

Faserbewehrter Beton^{*)}

Von Gerd Wischers, Düsseldorf

Übersicht

Beton ist zur Aufnahme und Übertragung großer Druckkräfte ein sehr wirtschaftlicher Baustoff. Sein Tragvermögen und seine Dehnung bei Zugbeanspruchung sind dagegen klein, so daß der Einbau von Fasern aus Stoffen mit einer hohen Zugfestigkeit eine deutliche Verbesserung der Gebrauchseigenschaften erwarten läßt. Als Faserwerkstoff bieten sich insbesondere Stahl, Asbest, Glas und Kunststoff an, die sich als Faserbewehrung verschiedenen Formen und Anordnungen lassen. — Im Gegensatz zu einigen anderen faserverstärkten Stoffen ist die Bruchdehnung der Matrix Beton immer wesentlich kleiner als die der eingebetteten zugfesten Fasern, so daß bei faserbewehrtem Beton die Matrix bereits in einem von vielen feinen Rissen durchsetzten Zustand vorliegt, bevor die Zugfestigkeit der Fasern voll ausgenutzt wird. Ob und in welchem Maße die Zugfestigkeit kurzer Fasern darüber hinaus genutzt werden kann, hängt vor allem von deren geometrischer Form und Verteilung sowie von der Haftung zwischen Faser und Matrix ab. — Ein technischer und wirtschaftlicher Vergleich zwischen üblichem Stahlbeton und einem mit kurzen Stahlfasern bewehrten Beton läßt es als wenig wahrscheinlich erscheinen, daß der Stahlfaserbeton den Stahlbeton in seinen derzeitigen vorwiegenden Anwendungsbereichen ersetzen wird. Der faserbewehrte Beton weist jedoch als technologische Vorzüge ein beträchtlich größeres Formänderungsvermögen und einen höheren Widerstand gegen dynamische Beanspruchung auf, die in besonderen Fällen eine sinnvolle Anwendung ermöglichen. — Asbest hat sich als Faser in zementgebundenen Werkstoffen technisch und wirtschaftlich sehr bewährt. Die Anwendung von ungeschützten Glasfasern setzt eine hinreichende Alkalibeständigkeit voraus, die von Kunststofffasern ist durch deren besonders große Dehnbarkeit beschränkt.

1. Allgemeines

Der Wert eines Baustoffs ergibt sich aus der Summe seiner Gebrauchseigenschaften bezogen auf seinen Preis. Bedingt ein in seinen Eigenschaften verbesserter Baustoff einen höheren Preis, so stellt sich die Frage, ob die Verbesserung der Eigenschaften auch diesen Preisanstieg wert ist. Für eine Beurteilung der Ent-

^{*)} Gekürzte Fassung eines Vortrages auf der Technisch-wissenschaftlichen Zement-Tagung 1973 des Vereins Deutscher Zementwerke am 14. September in München.

wicklungsmöglichkeiten des faserbewehrten Betons¹⁾ ist daher von Bedeutung, ob und welche Betoneigenschaften durch eine Faserbewehrung verbessert werden können und ob das Verhältnis Eigenschaften zu Preis sich durch Faserbewehrung günstiger gestalten läßt als mit den bisherigen Baustoffen. Dazu erscheint es nötig, sich zunächst etwas breiter mit den dabei maßgebenden Eigenschaften bei Baustoffen allgemein auseinanderzusetzen.

Bei tragenden Konstruktionen im Bauwesen ist für die technische und wirtschaftliche Beurteilung der Baustoffe in erster Linie die Aufnahme und Übertragung von Kräften maßgebend. In Bild 1 sind in einem Säulendiagramm die Kosten in DM für eine zulässige Kraftübertragung von 1 Mp über eine Strecke von 1 m in

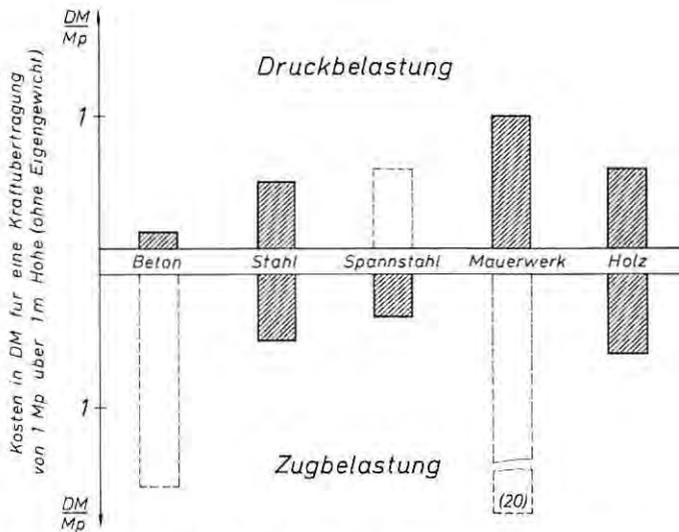


Bild 1 Kostenvergleich für eine zulässige Kraftübertragung von 1 Mp über eine Strecke von 1 m in Kräftrichtung durch Bauelemente aus verschiedenen Baustoffen

Kraftrichtung aufgetragen, und zwar im oberen Teil des Diagramms für Druckbelastung und im unteren Teil für Zugbelastung. Zugrunde gelegt sind nicht die reinen Stoffkosten, sondern Angebotspreise (Mitte 1973) für vergleichbare Bauteile aus diesen Baustoffen. Miteinander verglichen sind die Baustoffe Beton, Stahl, Spannstahl, Mauerwerk und Holz. Beim Stahl sind Baustahl St 37 und Betonstahl IIIb zusammengefaßt, beim Mauerwerk solche aus Ziegeln und Kalksandsteinen. Einschränkend ist

¹⁾ Hinsichtlich des umfangreichen Schrifttums wird auf eine gemeinsam mit Herrn Dipl.-Ing. B. Dartsch verfaßte Broschüre über faserbewehrten Beton verwiesen, die 1975 im Beton-Verlag erscheinen wird.

zu Bild 1 anzumerken, daß hierbei das Eigengewicht der Baustoffe nicht berücksichtigt worden ist, was sich bei größeren Spannweiten zugunsten jener Baustoffe auswirkt, bei denen das Verhältnis Eigengewicht zu aufnehmbarer Kraft klein ist.

Beton ist hinsichtlich der Aufnahme von Druckkräften der mit Abstand wirtschaftlichste Baustoff. Die Aufnahme gleicher Druckkräfte durch Stahl kostet größenordnungsmäßig viermal so viel. Mauerwerk ist hinsichtlich der Aufnahme von Druckkräften noch teurer als Stahl. Doch sind für die Bemessung von Mauerwerk häufig andere Kriterien maßgebend, etwa Raumabschluß mit Wärme- und Schalldämmung. Bei Zugbelastung ändert sich die Rangfolge. Nicht nur aus technischen, sondern auch aus wirtschaftlichen Gründen ist eine Aufnahme von größeren Zugkräften durch Beton und insbesondere durch Mauerwerk nicht möglich. Stahl und vor allem hochfester Spannstahl sind hierbei um ein Vielfaches wirtschaftlicher.

Bei biegebeanspruchten Bauteilen treten in verschiedenen Bereichen des gleichen Querschnitts Druck- und Zugbeanspruchungen auf, so daß Baustoffe für solche Bauteile in der Lage sein müssen, sowohl Zug- als auch Druckkräfte wirtschaftlich aufzunehmen. Die Verbundwerkstoffe Stahlbeton und Spannbeton sind für diese Beanspruchungsart deshalb besonders wirtschaftlich, weil dabei die Druckkräfte dem Beton und die Zugkräfte dem Bewehrungsstahl zugeordnet werden.

2. Werkstoffverhalten unter Druck- und Zugbeanspruchung

Für die Tragfähigkeit eines Baustoffs ist nicht seine Bruchfestigkeit maßgebend, sondern die zulässige Beanspruchung, die um einen bestimmten Betrag kleiner ist als die Bruchfestigkeit. Für den Betrag dieser Abminderung sind aufgrund von Sicherheitsbetrachtungen auch die nachfolgend behandelten stoffspezifischen Eigenschaften und Vorgänge beim Bruch des beanspruchten Baustoffs maßgebend.

Jeder auf Druck oder Zug beanspruchte Stoff verformt sich nach bestimmten Gesetzen. In Bild 2 sind schematisch die für die wesentlichsten Konstruktionsbaustoffe kennzeichnenden Spannungs-Dehnungs-Linien dargestellt (auf der Ordinate die Spannung σ bis zur Bruchfestigkeit β und auf der Abszisse die Dehnung ε in ‰).

