

Herstellung und Eigenschaften von Faserbeton

Von Jürgen Dahms, Eckernförde *)

Übersicht

Als Fasern werden in neuerer Zeit Kunststofffasern, Glasfasern und Stahlfasern als Zusatz zu Mörtel und Beton verwendet. Durch solche Fasern wird beim Frischbeton die Grünstandfestigkeit und beim Festbeton die Zugfestigkeit, die aufnehmbare Bruchenergie sowie die Widerstandsfähigkeit gegen dynamische Beanspruchungen, wie z. B. die Schlagfestigkeit, nennenswert erhöht. Dies beruht im wesentlichen auf einer Behinderung der Ribbildung und der Ribausbreitung durch die Fasern.

Kunststofffasern erhöhen in erster Linie die Grünstandfestigkeit und die Ribfestigkeit noch leicht verformbaren, jungen Betons. Glasfasern werden vorwiegend in weiche Mörtel für dünnwandige Bauteile eingemischt. Stahlfasern kommen sowohl für Mörtel als auch für Beton in Frage. Zugabe und gleichmäßiges Untermischen unter Baustellenbedingungen verlangen eingehende Vorversuche.

Bei den Untersuchungen mit unterschiedlichen Fasergehalten wurde durch Zugabe von 3 Vol.-% nicht orientierter Stahlfasern mit einem Verhältnis der Länge zum Durchmesser von 63 die Druckfestigkeit von Beton mit 16 mm Größtkorn um 44 %, die Spaltzugfestigkeit um 100 % und die Schlagfestigkeit um mehr als 2000 % erhöht. Glasfasern in derselben Menge verbesserten bei einem Beton mit kleinerem Größtkorn die Schlagfestigkeit etwa in derselben Größenordnung.

Mit Hilfe von Röntgenaufnahmen kann die Verteilung und Orientierung von Stahlfasern im Beton festgestellt werden. Beim Einbringen und Verdichten des Betons orientieren sich die Fasern rechtwinklig zur Herstellungsrichtung. Dadurch werden Druck-, Biegezug- und Spaltzugfestigkeit je nach Art und Richtung der Beanspruchung erhöht oder erniedrigt.

1. Einleitung

In zunehmendem Maße werden in einer Reihe von Sonderbereichen, wie z. B. beim Auskleiden von Felshohlräumen, beim Schutzraumbau, bei der Hangsicherung sowie bei einer Reihe von Beton-

*) Nach einem Vortrag auf der Technisch-wissenschaftlichen Zementtagung des Vereins Deutscher Zementwerke am 13. September 1978 in München.

steinerzeugnissen und Betonfertigteilen, dem Mörtel und Beton Fasern zugemischt.

Zur Anwendung kommen neben den seit langem bekannten Asbestfasern im Asbestzement Kunststoff-, Glas- und Stahlfasern. Ihre wirtschaftliche Verwendung ist immer dort möglich, wo die aus Faserkosten und Herstellungsaufwand bedingten Mehrkosten durch Einsparungen bei den Bauteilabmessungen, durch Vereinfachung bei der konstruktiven Durchbildung oder durch Erreichen einer zusätzlichen Sicherheit sowie außergewöhnlicher Eigenschaften ausgeglichen werden können.

Seit mehreren Jahren befaßte sich das Forschungsinstitut der Zementindustrie mit den Eigenheiten des Faserbetons [1]. Inzwischen wurden weitere Untersuchungen durchgeführt, die vornehmlich das Ziel hatten, einen Faserbeton herzustellen, der gegen dynamische Beanspruchbarkeit, in diesem Falle gegen Schlagbeanspruchung, einen möglichst hohen Widerstand aufweist. Hierzu waren einige Vorbetrachtungen über die Wirkungsweise der Fasern erforderlich.

Bei diesen Untersuchungen wurde festgestellt, daß durch ungleichmäßige Faserverteilung und herstellungsbedingte Orientierung der Fasern größere Streuungen der Prüfergebnisse erhalten wurden. Durch übliche Röntgenaufnahmen war es möglich, die Verteilung und Orientierung von Stahlfasern im Beton sichtbar zu machen. Im folgenden wird über Schlagprüfungen und Tastversuche zur Vergleichmäßigung der Faserverteilung berichtet.

