

# Ueber innere Spannungen in flächenhaften Materialverbindungen

Autor(en): **Kühne, H. / Ensner, K. / Strässler, H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **67 (1949)**

Heft 38

PDF erstellt am: **20.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-84134>

## **Nutzungsbedingungen**

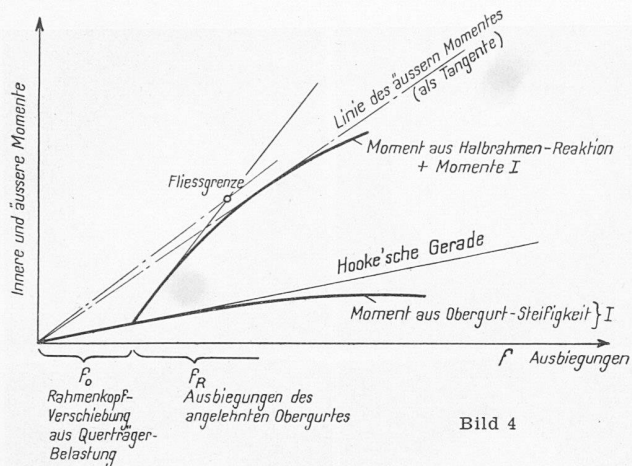
Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.



Ueber die Frage der Grösse von  $f_0$  dürften folgende Annahmen für die Berechnung massgebende Werte liefern: Eine für alle Querträger gleichmässige Belastung ergibt  $f_0 = 0$ . Zu vergleichen sind: Ein oder zwei oder drei belastete Querträger und unbelastete Nachbar-Querträger. Als Querträgerbelastung ist anzunehmen die auf diesen Querträger fallenden grösstmöglichen Axlasten plus 100 % Stosszuschlag.

Die grundsätzlichen Beziehungen sind auf Bild 4 graphisch dargestellt (wir betrachten hier als prinzipielle Darstellung nur zwei Felder und nehmen an, alles spiele sich im elastischen Bereich ab; auf den überelastischen Bereich wird weiter unten eingetreten). Die Obergurtkraft aus der Steifigkeit des Stabes wächst linear mit dem Ausbiegungspfeil  $f$ ; ebenso wächst linear die Obergurtkraft aus der Rahmenreaktion vom Anlehungsstadium an mit dem Pfeil  $f_R$ . Die Momentensumme der beiden «Hooke'schen Geraden» stellt die zur Verfügung stehenden inneren Momente dar; wir könnten z. B. bis zur Fließgrenze oder zur Bruchgrenze gehen, diese würde die Linie der zulässigen äusseren Momente bestimmen.

Nun aber werden für unsere Brückenbau-Verhältnisse im Unstabilitätszustand die Spannungen  $\sigma_p$  meist überschritten, so dass die Dehnungen nicht mehr proportional den Spannungen zunehmen; also wachsen auch die rückwirkenden Momente nicht mehr proportional den Ausbiegungen. Die Momentenlinien sind keine Geraden mehr, sondern Kurven; erst von den Unstabilitätslasten können wir auf die zulässigen Lasten schliessen: Es muss hier das *Traglastenverfahren* angewendet werden<sup>3)</sup>.

<sup>3)</sup> SBZ Bd. 123, S. 247\* (20. Mai 1944).

Vergleichende Berechnungen zeigen, dass die schweizerische Normenformel Orientierungswerte gibt, die durch einen entsprechend gewählten Sicherheitsgrad  $n$  dividiert, konstruktiv brauchbare Werte darstellen. Das Hooke'sche Gesetz des geradlinigen Zusammenhanges zwischen Spannung und Dehnung ist aber in erster Linie zu korrigieren durch das wahre Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

Die im elastischen Bereich durchgeführte Berechnung gibt uns ein «festes Gerippe», das aber durch den Ingenieur auf Grund der durch Versuche festgestellten materialtechnischen Eigenschaften zu interpretieren ist.