Idealelastische Stoffe verformen sich praktisch bis zum Bruch linear und voll elastisch, d. h. sie weisen nach dem Bruch keine bleibende Dehnung auf. Hierzu gehören die meisten anorganischen, nichtmetallischen Stoffe, wie z. B. viele Gesteine, Glas und Asbest. Die idealelastisch-idealplastischen Stoffe (elasto-plastisch) verformen sich ebenfalls bis unmittelbar unterhalb der Bruchspannung linear und elastisch. Sie verformen sich jedoch dann vor Eintreten des Bruchs noch um ein beträchtliches Maß plastisch, und diese plastische Dehnung bleibt nach dem Bruch erhalten. Viele Metalle sind elasto-plastische Stoffe. Im rechten Diagramm von Bild 2 sind Spannungs-Dehnungs-Linien eines

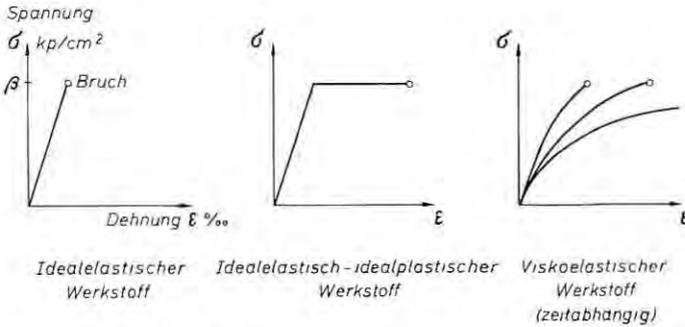


Bild 2 Schematische Darstellung von Spannungs-Dehnungs-Linien verschiedener Werkstoffe

viskoelastischen Stoffes dargestellt, bei dem bei jeder Spannung neben der elastischen Verformung ein plastisches Fließen auftritt, d. h. eine stark von der Zeit abhängende und nur zum geringen Teil reversible Verformung. Typisch ist ein solches Verhalten für viele Kunststoffe, aber auch Beton weist unter Beanspruchung ein viskoelastisches Verhalten auf.

Der Bruch eines auf Druck oder Zug beanspruchten Werkstoffs wird nicht durch die Kraft bzw. die Spannung hervorgerufen, sondern durch die Energie, die er bis zur Erschöpfung seiner Tragfähigkeit aufnehmen kann. Bei der einachsigen Festigkeitsprüfung entspricht die gesamte für den Bruch erforderliche Energie (Bruchenergie) der Arbeit, die aus dem Produkt der Kraft bzw. Spannung und der Verformung in Beanspruchungsrichtung entsteht. Die Bruchenergie ist also gleich dem Integral der Spannung über die Dehnung, d. h. sie entspricht der Fläche unter der Spannungs-Dehnungs-Linie. Wie Bild 3 zu entnehmen ist, kann daher bei gleicher Festigkeit β die für den Bruch erforderliche Energie sehr unterschiedlich sein. Es kann sogar sein, daß ein Baustoff mit höherer Festigkeit eine kleinere Bruchenergie erfordert. Für die zulässige Beanspruchung eines Baustoffs ist also nicht nur seine Festigkeit, sondern auch die insgesamt aufnehmbare Bruchenergie maßgebend, vor allem bei sich wiederholenden Krafteinwirkungen (dynamischen Beanspruchungen).

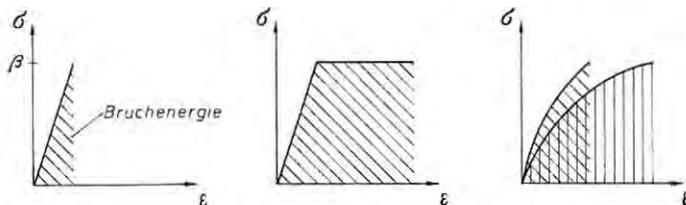


Bild 3 Verschieden große Bruchenergie von Stoffen gleicher Bruchfestigkeit β (schematisch)

Für die zulässige Zugbeanspruchung eines Baustoffs ist ferner seine Zähigkeit, die auch als Duktilität bezeichnet wird, eine wichtige Eigenschaft. Zähigkeit und das entgegengesetzte Verhalten (Sprödigkeit) werden an Hand von Bild 4 erläutert. Weist ein Werkstoff eine Kerbe mit dem Kerbradius r_0 im Kerbgrund auf (Darstellung links) und gerät dieser Bereich unter Zugspannung, dann tritt insbesondere bei sehr kleinem Kerbradius unmittelbar am Kerbgrund eine große Zugspannungsspitze auf. Bei einem zähen Werkstoff (Darstellung Mitte) wird diese Spannungsspitze durch plastische Verformung im Kerbgrund abgebaut, d. h. der Kerbradius wird durch plastische Verformung größer, und damit nimmt die Spannungskonzentration stark ab. Ein sprö-

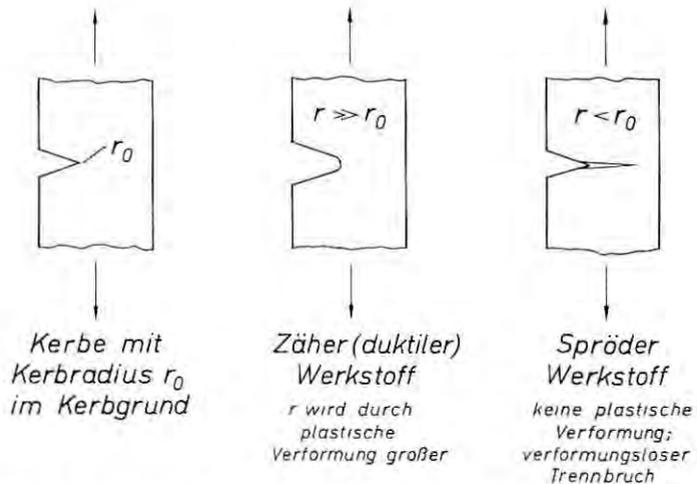


Bild 4 Auswirkung einer Kerbe auf zähen und spröden Werkstoff unter Zugbeanspruchung (schematisch)

der Werkstoff (Darstellung rechts) kann sich nicht plastisch verformen. Die Spannungskonzentration im Kerbgrund führt daher zu einem Abriß mit einem noch kleineren Radius im Rißgrund. Dadurch entsteht mehr oder weniger schlagartig ein verformungsloser Trennbruch. Idealelastische Stoffe, wie z. B. Glas, sind daher immer auch spröde. Stoffe mit großer plastischer Verformung sind auch zäh. Viskoelastische Stoffe, wie z. B. Kunststoff, können trotz einer großen Bruchdehnung dennoch spröde sein. Der große Einfluß kleinster Kerben auf die Tragfähigkeit von spröden Stoffen vermindert z. B. bei Glas durch einen Riß von nur $\frac{1}{100}$ mm Tiefe die Zugfestigkeit um mehr als das 100fache.

Die Verbesserung eines Baustoffs hinsichtlich seiner Tragfähigkeit kann somit auf dreifachem Wege geschehen, nämlich durch Steigerung der Festigkeit, durch Steigerung der für den Bruch erforderlichen Energie und durch Erzeugung einer ausreichenden Zähigkeit. Es gibt sogar Beispiele aus dem Stahlbau, bei denen ein Senken der Festigkeit, das jedoch zugleich mit einer Stei-

gerung der Bruchenergie und der Zähigkeit verbunden war, zu einer insgesamt größeren zulässigen Tragfähigkeit geführt hat. Neben der ausreichenden Sicherheit gegen Bruch können auch unverträglich große Verformungen Anlaß für eine verminderte Ausnutzung der Festigkeit sein.

3. Verhalten von Beton unter Druck- und Zugbeanspruchung

In Bild 5 sind schematisch links die Spannungs-Dehnungs-Linie und die Bruchenergie von auf Druck beanspruchtem Zementmörtel und Beton und rechts die Verhältnisse bei Zugbeanspruchung aufgetragen. Während Beton eine hohe Druckbeanspruchung aufnehmen kann und seine Bruchenergie dabei so groß ist, daß die Druckfestigkeit in hohem Grade ausgenutzt werden kann, beträgt die Zugfestigkeit hochfester Betone weniger als ein Zehntel der Druckfestigkeit; entsprechend ist die Bruchenergie bei Zugbe-

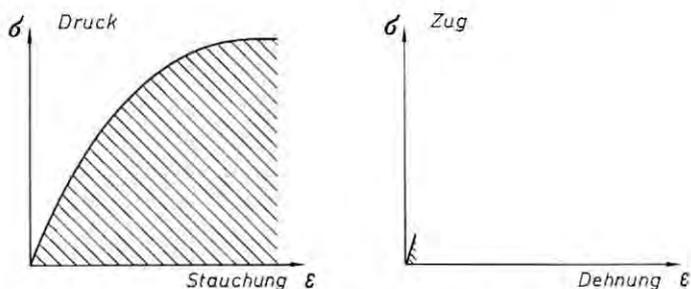


Bild 5 Spannungs-Dehnungs-Linie und Bruchenergie von Zementmörtel und Beton bei Druck- und Zugbeanspruchung (schematisch)

anspruchung aus diesem Grunde und infolge mangelnder Plastizität sehr klein. Beton ist jedoch kein spröder Baustoff. Daher kann man einen dünnen Stahlstift ohne Bedenken in Beton hineintreiben, während dies bei spröden Baustoffen, z. B. bei einer Wand aus Glasbausteinen, nicht möglich ist. Nur weil das Verformungsvermögen eines auf Zug beanspruchten Betons sehr gering ist, wird Beton irrtümlicherweise des öfteren als spröde bezeichnet. Aus all dem folgt, daß eine deutliche Verbesserung der Gebrauchseigenschaften von Beton durch eine Steigerung der Zugfestigkeit und durch eine Steigerung der Zug-Bruch-Energie erzielt werden könnte.

