



Institut für Werkstoffe des Bauwesens
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Faserbeton

Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel

Frühlingstrimester 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Allgemeines.....	5
1.2	Historische Entwicklung und wirtschaftliche Bedeutung [Lit 12].....	5
2	Zusammenwirken von Fasern und Matrix	8
2.1	Verbund Faser - Matrix [Lit 49].....	8
2.2	Ungerissener Beton	9
2.3	Verhalten nach dem Anriss	9
2.4	Fasern	14
2.4.1	Stahlfasern.....	14
2.4.2	Glasfasern.....	16
2.4.3	Kunststofffasern (Polymere)	17
2.4.4	Kohlenstoff- und Zellulosefasern.....	19
3	Zusammensetzung	20
3.1	Beton	20
3.1.1	Gesteinskörnung.....	20
3.1.2	Wassercementwert, Zementgehalt und Betonzusätze	20
3.2	Fasern	21
3.2.1	Länge und Durchmesser.....	22
3.2.2	Fasergehalt	22
4	Herstellung	24
5	Eigenschaften	26
5.1	Verhalten bei Druckbeanspruchung	26
5.2	Verhalten bei Zugbeanspruchung.....	27
5.3	Verhalten bei Biegebeanspruchung.....	28
5.3.1	Einmalige Belastung	28
5.3.2	Wiederholte Belastung	29

5.3.3	Einfluss hoher Temperaturen	29
5.4	Verhalten bei Schlag- und Stoßbeanspruchung	30
5.5	Verhalten bei Querkraft- und Torsionsbeanspruchung	31
5.6	Kriechen und Schwinden	32
5.7	Reißneigung bei behindertem Schwinden	32
5.8	Dauerhaftigkeit	33
5.8.1	Glasfaserbeton	33
5.8.2	Stahlfaserbeton	34
5.8.3	Kunststofffaserbeton	35
5.9	Frostwiderstand, Frost- und Taumittelwiderstand	35
5.10	Hitzebeständigkeit, Brandverhalten	36
5.11	Verschleißwiderstand	36
5.12	Transportvorgänge	37
6	Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton [Lit 4]	38
6.1	Tragverhalten	38
6.2	Faserauswahl	39
6.3	Klassifikation	40
6.4	Ermittlung der Leistungsfähigkeit und Berücksichtigung der Faserwirkung in der Tragwerksplanung	41
6.5	Anwendungsbereich der Richtlinie Stahlfaserbeton	46
7	Anwendungsgebiete für Faserbetone	48
8	Fasermatten- und Gittermattenbeton	49
8.1	Fasermatten und Gittermatten aus Stahl	49
8.2	Herstellung von Fasermatten- und Gittermattenbeton	50
8.3	Eigenschaften	51
8.3.1	Druckfestigkeit	51
8.3.2	Zugfestigkeit	51
8.3.3	Elastizitätsmodul	52

8.3.4	Langzeitverformungen	53
8.4	Anwendung	53
9	Literatur	54

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Dieses Skript basiert vornehmlich auf [Lit 4], [Lit 12] und [Lit 26].

Faserbeton ist ein Beton, dem bei der Herstellung zur Verbesserung des Riss- und Bruchverhaltens Fasern, vorzugsweise Stahl-, Glas- oder Kunststofffasern zugesetzt werden. Die Fasern sind im Zementstein bzw. im Mörtel, der Matrix, eingebettet und wirken dort als Bewehrung. Die Matrix bestimmt in erster Linie das Tragverhalten des Betons. Im Gegensatz zu dem Beton ohne Fasern benutzt man beim Faserbeton den Begriff Beton auch dann, wenn das Größtkorn 4 mm nicht überschreitet.

Die im Zementstein vorwiegend vorhandenen Calciumsilicathydrate bilden ein unregelmäßiges Geflecht aus kurzen Kristallfasern, das einer Druckbeanspruchung einen erheblichen Widerstand entgegensetzt. Bei einer Zugbeanspruchung jedoch werden die einzelnen Kristalle, die im Mittel nur etwa 1 μm lang sind, aus dem Geflecht herausgezogen, bevor ihre Zugfestigkeit erreicht ist [Lit 78]. Festigkeit und Bruchdehnung sowie das Arbeitsvermögen des Betons bei Zugbeanspruchung sind deshalb relativ klein. Es bilden sich bereits frühzeitig Risse.

Eine in die Matrix eingebaute Bewehrung aus zugfesten und dehnfähigen Fasern hemmt das Öffnen der Risse bzw. bewirkt bei größeren Dehnungen eine Aufteilung in viele, sehr feine und in der Regel unschädliche Risse (Bild 1). Unter bestimmten Voraussetzungen verbinden die Fasern die Rissufer zugfest miteinander und ermöglichen auch bei größeren Dehnungen noch eine Übertragung von nennenswerten Zugkräften.

Es besteht die Möglichkeit, in den Beton durchgehende lange Fasern in Richtung der zu erwartenden Zugbeanspruchung einzulegen oder kurze Fasern einzumischen. Die kurzen Fasern können je nach den Verarbeitungsbedingungen im erhärteten Beton

- nach Lage und Richtung räumlich gleichmäßig verteilt sein,
- mit unterschiedlicher Richtung vorwiegend in einer Ebene angeordnet sein, etwa beim Faserspritzbeton,
- einachsig ausgerichtet gleichmäßig über den Querschnitt verteilt sein, beispielsweise bei stranggepressten Betonwaren.

Die langen Fasern werden in Form von Gittern oder Matten eingesetzt.

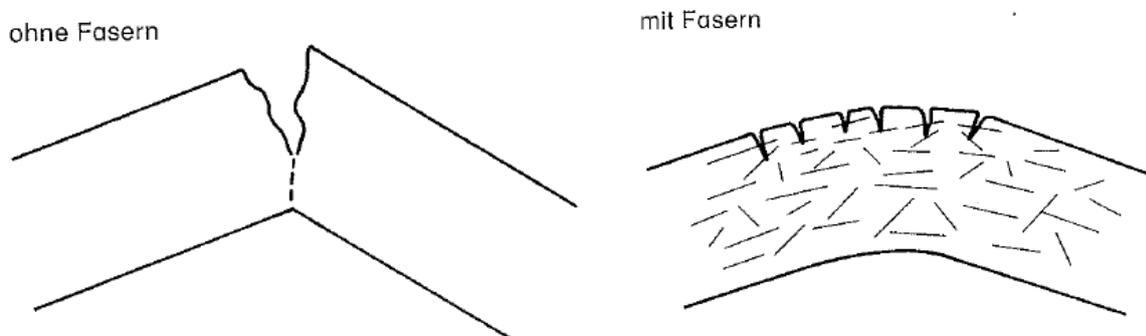


Bild 1: Riss bremsende und verteilende Wirkung von Fasern

1.2 Historische Entwicklung und wirtschaftliche Bedeutung [Lit 12]

So zeitgenössisch die Fasertechnik auf den ersten Blick auch anmuten mag: der Grundgedanke, Baustoffe durch Faserzugabe zu verstärken, ist uralte. Die Baumeister der Antike stell-

ten bereits Lehmziegel unter Zugabe von Stroh und Tierborsten her. Erst Ende des 19. Jahrhunderts verstärkte man in Kalifornien und einige Jahre später auch in Frankreich Beton mit kleinen Stahlstücken und Stahlfasern. Dieser Einsatz diente Forschungszwecken und führte 1874 zum ersten Patent für Stahlfaserbeton. Eine spürbare Intensivierung der praktischen Stahlfaserbeton-Anwendungen in den USA setzte Ende der sechziger, in Deutschland erst Ende der siebziger Jahre ein. Besonders dynamisch hat sich hier der Einsatz des Stahlfaserbetons erst in den letzten Jahren entwickelt. So hat sich der Absatz binnen zehn Jahren verzehnfacht (Bild 2).

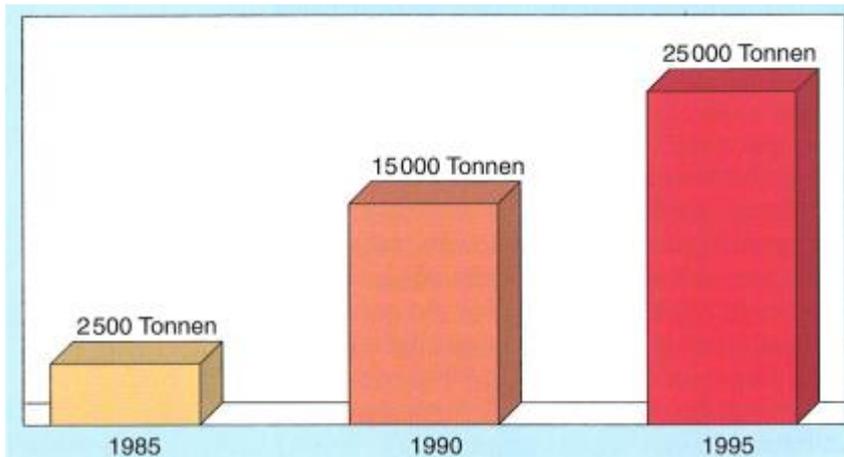


Bild 2: Stahlfaserabsatz in Deutschland

Die zunehmende Anwendung des Stahlfaserbetons führte in einer Reihe von Ländern zu Normen, die Regeln zur Bemessung bestimmter Bauteile, zur Prüfung der Eigenschaften und für die Herstellung des Stahlfaserbetons enthalten. Die Verteilung der Anwendungsgebiete zeigt Bild 3.

Besonders schnell haben sich Stahlfasern als Ersatz für die konstruktive Mattenbewehrung in Beton-Industriefußböden durchgesetzt. Bereits 25 % aller in Deutschland erstellten Betonböden sind mit Stahlfasern bewehrt. Darüber hinaus setzen innovative Bauunternehmen zunehmend Stahlfaserbeton auch bei der Erstellung von Tunnelinnenschalen, Tübbings und als Stahlfaserspritzbeton im Tiefbau ein. Im Wohnungsbau zeichnen sich weitere Einsatzmöglichkeiten bei Fundamenten, Kellersohlplatten, Kellerwänden und Estrichen ab.

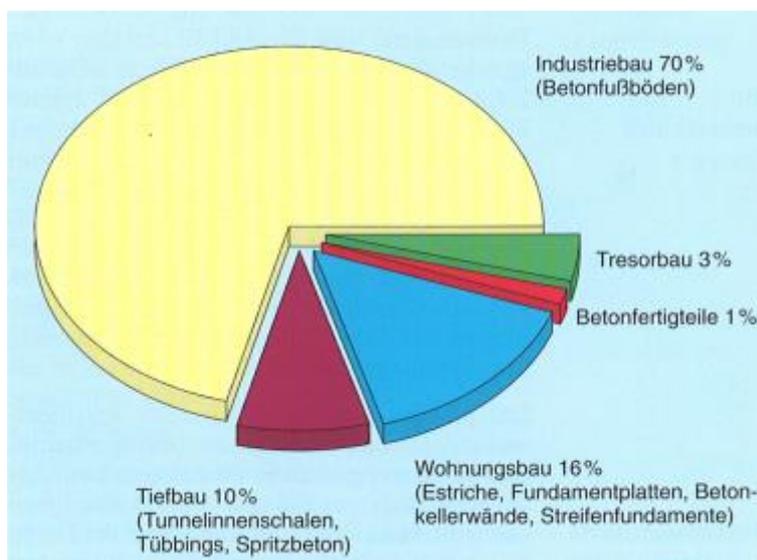


Bild 3: Anwendungsgebiete des Stahlfaserbetons in Deutschland

2 Zusammenwirken von Fasern und Matrix

2.1 Verbund Faser - Matrix [Lit 49]

Das Verbundverhalten zwischen Faser und Matrix wird im Wesentlichen durch chemische und mechanische Effekte gekennzeichnet. In Abhängigkeit vom Fasermaterial überwiegt eine Verbundart; bei Metallfasern ist dies der mechanische Verbund.

Der mechanische Verbund wird durch die Oberflächenbeschaffenheit, die Querschnittsform und die Gestaltung in Faserlängsrichtung beeinflusst. Vertiefungen im μm -Bereich, wie z. B. die feine Längsstrukturierung bei Polyacrylnitrilfasern, oder die herstellungsbedingte Oberfläche bei gefrästen Stahlfasern oder spezielle Formgebungen der Fasern, z. B. spezielle Endverankerungen wirken hier positiv [Lit 80]. Auch bei den Querschnittsformen gibt es einige Variationsmöglichkeiten, wobei der Verbund der Faser mit der Matrix um so besser ist, je größer die Oberfläche im Verhältnis zur Querschnittsfläche ist ($1/d$ - Verhältnis) [Lit 80].

In [Lit 34] wird der chemische Verbund von Stahlfasern mit der Matrix beschrieben. Die Grenzschichtausbildung ist jedoch nicht vom Fasermaterial abhängig, deshalb können die Kenntnisse aus diesem Bericht auch für Kunststofffasern übernommen werden. Die Mikrostruktur der Grenzschichtregion besteht aus einer dünnen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -reichen Schicht an der Oberfläche der Fasern. Diese ist aufgewachsen auf einer hochporösen Zone, die hauptsächlich aus CSH und CH-Kristallen besteht. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei Belastung ein Riss von der porösen Zone ausgeht [Lit 34]. Insbesondere bei der Verwendung von Kunststofffasern hat sich der Einsatz von Silicastaub (amorphe Kieselsäure) als günstig erwiesen. Die amorphe Kieselsäure fängt Calciumionen ein und verringert dadurch die Bildung von Calciumhydroxid (CH), welches durch Ausbildung der porösen Zone wie eine „Gleitschicht“ wirkt und den Haftverbund zwischen den Fasern und der Matrix herabsetzt [Lit 10].