2. Art und Eigenschaften der Fasern

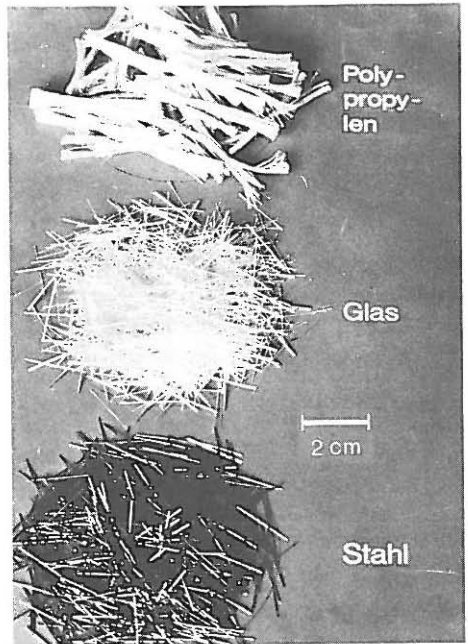
Die Fasern, die sich als Faserbewehrung im Beton eignen, lassen sich nach ihren Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten in drei Gruppen einteilen und unterscheiden (siehe Tafel 1 und Bild 1).

Tafel 1 Fasereigenschaften

Faser	Durchmesser mm	Länge mm	Rohdichte kg/dm ³	Zugfestigkeit N/mm ²	Bruchdehnung %	E-Modul N/mm ²
Polypropylen	0,01–0,1	50–70	0,9	500	15–20	5000–8000
Asbest (Chrysotil)	0,0001	10	2,6	1000–3000	2–3	80000–150000
Glas	0,01	50–70	2,6	1000–3000	2–3	80000
Stahl	0,2–0,5	20–50	7,8	1000–3000	3–4	200000

Die erste Gruppe bilden die *Kunststofffasern*, zu denen auch Fasern aus Naturstoffen, wie Sisal oder Holz, zuzuordnen sind. Als Kunststofffasern werden vorwiegend Polypropylenfasern mit einem Durchmesser von rd. $\frac{1}{100}$ mm verwendet. Ihr E-Modul liegt in der Regel in der Größenordnung von 5000 bis 8000 N/mm² und damit weit unter dem des Betons. Neuere Entwicklungen deuten darauf hin, daß es möglich erscheint, auch für Beton geeignete Kunststofffasern mit höherem E-Modul herzustellen.

Bild 1
Für Mörtel und Beton zur Anwendung kommende Faserarten



Zur zweiten Gruppe der für Beton verwendbaren Fasern sind die *Glas- und Mineralfasern* sowie die seit langem bekannten Asbestfasern zu rechnen. Hierbei handelt es sich um extrem feine Fasern mit einem Durchmesser von $\frac{1}{10.000}$ mm beim Asbest und von größenordnungsmäßig $\frac{1}{100}$ mm beim Glas. Ihr E-Modul liegt über dem des Betons.

Die dritte Gruppe bilden die *Stahlfasern* und praktisch auch die Kohlenstofffasern. Letztere sind aber wegen ihres hohen Preises für den Betonbau zur Zeit noch nicht von Bedeutung. Der E-Modul der Stahlfasern liegt mit mehr als 200.000 N/mm^2 weit über dem des Betons. Für Beton übliche Stahlfasern haben in der Regel einen Durchmesser von 0,2 bis 0,5 mm, und die Faserlängen liegen zwischen 20 und 50 mm.

3. Stand der Erkenntnisse über Faserbeton

3.1 Aufgabe und Wirkungsweise der Fasern

Im Stahl- und Spannbeton werden im allgemeinen dem Beton die Druckkräfte und dem Stahl die Zugkräfte zugeordnet. Durch die von verschiedenen Forschern aufgestellten Bruchhypothesen ist in etwa bekannt, wo im Makrogefüge des Betons je nach Belastungsart die größten Spannungsspitzen auftreten, wie die Risse entstehen und wie sie sich fortsetzen.

Bei einem Verbundbaustoff, wie Faserbeton (siehe Bild 2), sollen die Fasern in der Mörtelmatrix einen Lastanteil übernehmen und die

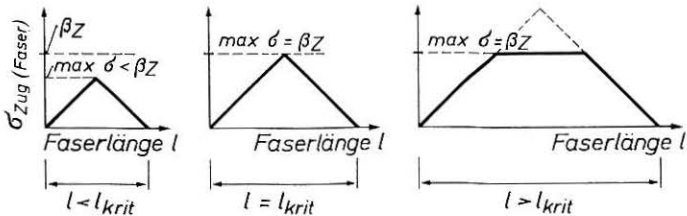
Bild 2
Bruchfläche eines
Stahlfaserbetons



Entstehung sowie die Ausbreitung von Rissen behindern. Voraussetzung für diese Wirkung der Fasern ist neben ihrer Verträglichkeit mit dem Zementstein, daß sie sich gut untermischen und gleichmäßig verteilen lassen sowie eine ausreichende Haftung, eine große Festigkeit und einen in der Regel höheren E-Modul als der Zementstein aufweisen.