Im üblichen Beton, bei dem vergleichsweise unnachgiebige Zuschlagkörner in eine Matrix aus Zementstein eingebettet sind, würde eine zugfestere und eine elastisch-plastisch verformbare Zementsteinmatrix auch zu verbesserten Betoneigenschaften bei Zugbeanspruchung führen. Bild 6 zeigt die elektronenmikroskopische Aufnahme eines 28 Tage alten Zementsteins. Die vorwiegend vorhandenen Calciumsilicathydrate bilden ein unregelmäßiges Geflecht aus kurzen Kristallfasern, zum Teil sind dies auch

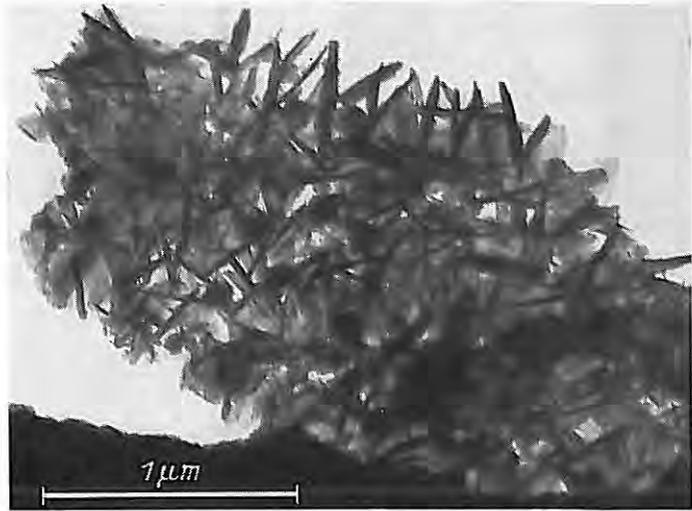


Bild 6 Elektronenmikroskopische Aufnahme eines 28 Tage alten Zementsteins

Röhrchen oder aufgewickelte Plättchen. Ein solches Geflecht leistet zwar einen erheblichen Widerstand gegen Druck. Bei einer Zugbeanspruchung werden die einzelnen, relativ kurzen Fasern jedoch nicht bis zu ihrer Zugfestigkeit beansprucht, sondern aus dem Geflecht herausgezogen, weil sie im Mittel nur etwa 0,001 mm (d. s. 1 μm) lang sind. Längere Calciumsilicathydrat-Fa-

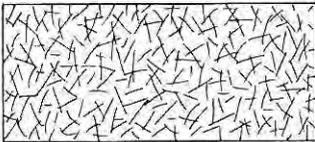


Bild 7 Elektronenmikroskopische Aufnahme von Calciumsilicathydrat-Fasern, die durch längeres Schütteln einer Suspension bei + 5 °C entstanden sind

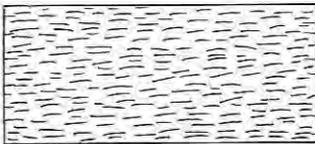
sern im Zementstein entstehen bei verlangsamter Hydratation, z. B. durch Zusatz von Verzögerern oder bei niedrigen Temperaturen, wie Bild 7 zeigt. Doch hat man in technischen Zementsteinen bislang eine mittlere Faserlänge über 0,03 mm (d. s. 30 μm) nicht erzeugen können, was für ein zugfestes Einbetten noch wesentlich zu kurz ist. Hier bietet sich also der Einbau einer künstlichen Faserbewehrung in den Zementstein an, um die Eigenschaften von auf Zug beanspruchtem Beton wesentlich zu verbessern.

4. Faserbewehrung – Form und Werkstoffe

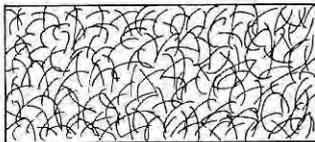
Schon allein von der Geometrie des Fasereinbaus her (Länge der Fasern und Anordnung) kann man verschiedene Möglichkeiten der Faserbewehrung unterscheiden, wie in Bild 8 schematisch



*Kurze, gerade Fasern
unregelmäßig verteilt*



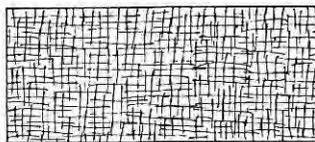
*Kurze, gerade Fasern
gerichtet*



*Längere, gebogene Fasern
unregelmäßig verteilt*



*Lange, gerade Fasern
gerichtet*



Fasergewebe

Bild 8 Verschiedene Formen für eine Faserbewehrung (schematisch)

dargestellt ist. Kurze, gerade Fasern können unregelmäßig oder gerichtet verteilt sein; im Asbestzement liegt, bedingt durch das Herstellungsverfahren, gewöhnlich eine teilweise Orientierung vor. Längere, gebogene und unregelmäßig verteilte Fasern sind beispielsweise in Holzwolle-Leichtbauplatten vorhanden. Um lange, gerichtete Fasern handelt es sich bei Betonstahl und Spannstahl; man kann jedoch auch lange, gerichtete Bewehrungsfasern aus Glasfasern oder Kunststoff herstellen. Fasergewebe können grobmaschig wie bei Betonstahlmatten oder feinmaschig aus Stahldraht, Asbestfasern, Glasfasern oder Kunststofffasern sein.

Von der Vielzahl natürlicher oder künstlicher Stoffe, aus denen man Fasern, wie sie in Bild 8 schematisch dargestellt sind, herstellen kann, werden nachfolgend nur diejenigen behandelt, die sich möglicherweise als Faserbewehrung für Beton eignen. Bild 9 zeigt Stahlfasern, hinten links solche von 0,3 mm Durchmesser und 3 cm Länge, vorne solche von 0,6 mm Durchmesser und 6 cm Länge. Stahlfasern werden für diese Zwecke mit Durchmessern von 0,1 bis 0,8 mm angeboten. Sie lassen sich noch wesentlich dünner herstellen, jedoch steigen die Herstellkosten bereits bei Drähten unter 1 mm erheblich an; außerdem lassen sich sehr dünne Stahlfasern schlecht verarbeiten. Die Länge der Stahl-



Bild 9 Stahlfasern

fasern beträgt gewöhnlich das Hundertfache des Durchmessers. Sie könnten natürlich auch in wesentlich längere Stahldrahtstücke geschnitten werden, jedoch sind sie dann schlechter zu verarbeiten. Zur Verbesserung der Haftung stellt man bereits Stahlfasern mit Profilierung her, wie z. B. die in Bild 9 vorne rechts abgebildeten Fasern, die in England und den USA unter der Markenbezeichnung „Duoform“ geliefert werden.

Die Bilder 10 und 11 zeigen Asbestfasern, und zwar Chrysotil-asbest im Muttergestein (Bild 10) und aufbereitet als Asbest-



Bild 10 Chrysotilasbest im Muttergestein

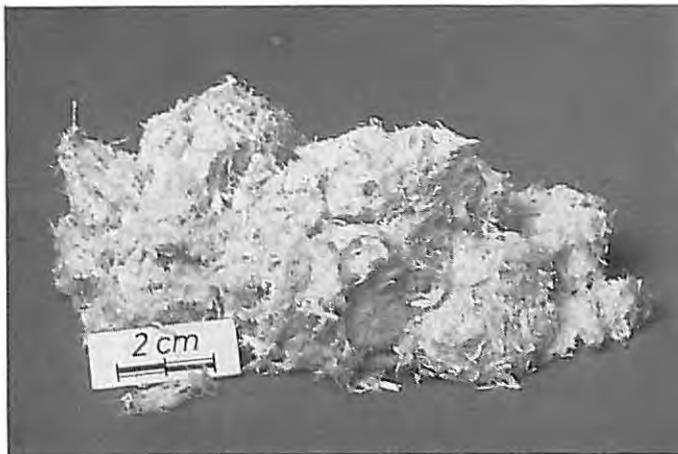


Bild 11 Wolle aus aufbereitetem Chrysotilasbest

wolle (Bild 11). Bei Chrysotilasbest handelt es sich um Kristallfasern aus Magnesiumsilicathydrat mit einem Durchmesser der Einzelfaser bis herunter zu $0,00001$ mm (d. s. $\frac{1}{100}$ μm). Sie sind mit großem Abstand die dünnsten Fasern, die als Bewehrung zur Verfügung stehen.