In Bild 4 wird die Kontaktzone zwischen (Stahl-)Fasern und dem Zementstein veranschaulicht: Direkt auf der Oberfläche der Faser (Kontaktzone; duplex film) bildet sich eine Schicht aus CH-Phasen. Darauf folgt eine poröse Lage (porous layer), nach welcher der Zementstein folgt.

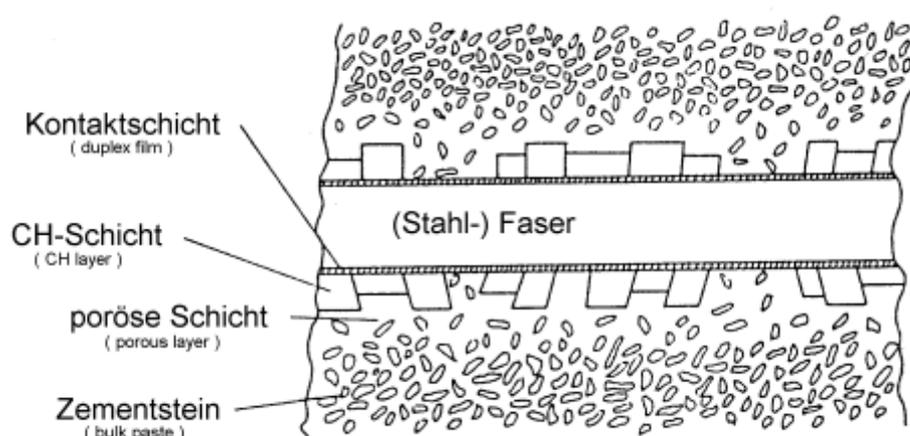


Bild 4: Schematische Darstellung der Kontaktzone zwischen Stahlfaser und Zementstein [Lit 77]

Nachteilig auf den Verbund der Fasern mit der Matrix können sich Verschmutzungen der Faseroberfläche auswirken. Da bei der Herstellung der Fasern für die Produktionsmaschinen

Schmiermittel verwendet werden, kann auf den Fasern ein feiner Ölfilm zurückbleiben, der zu einer Verminderung der Haftfähigkeit mit der Mörtelmatrix beiträgt [Lit 34]. Es kann aber auch sein, dass sich auf den Fasern (v. a. bei den Metallfasern) eine Oxidschicht ausbildet, oder dass die Fasern beschichtet sind. Dies kann sich negativ auf den Verbund auswirken [Lit 34]. Durch geeignete raue Beschichtungen (i. d. R. nur bei Metallfasern) kann jedoch auch ein umgekehrter Effekt, eine Erhöhung der Haftfestigkeit erzielt werden [Lit 34, Lit 13].

2.2 Ungerissener Beton

Die Bruchdehnung der Zementsteinmatrix bei einer Zugbeanspruchung ist wesentlich geringer als die Bruchdehnung der infrage kommenden Faserwerkstoffe. Infolgedessen reißt die Matrix stets, bevor die volle Tragfähigkeit der Fasern erreicht ist. Vor der Rissbildung beteiligen sich die Fasern nur entsprechend dem Verhältnis ihrer Dehnsteifigkeit $E_f A_f$ ($E = E$ -Modul, $A =$ Querschnitt) zur Dehnsteifigkeit $E_b A_b$ des Betons an der Übertragung von Zugkräften. Dieser Beitrag ist sehr gering, weil der Fasergehalt aus Gründen der Einmischbarkeit und aus Kostengründen meist nur wenige Vol.-% beträgt und darüber hinaus bei eingemischten Fasern nur ein Teil annähernd in Richtung der Beanspruchung orientiert ist. Daher kann selbst durch den Zusatz von Stahl- oder Kohlenstofffasern, deren Elastizitätsmodul im Vergleich zu dem der Matrix eine Zehnerpotenz größer ist, die Risslast nach den bisherigen Untersuchungsergebnissen nur beschränkt angehoben werden. Eine Möglichkeit, die Fasern im ungerissenen Zustand zu aktivieren, ist das Vorspannen der Fasern. Dies kann grundsätzlich durch eine Dehnung des Betons mittels Zugabe von Quellzusätzen (Freikalk, Kalziumsulfoaluminat) erreicht werden [Lit 22].

2.3 Verhalten nach dem Anriss

Die den Riss kreuzenden und beiderseits in der Matrix verankerten Fasern „vernähen“ die beiden Rissufer miteinander und behindern die Ausbreitung des Risses. Sie wirken somit als Rissbremse (Bild 5). Durch das Vorspannen der Fasern kann das Verhalten nach Rissbildung bei rückgängiger Belastung günstig beeinflusst werden (Schließen der Risse) [Lit 22].

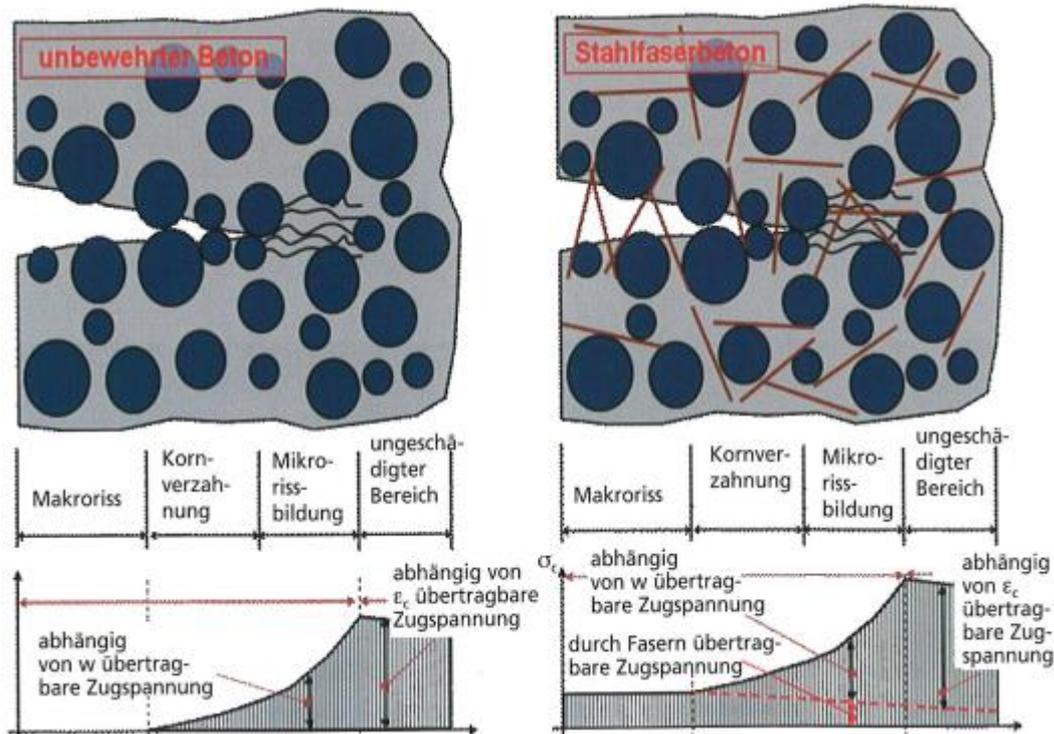


Bild 5: Querschnitt eines unbewehrten Betons und eines Stahlfaserbetons unter Zug- oder Biegezugbeanspruchung; Betrachtung auf Mikrostrukturebene [Lit 4]

Ist die Faser ausreichend lang und fest eingebettet, kann sie bis zu ihrer Zugfestigkeit beansprucht werden. Andernfalls wird sie vor dem Erreichen der Zugfestigkeit auf einer Seite aus der Matrix herausgezogen. Die Verankerungslänge, die zur Einleitung der Faserbruchlast erforderlich ist, wird als Haftlänge l_H bezeichnet. Sie hängt von der aufnehmbaren Verbundspannung und vom Durchmesser bzw. dem Umfang der Fasern ab. Für runde Fasern mit dem Durchmesser d und einer Zugfestigkeit f_t gilt

$$l_H = \frac{d}{4} \cdot \frac{f_t}{\tau_m}$$

Dabei ist τ_m die mittlere Verbundfestigkeit, die je nach Faserart zwischen 1 und 10 N/mm² liegen kann [Lit 56]. Für eine Stahlfaser mit $d = 0,4$ mm, $f_t = 1400$ N/mm² und $\tau_m = 5$ N/mm² ergibt sich die erforderliche Haftlänge zu

$$l_H = \frac{0,4}{4} \cdot \frac{1400}{5} = 28 \text{ mm.}$$

Entspricht die Faserlänge dem zweifachen Wert der Haftlänge, wird bei einem Matrixriss in halber Faserlänge die Zugfestigkeit der Faser gerade voll ausgenutzt (Bild 6, Mitte). Bei einem Riss außerhalb der halben Faserlänge wird das kürzere Ende der Faser herausgezogen. Erst wenn die gesamte Faserlänge ganz erheblich größer ist als die doppelte Haftlänge (rechtes Teilbild), wird auch bei Rissen an beliebiger Stelle eine weitgehende Ausnutzung der Zugfestigkeit der Faser möglich. Im statistischen Mittel wird hierzu eine Faserlänge von mindestens dem 4fachen Wert der erforderlichen Haftlänge benötigt. Diese Mindestlänge wird auch als kritische Faserlänge bezeichnet [Lit 56].

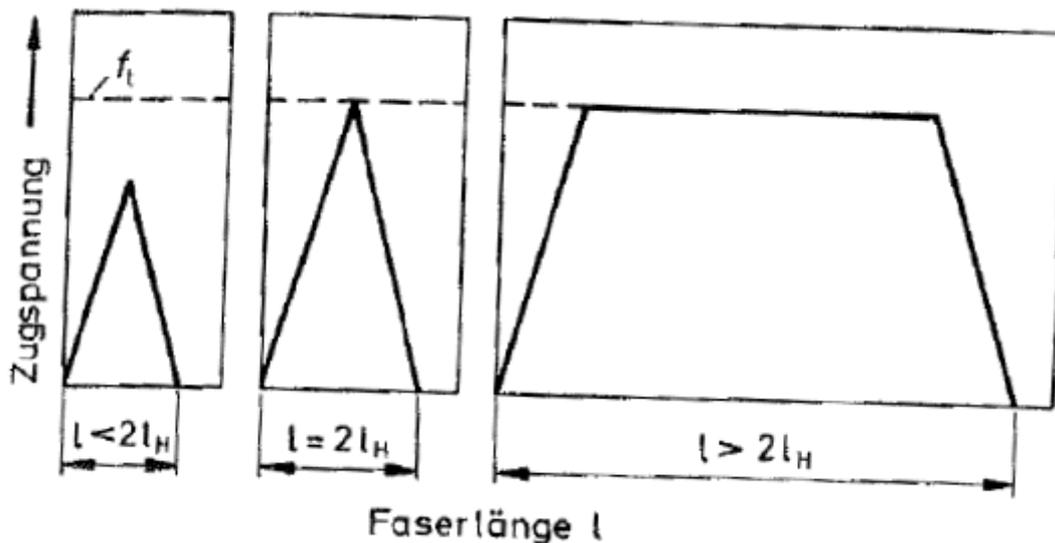


Bild 6: Zugbeanspruchung eingebetteter Fasern in Abhängigkeit von ihrer Länge [Lit 78]

Bei glatten runden Stahl-, Kohlenstoff- und manchen Kunststofffasern ist die kritische Faserlänge bei den aus Gründen der Verarbeitbarkeit infrage kommenden Durchmessern so groß, dass sich die Fasern nicht mehr einwandfrei einmischen lassen. Außerdem wäre ein Beton mit so langen Fasern kaum zu verarbeiten. Man muss deshalb kürzere Fasern wählen, deren Zugfestigkeit dann nicht mehr voll ausgenutzt werden kann. Dies ist jedoch, wie noch gezeigt wird, für die angestrebten Betoneigenschaften nicht unbedingt ein Nachteil, sondern kann sogar günstig sein. Bei Glas- und bestimmten Kunststofffasern können dagegen auch Fasern mit überkritischer Länge noch einwandfrei verarbeitet werden, weil die erforderliche Haftlänge aufgrund des geringen Faserdurchmessers und der guten Verbundfestigkeit relativ klein ist.

Mörtel oder Beton ohne Faserzusatz bricht unter einachsiger Zugbeanspruchung bei Erreichen der Zugfestigkeit im Allgemeinen nahezu schlagartig. Die Bruchdehnung liegt gewöhnlich unter 0,2 %. Werden in Krafrichtung genügend viele durchgehende Fasern eingelegt, dann können diese nach dem Anriss der Matrix die Zugkraft übernehmen. Der Fasergehalt in Volumenprozent, der gerade ausreicht, diese Aufgabe zu erfüllen, wird als kritischer Fasergehalt bezeichnet. Er hängt von der Zugfestigkeit der verwendeten Fasern, deren Länge und von der Betonzugfestigkeit ab. Er beträgt beispielsweise für Stahl- und Glasfasern 0,2 bis 0,3 Vol.-%.