Die Faserlänge, die mindestens erforderlich ist, damit eine Zugspannung in der Matrix durch Verbund auf die Faser übertragen und die Faser bis zu ihrer Zugfestigkeit beansprucht werden kann, wird als kritische Faserlänge l_{krit} bezeichnet.

Bild 3 zeigt die drei Möglichkeiten von Faserlängen. Aus verarbeitungstechnischen Gründen ist die übliche Faserlänge von eingemischten Glas- und Kunststoffasern häufig, von Stahlfasern immer



d = Faserdurchmesser

$$l_{krit} = \frac{d}{2} \cdot \frac{\beta_Z}{\tau_m}$$

β_Z = Faserzugfestigkeit

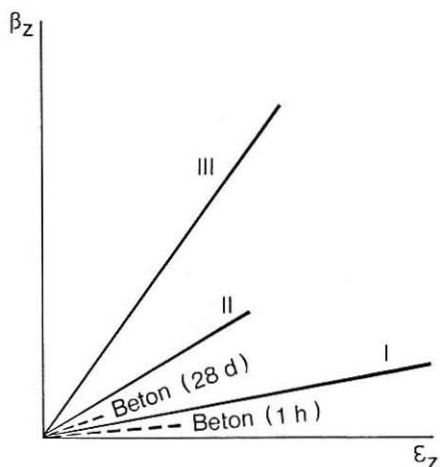
τ_m = mittl. Verbundspannung

Bild 3 Zugspannung in der Faser in Abhängigkeit von der Faserlänge nach [1]

kleiner als die kritische Faserlänge. Das heißt, diese Fasern werden nicht bis zum Bruch beansprucht, sondern vorher aus der Matrix herausgezogen.

Mehr symbolisch sind die Zugspannungsdehnungslinien für verschiedene Faserwerkstoffe und Beton in Bild 4 dargestellt. Der Beton wurde in diesem Verformungsdiagramm zweimal aufgeführt; einmal der junge Beton mit einem relativ großen Formänderungsvermögen und unbedeutender Zugfestigkeit und dann der Festbeton mit einem relativ geringen Formänderungsvermögen und seiner verhältnismäßig kleinen Zugfestigkeit.

Bild 4
Spannungsdehnungslinien (symbolisch) für verschiedene Faserwerkstoffe und Beton



Der Fasertyp I, wie z. B. eine Kunststofffaser, weist eine sehr große Bruchdehnung auf, hat relativ geringe Festigkeiten und einen kleinen E-Modul.

Der Fasertyp II, wie z. B. eine Glasfaser, hat eine mittlere Bruchdehnung, eine hohe Zugfestigkeit und einen mittleren E-Modul.

Der Fasertyp III, wie z. B. eine Stahlfaser, hat eine große Bruchdehnung, eine hohe Zugfestigkeit und einen hohen E-Modul.

Der Fasertyp I kann aufgrund seines niedrigen E-Moduls vorwiegend nur in jungem Beton, der noch ein relativ großes Formänderungsvermögen aufweist, wirksam werden, während die Fasertypen II und III sowohl in jungem als auch in erhärtetem Beton wirksam werden können, solange der Verbund zwischen Faser und Beton ausreicht, d. h. ihre kritische Länge groß genug ist, Kräfte zu übertragen. Beim Überschreiten der Verbundfestigkeit, was im Bruchbereich die Regel ist, werden die Fasern aus der Matrix herausgezogen. Auch in diesem Stadium können sie noch Kräfte aufnehmen, gleichzeitig wird durch das Herausziehen noch Energie verzehrt, was zu einem größeren Formänderungsvermögen des Faserbetons führt. Zu einem Bruch der Fasertypen II und III kommt es in der Regel nicht.

Die Wirkungsweise einer Faser im Beton kann außer an spannungsoptischen Modellen durch ihr Verhalten im gerissenen Beton veran-

schaulich werden. Die Modellvorstellung in Bild 5 mit einem idealisierten Zuschlagkorn in einer Fasermörtelmatrix bei Druck- und Zugbelastung zeigt den möglichen Rißverlauf und die mögliche Rißbehinderung. Demnach kann eine Faser nur in der Mörtelmatrix wirksam werden und hier die Rißentstehung oder -ausbreitung verhindern, so daß auch insgesamt die Rißgröße verringert wird. Die Röntgenaufnahme in Bild 6 einer auf Druck beanspruchten Betonscheibe zeigt, wie durch Stahlfasern die Rißausbreitung eines Haft- risses zwischen Mörtelmatrix und Zuschlagkörnern in die Mörtelmatrix hinein verhindert wird.