Wesentlich dicker, mit Durchmessern um $0,01$ mm (d. s. 10 μm) sind Glasfasern (Bild 12). Im Gegensatz zum kristallinen Asbest liegen die Glasfasern (wie der Name schon sagt) und ebenso Gesteinswolle und Hüttenwolle in einer Glasphase vor. Aus Glasfasern kann man beliebig lange Rovings herstellen – also eine



Bild 12 Fasern aus E-Glas (Bor-Silicat-Glas)



Bild 13 Kunststoff-Fasern aus Polypropylen

Art Glasfaserseile – oder kunststoffgebundene Bewehrungsstäbe mit einem Glasfaseranteil von 70 bis 80 Vol.-%.

Auch Kunststofffasern können praktisch endlos hergestellt werden. Bild 13 zeigt Kunststofffasern, und zwar Polypropylen. Polypropylen hat zwar eine kleinere Zugfestigkeit als Nylon; es ist jedoch wesentlich billiger und sein E-Modul ist wesentlich größer als der von Nylon.

Einige wichtige Eigenschaften der vorgenannten Faserstoffe sind in Tafel 1 zusammengestellt, die zum Vergleich auch Angaben

Tafel 1 Eigenschaften und Kosten von Faserwerkstoffen

Faserwerkstoff	Durchmesser mm	Länge m	Zugfestigkeit kp/cm ²	E-Modul 10 ³ kp/cm ²	Bruchdehnung %/ ₀	Stoffkosten bezogen auf		
						Gewicht DM/kg	Volumen DM/dm ³	Zugfestigkeit 10 ⁻⁵ DM/kp
Betonstahl IIIb	10,0	10,0	6000	2100	50	0,6	4,7	8
Spannstahl 140/160	10,0	10,0	17000	2100	30	1,0	7,8	5
Stahldraht	0,1	100,0	12000	2100	40	1,8 ¹⁾	14,1 ¹⁾	12 ¹⁾
Asbest	0,0001	0,01	8000	800	20	1,0	2,6	3
E-Glas	0,01	100,0	10000	800	25	3,5	8,8	9
Polypropylen	0,01	100,0	4000	80	150	4,0	3,6	9

1) bei einem Durchmesser von 0,4 mm

über schlaffen Bewehrungsstahl und Spannstahl enthält. Die Angaben in dieser Tafel sind Richtwerte und geben nur die Größenordnung an, die im Einzelfall um mehr als 50 % über- oder unterschritten werden kann.

Der Durchmesser der Fasern reicht von einigen Millimetern bis hinab zu 0,00001 mm (d. s. $\frac{1}{100}$ μm) bei einzelnen Asbestfasern. Technisch schließt man allerdings den Asbest nicht so weit auf, sondern verwendet Faserbündel von 0,0001 bis 0,001 mm Durchmesser (d. s. $\frac{1}{10}$ bis 1 μm); sie sind dann bis zu 10 mm lang.

Die Zugfestigkeit aller in Tafel 1 aufgeführten Faserwerkstoffe beträgt mehr als 4000 kp/cm². Die Festigkeit einzelner Asbest- oder Glasfasern kann noch wesentlich höher sein als in der Tafel angegeben ist. Der Elastizitätsmodul des Stahls liegt mit über 2 Millionen kp/cm² sehr hoch, vor allem im Vergleich zu Kunststoff. Stahl verformt sich daher unter der gleichen Spannung 25mal weniger als Polypropylen. Die Bruchdehnung setzt sich aus der elastischen und der plastischen Dehnung zusammen. Stoffe, die einen hohen E-Modul und dennoch eine hohe Bruchdehnung aufweisen, sind als Konstruktionsbaustoffe günstig, weil sie sich unter Gebrauchsspannungen wenig verformen und dennoch eine hohe Sicherheit wegen ihrer großen Bruchenergie aufweisen.

Der Gebrauchswert der Baustoffe hängt nicht allein von ihren absoluten technischen Eigenschaften, sondern auch von deren Kosten ab. In Tafel 1 sind daher auch Richtwerte für die Kosten dieser Faserwerkstoffe aufgeführt, und zwar erstens bezogen auf ihr Gewicht, weil sie meistens so gehandelt werden, zweitens bezogen auf ihr Volumen und drittens bezogen auf die Zugfestigkeit, was für die Beurteilung am aussagekräftigsten ist. Der natürliche Werkstoff Asbest ist in dieser Hinsicht am wirtschaftlichsten, gefolgt von Spannstahl.

5. Zusammenwirken von Fasern und Beton

Allgemein gesehen kann bei faserverstärkten Stoffen die Bruchdehnung der Matrix größer oder kleiner sein als die der eingelegten Fasern, siehe Bild 14. Aufgetragen sind dort die Span-

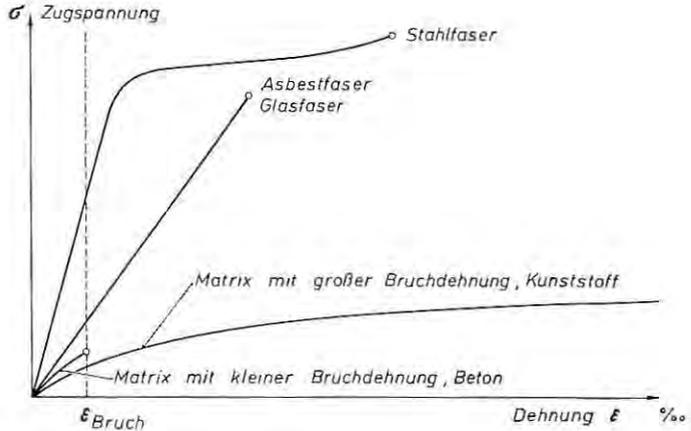


Bild 14 Spannungs-Dehnungs-Linien von Fasern und Matrizen mit großer und kleiner Bruchdehnung (schematisch)

nungs-Dehnungs-Linien von Stahlfasern sowie von Asbest- und Glasfasern. Weist die Matrix eine sehr große Bruchdehnung auf, wie z. B. Kunststoff, dann bleibt bei vollem Verbund die Matrix ungerissen, bis die volle Tragfähigkeit und Bruchdehnung der eingelegten Fasern erreicht ist. Weist die Matrix aber nur eine kleine Bruchdehnung auf, dann reißt die Matrix, bevor die volle Tragfähigkeit der Fasern erreicht ist. Das ist bei Beton stets der Fall, so daß sich die weiteren Ausführungen hierauf beschränken.

5.1. Zugfestigkeit von faserbewehrtem Beton

In Bild 15 ist links ein auf Zug beanspruchtes Betonteil mit durchgehender Bewehrung dargestellt, rechts eine Bewehrung mit in Zugbeanspruchung gerichteten kurzen Fasern. Wenn diese bewehrten Betonteile bis über die Bruchdehnung der Matrix Beton auf Zug beansprucht werden, dann treten in der Matrix Risse auf, wie das in Bild 15 angedeutet ist, und zwar bei der durchgehenden Bewehrung wenige, breitere Risse und bei der enger liegenden Faserbewehrung viele, sehr enge Risse.

Wenn das linke Betonteil überhaupt keine Bewehrung enthalten würde, dann nähme es zunächst bis zur Zugfestigkeit des Betons eine gewisse, wenn auch nicht große Zugkraft auf. Wäre das Betonteil nur mit einer sehr schwachen durchgehenden Längsbewehrung versehen, dann würde diese nach Reißen der Matrix die vorhandene Zugkraft nicht aufnehmen können und daher ebenfalls

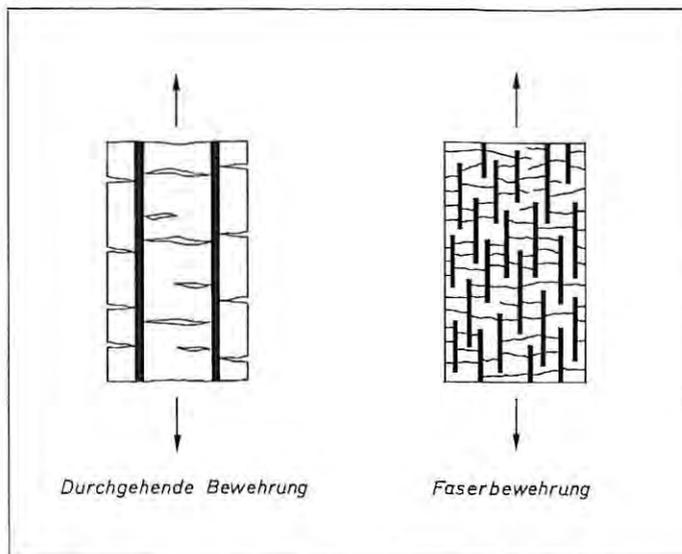


Bild 15 Auf Zug beanspruchte Betonteile, die entweder durchgehend (links) oder mit kurzen, geraden, gerichteten Fasern (rechts) bewehrt sind

reißen. Es gibt daher einen kritischen Prozentsatz (in Vol.-%) durchgehender Bewehrung, unterhalb dessen die aufnehmbare Zugkraft eines schwach bewehrten Betonbauteils ausschließlich von der Zugfestigkeit des Betons bestimmt wird. Dieser kritische Prozentsatz hängt in erster Linie von der Zugfestigkeit der Längsbewehrung ab. Er beträgt z. B. bei Torstahl rd. 0,5 Vol.-%, bei durchgehenden Glas-Rovings rd. 0,3 Vol.-% und bei Spannstahl etwas weniger als 0,2 Vol.-%. Bei Kunststofffasern als Längsbewehrung errechnet sich hierfür ein kritischer Bewehrungsprozentsatz von rd. 0,8 Vol.-%, jedoch wäre die Dehnung der bis kurz unterhalb der Zugfestigkeit beanspruchten Kunststofffasern so groß, daß die Matrix in viele einzelne Stücke reißen und das System dann vergleichsweise Matrixscheiben auf einer Kunststoffschnur entsprechen würde. Aus diesem Grunde kann man die gesamte Zugfestigkeit von Fasern mit niedrigem E-Modul allenfalls dann ausnutzen, wenn diese Fasern vorgespannt werden.