Das innere Moment  $M_{i0}$  aus Obergurtsteifigkeit wächst (bei Voraussetzung des Hooke'schen Gesetzes) linear mit dem Ausbiegungspfeil; es beträgt z. B. für zwei Felder:

$$M_{i0} = \frac{\pi^2 EJ}{(2a)^2} f$$

Von dem Ausbiegungspunkt an, wo sich der gegen die Brückenmitte hin verbogene Obergurt auf den Halbrahmen stützt, kommt ein Moment dazu, das sich aus der Grösse der Reaktion  $R$  berechnet.

$$M_{iR} = 0,4 a R, \text{ wobei } R = R_1 f_R$$

Die Summe beider Momente ergibt das zur Verfügung stehende innere Moment  $M_i$ . Das äussere belastende Moment  $M_a$  für Wellenmitte steigt linear mit dem Wert  $f = f_0 + f_R$ .

Alle gebräuchlichen Konstruktionsmaterialien (Baustahl, Bauholz, Leichtmetalle usw.) weisen eine Proportionalitätsgrenze auf; bei Spannungen über diese hinaus tritt an Stelle des Moduls  $E$  ein modifizierter und variabler Modul  $T$ ; die inneren Momentenlinien sind keine Geraden mehr, sondern nach der  $f$ -Achse hin konkav gekrümmte Kurven (Bild 4).

$$T J = M \rho; \quad M = \frac{T J}{\rho}$$

wobei  $\rho$  den Krümmungsradius des Obergurtes in der Mitte bezeichnet. Bei sinuslinienförmiger Ausbiegungsaxe ist

$$\rho = \frac{l^2}{\pi^2 f}$$

wobei  $l$  die Wellenlänge darstellt.

Die Tangente an die Summe dieser Kurven ergibt das Mass für die grösste Obergurtkraft im Stabilitätsfall. Es zeigt sich in dieser Betrachtung, dass auch hier die Gleichgewichtslage am Tragsystem kein Spannungsproblem, sondern ein Stabilitätsproblem darstellt.

Diese kurze Abhandlung wollte vor allem Einsicht in die qualitativen Verhältnisse geben und nicht eingehen auf die quantitativen Werte.

## Ueber innere Spannungen in flächenhaften Materialverbindungen

DK 539.319 : 668.3

Von H. KÜHNE, Mitarbeiter K. ENSNER, H. STRÄSSLER

Materialgerechtes Trennen und Verbinden ist eine der wichtigsten Aufgaben des Konstrukteurs. Wo Materialien verschiedener Beschaffenheit miteinander in Berührung treten, zeigen sich alle gegenseitigen physikalischen und chemischen Unterschiede in ausgeprägter Form. Sie wirken sich unter anderem durch Spannungen, Korrosionserscheinungen usw. aus. Je starrer ihre Verbindung ist, um so grösser werden im allgemeinen die Spannungen, die durch thermische, hygroskopische oder konstitutionelle Volumenänderungen hervorgerufen werden.

Flächenhaftes Verbinden mit dünnen Schichten organischer oder anorganischer Bindemittel (z. B. Zemente, Lote, Leime, Klebstoffe, Kitten) ermöglicht in vielen Fällen eine Steigerung der Materialausnützung, sowie eine Vereinfachung der Herstellung und hat daher in der modernen Technik eine starke Verbreitung gefunden. Neben alten lang bewährten Verfahren hat die Kunststoffindustrie neue Verbindungsmöglichkeiten geschaffen, so dass heute schon verschiedenartigste Werkstoffe miteinander verbunden werden können. Wir dürfen annehmen, dass neue Erkenntnisse über das Wesen der Oberflächenhaftung weitere und vollkommener Verbindungen ermöglichen.

Obschon die Verbindungsverfahren teilweise eingehend untersucht wurden, sind ihre Besonderheiten dem Konstrukteur meist wenig bekannt. Oft wird bei der Gestaltung einer solchen Konstruktion nur ein fiktiver Endzustand vorausgesetzt, wobei die zu verbindenden Teile als homogenes Ganzes betrachtet werden. Die Schicht des Bindemittels an sich, wie

auch die Einflüsse des Herstellungsprozesses werden vernachlässigt, was zu völlig unerwarteten Schäden und ganz einseitiger Beurteilung der Verbindungsmöglichkeit führen kann. Es erscheint daher angezeigt, einige jener Faktoren einander gegenüberzustellen, welche die Eigenschaften der Verbindung von Seiten der spezifischen Verfestigungsbedingungen des Bindemittels namhaft beeinflussen können. Dabei sei vorausgesetzt, dass ein Verbindungsmittel vorliegt, dessen Bindeaffinität zum Werkstoff eine Festigkeit zwischen Bindemittel und Werkstoff garantiert, die mindestens nahe an die Festigkeitseigenschaften des schwächsten Materiales (verfestigtes Verbindungsmittel oder Werkstoff) herankommt.