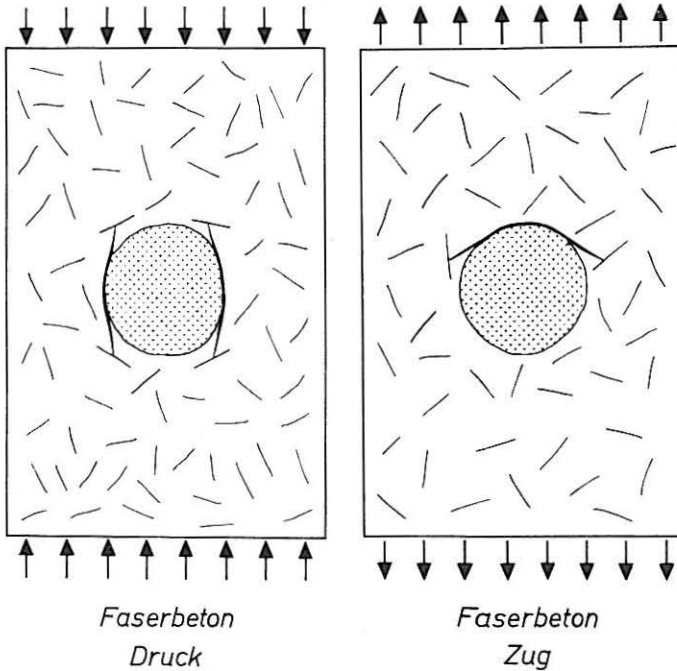


Bild 5 Modellvorstellung der Haftrißentstehung zwischen Zuschlag und Mörtelmatrix

Die Behinderung der Rißausbreitung und Übernahme der Zugkräfte wird besonders beim Spaltzugversuch erkennbar. In Bild 7 (7 a und 7 b) sind die verschiedenen Bruchphasen eines Betons mit 2 Vol.-% Stahlfasern dargestellt.

Bei fortgeschrittener Belastung (Bild 7 b) liegt keine reine Spaltzugbeanspruchung mehr vor.

3.2 Kennwerte für die Eigenschaften von Faserbeton

Die Biegezugfestigkeit oder die Spaltzugfestigkeit, die Energieaufnahme und die Schlagfestigkeit sind die Eigenschaften des Faserbetons, die diesen gegenüber Normalbeton besonders auszeich-

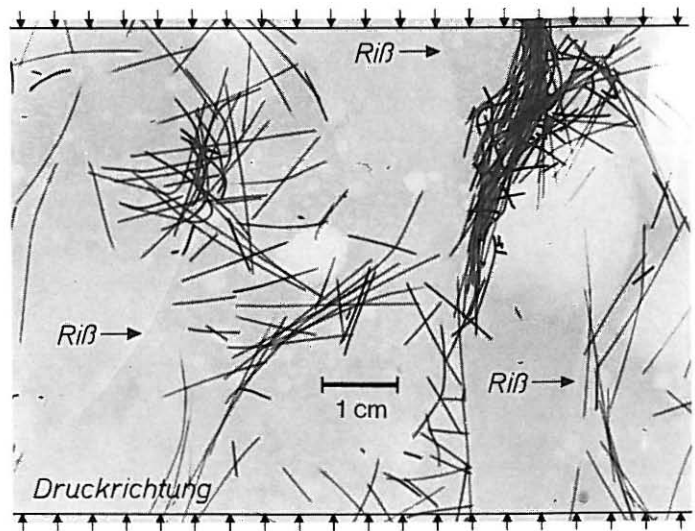


Bild 6 Röntgenaufnahme eines Stahlfaserbetons mit Hafrissen

nen. Als eigentliche Spaltzugfestigkeit gilt die bis zum Auftreten des ersten Risses erhaltene Beanspruchung. Bei weiterer Festigkeitssteigerung wird dann mehr oder weniger der Haftverbund der Fasern geprüft. Im allgemeinen wird bei Druckbeanspruchung die Fläche unterhalb der Spannungsstauchungslinie als Energieaufnahme bezeichnet. Vielfach dargestellte Spannungsdehnungslinien von Stahlfaserbetonen zeigen bei Auftreten des ersten Risses einen steilen Lastabfall, der im wesentlichen durch die in der Prüfmaschine gespeicherte Energie bedingt ist und nicht exakt einem verformungsgesteuerten Spannungsdehnungsverlauf entspricht.