Auch für eine Bewehrung aus kurzen, gerichteten Fasern gibt es einen kritischen Bewehrungsprozentsatz, unterhalb dessen die Zugfestigkeit des faserbewehrten Betons nur der des Betons selbst entspricht. Da die Zugkraft durch Haftung und Schub in der Matrix von einer Faser auf die andere übertragen werden muß, ist ein höherer kritischer Bewehrungsprozentsatz erforderlich als bei durchgehender Bewehrung, wie auch aus Bild 16 hervorgeht. Links sind zwei parallele Fasern mit dem Durchmesser d und der Länge l im Abstand s voneinander in einer in Faserrichtung auf Zug beanspruchten Matrix eingebettet. Wenn in der Matrix ein Riß entsteht, so wird dessen Ausbreitung durch die Fasern behindert, die dabei durch Verbundspannung auf Zug be-

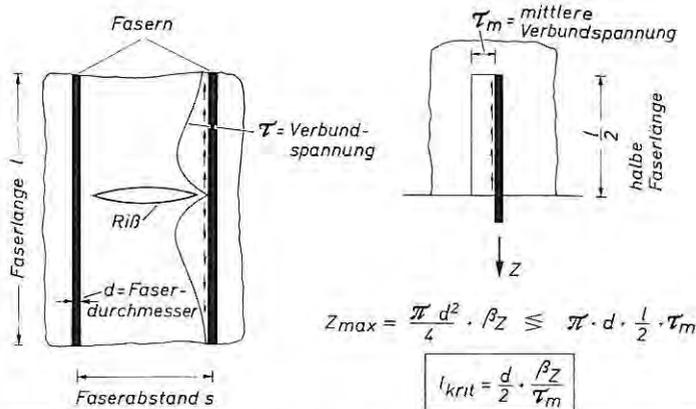


Bild 16 Gleichgewichtsbedingungen zwischen Verbund und Zugfestigkeit einer Faser im Beton

anspruch werden. Wenn die Faser ausreichend fest in die Matrix eingebettet ist, wird sie bis zur Zugfestigkeit beansprucht; anderenfalls wird eine Hälfte vorher aus der Matrix herausgezogen. Im rechten Teil des Bildes sind die bis zum Bruch wirksamen Gleichgewichtsbedingungen einer Faser dargestellt. Nimmt man zur Vereinfachung eine auf der gesamten Faserlänge l mittlere Verbundbruchspannung τ_m an, so beträgt die maximale Verbundkraft $\pi \cdot d \cdot \frac{l}{2} \cdot \tau_m$. Diese Kraft kann je nach Durchmesser, Einbettungslänge und mittlerer Verbundbruchspannung kleiner, gleich oder größer als die vom Querschnitt und der Zugfestigkeit abhängige maximale Zugkraft der Faser $Z_{max} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \beta_Z$ sein.

Bei gegebenen Stoffen sind die Faserzugfestigkeit β_Z und die Verbundbruchspannung τ_m bekannt. Es hängt dann nur noch vom Faserdurchmesser ab, wie lang die Faser sein muß, damit sie nicht vor der vollen Ausnutzung ihrer Zugfestigkeit aus der Matrix herausgezogen wird; d. h. es gibt eine kritische Faserlänge $l_{kritisch}$, unterhalb der die Fasern herausgezogen werden. Bei Stahlfasern beträgt die kritische Faserlänge z. B. das rd. 600fache des Durchmessers, so daß eine 0,5 mm dicke Stahlfaser wenigstens 30 cm lang sein müßte, damit ihre Zugfestigkeit ausgenützt werden könnte. Fasern mit einem solchen Verhältnis von Länge zu Durchmesser sind jedoch nicht zu verarbeiten, so daß man kürzere Fasern wählt. Bei Stahl beträgt z. B. das Verhältnis von Länge zu Durchmesser meist nur 100 : 1. Dadurch kann die volle Zugfestigkeit der Faser nicht ausgenutzt werden, wie Bild 17 zeigt. Ist die Faserlänge kürzer als die kritische Länge, so wird also die Festigkeit der Faser nicht ausgenutzt. Entspricht die Faserlänge genau der kritischen Faserlänge, dann wird die Faserfestigkeit nur dann ausgenutzt, wenn der Riß in der Matrix genau in Fasermitte entsteht, anderenfalls wird das kürzere Ende herausgezogen. Erst dann, wenn die Faserlänge das Mehrfache der kritischen Länge ausmacht, nähert sich die Zugfestigkeit eines

Zugspannung in der Faser in Abhängigkeit von der Faserlänge

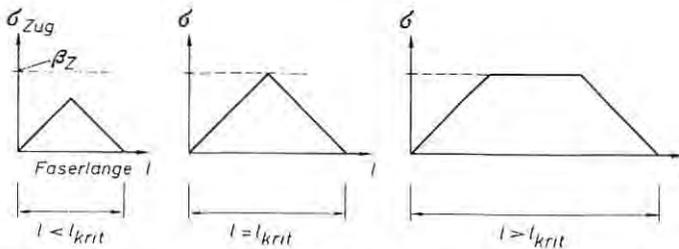


Bild 17 Zugspannung in kurzen Fasern in Abhängigkeit von deren Länge; links unterkritische Länge, in der Mitte kritische Länge und rechts überkritische Faserlänge

mit kurzen, gerichteten Fasern bewehrten Betons der eines mit dem gleichen Prozentsatz durchgehend bewehrten Betons. Nur die sehr dünnen Asbestfasern weisen bereits bei einigen Millimetern Länge eine überkritische Faserlänge auf, so daß sie bis zu ihrer vollen Zugfestigkeit im Zementstein ausgenutzt werden. Bei allen anderen abgelängten Fasern aus Stahl, Glas und Kunststoff liegt die Faserlänge aus verarbeitungstechnischen Gründen weit unter der kritischen Faserlänge, so daß deren Zugfestigkeit nicht voll genutzt wird.

Setzt man den kritischen Bewehrungsprozentsatz bei durchgehender Bewehrung gleich 1, dann erfordern in Zugbeanspruchung gerichtete Fasern mit der doppelten kritischen Länge bereits etwa den 1,5fachen Bewehrungsprozentsatz und Fasern mit der kritischen Länge den 2fachen. Bei unterkritischer Faserlänge steigt der kritische Bewehrungsprozentsatz auf das Vielfache dessen an, der bei durchgehender Bewehrung für die gleiche Zugfestigkeit erforderlich wäre.

Zudem liegen kurze Fasern meist nicht in Richtung der Zugbeanspruchung, sondern sie sind mehr oder weniger unregelmäßig verteilt. Bei einachsiger Zugbeanspruchung wird dann nur der Teil einer Faser wirksam, der der Projektion in Zugrichtung entspricht. Andererseits erfordert eine einachsige Bewehrung eine gewisse Querbewehrung in der Größenordnung von 20 %, die durch unregelmäßig verteilte Fasern schon gegeben ist. Daher ist eine rein geometrische Umrechnung nicht ganz zutreffend. Eine unregelmäßige Flächenbewehrung dürfte in einer Achse höchstens zu etwa 60 % und eine unregelmäßige Raumbewehrung nur zu etwa 40 % wirksam sein.

Bei der Asbestzementherstellung mit der Hatschekmaschine ist es ein Vorteil, wenn statistisch eine bevorzugte Orientierung in einer Achsrichtung der an sich unregelmäßigen Flächenbewehrung auftritt und in dieser Achse dann bevorzugt die Zug- und Biegebeanspruchung wirken. Bei anderen faserverstärkten Werkstoffen

unternimmt man daher viele Anstrengungen, um eine teilweise Orientierung zu erreichen.