Um das Verbindungsmittel mit der Materialoberfläche in innige aktive Berührung zu bringen, wurden bisher hierfür Stoffe verwendet, die vor der endgültigen Verfestigung eine flüssige bzw. plastische, mehr oder weniger viskose Phase durchlaufen. Der Verflüssigungs- und Wiederverfestigungsvorgang kann verschiedener Natur sein, so z. B.:

1. Verflüssigung durch Temperaturerhöhung über den Schmelzpunkt des Bindemittels, Verfestigung durch Rückkühlung unter den Schmelzpunkt (z. B. Metall-Lote, Thermoplaste).
2. Verflüssigung durch Auflösen des Bindemittels in einem Lösungsmittel, Wiederverfestigung durch Verdunstung des Lösemittels (z. B. Gummi arabicum, Zelluloseester).

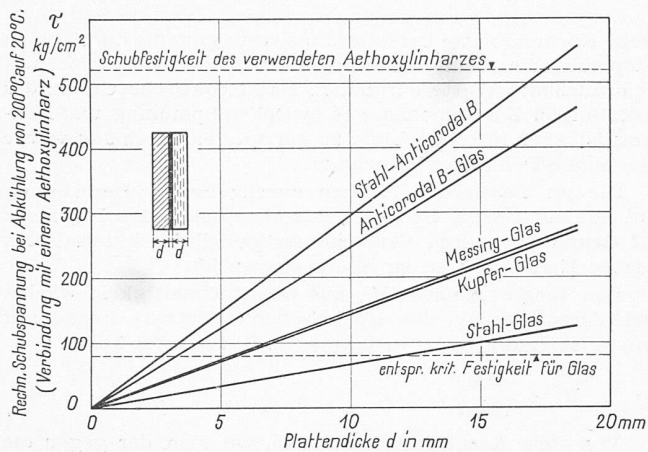


Bild 1. Rechnerische Schubspannungen infolge verschiedener thermischer Retraktion von je zwei flächenhaft mit einem Aethoxylinharz verbundenen Werkstoffen. Die kritischen Festigkeiten für das Harz und für Glas sind auf Grund von Versuchen eingetragen

3. Emulgieren des Verbindungsmittels in einer Flüssigkeit, Verfestigung durch Verdunstung oder Abzug der Flüssigkeit (z. B. Bitumenemulsionen, Paraffinemulsionen, Polyvinylacetatemulsionen).
4. Erreichung einer «weichen» Gelphase durch Quellung in einer Flüssigkeit und Verflüssigung durch Temperaturerhöhung über den Schmelzpunkt des Geles. Wiederverfestigung durch Rückkühlung und Verdunstung eines Teiles der Quellflüssigkeit (z. B. Glutinleime).
5. Verflüssigung durch Temperaturerhöhung über den Schmelzpunkt, Verfestigung durch Polymerisation, Kondensation, evtl. unter Einwirkung eines Katalyten oder Vernetzung mit Hilfe eines Vernetzungsmittels (z. B. Phenolharzfilme, Aethoxylinharze).
6. Verflüssigung durch Zusammengeben verschiedener gegenseitig chemisch aktivierbarer Stoffe in einer Flüssigkeit, Verfestigung durch chemische Verbindung (evtl. unter zusätzlicher Anwendung erhöhter Temperatur). Die «Löse»-Flüssigkeit wird teilweise an die feste Substanz gebunden. Der Rest verflüchtigt sich ganz oder teilweise (z. B. Kaseinleime, hydraulische Bindemittel).
7. Verflüssigung durch Auflösung von Kondensaten oder Polymerisaten niedriger Stufe in einer Flüssigkeit, meist unter Beifügung eines Katalyten. Härtung eventuell bei höherer Temperatur durch Erreichen einer höheren, festen Kondensations- oder Polymerisationsstufe, wobei die «Löse»-Flüssigkeit wieder entweicht (z. B. Harnstoff-, Melamin-, Resorcinharzleime).