Als Gerät zur Prüfung der Schlagfestigkeit wird ein Fallwerk verwendet, wie es in [2] näher beschrieben wurde. Hiernach wird die Anzahl der Schläge mit einem 50 kg schweren Fallgewicht aus 100 cm Fallhöhe bis zum Bruch der zylinderförmigen Betonprobe (\varnothing 15 cm, $h = 30$ cm) als Schlagfestigkeit definiert.

3.3 Eigenschaften von Faserbeton

Eine zusammenfassende Literaturübersicht wurde in einem vom Innenministerium des Landes NRW geförderten Forschungsvorhaben am Lehrstuhl für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart angefertigt (noch nicht veröffentlicht). Wenn auch die bisherigen Versuchsergebnisse infolge verschiedener Einflußgrößen stark streuen, so kann doch übereinstimmend aus den Ergebnissen der Literatur gefolgert werden, daß die Betondruckfestigkeit durch Zugabe von Fasern kaum, die Zugfestigkeit, bestimmt als reine Zugfestigkeit, als Spaltzugfestigkeit und als Biegezugfestigkeit, durch Zugabe von Glas- und Stahlfasern erheblich erhöht werden kann. Übereinstimmend ergibt sich auch die Erhöhung der Energieaufnahme des Betons, die je nach Faserart und -menge mehr als den

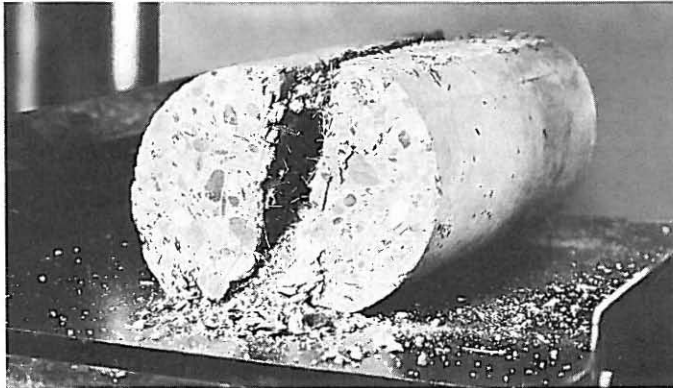
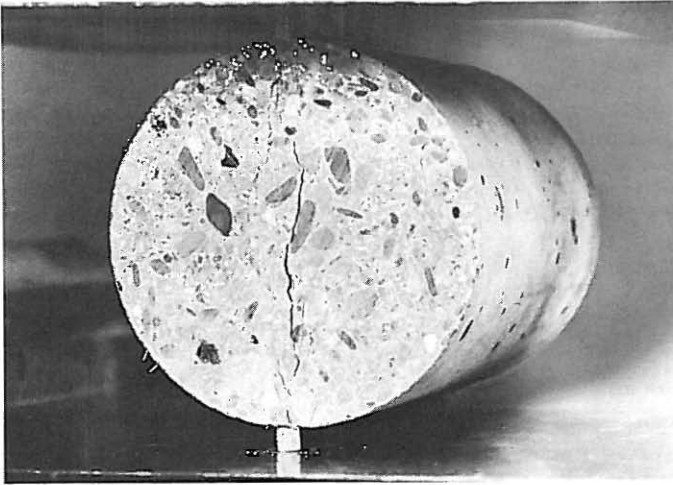


Bild 7 Spaltzugprüfung eines Stahlfaserbetons

20fachen Wert eines Betons ohne Fasern annehmen kann. Zur dynamischen Beanspruchbarkeit wird zwar hin und wieder angeführt, daß sie größer ist als die von Normalbeton; systematische Untersuchungen hierüber sind jedoch noch nicht bekanntgeworden.

4. Untersuchungen über die Schlagfestigkeit des Betons in Abhängigkeit vom Stahlfasergehalt

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden bereits vor mehr als 10 Jahren umfangreiche Untersuchungen über die dynamische Beanspruchbarkeit und besonders über die Schlagfestigkeit des Betons ohne Fasern durchgeführt. In den nachfolgend beschriebenen Versuchen wurden neben der Schlagfestigkeit auch die Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit und Formänderung von Faserbeton an Zylindern 15/30 cm untersucht. Im folgenden wird aus dieser um-

fangreichen Arbeit lediglich auf den Einfluß des Fasergehalts kennzeichnend eingegangen.

4.1 Zusammensetzung und Frischbetoneigenschaften

Der Ausgangsbeton hatte einen Zementgehalt von rd. 400 kg PZ 35 F je m³ verdichteten Betons und einen Wasserzementwert von 0,42; die Kornzusammensetzung des Kiessandgemisches aus Rheinkies entsprach etwa der Sieblinie B 16 und die Konsistenz etwa K 1. Dem Beton wurden unterschiedliche Stahlfasermengen von 1, 2 und 3 Vol.-% zugemischt, die Stahlfasern hatten eine Länge von 25 mm und einen Durchmesser von 0,4 mm und damit ein Verhältnis $l : d$ von 63.