Zusammenfassend kann man hinsichtlich der einachsigen Zugfestigkeit feststellen, daß kurze Fasern mit einer durchgehenden Bewehrung nur dann konkurrieren können, wenn sie eine mehrfache kritische Faserlänge aufweisen. Das ist derzeit nur bei Asbestfasern möglich, läßt sich jedoch bei Stahl-, Glas- und Kunststofffasern aus verarbeitungstechnischen Gründen nicht verwirklichen.

5.2. Bruchenergie und Zähigkeit von faserbewehrtem Beton

Für die Tragfähigkeit eines Baustoffs sind neben seiner Festigkeit die für seinen Bruch erforderliche Energie sowie seine Zähigkeit maßgebend. Bei einer durchgehenden Bewehrung reißt bereits bei einer kleinen Dehnung die verformungsarme Matrix. Für die anschließende Verformung sind dann weitgehend die Verformungscharakteristiken des Werkstoffs bestimmend, aus dem die durchgehenden Fasern bestehen. Von ihrem Verformungsverhalten hängen damit die für den Bruch erforderliche Energie sowie die Duktilität ab, wobei zur Erhaltung des gesamten Verbundsystems gewisse Dehnungen nicht überschritten werden dürfen.

Bei Zugbeanspruchung kann sich ein mit kurzen Fasern bewehrter Beton hinsichtlich aufnehmbarer Bruchenergie und Zähigkeit wesentlich anders verhalten als durchgehend bewehrter Beton. Die drei theoretisch möglichen Fälle (a bis c) sind in Bild 18 schematisch wiedergegeben, und zwar sind jeweils links mit kurzen Fasern bewehrte Elemente dargestellt, bei denen ein Anriß bereits vorhanden sein soll. Nimmt die im Bild senkrecht angenommene Zugbeanspruchung zu, so will sich der Anriß in der Rißebeine fortsetzen. Dem wirken die senkrecht zur Rißebeine vorhandenen kurzen Fasern entgegen. Wird die Zugbeanspruchung hinreichend groß, so überwindet die den Riß erzeugende Kraft den Verbund oder die Zugfestigkeit der Fasern (im Bild jeweils rechts), und es wird der Bruch eingeleitet. Bruchenergie und Zähigkeit hängen dabei vom Werkstoff der Fasern, vom Verbund zwischen Faserwerkstoff und Betonmatrix und von der geometrischen Form der Fasern ab.

Im Fall a (im Bild oben) ist der Verbund zwischen Fasern und Beton kleiner als die Zugfestigkeit der Fasern, weil z. B. die Faserlänge unterkritisch ist. Dann werden die Fasern beim Bruch aus der Matrix herausgezogen, ohne daß sie reißen. Dieses Herausziehen ist ein Gleitvorgang, der neben dem Trennen der Matrix eine beträchtliche Energie erfordert. Obwohl die Zugfestigkeit der Fasern nicht ausgenutzt wird und obwohl dadurch auch die Zugfestigkeit des faserbewehrten Betons nicht die dem Querschnitt der Fasern entsprechende Zugfestigkeit aufweist, ist die für den Bruch erforderliche Energie relativ groß. Ein solcher Verbundwerkstoff (Beton) weist auch ein quasizähes Verhalten auf. Diese Verhältnisse gelten bei Beton, der mit kurzen Fasern aus Stahl, Glas und Kunststoff bewehrt ist.

In den Fällen b und c ist der Verbund größer als die Zugfestigkeit der eingebetteten Fasern. Der Bruchvorgang wird dann we-

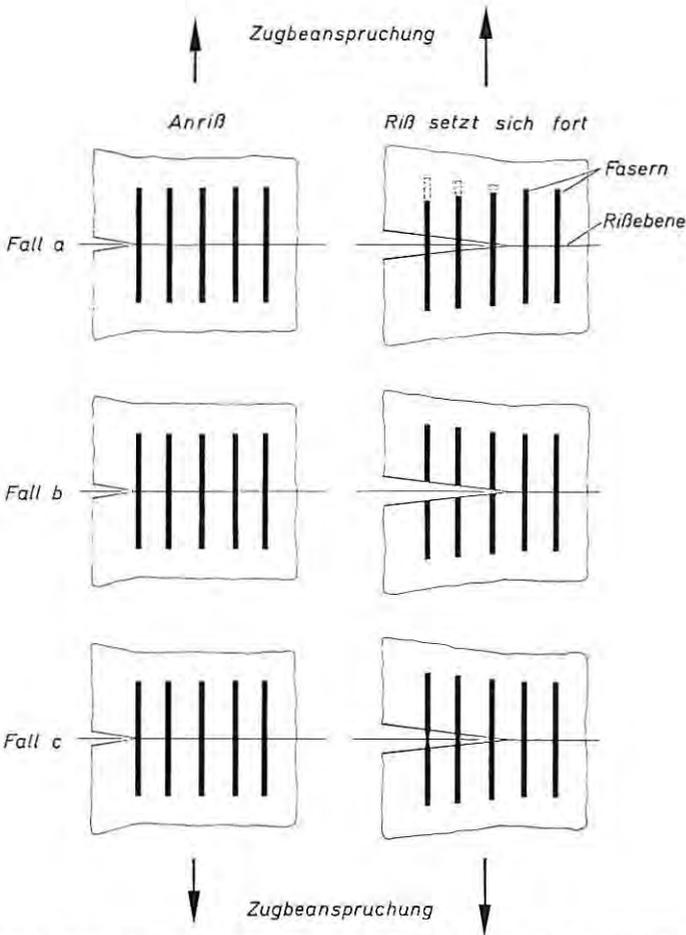


Bild 18 Bruchvorgänge bei mit kurzen Fasern bewehrtem Beton unter Zugbeanspruchung
 Fall a: Mangelnder Verbund, Fasern werden herausgerissen
 Fall b: Guter Verbund, spröde Fasern reißen ohne plastische Verformung
 Fall c: Guter Verbund, plastische Fasern reißen erst nach großer Verformung

sentlich von den Verformungseigenschaften des Faserwerkstoffs bestimmt. Im Fall b handelt es sich um einen idealelastischen Faserstoff (vgl. Bild 2), der sich praktisch bis zum Bruch voll elastisch und ohne größere bleibende Dehnung verformt. Bezogen auf die Zugfestigkeit ist die für den Bruch erforderliche Energie daher relativ klein, und ein mit solchen Fasern bewehrter Beton ist auch relativ verformungsarm, d. h. er weist ein einem spröden Stoff vergleichbares Verhalten auf. Ein solcher Bruchvorgang ist kennzeichnend für Asbestzement. Die Bruchenergie ist jedoch klein, weil Asbest ein idealelastischer Stoff ist, der dadurch auch

ein quasisprödes Verhalten des Asbestzements verursacht. Asbest und Glas sind beide idealelastische Stoffe; ihre Zugfestigkeit und E-Moduln sind ebenfalls von gleicher Größenordnung. Während Asbestfasern jedoch eine überkritische Länge aufweisen, ist die Länge der Glasfasern unterkritisch, weil sie um Zehnerpotenzen dicker sind. Bei gleichem Volumenanteil Fasern ist daher Asbestzement wesentlich zugfester, während glasfaserbewehrter Zementstein trotz kleinerer Festigkeit eine höhere Bruchenergie aufweist und quasizäher ist; dies äußert sich daher auch in einer höheren Schlagfestigkeit.

Besonders günstig wäre ein Bruchvorgang entsprechend Fall c, bei dem ebenfalls ein guter Verbund vorliegt und bei dem der Faserwerkstoff neben einer hohen Zugfestigkeit sich elasto-plastisch verformt. Derzeit gibt es faserbewehrte Betone mit einem solchen Bruchverhalten nicht. Stahl würde als Faserwerkstoff zwar die Voraussetzung eines elasto-plastischen Stoffs erfüllen; glatte Stahlfasern dürften jedoch auch in Zukunft nur mit einer unterkritischen Länge verarbeitbar sein. Gewisse Erfolge in der angestrebten Richtung dürften bei gleichen geometrischen Abmessungen der Fasern durch eine Erhöhung der mittleren Verbundbruchspannung zu erwarten sein, z. B. durch ein Profilieren der Stahlfasern oder durch ein zusätzliches Tränken des Betons mit Kunstharz und Polymerisieren, was allerdings beträchtliche Kosten verursacht.

Zusammenfassend kann man feststellen, daß Fasern unterhalb eines kritischen Bewehrungsprozentsatzes die dem Beton eigene Zugfestigkeit praktisch nicht verbessern, daß sie jedoch die für den Bruch erforderliche Energie erhöhen und dem Beton ein quasizähes Verhalten verleihen. Je höher die Bruchenergie und die Zähigkeit sind, desto größer ist der Widerstand gegen schlagartige Beanspruchung. Dies gilt auch bei kurzen Fasern mit einer unterkritischen Länge, bei denen zwar die Festigkeit nicht ausgenutzt wird, jedoch das Herausziehen aus der Matrix Energie erfordert, die sogar beträchtlich größer sein kann als bei Fasern mit einer überkritischen Länge, deren Festigkeit voll ausgenutzt wird.