Bei in Beanspruchungsrichtung orientierten Kurzfasern reicht der gleiche Fasergehalt aus, wenn die Faserlänge mindestens der kritischen Faserlänge entspricht. Bei Verwendung von Kurzfasern mit einer unterkritischen Länge ist ein höherer Fasergehalt erforderlich. Sind darüber hinaus die Kurzfasern nicht alle in Beanspruchungsrichtung, sondern in der Ebene oder im Raum unterschiedlich orientiert, so wächst der kritische Fasergehalt weiter stark an, da nur ein Teil der Fasern wirksam wird. Im Fall von Stahlfasern mit einem Längen/Durchmesser-Verhältnis von 100 (unterkritische Länge) und dreidimensionaler Orientierung beträgt der kritische Fasergehalt fast 2 Vol.-%. Er steigt auf das Doppelte an, wenn das Verhältnis von Faserlänge zu Durchmesser nur 50 beträgt [Lit 56].

Nach der Rissbildung in der Matrix sind für das weitere Tragverhalten mehrere Fälle zu unterscheiden, die in Bild 7 schematisch dargestellt sind:

Fall 1

Hier werden die Fasern vor Erreichen der Zugfestigkeit aus der Matrix herausgezogen, da die Verankerungslänge kleiner als die benötigte Haftlänge ist (unterkritische Faserlänge).

Die Zugkraft in der Faser erreicht ihr Maximum beim Überwinden der Haftung. Dann fällt sie ab. Das weitere Herausziehen wird jedoch durch Reibungskräfte behindert. Damit ist ein Energieverzehr verbunden. Daher haben derartige Faserbetone ein großes Arbeitsvermögen und zeigen ein quasi-zähes Verhalten.

Die maximal übertragbare Zugkraft ist abhängig vom Fasergehalt (unterkritisch oder überkritisch (Bild 8)). Der Verlauf der Arbeitslinie nach Überschreiten der Höchstlast wird außer vom Fasergehalt auch stark durch das Ausziehverhalten der Fasern beeinflusst.

Ein unterkritischer Fasergehalt erhöht die Höchstlast nur geringfügig. Nach Überschreiten der zur Höchstlast gehörenden Dehnung fällt die übertragbare Zugkraft stark ab. Durch Vorspannung der Fasern kann bei unterkritischem Fasergehalt die maximal aufnehmbare Last erhöht werden [Lit 22].

Fasergehalte, die deutlich über dem kritischen Fasergehalt liegen, führen zu einer nennenswerten Erhöhung der Höchstlast.

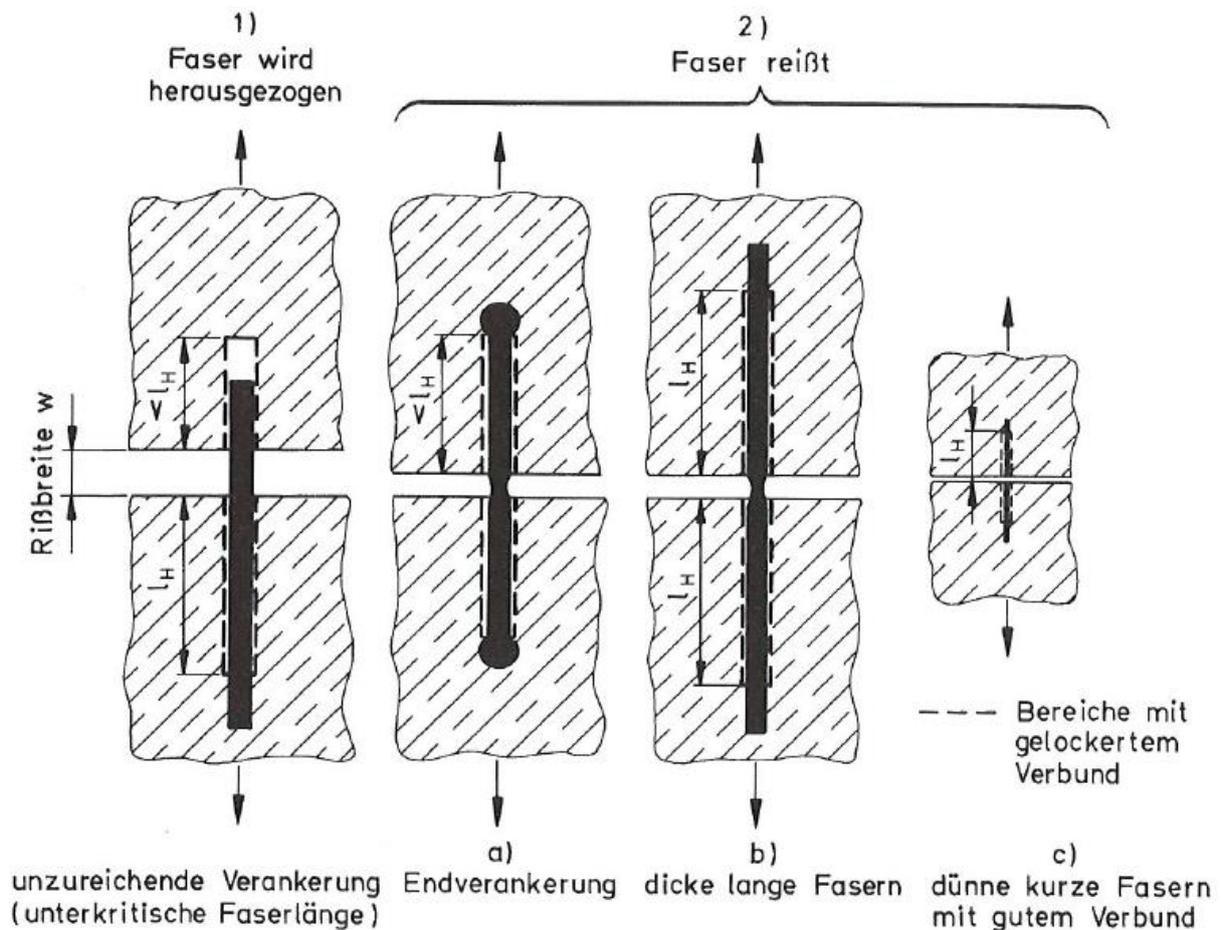


Bild 7: Verankerung und Versagensmöglichkeiten von Fasern

In beiden Fällen erfolgt die weitere Kraftübertragung nach Ausfall der gerissenen Matrix nur noch über den Auszieh Widerstand der Fasern. Das Ausziehverhalten wird durch das Verbundverhalten, die Fasergeometrie, die Faserorientierung, die Endverankerung der Fasern und das Zusammenwirken der Fasern beeinflusst. Fasern, die den Riss schräg kreuzen, erfahren dabei eine zusätzliche Biegebeanspruchung. Bei biegesteifen Fasern, wie Stahlfasern, ist dann die übertragbare Zugkraft größer, als wenn sie die Rissebene rechtwinklig kreuzen, weil durch die durch die Kraftumlenkung hervorgerufenen Querpressungen der Auszieh Widerstand erhöht wird [Lit 67]. Stahlfasern mit abgekröpften Enden (Typ DRAMIX), die beim Herausziehen erst gerade gebogen werden müssen, zeichnen sich durch einen besonders hohen Auszieh Widerstand aus. Je höher der Auszieh Widerstand der Fasern ist und je länger er mit zunehmender Dehnung des Betons erhalten bleibt, desto langsamer nimmt die übertragbare Zugkraft ab. Der flach verlaufende Entlastungsast der Arbeitslinie beschreibt ein erhöhtes Arbeitsvermögen des Faserbetons (Bild 7; Fall 1).

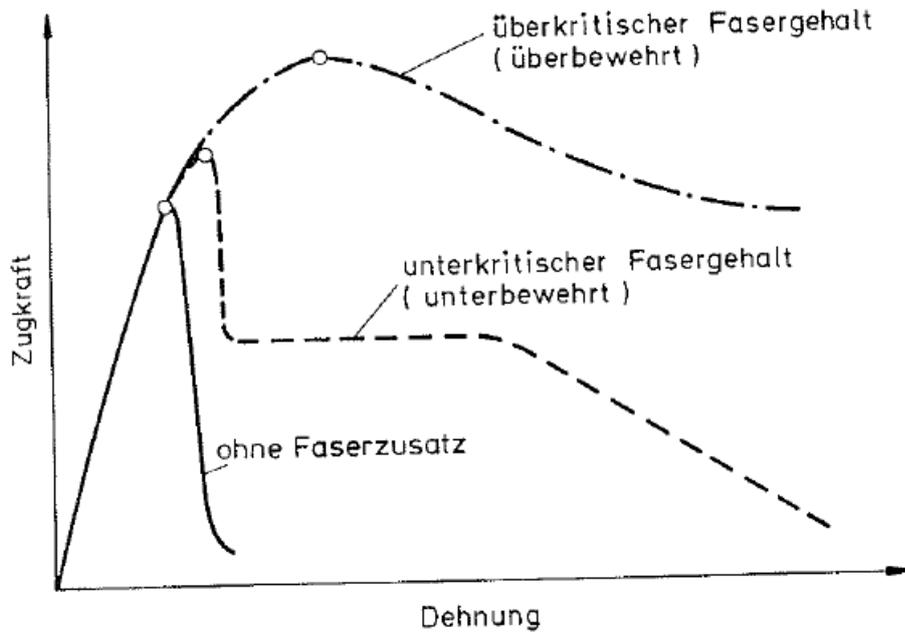


Bild 8: Zusammenhang zwischen Zugkraft und Dehnung von Faserbeton mit unterkritischer Faserlänge bei zentrischem Zug in Abhängigkeit vom Fasergehalt (schematisch)

Fall 2

Hier sind die Fasern so fest in der Matrix verankert, dass sie bis zu ihrer vollen Zugfestigkeit beansprucht und damit im Hinblick auf die Verbesserung der Zugfestigkeit des Betons optimal ausgenutzt werden können.

Meist ist jedoch für den Einsatz von Faserbeton nicht dessen erhöhte Zugfestigkeit entscheidend, sondern die gegenüber üblichem Beton größere Zähigkeit bzw. das größere Arbeitsvermögen. Dafür ist das Verformungsverhalten nach der Rissbildung maßgebend, das in starkem Maße vom Dehnungsvermögen, dem Verbundverhalten und der Verankerung der Fasern abhängt. Ein zähes Bruchverhalten des Faserbetons ist nur möglich, wenn die Fasern sich im Rissbereich ausreichend verlängern können. Dies bedingt, neben einer hohen Bruchdehnung, dass sich der Verbund beiderseits des Risses auf eine genügende Länge löst. Ein Beispiel dafür sind kurze Stahlfasern mit angestauchten Köpfchen oder abgewinkelten Enden (Bild 7, Fall 2 a).

Ein ähnlich zähes Bruchverhalten lässt sich auch durch Verwendung von genügend dehnfähigen Fasern mit überkritischer Länge erreichen, die so dick und lang sind, dass der Verbund auf eine größere Länge versagt und damit eine ausreichende Verlängerung der Faser erlaubt, bevor diese reißt (Bild 7, Fall 2 b).

Sind die Fasern dagegen sehr dünn und aufgrund ihrer Oberflächengestalt wie der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung so fest in die Matrix eingebunden, dass die zum Bruch führende Zugkraft auf einer sehr kurzen Länge übertragen werden kann (Bild 7, Fall 2c), so lassen sich das Arbeitsvermögen und die Zähigkeit des Betons durch die Faserzugabe kaum erhöhen. Ein Beispiel dafür sind Asbestfasern. Dagegen ist eine beträchtliche Steigerung der Zugfestigkeit möglich (Bild 9).

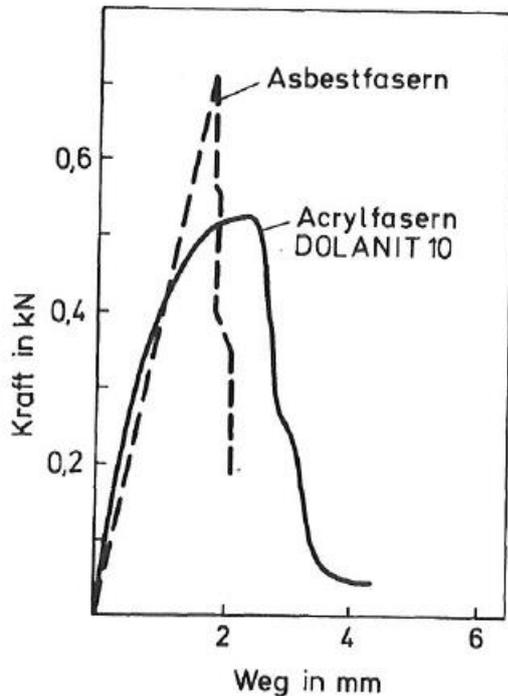


Bild 9: Kraft-Weg-Diagramm für Fassadenplatten aus Asbestzement und Faserzement mit Acrylfasern bei Biegezugbeanspruchung [Lit 27]

2.4 Fasern

Für Faserbeton werden überwiegend Stahl-, Glas- und Kunststofffasern verwendet.