Wie aus Bild 8 hervorgeht, wurde die Konsistenz des Ausgangsbetons – gekennzeichnet mit dem Verdichtungsmaß v – durch die Zugabe der Fasern steifer und damit schwerer verarbeitbar. Bei der Zugabemenge von 3 Vol.-% wurde die Grenze der Verdichtbarkeit dieses Betons durch Rütteln erreicht. Beton mit 3,5 Vol.-% Stahlfasern war nicht mehr vollständig verdichtbar.

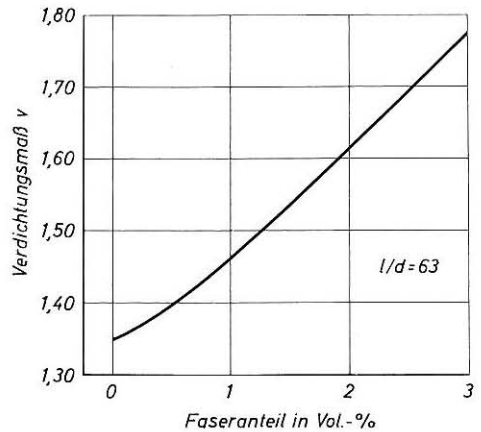


Bild 8
Verdichtungsmaß
in Abhängigkeit vom
Stahlfaseranteil

4.2 Eigenschaften des erhärteten Betons

Wie aus Tafel 2 hervorgeht, wurde die Druckfestigkeit bis zu einer Zugabemenge von 3 Vol.-% Stahlfasern um 44 % gegenüber der des Ausgangsbetons erhöht. Die Spaltzugfestigkeit war bei einem Faseranteil von 3 Vol.-% mehr als doppelt so hoch wie beim Beton ohne Fasern.

Dennoch müssen diese Festigkeitssteigerungen als gering angesehen werden gegenüber der Verbesserung der Schlagfestigkeit, die bei einem Faseranteil von 3 Vol.-% mehr als den 20fachen Betrag des Nullbetons erreichte.

In Bild 9 sind die Arbeitslinien des Ausgangsbetons unter Druckbelastung und die des gleichen Betons mit 1, 2 und 3 Vol.-% Stahlfasern dargestellt. Hierbei zeigen sich der erhebliche Einfluß der Erhöhung des Formänderungsvermögens nach Erreichen der Höchst-

Tafel 2 Festbetoneigenschaften

Faseranteil in Vol.-%	Druckfestigkeit N/mm ²	Spaltzugfestigkeit N/mm ²	Schlagfestigkeit als Anzahl der Schläge
() Anteil in % des Betons ohne Fasern			
0	481 (100)	38 (100)	27 (100)
1	563 (117)	40 (105)	127 (470)
2	607 (126)	63 (166)	216 (800)
2,5	641 (133)	72 (189)	490 (1815)
3	695 (144)	80 (211)	559 (2070)

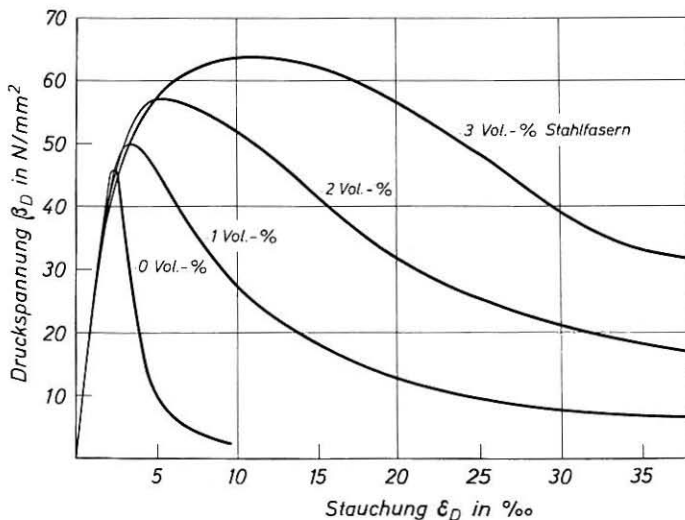


Bild 9 Arbeitslinien von Betonen mit unterschiedlichen Fasergehalten

last und die sehr viel größere Energieaufnahme gegenüber dem Ausgangsbeton.