Es sei hier nebenbei erwähnt, dass sich bei einzelnen Vorgängen auch Stoffe abspalten können (z. B. organische Säuren, Wasser), die leicht Anlass zu Korrosionserscheinungen oder Blasenbildung geben. Bei der Verwendung feuchtigkeits- undurchlässiger Werkstoffe bereitet auch das Vorhandensein nicht mehr benötigter Quell- oder Löseflüssigkeit Schwierigkeiten, sodass in diesem Falle flüssigkeitsfreie Verbindungsmittel im allgemeinen vorzuziehen sind.

Der Verflüssigungs- und Wiederverfestigungsvorgang kann von inneren oder gegenseitigen Dimensionsänderungen des Verbindungsmittels und der Werkstoffe begleitet sein. Unterschiedliche Dimensionsänderungen benachbarter Materialpartien haben innere Spannungen zur Folge. Betrachtet man die oben zusammengestellten Verbindungsprozesse, so erkennt man, dass folgende Vorgänge innere Spannungen erzeugen können:

- a. Temperaturänderungen, sofern die thermischen Dehnungs- bzw. Retraktionskoeffizienten der Werkstoffteile untereinander oder gegenüber dem Bindemittel verschieden sind (z. B. Verbindungen von Metallen mit Glas mit heisshärtenden Kunststoffen).
- b. Temperaturgefälle innerhalb des Bindemittels bzw. der Werkstoffteile (z. B. Glas).
- c. Abgabe nicht mehr benötigter Flüssigkeit aus dem Verbindungsmittel mit nachfolgender Volumenänderung dieses Mittels (z. B. stark verdünnte Leime).
- d. Aufnahme von Flüssigkeit, die vom Bindemittel herrührt, durch einen quellfähigen Werkstoff (z. B. Holz) und dadurch verursachte Volumenänderung dieses Werkstoffes.

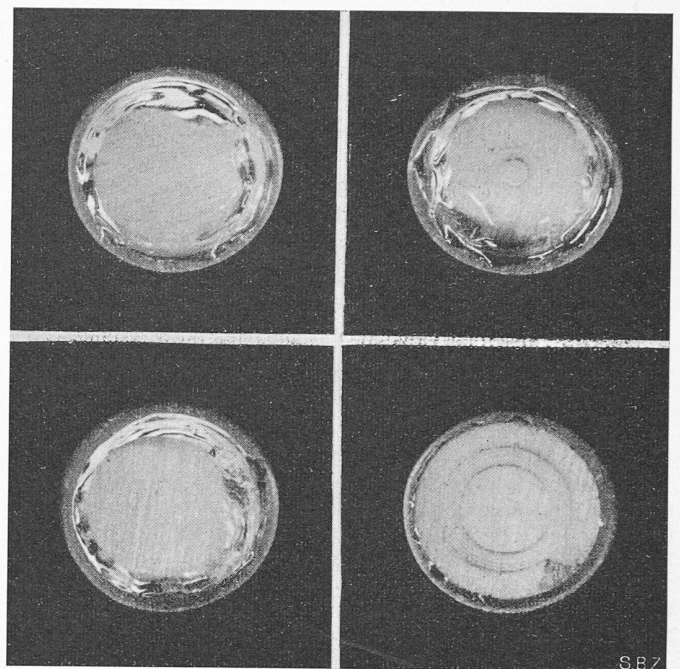


Bild 2. Rissbildungen in Glas infolge verschiedener thermischer Retraktion mit dem Glas verbundener Metall-Nocken. Verbindung von Stahl (rechts unten), Kupfer (rechts oben), Anticorodal B (links oben) und Messing (links unten) mit Hilfe eines Aethoxylinharzes bei 200 °C. Rissbildung nach Rückkühlung auf 20 °C, deutlich nach der Grösse der Retraktionskoeffizienten der Metalle (am stärksten bei Anticorodal, kaum erkennbar bei Stahl). Vermeidung der Risse durch Herabsetzung der Härtungstemperatur und durch langsame Abkühlung