Asbestfasern sind für Faserzementprodukte, wie Dachplatten, Rohre, usw., technisch besonders gut geeignet [Lit 43]. Sie werden jedoch nicht mehr angewandt, weil sie durch Staubbildung bei der Herstellung, Verarbeitung und u. U. auch bei der Nutzung der Asbestzementprodukte gesundheitsgefährdend sind.

2.4.1 Stahlfasern

Stahlfasern zeichnen sich durch eine relativ hohe Zugfestigkeit ($0,3$ bis $2,5 \text{ kN/mm}^2$) und einen hohen Elastizitätsmodul aus, der mit mehr als 200 kN/mm^2 eine Zehnerpotenz über dem der Mörtelmatrix liegt. Sie sind nicht brennbar und in dichtem, alkalischem Beton ohne Einwirkung von Chloriden gut gegen Korrosion geschützt und auf Dauer beständig.

In der karbonatisierten Randzone kann es in Anwesenheit von Feuchte zu einer Korrosion, zu Rostflecken und zum Durchrosten einzelner Fasern kommen. Dies führt jedoch im Allgemeinen nicht zu größeren Oberflächenschäden in Form von Absprengungen, weil die Sprengwirkung der um die dünnen Fasern herum entstehenden Korrosionsprodukte dazu erfahrungsgemäß nicht ausreicht. Die Korrosion der außen liegenden Fasern kann durch eine Imprägnierung des Stahlfaserbetons an der Oberfläche mit Polymeren [Lit 78] oder durch Aufbringen einer geeigneten Deckschicht (z. B. Spritzbeton) verhindert werden.

Die Haftung glatter Stahlfasern im Zementstein ist schlecht. Das Verbundverhalten kann aber durch Wellung, Abkröpfen oder Verdicken der Enden verbessert werden.

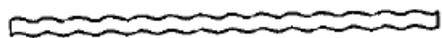
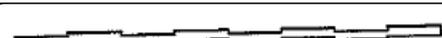
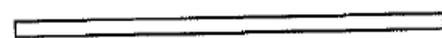
Tabelle 1 gibt eine Übersicht über verschiedene auf dem Markt erhältliche Stahlfasern und die Art ihrer Herstellung. Die meisten Produkte haben einen runden Querschnitt und werden aus Walzdraht durch mehrere, abwechselnd aufeinanderfolgende Kaltziehvorgänge und

Wärmebehandlungen gewonnen. Sie können glatt und gerade oder zur Verbesserung des Verbundes profiliert sein.

Die DRAMIX-Fasern mit abgekröpften Enden sind mit einem wasserlöslichen Kleber zu streifenartigen Bündeln verklebt. Die Faservereinzelung erfolgt während des Einmischens in den Beton durch Auflösen des Klebers und Reibung mit den Gesteinskörnern. Die Gefahr einer „Igelbildung“ ist hierdurch stark verringert.

Die HAREX-Stahlfaser wird mittels eines Fräsers aus unbearbeiteten Brammen hergestellt. Dabei entsteht ein in sich gedrehter Stahlspan mit sichelförmigem Querschnitt, der auf der konvexen Außenseite glatt und auf der konkaven Innenseite rau ist. Die HAREX-Stahlfasern sind sehr gut zu verarbeiten, da sie sich aufgrund ihrer Formgebung nicht ineinander verhaken, keine Knäuel oder Igel bilden, rieselfähig sind und sich auch noch in hoher Konzentration beim Mischen gleichmäßig verteilen. Sie zeichnen sich durch einen besonders guten Verbund aus und können deshalb im Allgemeinen bis zum Bruch beansprucht werden, ohne herausgezogen zu werden.

Tabelle 1: Verschiedene Formen von Stahlfasern [Lit 37]

		Firma	Markenname	Bemerkung	
		A	Trefil ARBED	WIREX	Einzelfaser
		A		EUROSTEEL	
		B	Australian Wire	FIBRESTEEL	
		A	Bekaert	DRAMIX	Zu Bündeln verklebt
		A	National- standard	DUOFORM	
		D	National- standard	MELT EXTRACTED	
		C	HAREX Stahlfaser- technik	HAREX	Sichelförmige Stahlspäne Einzelfasern
		A			
		A	Stax		
		A	Thibo		
		B	US-Steel		Blechfasern

A: aus Wahldraht gezogen B: aus Blechstreifen geschnitten
C: aus Blöcken gefräst D: direkt aus der Schmelze hergestellt

2.4.2 Glasfasern

Glasfasern werden unter anderem durch Ausziehen zähviskoser Glasschmelzen aus Platinspindnüssen hergestellt. Diese Herstellungsart garantiert einen Minstdurchmesser der Fasern von 10 bis 20 μm (d. h. größer als 3 μm und damit eine Einstufung in den nicht gesundheitsgefährdenden Bereich [Lit 32]). Die aus den Düsen austretenden Einzelfäden (Filamente) werden mit einer Schlichte (sizing) versehen und mehrere Hunderte dazu zu Spinnfäden (strand) zusammengefasst. Etwa 10 bis 40 dieser Spinnfäden ergeben einen Roving mit einem Außendurchmesser in der Größenordnung von 1 mm. Spinnfäden und Rovings lassen sich zu Vliesen, Matten und Geweben weiterverarbeiten. Aus dem Roving können durch Schneiden Kurzfasern hergestellt werden. Dabei zerfällt er wieder zu Spinnfäden oder noch kleineren Einheiten [Lit 56, Lit 64].

Ein Hauptproblem bei der Verwendung von Glasfasern in zementgebundenen Werkstoffen ist die Frage der Alkalibeständigkeit. Die herkömmlichen Silikatgläser, Natron-Kalk-Glas (A-Glas) bzw. Borosilikatglas (E-Glas), sind gegenüber alkalischen Lösungen, wie sie in feuchtem Zementstein bzw. Beton vorliegen können, unbeständig. Dabei entstehen an der Glasoberfläche lochfraßähnliche Korrosionen [Lit 78], die durch Kerbwirkung zu starken Festigkeitseinbußen und zu einer Versprödung führen. E-Glas ist daher nur für wenige Zwecke einsetzbar, z. B. zur Steigerung der Grünstandfestigkeit [Lit 32]. Die fehlende Alkalibeständigkeit des E-Glases durch Zugabe von Polymerdispersionen in die Matrix zu kompensieren, ist umstritten [Lit 32].

Von der englischen Firma PILKINGTON wurde ein Soda-Zirkon-Glas mit hoher Alkalibeständigkeit (AR-Glas) entwickelt. Während der Herstellung der aus diesem Glas bestehenden Fasern, bekannt unter dem Handelsnamen Cem-FIL 2 (japanische NEG-Faser), wird das Material im Oberflächenbereich durch einen patentierten Prozess chemisch modifiziert, wobei die Alkalibeständigkeit nach Angabe des Herstellers noch erheblich zunimmt. Falls die Matrix keine zusätzliche Bewehrung aus Stahl oder metallische Einbauteile aufweist und deshalb keine korrosionsschützende Eigenschaft besitzen muss, kann die Dauerhaftigkeit der Glasfaser durch die Verwendung von alkaliarmen Zementen erreicht werden.

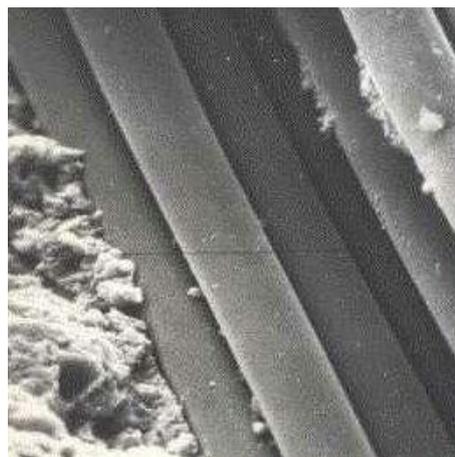
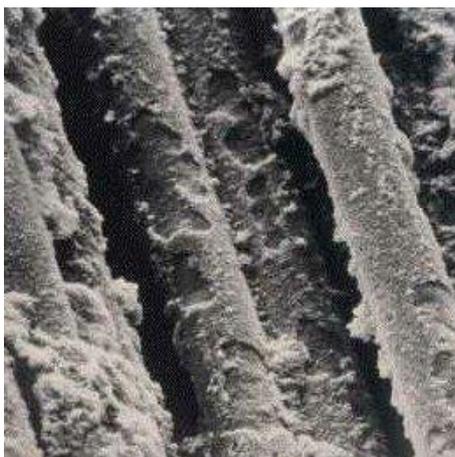


Bild 10: Auswirkung eines alkalischen Milieus auf Faser aus E-Glas (links) und AR-Glas (rechts) [Lit 70]

Ein weiteres Problem ist die Kerb- und Ritzempfindlichkeit der glasigen Oberfläche. Beim Einmischen von Glasfasern in Mörtel oder Beton sind daher wegen der Reibwirkung der Gesteinskörnung schlechtere Ergebnisse zu erwarten als beim Einsatz in nur wenig gemagertem Zementleim [Lit 64].

Glasfasern sind unbrennbar. Ihre Zugfestigkeit liegt mit 2,0 bis 3,5 kN/mm² in der Größenordnung derjenigen von hochfesten Stahlfasern (Tabelle 2). Der Elastizitätsmodul ist etwa doppelt bis dreimal so groß wie der des Zementsteins und beträgt rund 1/3 desjenigen von Stahl. Der Verbund zwischen Glasfasern und Zementsteinmatrix ist aufgrund des geringen Faserdurchmessers und der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung des Faserwerkstoffs gut, sodass bei üblichen Faserlängen die Zugfestigkeit voll ausgenutzt werden kann. Bei Verwendung einer geeigneten Zementmatrix können Glasfasern die gesundheitsschädlichen Asbestfasern ersetzen [Lit 21].

Tabelle 2: Eigenschaften ausgewählter Fasern (Richtwerte) im Vergleich zur Faserbetonmatrix [Lit 56, Lit 64, Lit 73, Lit 74]

Material	Dichte g/cm ³	Typische Durchmesser µm	Zugfestig- keit kN/mm ²	E-Modul kN/mm ²	Bruch- dehnung %	Haftung in Zementstein	Beständigkeit in Zementstein
Glas	E-Glas	2,6	8–15	2–3,5	175	2–3,5	gut
	CEM-FIL	2,7	10–15	1,8–3,0	75	2–3	gut weitgehend beständig
Stahl	normal	7,85	150–1000 ggf. auch flach	0,3–2,5	200–210	3–4	mäßig schlecht
	nichtrostend			2,1	160–170	3	im alkal. Milieu beständig sehr gut
Kunststoff	Polypropylen fadenförmig	0,9	> 4 (> 20)	0,4–0,7	1–8	20	schlecht
	fibrilliert	0,9	> 4	0,5–0,75	5–18	5–15	gut
	KEVLAR 49 ¹⁾	1,45	10	2,8–3,6	130	2	–
	KEVLAR 29	1,45	10	2,8–3,6	65	4	schlecht
	Polyacrylnitril (DOLANIT)	1,17	13–100	0,85–0,95	16,5–19	10	gut
	Polyvinylalkohol (KURALON)	1,31	≥ 12	1,6	30	6	gut
Kohlenstoff	Typ I (hoher E-Modul)	2,0	5–10	1,4–2,1	380–450	0,4–0,5	schlecht
	Typ II (hohe Festigkeit)	1,7	– 8	2,5–3,2	250–320	~ 1	schlecht
Naturfaser	Sisal	1,5	8–50	0,85	–	3	–
	Hanf	1,5	15–50	0,40	–	2	–
Matrix	Zementstein	2,0	–	bis 0,008 ²⁾	7–28	0,03–0,06	–
	Mörtel	2,3	–	bis 0,006 ²⁾	20–45	0,015	–
	Beton	2,6	–	bis 0,004 ²⁾	20–45	0,01	–

¹⁾ Cyclisches Polyamid

²⁾ Grobe Anhaltswerte

2.4.3 Kunststofffasern (Polymere)

Aus der Vielzahl der für die Herstellung von Fasern zur Verfügung stehenden Kunststoffe wurde bisher wegen der geringen Kosten und der guten Alkalibeständigkeit vorwiegend Polypropylen verwendet. Neben dem auch für andere Polymerfasern üblichen Düsen-Ziehverfahren, bei dem einzelne Fäden (Filamente) entstehen, ist hier besonders die Herstellung von Fibrillaten bedeutend [Lit 64]. Dazu wird eine extrudierte Polypropylenfolie in Streifen geschnitten und anschließend im Warmluftstrom auf das 8fache ihrer Ausgangslänge gereckt. Das Recken bewirkt eine Erhöhung der Festigkeit und Steifigkeit in Längsrichtung und gleichzeitig eine Abnahme der Querkzugfestigkeit, sodass die Streifen beim Verdrehen um die Längsachse zu einem netzähnlichen Gebilde zerfasern (fibrillate). Dies führt zu einem guten mechanischen Verbund mit der Matrix, der bei glatten Einzelfäden nicht gegeben ist. Die gereckte Faser hat eine Festigkeit von 0,4 bis 0,7 kN/mm² und einen Elastizitätsmodul von 1 bis 8 kN/mm² [Lit 74]. Bei einem abgewandelten Herstellungsverfahren, das eine Wärmebehandlung einschließt, werden E-Moduln bis 18 kN/mm² erreicht [Lit 47].