Die Veränderungen des Formänderungsvermögens mit zunehmender Anzahl der Schläge gehen aus Bild 10 hervor. Auf der Abszisse wurde der Zeitablauf und auf der Ordinate des oberen Teils des Bildes die Größe der unter Schlag mit einer Kraftmeßdose gemessenen Belastung aufgetragen. Der Be- und Entlastungsvorgang dauerte rd. 1 Millisekunde, damit wurde eine Belastungsgeschwindigkeit von mehr als 100 000 N/mm² pro Sekunde erhalten. Dargestellt wurde hier nur der 1. und der 100. Schlag. Der Probekörper hielt bis zum Bruch rd. 400 Schläge aus.

Die Längsstaechung wird nach dem mittleren Teil des Bildes 10 vom ersten bis zum hundertsten Schlag größer und zeigt damit Gefüge-

änderungen und Gefügestörungen des Faserbetons an, die äußerlich noch nicht sichtbar waren. Auch der bleibende Anteil der Längsstauchung ist hier erkennbar und beträgt nach 100 Schlägen rd. 0,3 %.

In Bild 10, unten, ist die Querdehnung beim ersten und beim hundertsten Schlag dargestellt. Dabei verhält sich die Querdehnung beim ersten Schlag ähnlich der beim unbewehrten Beton. Mit zunehmender Schlagzahl nimmt die Querdehnung – und zwar sowohl

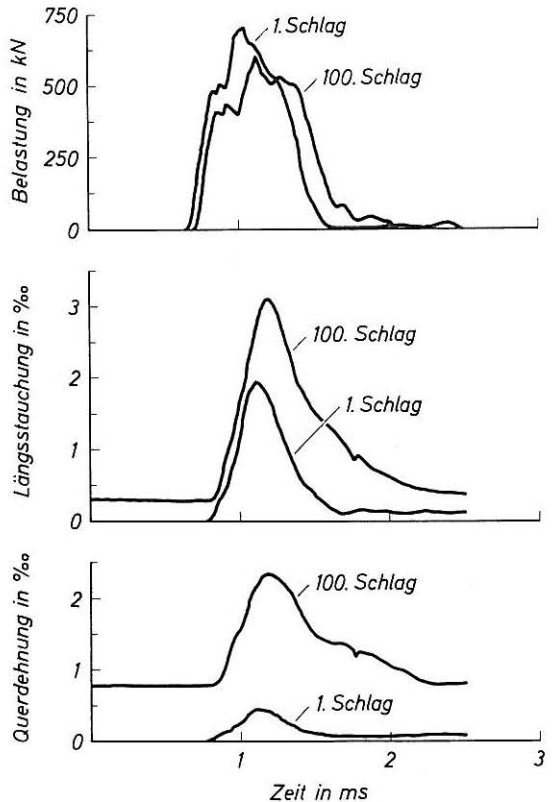


Bild 10 Last- und Verformungsverlauf in einem Betonzylinder \varnothing 15 cm, $h = 30$ unter Schlagbelastung

der bleibende als auch der elastische Anteil – stark zu, so daß die Querdehnung noch mehr als die Längsstauchung schon im Zustand nach 100 Schlägen auf erhebliche Gefügestörungen des Betons hinweist. Anzeichen dafür waren mit bloßem Auge auf der Oberfläche nicht erkennbar. Die große Querdehnung läßt vermuten, daß bereits viele kleine Anrisse im Beton vorhanden waren, die sich nur zum Teil nach Entlastung wieder schlossen.

4.3 Faserverteilung und -orientierung

Bei den Versuchen über die Schlagfestigkeit wurde festgestellt, daß durch ungleichmäßige Faserverteilung und herstellungsbedingte Orientierung der Fasern sich größere Streuungen der Ergebnisse ergaben. Durch Herabsetzung des Größtkorns von 32 auf 16 mm wurde versucht, eine gleichmäßigere Verteilung der Fasern zu erhalten. Aus den Röntgenaufnahmen in Bild 11 wird deutlich, wie durch Verringerung des Größtkorns von 32 mm (Bild 11, links) auf 16 mm (Bild 11, rechts) bei sonst gleicher Betonzusammensetzung die Fasern gleichmäßiger verteilt werden.

Durch das Einbringen und Verdichten des Faserbetons wird eine bevorzugte Orientierung der Fasern rechtwinklig zur Einfüllrichtung erhalten. Wie sich diese z. B. auf die Biegezugfestigkeit auswirkt, zeigt Bild 12. Während die Biegezugfestigkeit bei liegender Herstellung der Prismen 15 cm x 15 cm x 70 cm im Vergleich zum Beton ohne Fasern erheblich verbessert wurde, ergaben sich bei stehender Herstellung sogar noch etwas geringere Festigkeiten als beim Beton ohne Fasern. Um die Orientierung der Fasern durch die Schütt- und Verdichtungseinwirkung einzuschränken, sollte angestrebt werden, Faserbeton so zusammenzusetzen, daß er sich auch ohne stärkere Verdichtungseinwirkung ausreichend dicht herstellen läßt.