6. Verarbeitbarkeit

Es bereitet erhebliche verfahrenstechnische Schwierigkeiten, einen größeren Volumenanteil kurzer Fasern in Zementstein, -mörtel oder Beton gleichmäßig oder gar orientiert einzubringen und zu verdichten. So wie die Geschichte des Asbestzements zu einem erheblichen Teil die Geschichte von verfahrenstechnischen Patenten zum sachgerechten Einbringen, Verdichten und Nachbehandeln von 5 bis 15 Vol.-% fein aufbereiteter und gleichmäßig im Zementstein verteilter Asbestfasern ist, so werden derzeit an einer ganzen Reihe von Stellen in der Welt verschiedene Verfahren zum Herstellen von bewehrten Mörteln und Betonen mit kurzen Fasern untersucht und auch zum Patent angemeldet. Ein einfaches Einmischen in Beton üblicher Zusammensetzung und Konsistenz in einem Betonmischer bereitet bereits bei einem Faser-Volumenanteil von nur 2 bis 3 % schon erhebliche Schwierigkeiten. Wenn man die Fasern nicht gleichmäßig in den laufenden Mischer ein-

rieseln läßt, dann rollen sich Stahlfasern häufig zu tennisballgroßen Stahligel auf, siehe Bild 19. Die Verarbeitung wird um so schwieriger, je länger die Fasern und je dünner sie sind.

Zum Teil versucht man das Einbringen größerer Fasermengen dadurch zu erleichtern, daß man das Größtkorn des Zuschlags herabsetzt sowie die Matrix durch höheren Wasserzusatz und/oder Zusatzmittel dünnflüssiger macht und das überschüssige Wasser während des Verdichtens z.B. durch Saugen und Pressen wieder entfernt. Die konsequente Weiterführung dieser verfahrenstechnischen Richtung mündet eigentlich in die der Asbestzementherstellung ein, wie sie seinerzeit Hatschek entwickelt hat. Dabei ist aber zu beachten, daß m.W. nur Asbestfasern in größerem Maße die verfahrenstechnisch wichtige Eigenschaft aufweisen, aus einer Zementsuspension einen gewissen Anteil an Zementkörnern adsorptiv an sich zu binden.



Bild 19 Tennisballgroße „Stahligel“ durch Aufrollen kurzer Stahlfasern in der Mischmaschine

Erfolgversprechend und der Herstellung von glasfaserverstärktem Kunststoff nachempfunden scheint das Spritzen von Fasermörtel oder -beton, wobei die Fasern mehr oder weniger flächenhaft orientiert werden. Dadurch lassen sich Fasergehalte bis zu etwa 10 Vol.-% einbringen.

Einfacher lassen sich gebündelte Fasern als Zugbewehrung verarbeiten. Dickere Stäbe oder Seile mit hoher Festigkeit lassen sich durch Hunderte von parallelen dünnen Fasern herstellen, die zusätzlich durch Kunststoff miteinander verbunden sein können. Solche GFK-Stäbe ermöglichen eine Faserkonzentration zugbeanspruchter Stellen des Betons, ähnlich wie bei der üblichen durchgehenden Bewehrung aus Stabstahl.

7. Beständigkeit der Fasern

Das alkalische Milieu im Beton schützt den Bewehrungsstahl vor Korrosion, es sei denn, daß der Beton korrosionsfördernde Stoffe enthält, wie z. B. Chlorid. Um ein Rosten zu verhindern, müssen Bewehrungsstähle eine ausreichend dicke und dichte Betondeckung erhalten. Wenn Beton gleichmäßig mit Stahlfasern durchsetzt ist, dann liegen einige Stahlfasern ohne ausreichende Überdeckung nahe der Oberfläche. Nach einem halben Jahr Außenlagerung wies Stahlfaserbeton bereits an der Außenfläche zahlreiche lokale Rostflecken auf, siehe Bild 20. Ob die Korrosion der außenliegenden Fasern nur einen Schönheitsfehler bedeutet oder ob der Rost der sehr dünnen Stahlfasern die äußere Betonzone auch schädigen kann, ist noch nicht geklärt; man muß jedoch nicht zwingend eine Schädigung des Betons unterstellen. Eine Imprägnierung des Stahlfaserbetons an der Oberfläche mit Polymeren verhindert die Korrosion der außenliegenden Fasern.

Bild 20
Würfel aus Stahl-
faserbeton nach halb-
jähriger ungeschütz-
ter Lagerung im
Freien



Die Asbestfaser ist sowohl unter den üblichen Umweltbedingungen beständig als auch im alkalischen Milieu des Zementsteins. Denn die Kieselsäure im Asbest ist Bestandteil des kaum reagierenden Kristalls. Auch wenn ein gewisser Austausch des Magnesiums im Asbestkristall mit dem Calcium im umgebenden Zementstein stattfindet, so bewirkt dies nur einen um so besseren Verbund zwischen Asbestfaser und Zementstein, ohne daß die Struktur und Festigkeit des faserigen Asbestkristalls nennenswert verändert werden.

Wesentlich anders verhalten sich die meisten Silicatgläser trotz einer chemisch ähnlichen Zusammensetzung, weil die Kieselsäure dort in einer gegenüber alkalischen Lösungen wesentlich reaktionsbereiteren Glasphase vorliegt. Durch solche Reaktio-

nen entstehen an der Glasoberfläche Korrosionen, die man in ihrem äußeren Erscheinungsbild mit Lochfraß vergleichen kann. Da Glas ein spröder Stoff ist, senken solche Reaktionen die Festigkeit der Faser erheblich. Die Reaktionsbereitschaft von Glas ist je nach seiner Zusammensetzung oder Behandlung recht unterschiedlich. So reagiert z. B. Fensterglas – das ist ein Soda-Kalk-Glas – sehr schnell. Langsamer reagiert das für andere glasfaserverstärkte Stoffe verwendete E-Glas, das in Tafel 1 aufgeführt ist. E-Glas ist ein Bor-Silicat-Glas. Eine sechswöchige Einwirkung von Calciumhydroxidlösung führte jedoch zu einer stark angegrabten Oberfläche, siehe Bild 21. Ob das in England entwickelte Soda-Zirkon-Silicat-Glas, welches den Handelsnamen CEM-FIL führt,

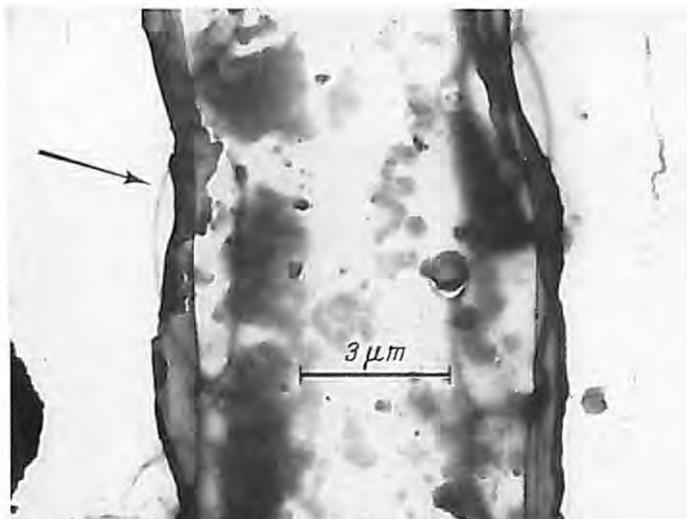


Bild 21 Lochfraßkorrosion an der Oberfläche einer E-Glas-Faser (Bor-Silicat-Glas) durch sechswöchige Einwirkung von Calciumhydroxidlösung (Elektronenmikroskopische Aufnahme)

tatsächlich wie angegeben alkaliresistent ist, kann derzeit noch nicht abschließend beurteilt werden. Fest steht, daß dieses Glas wenn überhaupt, dann wesentlich langsamer reagiert, so daß wahrscheinlich noch nach Jahrzehnten eine Restfestigkeit von mehr als 70 % vorhanden ist. Derzeit kostet dieses Glas jedoch nahezu das Doppelte von E-Glas, und es wird angenommen, daß sein Preis auch bei größerer Produktion allenfalls auf den von E-Glas zurückgeht.

Um die chemische Verträglichkeit zwischen Glasfasern und einer zementgebundenen Matrix zu verbessern, sind auch andere Wege beschritten worden, z. B. ein Senken des pH-Werts des Porenwassers im Beton durch Verwenden von Tonerdezement oder durch Carbonatisierung sowie ein Schutz der Glasfasern vor der alkalischen Lösung durch Kunststoffüberzüge, die zugleich die

Haftung verbessern sollen. Bislang scheint eine voll befriedigende Lösung noch nicht gefunden, sie liegt jedoch im Bereich des Möglichen.