Unter den Handelsnamen KEVLAR 29 bzw. KEVLAR 49 werden von DuPont Fasern aus aromatischen Polyamiden angeboten, die bei der Zugfestigkeit, dem Elastizitätsmodul und der Bruchdehnung etwa die günstigen Werte von Glasfasern erreichen [Lit 64]. Ihre Beständigkeit

im Beton erscheint jedoch nicht gesichert, da sie nach [Lit 20] von stark alkalischen Lösungen angegriffen werden.

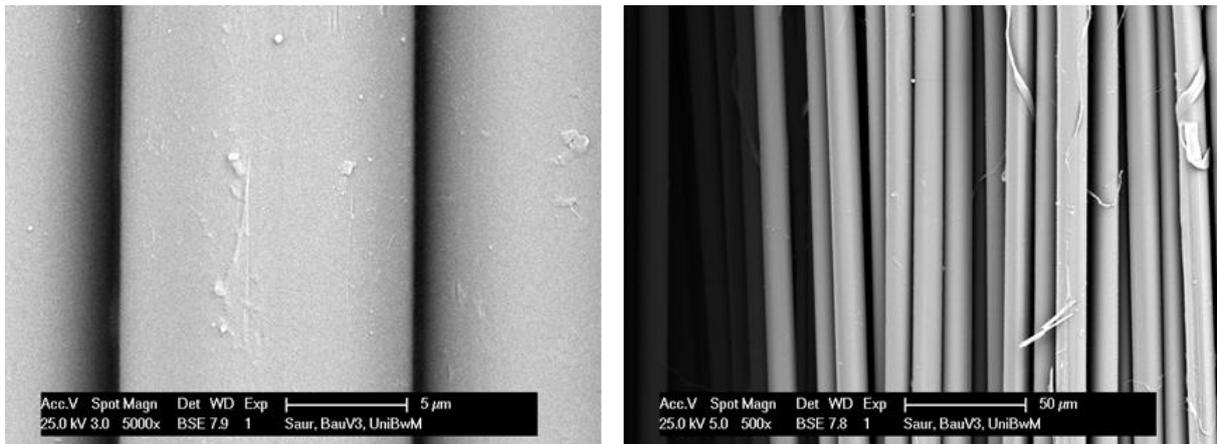


Bild 11: Polyaramidfasern (Kevlar)

Die von der Fa. Clariant entwickelte hochfeste Polyacrylnitrilfaser DOLANIT (PAN-Faser) hat einen nierenförmigen Querschnitt (Bild 12) und eine Oberfläche mit feiner Längsstruktur. Sie zeichnet sich daher durch einen guten Faser-Zement-Verbund und durch Beständigkeit gegenüber Alkalien, Säuren, Chloriden und UV-Strahlung aus [Lit 61]. Ihre Festigkeit ist deutlich höher als die textiler Acrylfasern (Bild 13). Der Elastizitätsmodul erreicht mit 16 bis 19 kN/mm² eine ähnliche Größenordnung wie der von Zementstein. Die Bruchdehnung von etwa 10 % übertrifft deutlich die von Stahl- oder Glasfasern (2 bis 4 %). Die alkalibeständige Faser wird mit Durchmessern von 14 µm an aufwärts bis etwa 100 µm geliefert, wobei für die Bewehrung von Beton und Mörtel Fasern mit Durchmessern zwischen 50 und 100 µm und nicht zu großer Länge (6 bis 24 mm) sich am günstigsten erwiesen haben.

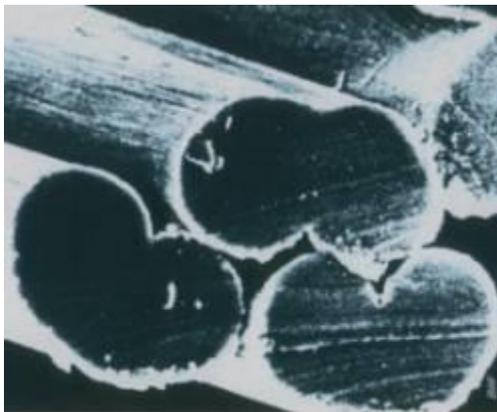


Bild 12: Faserquerschnitt Polyacrylnitrilfaser Dolanit [Lit 42]

Unter dem Handelsnamen KURALON stellt die japanische Firma Kuraray Fasern aus Polyvinylalkohol mit günstigen Festigkeits- und Verformungseigenschaften und guter Alkalibeständigkeit her.

DOLANIT und KURALON werden bereits in industriellem Maßstab als Asbestersatz für Faserzementprodukte eingesetzt, wobei allerdings zusätzlich noch sogenannte Prozessfasern auf natürlicher (beispielsweise Cellulose) oder synthetischer Basis (beispielsweise Pulpex) zugesetzt werden müssen, um den Zementleim zu binden.

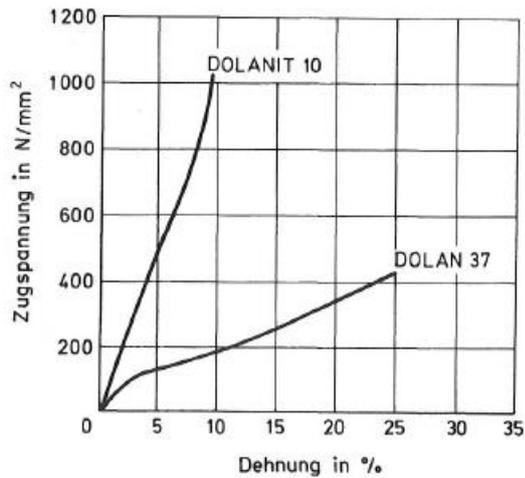


Bild 13: Spannung-Dehnung-Linie einer technischen Polyacrylnitrilfaser (DOLANIT 10) im Vergleich zu einer textilen Acrylfaser (DOLAN 37) [Lit 28]

2.4.4 Kohlenstoff- und Zellulosefasern

Kohlenstofffasern (Carbon-, Grafitfasern) werden durch Verkohlung geeigneter organischer Fasern (beispielsweise Viskose oder Polyacrylnitril) hergestellt. Sie sind alkaliverträglich und weitgehend temperaturbeständig. Die Festigkeit entspricht der von hochfestem Stahl. Der Elastizitätsmodul ist mehr als doppelt so groß wie der von Stahl. Die Faserstruktur ergibt sich aus dem Ausgangsmaterial. Im Allgemeinen sind viele Einzelfasern seilartig zusammengedreht, sodass sich ein guter Reibungsverbund einstellen kann. Gegen Oberflächenbeschädigungen sind Kohlenstofffasern noch empfindlicher als Glasfasern. Um sie einmischen zu können, müssen sie im Allgemeinen durch einen Kunstharzüberzug geschützt werden. Wegen des gegenüber anderen Fasern höheren Preises kommen Kohlenstofffasern trotz ihrer günstigen Eigenschaften nur für besondere Anwendungen in Betracht. Vereinzelt wurden in Kunstharz eingebettete Kohlenstofffaserbündel als teilweiser Ersatz der Spannglieder in Brückenbauwerken eingesetzt (Gewichtersparnis, kein Korrosionsschutz wie bei Spannstahl erforderlich) [Lit 32].

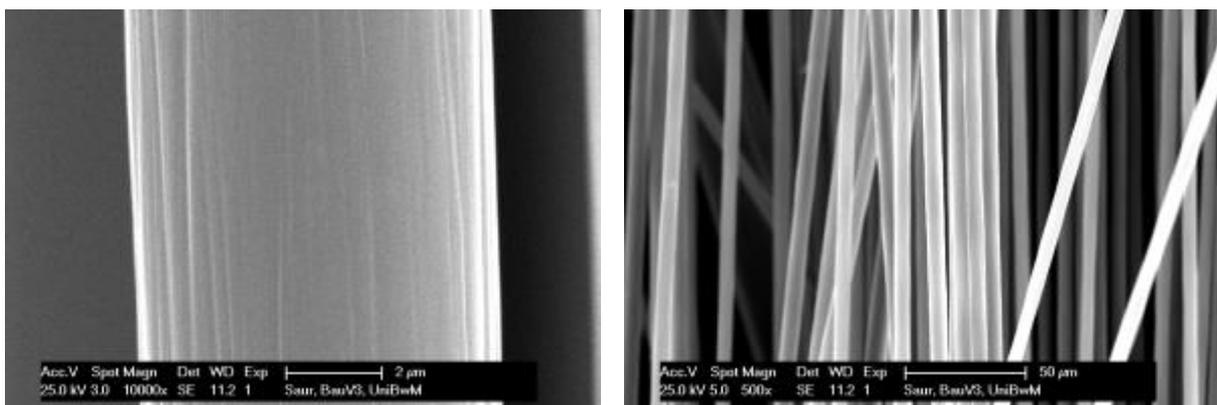


Bild 14: Kohlenstofffasern (Sigrafill SFC 60 00B)

Zellulosefasern stehen in Form von weitgehend unbehandelten Naturprodukten (Baumwolle, Sisal, Hanf) oder chemisch aufbereiteten Fasern (Viskose, „Reyon“) zur Verfügung. Die Anwendbarkeit in zementgebundenen Werkstoffen ist wegen ihrer geringen Beständigkeit beschränkt [Lit 17].

3 Zusammensetzung

3.1 Beton

Die Auswahl der Betonausgangsstoffe sowie die Festlegung der Mischungszusammensetzung und der Einbaukonsistenz wird grundsätzlich von den Verarbeitungsbedingungen auf der Baustelle und der geforderten Druckfestigkeit bestimmt. Für die Betonzusammensetzung gelten die allgemeinen Regeln der Betontechnologie, ergänzt durch die folgenden Hinweise.

3.1.1 Gesteinskörnung

Es kann jede Art von Gesteinskörnung verwendet werden. Wichtig sind die Wahl des Größtkorndurchmessers und die Begrenzung des Grobanteils.

Das Größtkorn muss auf die Bauteildicke sowie die Art und die Abmessungen der Fasern abgestimmt werden. Aus Gründen der Verarbeitbarkeit und zur Erzielung eines möglichst geringen Faserabstandes wird das Größtkorn häufig auf 8 mm oder weniger beschränkt. Bei Glasfaserbeton sollte das Größtkorn nicht größer sein als 4 mm, als optimal erwies sich hier ein Größtkorn von 1 bis 2 mm [Lit 32]. In [Lit 84] wird für Stahlfaserbeton empfohlen, den Größtkorndurchmesser nicht größer als ein Drittel der Faserlänge zu wählen.

Je geringer der Anteil an grober Gesteinskörnung ist, desto mehr Fasern lassen sich unterbringen, ohne dass es zu Faseragglomerationen kommt [Lit 64]. Ein hoher Feinstsandanteil ist vorteilhaft für das Einbringen von stabförmigen Elementen, wie das bei den Fasern der Fall ist [Lit 68]. Bei Verwendung von grober Gesteinskörnung sind dickere Fasern vorteilhaft. Besonders bei hohem Fasergehalt erweisen sich Ausfallkörnungen als problematisch [Lit 68]. Gebrochene Körner können die Verarbeitbarkeit des Faserbetons ungünstig beeinflussen.

3.1.2 Wasserzementwert, Zementgehalt und Betonzusätze

Als günstig haben sich Wasserzementwerte zwischen 0,40 und 0,50 erwiesen [Lit 57]. Um diese Werte einzuhalten, ist ein relativ hoher Zementgehalt erforderlich, da der Wasseranspruch für eine bestimmte Verarbeitbarkeit des Betons mit zunehmendem Fasergehalt steigt. Dies gilt verstärkt bei Verwendung eines grobkornarmen Gesteinskörnungsgemischs. Bei Glasfaserbeton sollte das Mischungsverhältnis Zement zu Gesteinskörnung 1 : 1 oder 1 : 2 betragen, um die vollständige Umhüllung der Fasern zu gewährleisten [Lit 32].

Um den Zementgehalt unter Beibehaltung der Festigkeit zu senken, können 25 bis 35 % des Zements gegen Flugasche ausgetauscht werden [Lit 1]. Ein Austausch von bis zu 10 % des Zements gegen Silikastaub kann sich ebenfalls günstig auswirken.

Bei geringen Fasergehalten, also etwa bis 40 kg/m^3 , unterscheidet sich die Betonzusammensetzung nur geringfügig von der eines faserfreien Betons für die gleiche Anwendung. Die etwas erschwerte Verarbeitbarkeit bei Fasergehalten ab 50 kg/m^3 gleicht ein leicht erhöhter Mörtelgehalt des Betons aus; der Anteil aller Bestandteile unter 2 mm Größe sollte 560 bis 630 kg/m^3 betragen. Dabei sollte der Gehalt feiner Bestandteile bis 0,25 mm Korngröße möglichst über 380 kg/m^3 liegen [Lit 12]. Tabelle 3 zeigt an einem Beispiel die Zusammensetzung eines Stahlfaserbetons mit einem hohen Anteil gebrochener Gesteinskörnung.