Bild 11 Röntgenaufnahmen von Stahlfaserbetonen mit 32 mm Größtkorn (links) und 16 mm Größtkorn (rechts)

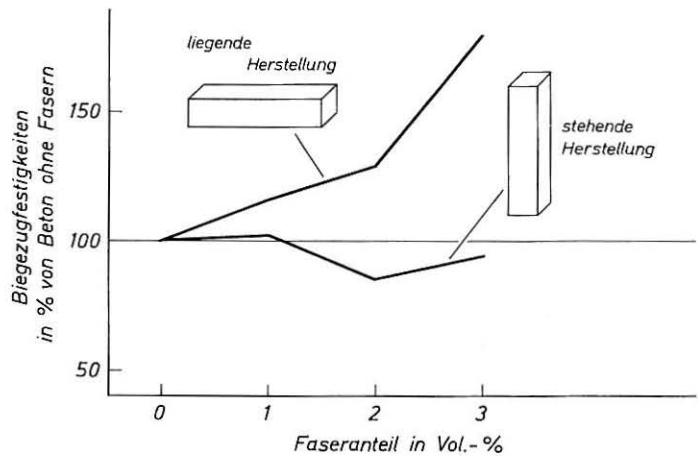


Bild 12 Veränderung der Biegezugfestigkeit mit dem Faseranteil in Abhängigkeit von der Herstellung

5. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Zur Anwendung kommen im Bauwesen neben den seit langem bekannten Asbestfasern zur Verbesserung der Mörtel- und Betoneigenschaften zur Zeit vorwiegend Kunststoff-, Glas- und Stahlfasern.

Die Wirkungsweise der Fasern beruht im wesentlichen auf einer Behinderung der Ribbildung und der Ribausbreitung.

Verbessert werden mit Glas- und Stahlfasern bestimmte Eigenschaften des erhärteten Betons, vorwiegend die Zugfestigkeit und ganz besonders die aufnehmbare Bruchenergie sowie die Widerstandsfähigkeit gegen dynamische Beanspruchungen. Die Wirksamkeit der Kunststofffasern ist zur Zeit vorwiegend auf die Verbesserung der Grünstandfestigkeit und des jungen Betons mit noch relativ großem Verformungsvermögen beschränkt.

Mit Hilfe eines Schlagwerks konnte nachgewiesen werden, daß bereits durch Zugabe von 1 Vol.-% Stahlfasern die Schlagfestigkeit, ausgedrückt durch die Anzahl der Schläge bis zum Bruch, gegenüber einem Beton ohne Stahlfasern um mehr als den vierfachen Wert erhöht werden kann.

Mit höheren Faseranteilen konnten die Schlagfestigkeiten weiter gesteigert werden, so daß schließlich bei einem Stahlfaseranteil von 3 Vol.-% bei entsprechend zusammengesetzten Betonen im Mittel eine rd. 20fach höhere Schlagfestigkeit gegenüber einem Beton ohne Fasern erhalten wurde.

Bei einem angenommenen Stahlfaserpreis von DM 2,00 pro Kilogramm und einem Stahlfaseranteil von 1 Vol.-% im Beton würde der Materialpreis des Betons um rd. DM 150 je m³ verteuert.

Trotz dieser Verteuierung dürfte der Einsatz von Stahlfasern besonders für dynamisch beanspruchte Betonbauteile, wie Schutzräume, Tresorräume und Rammpfähle, wirtschaftlich sein. Bei Rammpfäh-

len würde z. B. ein Pfahlkopf oder ein besonders hergestelltes Koppelstück als Pfahlkopf aus Stahlfaserbeton für die meisten Anwendungsfälle ausreichend und zweckmäßig sein.

SCHRIFTTUM

- [1] Wischers, G.: Faserbewehrter Beton. beton 24 (1974) H. 3, S. 95/99, und H. 4, S. 137/141; ebenso Betontechnische Berichte 1974, Beton-Verlag, Düsseldorf 1975, S. 45/70.
- [2] Dahms, J.: Über die Schlagfestigkeit des Betons für Rammpfähle. beton 18 (1968) H. 4, S. 131/136, und H. 5, S. 177/182; ebenso Betontechnische Berichte 1968, Beton-Verlag, Düsseldorf 1969, S. 49/82.