- e. Durch den gleichen Vorgang (d) verursachte Quellung von Werkstoffen verschiedener spezifischer Quellmasses (z. B. Sperrholz).
- f. Sättigungsgefälle im Verbindungsmittel bzw. im Werkstoff infolge Abgabe bzw. Aufnahme von Flüssigkeit, die vom Verbindungsmittel nicht mehr benötigt wird.
- g. Verfestigungsvorgänge, die aus Konstitutionsgründen eine Volumenänderung des Verbindungsmittels zur Folge haben (z. B. bei gewissen Kondensationsvorgängen oder wenn ein Bindemittel im Verlaufe einer Abkühlung Zustandsänderungen durchmacht).
- h. Verfestigungsgefälle im Verbindungsmittel (z. B. infolge beschleunigter oder verlangsamter Verfestigung an den Berührungsstellen mit dem Werkstoff).

Die Grösse der auftretenden inneren Spannungen ist natürlich neben den genannten Vorgängen durch die Elastizitäts- und Schubmoduli der Werkstoffteile und des festen Bindemittels massgebend beeinflusst. Die Bruchgefahr hängt im weiteren von den Festigkeitseigenschaften der beteiligten Materialien ab. Bleibt das Bindemittel plastisch, so können sich innere Spannungen unter Umständen ganz oder teilweise ausgleichen.

Eine genaue Berechnung der Bruchgefahr ist meist schwierig, da die Materialeigenschaften von Klebstoff und Bindemittel in allen Phasen des Verbindungsprozesses selten genügend genau bekannt sind. Man ist daher im allgemeinen auf Versuche angewiesen. Ueber die Verteilung der inneren Spannungen können auch photoelastische Untersuchungen wertvollen Aufschluss geben.

Nachfolgendes Beispiel soll ein Bild über die Grössenordnung der inneren Spannungen geben. Eine Stahlplatte wurde mit einer Anticorodalplatte unter Verwendung eines Aethoxylinharzes verbunden. Das Bindemittel wurde dabei auf die vorgewärmten Metallplatten aufgeschmolzen und die zusammengelegten Platten bei 200 °C eine Stunde ausgehärtet. Beim Abkühlungsvorgang verhielt sich das Bindemittel bis gegen 50 °C teilweise plastisch. Infolge der grösseren Retraktion gegenüber dem Metall entstehen im Bindemittel Zugspannungen und im Metall Druckspannungen. Bei einer Fugendicke von 0,1 mm und Plattenstärken von 15 mm treten infolge der Abkühlung von 200 °C auf 20 °C im Bindemittel rechnerische Eigenspannungen von 65 kg/cm² auf, während sie im Metall weniger als 1 kg/cm² betragen.