Ferner ist eine Verringerung des Wasseranspruchs durch Zugabe eines Betonverflüssigers oder Fließmittels zweckmäßig. Weitere Zusatzmittel, beispielsweise Luftporenbildner,

können wie beim üblichen Beton zur Verbesserung bestimmter Eigenschaften eingesetzt werden. Bei Anwendung von Luftporenbildnern sollte der in der Regel von Hause aus höhere Luftgehalt des Stahlfaserbetons beachtet werden [Lit 68]. Um einen ausreichenden Gehalt an Mikroluftporen zu erzielen, ist der Gesamtluftgehalt entsprechend zu erhöhen. Werden zur Vorspannung der Fasern Quellzusätze in den Beton gegeben, ist der Fasergehalt auf die Menge der Zusätze abzustimmen, um Gefügestörungen zu verhindern [Lit 22].

Tabelle 3: Rezepturbeispiel eines Stahlfaserbetons mit einem hohen Anteil gebrochener Gesteinskörnung [Lit 12]

	Masseanteil [kg/m ³]	Stoffrohddichte [kg/dm ³]	Stoffraumanteil [dm ³ /m ³]
Hochofenzement 45 L	390	3,00	130
Flugasche	75	2,40	31
Wassergehalt	172	1,00	172
Flusssand 0/2	697	2,63	265
Flusskies 2/8	153	2,63	58
Basaltsplitt 5/8	388	3,00	129
Basaltsplitt 8/11	581	3,00	194
Fließmittel	2,8		3
Verzögerer	0,8		1
Stahlfasern 40/0,60	75	7,85	10
Luftporengehalt			7
Frischbetonrohddichte	2535		1000

3.2 Fasern

Die Entscheidung über die Faserart, das heißt über deren Abmessungen und Formgebung, hängt von den Förderbedingungen, zum Beispiel dem Durchmesser der Betonpumpleitung, sowie von technischen und wirtschaftlichen Überlegungen ab [Lit 12].

Stahlfasern sind in ihren Eigenschaften (insbesondere Schlankheit, Zugfestigkeit und Formgebung) so gestaltet, dass ein Versagen der Fasern nicht durch Abreißen, sondern durch langsames Herausziehen erfolgt. Beim langsamen Herausziehen erfolgt die Kraftübernahme vom Beton auf die Faser durch die Mantelreibung (und gegebenenfalls noch durch formschlüssige Verankerung). In einem auf Biegezug beanspruchten Querschnitt mit sich öffnendem Riss geben bei zunehmender Rissöffnung die außen liegenden Fasern langsam Kraft an weiter innen liegende Fasern ab. Dies ist ein duktiler Versagen mit Vorankündigung durch große Verformungen. Ein solches Versagen ist erwünscht. Bei zu langen Fasern würde der Versagensmechanismus „Abreißen“ sein (vgl. Kapitel 2.3). Dies würde bei biegezugbeanspruchtem Querschnitt mit sich öffnendem Riss dazu führen, dass Kräfte schlagartig von einer Faser auf die nächste umgelagert würden. Es könnte sich ein „Reißverschluss“-Effekt einstellen mit vergleichsweise schnellem Versagen des Bauteils bei kleinen Verformungen.

Im Hinblick auf die Faserauswahl wurden bei der Richtlinie Stahlfaserbeton [Lit 15] im Anwendungsbereich Einschränkungen vorgenommen: Zugelassen sind Stahlfasern mit formschlüssiger, mechanischer Verankerung. Mechanisch verankerte Fasern sind in der Regel gewellte oder gekröpfte Fasern oder Fasern mit aufgestauchten Köpfen. Mit dieser Regelung wird sichergestellt, dass der über lange Jahre gewonnene Erfahrungsschatz durch Faser- und Bauteilzulassungen in die Anwendung einfließt. Weiterhin erzwingt diese Regelung die Wahl von leistungsfähigen Fasern.

Betontechnisch betrachtet sind Stahlfasern Betonzusatzstoffe; sie müssen in der Stoffraumrechnung berücksichtigt werden. Die Fasern selbst sind in ihren Eigenschaften und in ihrer Qualitätskontrolle in der europäischen Norm DIN EN 14889-1 [Lit 19] geregelt.

3.2.1 Länge und Durchmesser

Die Zugabe von Fasern erhöht den Wasseranspruch des Betons. Bei gegebenem Fasergehalt vergrößert sich der Wasseranspruch deutlich mit abnehmendem Faserdurchmesser d und -weniger ausgeprägt - mit steigender Faserlänge l .

Von großem Einfluss auf die Einmischbarkeit der Fasern und die Verarbeitbarkeit des Frischbetons ist das Verhältnis l/d . Mit zunehmendem Verhältnis l/d nimmt die Verarbeitbarkeit ab.

Bei Stahlfaserbeton ist nach [Lit 60] noch eine gute Verarbeitbarkeit zu erwarten, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$p \cdot \frac{l}{d} < 100 \text{ bis } 150 \text{ (Größtkorn } 10 \text{ mm)} \text{ bzw. } < 160 \text{ bis } 200 \text{ (Größtkorn } 2 \text{ mm)}$$

Dabei ist p der Fasergehalt in Vol.-%.

Für Stahlfaserbeton bzw. stahlfaserverstärkten Stahlbeton werden überwiegend Stahlfasern bis etwa 1 mm Dicke, für Stahlfaserspritzbeton solche von 0,3 bis 0,5 mm Dicke eingesetzt. Das Verhältnis l/d liegt meist zwischen 30 und 150 [Lit 16]. Sind die Stahlfasern zu schlank ($l/d > 100$), so besteht die Gefahr, dass sie sich beim Mischen verbiegen.

Glasfasern und Kunststofffasern sind wesentlich biegeweicher als Stahlfasern. Bei der Herstellung von Faserbeton im Mischverfahren wird ihre Länge i. a. auf 25 mm, oft sogar auf 12 oder 6 mm beschränkt. Dies hat zur Folge, dass hochfeste Kunststofffasern, z. B. aus Polyacrylnitril, ab einer Dicke von etwa 0,1 mm hinsichtlich ihrer Zugfestigkeit nicht mehr voll ausgenutzt werden können, da die Verankerungslänge kleiner als die Haftlänge ist. Bis zu Verankerungslängen von etwa 15 mm ließen sich in Versuchen 0,1 mm dicke Polyacrylnitrilfasern noch aus der Matrix (Normmörtel nach EN 196-1 mit CEM I 42,5 R) herausziehen [Lit 26].

3.2.2 Fasergehalt

Der erforderliche Fasergehalt wird in erster Linie von den Anforderungen an die Biegezugfestigkeit und den Widerstand gegen dynamische Belastungen bestimmt [Lit 12]. Der Fasergehalt wird sowohl in Vol.-% bezogen auf das Betonvolumen als auch als Zugabemasse in kg/m^3 , angegeben.

Mit steigendem Gehalt nimmt die Neigung der Fasern zum Zusammenballen (Igelbildung) während des Mischvorganges zu.

Die einmischbare Fasermenge hängt von der Zusammensetzung und Konsistenz des Frischbetons, den Eigenschaften der Fasern und der Mischtechnik ab. In feinkörnigen Beton lassen sich mehr Fasern einmischen als in grobkörnigen. Normalerweise liegt der Fasergehalt im Bereich von 0,4 bis 3 Vol.-%.

Bei Bodenflächen werden 20 bis 40 kg Stahlfasern pro Kubikmeter zugegeben. Im Tunnelbau und konstruktiven Ingenieurbau liegen die Zugabemengen bei 40 bis 100 kg/m³, in besonderen Fällen auch bis etwa 120 kg/m³. Bei hohen Fasergehalten ist ein Verhältnis Länge zu Durchmesser von 60:1 ist zweckmäßig. Bis etwa 60 kg/m³ lassen sich auch noch Fasern mit einem Länge-Durchmesser-Verhältnis von 100:1 verwenden [Lit 12].

Bei Anwendung spezieller Verarbeitungstechniken und von Zusatzmitteln sind höhere Fasergehalte, z. B. bei Glasfasern bis zu 6 Vol.-% [Lit 58], möglich.

Mit Stahlfasern lassen sich extrem hohe Fasergehalte von 10 bis 20 Vol.-% erreichen, indem man in ein Faserhaufwerk, das in die Schalung lose eingelegt oder eingerüttelt wird, Zementleim oder Feinmörtel einbringt. Diese spezielle Art von Stahlfaserbeton wird SIFCON genannt (Slurry Infiltrated Fibre CONcrete) [Lit 50].

4 Herstellung

Damit die Fasern voll wirksam werden, ist beim Einmischen eine möglichst gleichmäßige Verteilung im Beton anzustreben. Dabei sollte das Mischgut zur besseren Einlagerung der Fasern aufgelockert werden. Um ein ausreichendes Durchmischen zu ermöglichen, ist es vorteilhaft, mit dem Gegenstromprinzip zu arbeiten. Weiterhin sollte auf kurze Mischzeiten geachtet werden, um eine Entmischung und Kompaktierung des Betons zu verhindern [Lit 9].

Die Verarbeitbarkeit des Faserbetons hängt vom Fasergehalt, dem Faserdurchmesser, der Faserlänge, dem Wassergehalt und dem Größtkorn ab. Um die Konsistenz eines Normalbetons zu erhalten, muss ein Fließmittel zugegeben werden [Lit 30].

Manche Fasertypen können aus ihrer Verpackung direkt in den Mischer geschüttet werden (Bild 15) und verteilen sich beim Mischen von selbst, etwa die gefrästen HAREX-Stahlfasern, die mit wasserlöslichem Kleber zu Bündeln verklebten DRAMIX-Stahlfasern oder bestimmte Polypropylenfasern.

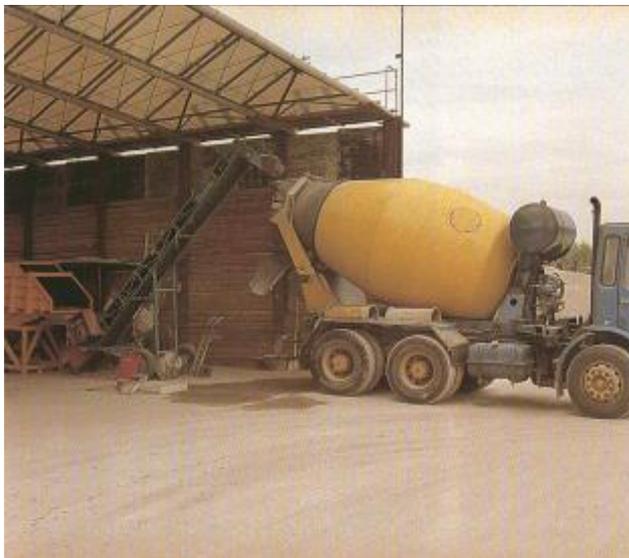


Bild 15: Stahlfaser-Dosieranlage bei einem U-Bahn-Tunnel in Essen [Lit 12]

Viele Stahl- und Kunststofffasertypen müssen jedoch vor der Zugabe zunächst vereinzelt werden, weil sie ineinander verhakt oder verfilzt sind. Hierfür gibt es besondere Vereinzlungsgeräte, die je nach Faserart unterschiedlich ausgebildet sind. Für Stahlfasern haben sich Geräte bewährt, die mit Schwingsieben oder Siebtrommeln arbeiten [Lit 38].

Bei der Verarbeitung von Glasfasern ist deren Empfindlichkeit Rechnung zu tragen. Sie lassen sich bis zu 25 mm Länge gut einmischen, werden dabei aber leicht beschädigt, besonders wenn der Beton auch grobe Gesteinskörner enthält. Statisch beanspruchte Bauteile werden in der Regel nach dem Spritzverfahren hergestellt, bei dem Faserlängen von 50 mm üblich sind [Lit 40]. Dabei wird ein Roving (s. Kapitel 2.4.2) von einem Endlosstrang abgezogen und mittels einer luftgetriebenen Schneidewalze abgelängt.

Der Einbau von kurzen Fasern kann bei der Herstellung von Wellplatten (Wellcrete-Technologie) durch Eindrücken, von langen Fasern durch Einlegen erfolgen. Durch das Wellcrete-Verfahren ist eine exakte Orientierung und Verteilung von aus Rovings geschnittenen Kurzfasern (AR-Glasfasern und Kunststofffasern) in beliebig viele Schichten der Zugzone möglich. Durch Einlegen von Langfasern oder Matten kann die Tragfähigkeit gesteigert

werden. Auf diese Art verstärkte Wellplatten lassen sich z. B. als Deckschichten von Sandwichplatten verwenden [Lit 58, Lit 59].

Kurze Kunststofffasern (6 bis 12 mm) mit einem Längen/Durchmesser-Verhältnis < 120 lassen sich oft noch recht gut ohne den Einsatz eines Vereinzelnungsgeräts einmischen. Auf die Einmischbarkeit hat auch die Betonzusammensetzung Einfluss. So wurde bei Beton mit gebrochener Gesteinskörnung eine bessere Verteilung von Kunststofffasern beobachtet als bei Kiesbeton, was auf die höheren Scherkräfte der gebrochenen Körner zurückzuführen ist.

Zwangsmischer lassen i. a. eine bessere Verteilung der Fasern erwarten als sogenannte Freifallmischer, zu denen im Prinzip auch Mischfahrzeuge zu rechnen sind. Dessen ungeachtet konnten hier bei Versuchen gefräste Stahlfasern (HAREX) bis zu 150 kg/m^3 Beton (1,9 Vol.-%) untergemischt werden, ohne dass eine Igelbildung festzustellen war.

