eigenschaften. Weitgehend wird das physikalische und chemische Verhalten eines Stoffes durch die Struktur der Baueinheiten und durch die Verbandsverhältnisse dieser Baueinheiten unter sich bestimmt. Auf alle Fälle gehören derartige Grössen in den Mittelpunkt einer jeden Betrachtung von Zusammenhängen zwischen Konstitution und Eigenschaften. Es gibt in der Tat nicht wenige Stoffmerkmale und zwar gerade technisch wichtige, die zum mindesten in einem qualitativ-anschaulichen Sinn unmittelbar mit der besonderen Struktur einer Kristallverbindung in Beziehung gebracht werden können. Wo solches nicht oder nur teilweise gelingt, kann es sich als notwendig herausstellen, das geometrische Bild einer Kristallstruktur durch das gitterphysikalische Studium ihrer dynamischen Verhältnisse zu erweitern. In andern Fällen sind die submikroskopischen Aufbauverhältnisse der Kristalle (wie auch der amorphen Körper) und daran anschliessend die Eigenarten des Mikro-, allenfalls auch des Makro-Gefüges von wesentlicher Bedeutung, so dass erst ihre Mitberücksichtigung das spezifische Verhalten eines Materials unter verschiedenen Bedingungen verstehen lässt. Ob in der einen oder der andern Richtung zu verfahren ist, stets wird für jede Erforschung von Beziehungen zwischen Aufbau und Eigenschaften der Werkstoffe die Kristallstruktur den Ausgangspunkt bilden. Damit aber wird die Kristallchemie zur besonders wichtigen Grundlage für ein tieferes Eindringen in das Wesen der Werkstoffe und es rücken kristallchemische Betrachtungen in unmittelbare Beziehung zu jeglicher Art der Ingenieurtätigkeit. Gestützt auf die an der E. T. H. und EMPA ausgeführten Forschungen und die gemeinsamen Erfahrungen ist in den letzten fünf Jahren in zusammenfassenden Darstellungen¹⁾ versucht worden, diese Betrachtungsweise näher zu erläutern.

Im wesentlichen sind Kristallchemie und Materialienkunde in inniger Weise mit Strukturforschung verbunden. Dieser ist es gelungen, hochwertige, aber auch spezifisch empfindliche neue Werkstoffe zu schaffen und in der Natur vorhandene zu bewerten. In den Händen eines urteilsfähigen Ingenieurs lassen sich mit solchen Stoffen bestandfähige Werke der Technik errichten, deren Ausführung bisher unmöglich schien. Benutzt ein Ingenieur, der nicht weiss, wie sehr die Stoffeigenschaften vom inneren Aufbau, der Darstellungsmethode und Verarbeitung abhängig sind, die gleichen Materialien, so steigert er in unverantwortlicher Weise die Gefahrenmomente, die allen Neukonstruktionen innewohnen. Aufgabe der technischen Hochschulen ist es, auch auf diesem Gebiet mit den Anforderungen der Zeit Schritt zu halten, d. h. in vermehrtem Masse den Ingenieur in das Wesen der chemischen Werkstoffkunde einzuführen, selbst wenn dadurch ein traditionelles Vorurteil (d. h. die Meinung, für Bau-, Maschinen- und Elektroingenieure seien chemische Kenntnisse nur von untergeordneter Bedeutung) in sehr mühsamer Arbeit überwunden werden muss.

¹⁾ E. Brandenberger, Röntgenographisch-analytische Chemie, 1945; E. Brandenberger, Grundlagen der Werkstoffchemie, 1947. — A. von Moos u. F. de Quervain, Technische Gesteinskunde, 1948. — P. Niggli, Lehrbuch der Mineralogie und Kristallchemie (3. Aufl.) 1941—42; P. Niggli, Grundlagen der Stereochemie, 1945; P. Niggli, Gesteine und Mineralagerstätten, 1948. — F. de Quervain, Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz, I, 1945.