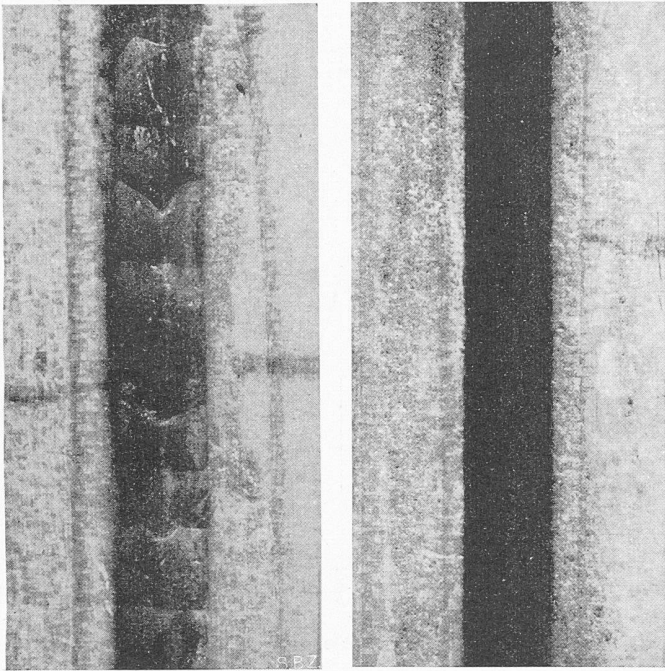


Bild 4. 3 mm starke Leimfuge ohne innere Spannungsrisse. Mit organischem Füller beeinflusster Harnstoff-Formaldehyd-Leim zwischen Tannenholz. Die den Schwindvorgang des Leimes hervorrufende Wasserabgabe hat teilweise schon bei nachgiebiger Konsistenz des Leimes stattgefunden, sodass an Stelle der Risse (s. Bild 3) eine dünnere Fuge mit konkav eingezogenen Rändern entstanden ist.

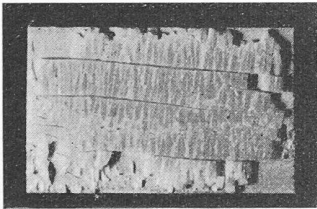


Bild 3. 3 mm starke Leimfuge mit inneren Spannungsrisse. Reiner Harnstoff-Formaldehyd-Leim zwischen Tannenholz. Das untere Bild zeigt, dass die Schwindspannungen des Leimes sogar Längsrisse im Holz hervorgerufen haben. Solche Zerstörungen können z. B. durch niedrig gehaltene Fugendicken ( $\omega < 0,2 \text{ mm}$ ) oder durch Füller vermieden werden

Verbindet man, wie im vorliegenden Falle, Metalle mit verschiedenen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, so entstehen in den Metallen Zug- und Druckspannungen, die sich den bereits erwähnten Eigen-

spannungen superponieren. Die mittlern Normalspannungen in einer Anticorodal-Eisenplatte betragen bei einer Abkühlung von  $200^\circ \text{C}$   $300 \text{ kg/cm}^2$  in beiden Metallen, die Schubspannungen am Fugenrand  $450 \text{ kg/cm}^2$ .

Da die Schubspannungen von den Plattendicken abhängig sind, können nicht beliebig dicke Platten miteinander verklebt werden. Bild 1 zeigt den Zusammenhang zwischen rechnerischen Schubspannungen und Plattendicken für die Verbindung einiger Werkstoffe mit Aethoxylinharz bei  $200^\circ \text{C}$  nach Abkühlung auf  $20^\circ \text{C}$ .

Die grösste Schubspannung tritt in jener Ebene auf, in der das Bindemittel denjenigen Werkstoff berührt, der die grössere Retraktionsdifferenz gegenüber dem Bindemittel aufweist. Dies wird durch Bruchbilder bestätigt, die bei ausgeführten Versuchen erhalten wurden. Die Bilder 2 bis 5 veranschaulichen einige Beispiele der Auswirkung von inneren Spannungen.

Von der Industrie und Forschung werden grosse Anstrengungen unternommen, um Verbindungsprobleme durch Kunstgriffe und Spezialisierung der Verbindungsmittel zu meistern. Dies gelingt umso leichter, je mehr man sich über die Verbindungsvorgänge selbst im klaren ist. Es würde an dieser Stelle zu weit führen, all die vielen Möglichkeiten einer Reduktion innerer Spannungen zu erörtern. Neben der in Bild 4 behandelten Füllung von Kunstharzleimen sind andere Verfahren bekannt geworden, durch modifizierte Führung des Härtungsvorganges auch dicke, angenähert spannungsfreie Leimfugen zu erzielen (sog. «gap-filling»-Leime). Auch durch Schaum-