Durch Einbau eines Aktivators, eines schnell laufenden Rührwerkzeugs, in einen Gleichstrom-Zwangsmischer konnte bei Polypropylenfasern ein wesentlich besserer Aufschluss und damit eine größere Wirksamkeit zur Verhinderung von Schwindrissen in verformungsbehinderten Bauteilen erzielt werden [Lit 11].

Bei der Herstellung von Faserdichtschichten aus SIFCON unter Verwendung von Stahlfasern werden zuerst die Fasern lose eingestreut, anschließend fließfähiger Mörtel infiltriert (siehe Kapitel 8.1). Durch diese Verfahrensart wird ein sehr hoher Fasergehalt (ca. 10 Vol.-%) ermöglicht. Abschließend wird eine Deckschicht aus stahlfaserfreiem Mörtel zur Vermeidung von Oberflächenkorrosion aufgebracht. Eine sorgfältige Nachbehandlung zur Vermeidung von Schwindrissen ist notwendig [Lit 11].

5 Eigenschaften

5.1 Verhalten bei Druckbeanspruchung

Die Druckfestigkeit des Faserbetons wird vorwiegend durch die Betonzusammensetzung bestimmt. Der Gehalt an Verdichtungs-poren ist gegenüber üblichem Beton etwas erhöht. Andererseits lassen die Fasern durch die Behinderung der Rissbildung eine leichte Festigkeitssteigerung erwarten.

Üblicherweise wird Faserbeton entsprechend den Festigkeitsklassen C 20/25 bis C 30/37 hergestellt. Um die Duktilität und die Druckfestigkeit zu steigern, wurden in letzter Zeit hochfeste Faserbetone entwickelt [Lit 51]. Bei Versuchen an hochfestem Faserbeton wurden geringere Druckfestigkeiten als bei sonst gleich zusammengesetztem hochfesten Beton ohne Faserverstärkung festgestellt. Dies begründet sich durch eine erhöhte Porosität, die durch eine hohe Stahlfaserkonzentration (> 5 Vol.-%) und eine "Igelbildung" bei Zunahme der Faserkonzentration hervorgerufen wird [Lit 51].

Die Völligkeit der Arbeitslinie wird durch einen Faserzusatz vergrößert, insbesondere im Bereich des abfallenden Astes (Bild 16 und Bild 17).

Beim Stahlfaserbeton können gleiche Grenzstauchungen erreicht werden (bis zu etwa 6 ‰) wie in einem Querschnitt mit einer Druckbewehrung von $p = 3$ ‰. Das Versagen der Druckzone kündigt sich vorher an und tritt nicht schlagartig auf [Lit 72].

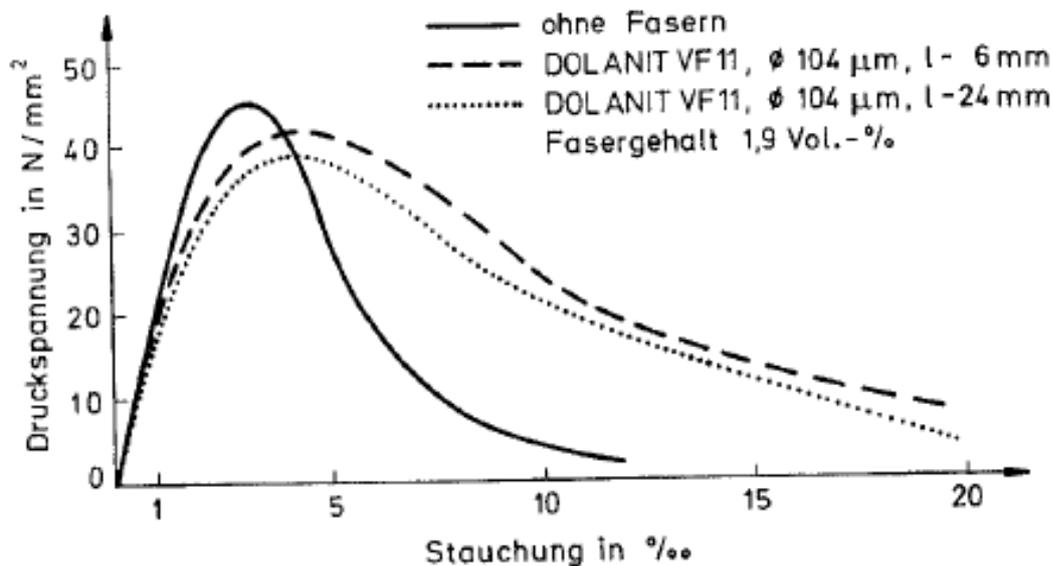


Bild 16: Arbeitslinien von Beton mit und ohne Kunststofffasern (Polyacrylnitril) bei zentraler Druckbelastung mit $\dot{\epsilon} = 2$ ‰/min [Lit 29]

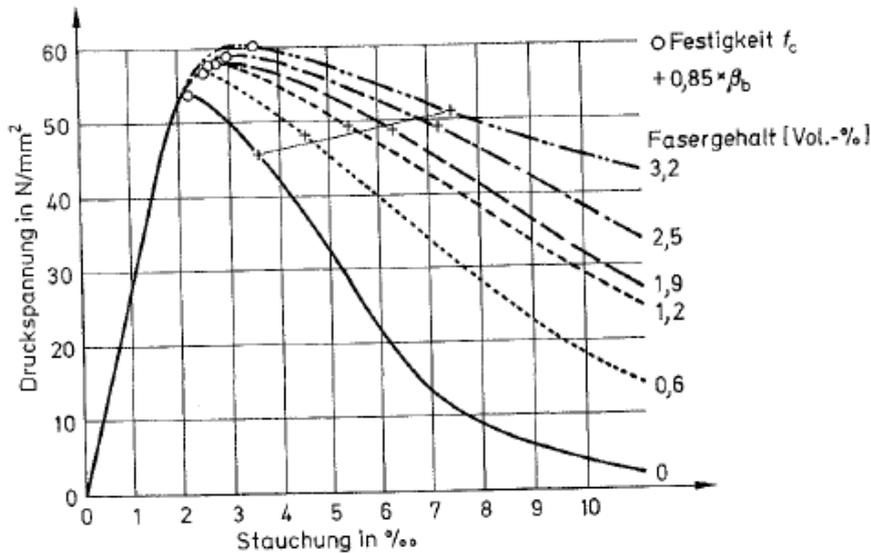


Bild 17: Arbeitslinien von Stahlfaserbeton bei zentrischer Druckbelastung in Abhängigkeit vom Fasergehalt [Lit 66]

5.2 Verhalten bei Zugbeanspruchung

Bild 18 zeigt einige typische Arbeitslinien für Stahlfaserbeton. Sie wurden in verformungsgesteuerten zentrischen Zugversuchen an Faserbeton bestimmt. Die Völligkeit des abfallenden Astes nimmt mit steigendem Fasergehalt zu [Lit 71].

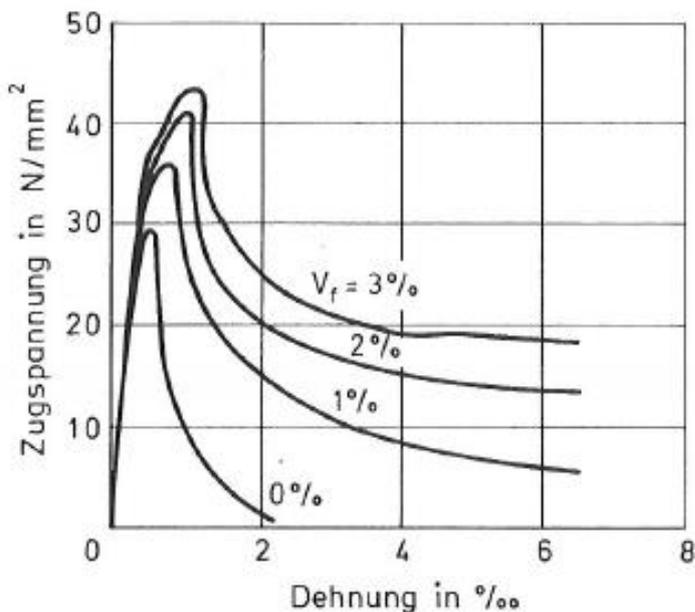


Bild 18: Arbeitslinien von Stahlfaserbeton bei zentrischer Zugbelastung in Abhängigkeit vom Fasergehalt [Lit 71]

Die Zugfestigkeit kann durch Zusatz von Stahlfasern um maximal etwa 50 % gesteigert werden. Dabei erhöht sich die Dehnung unter Höchstlast um etwa 30 %. Die Zugfestigkeit, die Risslast und das Last-Verformungs-Verhalten des Betons bei überkritischem und unterkritischem Fasergehalt können durch Vorspannung verbessert werden. Es wurden in Abhängigkeit vom E-Modul der Fasern Steigerungen der Zugfestigkeit von über 25 % festgestellt [Lit 22]. Weitere Angaben zum Last-Verformungs-Verhalten siehe [Lit 51].

5.3 Verhalten bei Biegebeanspruchung

Das Verhalten des Faserbetons bei Biegebeanspruchung wird durch das Verhalten der Zugzone bestimmt (s. Kapitel 2).

5.3.1 Einmalige Belastung

Maßgebend für die Riss- und Bruchlast, für die Last-Durchbiegung-Kurve und das Bruchverhalten, spröde oder zäh, sind der E-Modul, die Zugfestigkeit und die Verbundfestigkeit der Fasern sowie der Fasergehalt.

Fasern, deren E-Modul kleiner ist als der E-Modul der Betonmatrix, wie Polypropylen- oder Polyacrylnitrilfasern (PAN) (siehe Tabelle 2), wirken sich auf die Risslast praktisch nicht aus. Die Höchstlast ist abhängig vom Gehalt und der Zugfestigkeit der Fasern bzw. deren Auszieh Widerstand und liegt bei überkritischem Fasergehalt über der Risslast. Für den Verlauf des abfallenden Astes der Last-Durchbiegung-Kurve ist neben dem Verbundverhalten der Fasern deren Verformungsmodul entscheidend.

Bild 19 zeigt Last-Durchbiegung-Kurven von Betonbalken mit Polyacrylnitrilfasern (DOLANIT), die ein je nach Faserlänge unterschiedlich zähes Bruchverhalten erkennen lassen.

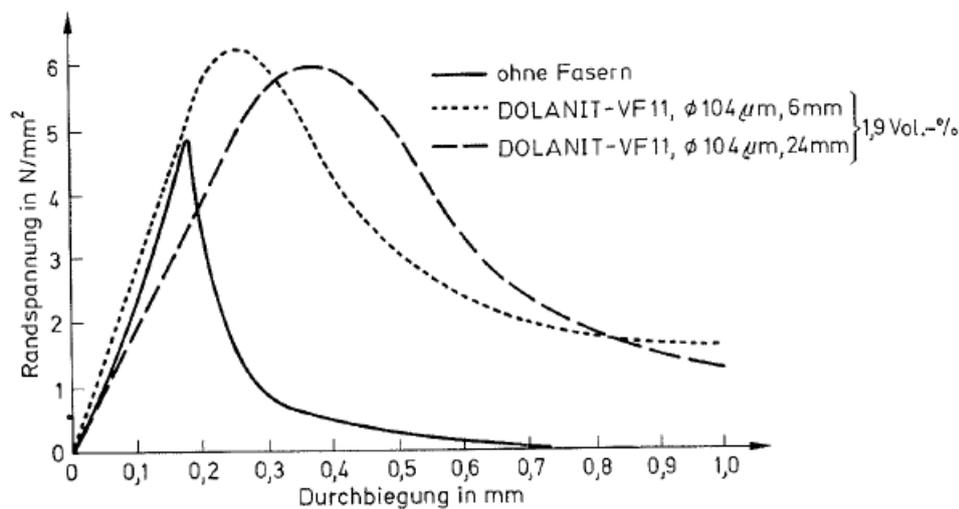


Bild 19: Last-Durchbiegung-Kurven von Balken mit DOLANIT-Fasern (Querschnitt $100 \cdot 100 \text{ mm}^2$, $l = 400 \text{ mm}$, Einzellast in Feldmitte) [Lit 29]

Bei Verwendung von PAN-Fasern wurde eine Steigerung der Biegezugfestigkeit bis zu 45 % festgestellt [Lit 30]. Die Verbesserung ist anscheinend direkt abhängig vom Fasergehalt und dem Verhältnis l/d .

Fasern, deren E-Modul größer ist als der E-Modul der Betonmatrix, etwa Stahl- oder Glasfasern, erhöhen die Risslast. Die Bruchlast ist in der Regel größer als die Risslast. In statischen Kurzzeitversuchen wurden bei Stahlfaserbeton Steigerungen der Biegezugfestigkeit zwischen 10 und 20 %, in Extremfällen bis etwa 45 % beobachtet [Lit 63] (Bild 20). Der Verlauf des abfallenden Astes und damit das Arbeitsvermögen bzw. das Bruchverhalten des Faserbetons wird in erster Linie durch das Verbundverhalten der Fasern bestimmt. Fasern mit besonders gutem Verbund erhöhen bei ausreichender Menge wohl die Risslast, lassen aber keine große Rissöffnung zu; das Versagen tritt nahezu schlagartig auf. Bei schlechtem Verbund wird die Risslast kaum gesteigert, es tritt jedoch - einen überkritischen Fasergehalt vorausgesetzt - ein zähes Bruchverhalten auf.