Von den Kunststofffasern weisen Polyamid (Nylon, Perlon) sowie Polypropylen eine gute chemische Verträglichkeit mit einer zementgebundenen Matrix auf, während Polyester (Trevira) im alkalischen Milieu verseifen kann und dabei seine Festigkeit verliert. Ein großer Nachteil des Kunststoffs — auch im Beton — besteht in seiner mangelnden Hitzebeständigkeit; das dürfte auch für Kunststoffüberzüge zum Schutz von Glasfasern sowie für den kunststoffimprägnierten Beton gelten. Auch hinsichtlich der Alterung von Kunststoff liegen noch keine überzeugenden Erfahrungen vor wie bei den anorganischen Baustoffen.

8. Wirtschaftlichkeit und Anwendungsbereiche

Bezieht man in faserverstärkte Verbundwerkstoffe auch solche mit durchgehenden und nur in bestimmten Bereichen konzentrierten Fasern (Stäben) ein, dann sind der Stahl- und Spannbeton die mit Abstand am meisten in der Welt verwendeten faserbewehrten Stoffe. Bauteile, die heute am wirtschaftlichsten in schlaff bewehrtem Stahlbeton errichtet werden, wie z. B. Wohnhausdecken, werden nach dem derzeitigen Stand der Kenntnisse auch in der vor-ausschbaren Zukunft auf diese Weise gebaut werden, weil kurze Fasern einen mehrfachen Materialaufwand erfordern würden. Es wird sich daher weder etwas an dem Prinzip zur Aufnahme der Zugkräfte durch eine im Zugbereich konzentriert angeordnete, durchgehende Bewehrung ändern, noch wird aus wirtschaftlichen Gründen ein anderer Werkstoff Stahl als schlaffe Bewehrung vorerst ersetzen können. Zwar mag es sein, daß kunststoffgebundene Glasfaserstäbe, bezogen auf ihre Zugfestigkeit, ebenso preiswert oder sogar noch billiger werden als Bewehrungsstahl, aber der nur etwa $\frac{1}{3}$ so große E-Modul der Glasfaserstäbe wird eine wirtschaftliche Anwendung für schlaff bewehrte Bauteile mit größerer Verkehrslast wohl kaum erlauben.

Die Erfindung der Vorspannung gestattet die Ausnutzung sehr hoher Zugfestigkeiten in einer durchgehenden Bewehrungsfaser, ohne daß es zu einer unzulässig großen Dehnung in der Betonmatrix kommt. Auch bei vorgespanntem Beton wird sich in absehbarer Zukunft an dem Prinzip der Aufnahme der Zugkräfte in konzentriert angeordneter, durchgehender, vorgespannter Bewehrung nichts ändern. Im Gegensatz zu schlaff bewehrten Bauteilen kann man einen möglichen Ersatz des Spannstahls durch vorgespannte Glasfaserstäbe oder -seile jedoch nicht ausschließen, weil hierbei der niedrigere E-Modul von Vorteil ist. Eine Reihe von Problemen, die beim Spannstahl jedoch schon gelöst sind, sind bei solchen vorgespannten Glasfaserstäben noch nicht geklärt, z. B. die Verankerung.

Als Baustoff mit zementgebundener Matrix und kurzen Fasern hat sich in der Praxis seit Jahrzehnten Asbestzement durchgesetzt und bewährt. Die Bilder 22 und 23 zeigen hierzu zwei Beispiele aus jüngster Zeit. Selbst wenn nun alkalibeständiges Glas herstellbar sein soll, erscheint es fraglich, ob kurze Glasfasern die Asbestfasern verdrängen könnten, weil schon E-Glas bezogen auf



Bild 22 Großformatige Dacheindeckung aus Asbestzement (Werksfoto Eternit AG)



Bild 23 Rohre für eine Druckwasserleitung aus Asbestzement (Werksfoto Eternit AG)

seine Festigkeit drei- bis fünfmal soviel kostet wie Asbest, das englische CEM-FIL-Glas derzeit sogar rd. 10mal soviel. Glas hat jedoch den Vorteil, daß es zu gleichem Preis auch als Endlosfaser, Spinnfaden oder Glasroving hergestellt werden kann, was im Vergleich oder in Kombination mit kurzen Fasern zu günstigeren Bewehrungsformen führen kann, als dies mit Asbest möglich ist. So hat man z. B. in England eine Rohrmaschine entwickelt, bei der gleichzeitig Glasrovings auf einen Kern gewickelt und kurze Fasern mit Zementleim aufgespritzt werden.

Mit kurzen Stahlfasern bewehrter Beton wird den durchgehend bewehrten Stahl- und Spannbeton im allgemeinen nicht ersetzen können, zumindest wenn die Aufnahme von Zugkräften maßgebend ist. Stahlfaserbeton weist jedoch eine hohe Bruchenergie und Zähigkeit auf, die weitere Anwendungsgebiete für den Beton erschließen kann. So dürfte er in manchen Anwendungsbereichen dem Gußeisen technisch und wirtschaftlich überlegen sein, z. B. anstelle von Tübbings im Schacht- oder Tunnelbau, wo er direkt auf das anstehende Gebirge aufgespritzt werden kann. Dieses Verfahren läßt sich z. B. auch zur Hangsicherung im Gebirge und für andere Anwendungsbereiche einfach anwenden.

In England hat die Cement and Concrete Association ein Verfahren zum Patent angemeldet, um einen steifen Beton mit hohem Stahlfaseranteil bis zu 10 Vol.-% unter hohem Druck zu verdichten. Bild 24 zeigt Rahmen und Deckel eines Einstiegluchs aus Beton mit 7 Vol.-% Stahlfasern. Zahlreiche weitere potentielle Anwendungsbereiche lassen sich noch aufführen, bei denen nicht die statische Zugkraft, sondern die Sicherheit gegen begrenzte Verformungen oder gegen schlagartige Beanspruchungen maßgebend ist, z. B. Köpfe von Rammpfählen, Tresorbeton, vorgespannter Stahlfaserbeton für Reaktoren oder explosionsgefährdete Räume.

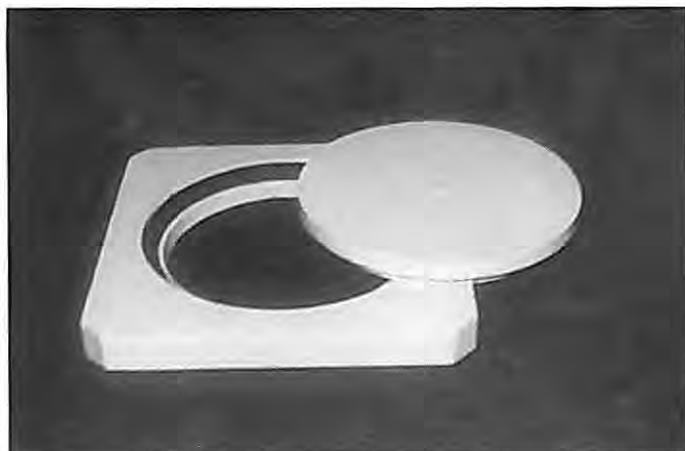


Bild 24 Rahmen und Deckel eines vorgefertigten Einstiegluchs aus Stahlfaserbeton (Foto Cement & Concrete Association G.B.)

Für letztere eignet sich auch Kunststoffaserbeton. Durch Kunststoffasern lassen sich — ebenso wie mit Glasfasern — zudem erhebliche Verbesserungen in den Frischbetoneigenschaften erreichen, z. B. eine beträchtliche Steigerung der Grünlandfestigkeit von frisch verdichtetem, erdfeuchtem Beton, was zahlreiche Vorzüge bei der Herstellung von Betonwaren mit sich bringen würde.

9. Schlußbetrachtung

Im Vergleich zu unbewehrtem Beton lassen sich durch Zusatz von wenigen Vol.-% geeigneter kurzer Fasern verschiedene Frisch- und Festbetoneigenschaften deutlich verbessern. Im Gegensatz zu vielfachen Erwartungen betrifft diese Verbesserung weniger die Zugfestigkeit als vielmehr das Formänderungsvermögen bei Druck- und Zugbeanspruchung, was sich in einer hohen Bruchenergie und einem quasizähen Verhalten ausdrückt. Ein Ersatz von durchgehender, in bestimmten Bereichen konzentriert angeordneter Bewehrung, wie beim Stahl- und Spannbeton, durch eine über den gesamten Querschnitt unregelmäßig verteilte Bewehrung aus kurzen Fasern dürfte in der absehbaren Zukunft aus wirtschaftlichen Gründen nicht möglich sein. In bestimmten Anwendungsbereichen hat sich Beton mit einer Bewehrung aus kurzen Fasern, wie z. B. Asbestzement, bereits seit Jahrzehnten wirtschaftlich durchgesetzt und bewährt. Weitere Anwendungsbereiche bieten sich hierfür an, insbesondere scheint trotz der hohen Stoffkosten eine Kombination von durchgehender, an bestimmten Stellen konzentriert angeordneter Bewehrung mit einer Bewehrung von kurzen Fasern über dem gesamten Querschnitt erfolgversprechend.