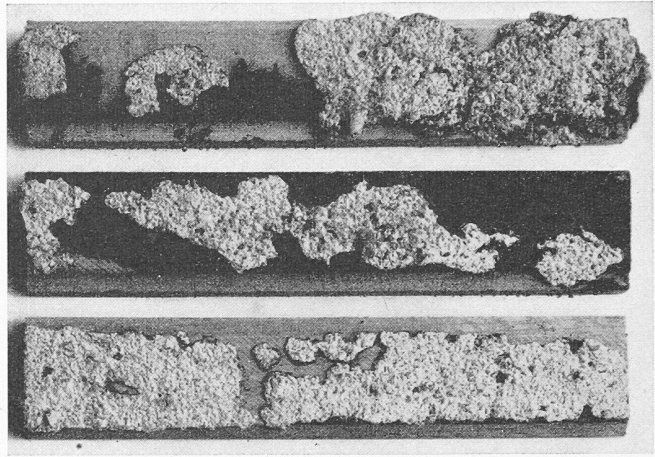


Bild 5. Bruchbilder von Holz-Kleinparkettstäben, die mit Hilfe einer Bitumenemulsion auf Zementestrich aufgezogen waren. Die im vorliegenden Fall schlechten Festigkeitseigenschaften des Zementestrichs verunmöglichten die Aufnahme der Spannungen, die infolge des Quellens der Parkettstäbchen unter Einwirkung des Emulsionswassers aufgetreten sind. Trotz der plastischen Eigenschaften des Bitumens erfolgte ein Bruch vorwiegend im Zementestrich.

leime werden die inneren Spannungen wesentlich verändert. Ein klassisches Beispiel für eine folgerichtige Entwicklung von Verbindungsmitteln stellt übrigens die Geschichte der Mörtel und des Betons dar.

## Ueber Schadenbildungen an Zementröhren

Von E. HERZIG

DK 621.643.253.0046

Unter der Leitung von Prof. Dr. M. Roß wurden an der EMPA zahlreiche materialtechnische Untersuchungen an unarmierten und armierten Zementröhren durchgeführt. Ein Teil dieser Untersuchungen (Bericht EMPA Nr. 29 und 108 bzw. SVMT Nr. 10 und 35) diente zur Aufstellung und Kontrolle von Normen für die Herstellung von Zementröhren. Weitere Veröffentlichungen betreffen Untersuchungen, die im Auftrag der Zementröhren erzeugenden Industrie durchgeführt worden sind.

Diese Untersuchungen wie auch die laufenden Prüfungen der an die EMPA eingesandten Röhren ergaben meist Rohrqualitäten, die erheblich über den Normenwerten lagen. Es war eine Ausnahme, wenn ein Rohr den Normen nicht entsprach. Im Jahre 1937 erschien der EMPA-Bericht Nr. 108 (bzw. SVMT-Bericht Nr. 35) mit einer Arbeit von A. Voellmy «Bruchsicherheit eingebetteter Rohre», in der einige Schadenfälle besprochen sind<sup>1)</sup>. Seither ist die EMPA in rd. 20 Schadenfällen zugezogen worden, bei denen meist eine grössere Zahl von Röhren gebrochen oder gerissen waren. Zerstörungen durch Korrosion, chemische Angriffe usw. sind dabei nicht berücksichtigt. Die Kostenfolgen solcher Schadenfälle waren oft bedeutend, mussten doch in einzelnen Fällen 50 bis 80 Stück Röhren wieder ausgegraben, ersetzt und neu verlegt werden. Es ist anzunehmen, dass noch weitere Schadenfälle aufgetreten sind, von denen die EMPA keine Kenntnis erhielt.

Die Schäden wurden in der Regel bald nach dem Einbau festgestellt und waren im wesentlichen stets gleicher Art. Sie bestanden in mehr oder weniger klaffenden Scheitel- und Sohlenrissen und weniger breiten Rissen in den Kämpfern, die aber erst beim Ausgraben der Röhren festgestellt werden konnten. Diese Risse erstreckten sich stets über eine grössere Zahl benachbarter Rohre. Meist handelte es sich um Röhren von über 60 cm Durchmesser.

In den meisten dieser Schadenfälle wurde von den Betroffenen die Qualität der Zementrohre angezweifelt und daher stellt sich die Frage, ob die eingangs erwähnten Untersuchungsergebnisse an Röhren, die an der EMPA geprüft wurden, nicht zu günstig sind, verglichen mit der durchschnittlich in der Praxis verwendeten Rohrqualität.

Die Untersuchung der Ursachen der Schäden ergab Folgendes: a) In keinem der von der EMPA untersuchten Fälle

<sup>1)</sup> Vgl. auch A. Voellmy: Bemessung und Bruchsicherheit von Rohrleitungen, SEZ Bd. 122, S. 177\* ff. (1943). Red.