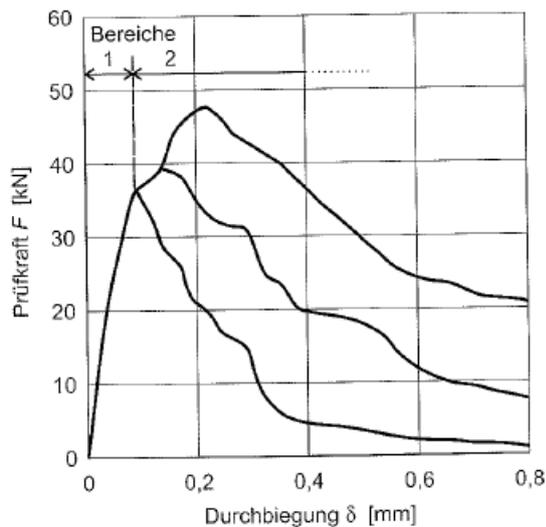


Bild 20: Last-Durchbiegung-Kurven von Stahlfaserbetonbalken

Das Verhalten nach dem ersten Anriss lässt sich quantitativ durch den Zähigkeitsindex (toughness index) beschreiben. Dieser ist nach ASTM C 1018 definiert als das Verhältnis der Fläche unter der Last-Durchbiegung-Kurve bis zu einer festgelegten Durchbiegung (i. a. das 5,5fache der beim ersten Riss vorhandenen Durchbiegung) zur Fläche unter der Kurve bis zum ersten Riss. Die jeweiligen Flächen entsprechen der Energie, die für die betreffende Durchbiegung aufgewendet werden muss.

Bei unbewehrtem Beton beträgt der Zähigkeitsindex 1,0. Bei Stahlfaserbetonen mit Fasergehalten von 0,5 bis 0,75 Vol.-% wurden Werte zwischen 10 und 15 [Lit 63], bei Polypropylenfaserbeton mit Fasergehalten von 0,1 bis 0,3 Vol.-% Werte zwischen 2 und 3 [Lit 62] ermittelt. Besonders hohe Zähigkeiten lassen sich nur mit überkritischen Fasergehalten erreichen, weil nur dann eine vollständige Rissentwicklung an vielen Stellen gleichzeitig möglich ist.

5.3.2 Wiederholte Belastung

Nach [Lit 63] führt ein Faserzusatz zu einer erheblichen Verbesserung der Biegeschwelfestigkeit. Während diese bei unbewehrtem Beton nur etwa 50 % der statischen Kurzzeitbiegefestigkeit beträgt, konnte sie durch Zusatz von Stahlfasern auf 90 bis 95 % gesteigert werden. Bei Zugabe von Polypropylenfasern war die Verbesserung nach [Lit 62] weniger ausgeprägt. Die Biegeschwelfestigkeit erreichte hier ca. 70 % der statischen Kurzzeitbiegefestigkeit.

5.3.3 Einfluss hoher Temperaturen

Bei Einwirkung hoher Temperaturen ist der Beton biegeweicher als bei Raumtemperatur. Gleichzeitig verringert sich die aufnehmbare Biegezugkraft (Bild 21). Danach versagen Probekörper aus Beton ohne Fasern auch bei hohen Temperaturen weitgehend schlagartig. Die erreichten Durchbiegungen entsprachen etwa denen bei 20 °C. Bei Stahlfaserbeton konnten die Probekörper auch bei hohen Temperaturen nach Erreichen der Höchstlast bei weiterer Verringerung noch erhebliche Lasten aufnehmen, die i. a. mit zunehmender Durchbiegung nur relativ langsam abnahmen. Der Übergang von der Höchstlast auf das untere Lastniveau nach dem Bruch der Zugrandfaser war bei thermisch beanspruchten Proben wesentlich weicher als bei normaler Raumtemperatur [Lit 46].

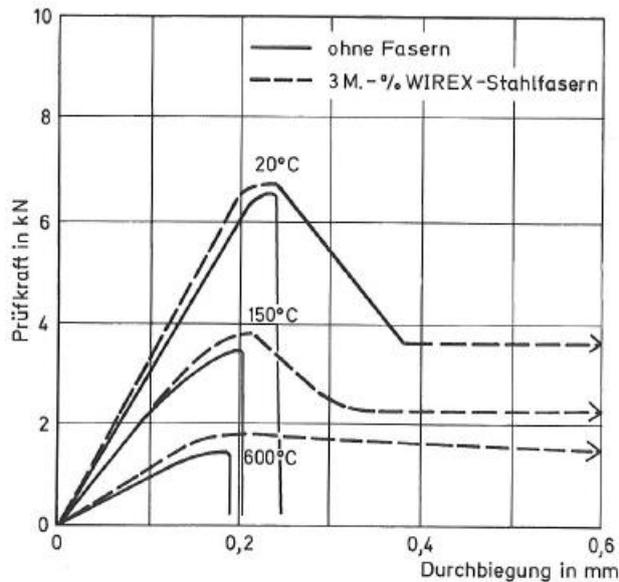


Bild 21: Last-Durchbiegung-Kurven von Betonbalken mit und ohne Stahlfasern bei hohen unterschiedlichen Temperaturen [Lit 46]

5.4 Verhalten bei Schlag- und Stoßbeanspruchung

Die Schlagzähigkeit kann durch Zugabe bestimmter Fasern beträchtlich erhöht werden. Günstig sind Kunststofffasern und die meisten Stahlfasern. Dies gilt auch für Glasfasern, solange noch keine Versprödung durch Alkaliangriff und Beeinträchtigung der Verformbarkeit durch Kristallwachstum eingetreten ist (s. Kapitel 5.8 und Bild 22).

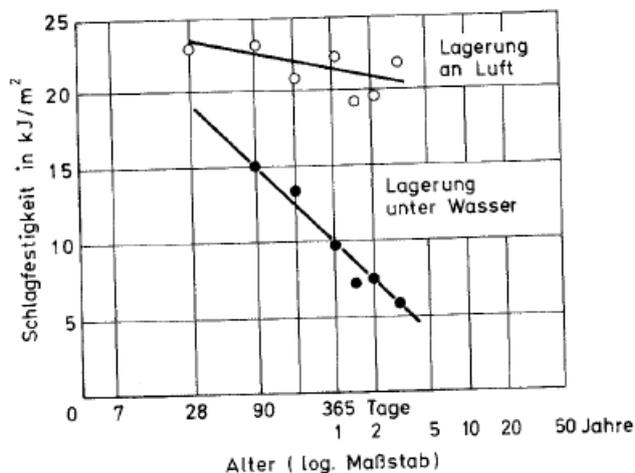


Bild 22: Einfluss des Alters auf die Schlagfestigkeit von Faserzement mit „alkalibeständigen“ Glasfasern (AR-Glas) [Lit 52]

Nach [Lit 74] ist eine Kombination von Fasern mit hohem und mit niedrigem E-Modul und hoher Bruchdehnung vorteilhaft. Eine Verbesserung der Schlagfestigkeit konnte bei Stahlfasern und auch bei Polypropylenfasern bereits ab einer Zugabemenge von 0,1 Vol.-% festgestellt werden [Lit 35]. Bei Polypropylenfasern sind Lagerungsbedingung und Alter des Betons ohne großen Einfluss auf die Schlagfestigkeit [Lit 44].

Mit steigender Zugabemenge nimmt die Schlagfestigkeit deutlich zu (Bild 23). In [Lit 8] werden Stahlfasergehalte von 0,6 Vol.-% (2 M.-%) als optimal angesehen, weil hiermit bei noch günstiger Verarbeitbarkeit des Frischbetons eine hohe Schlagzähigkeit erreicht wird. Die Zähigkeit bei dynamischen Einwirkungen, wie Beanspruchung durch aufprallende Massen,

Explosionen, Erdbeben usw., ist bei faserbewehrtem Beton oft 5 bis 10 mal so groß wie bei unbewehrtem Beton [Lit 1]. Weitere Angaben zur Schlagfestigkeit siehe [Lit 23, Lit 24].

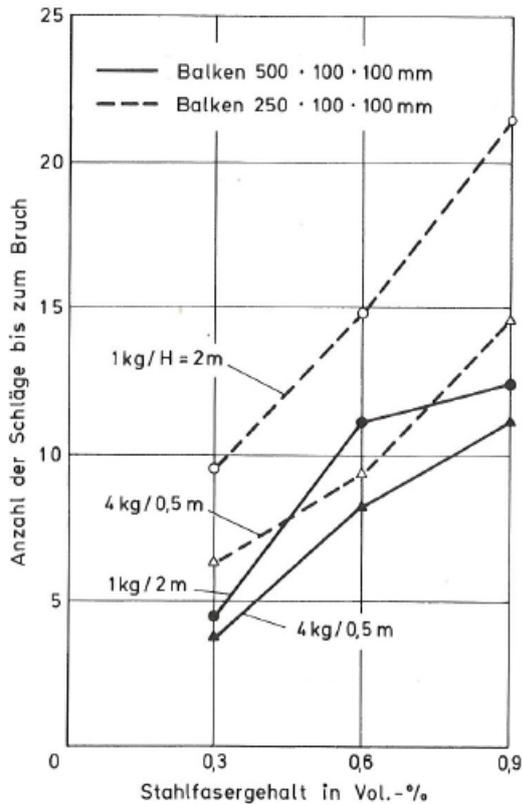


Bild 23: Einfluss des Fasergehalts auf die Schlagfestigkeit von Stahlfaserbeton [Lit 8] (gerade Stahlfasern, $d = 0,3 \text{ mm}$, $l = 30 \text{ mm}$, Balken mit 20 mm tiefer Nut, Fallgewicht 1 kg aus 2 m Höhe bzw. 4 kg aus 0,5 m Höhe)

5.5 Verhalten bei Querkraft- und Torsionsbeanspruchung

Bei den in [Lit 7] beschriebenen Querkraftversuchen hatte die Zugabe von Stahl- oder von Polypropylenfasern bis etwa 1 Vol.-% nur sehr geringen Einfluss auf die Schubtragfähigkeit. Durch hohe Gehalte an Glasfasern ($\approx 4 \text{ Vol.-%}$) ließ sich die Schubtragfähigkeit dagegen nahezu verdoppeln. Bei anderen Querkraftversuchen [Lit 69] brachte die Zugabe von 0,9 Vol.-% Stahlfasern von 50 mm Länge und abgekröpften Enden eine Erhöhung der Schubtragfähigkeit um 30 bis 40 %.

In allen Fällen erhöhte die Zugabe von Fasern die Zähigkeit. Diese nahm proportional mit dem Fasergehalt zu. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Fasern die Schubrisse überbrücken, das Öffnen der Risse bremsen und die Rissufer miteinander verdübeln. Sie wirken in dieser Hinsicht ähnlich wie eine Bügelbewehrung, sind allerdings bei gleichem Bewehrungsprozentsatz weniger wirksam [Lit 76].

Torsionsbeanspruchte Bauteile mit Faserbewehrung ertragen bis zum Versagen wesentlich stärkere Verdrehungen als unbewehrte, z. B. 5 bis $22^\circ/\text{m}$ gegenüber rd. $0,1^\circ/\text{m}$. Dies führt trotz eines nicht oder nur relativ wenig erhöhten Bruchtorsionsmomentes zu einer um 1 bis 2 Zehnerpotenzen höheren Energieaufnahme bis zum Bruch (Bild 24). Bei gleichem Fasergehalt sind lange Fasern, beispielsweise 50 mm, wirksamer als kürzere von z. B. 30 mm Länge. Als sehr günstig hat sich eine Mischung aus langen und kurzen Fasern im Verhältnis 1 : 1 erwiesen, weil sie hinsichtlich der Bruchenergie und der Verdrehbarkeit fast die gleiche

Verbesserung bringen wie die gleiche Menge an langen Fasern, die Verarbeitbarkeit des Betons aber viel weniger beeinträchtigen [Lit 14].

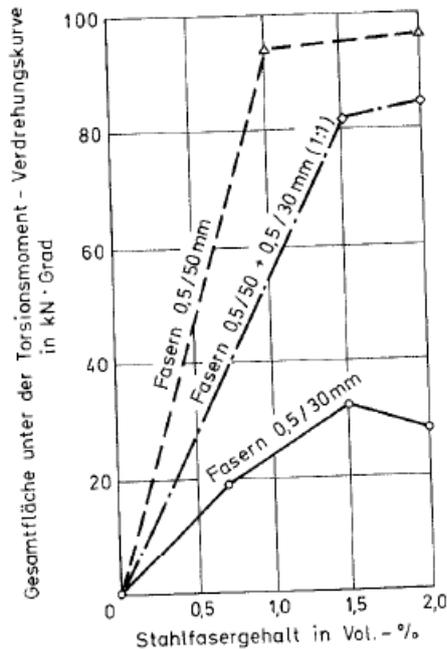


Bild 24: Einfluss von Stahlfasern auf die Bruchenergie bei Torsionsbeanspruchung [Lit 14] (Balkenquerschnitt 305 · 152 mm; Stahlfasern mit abgekröpften Enden, d = 0,5 mm, l = 30 bzw. 50 mm)

5.6 Kriechen und Schwinden

Über den Einfluss eines Faserzusatzes auf das Kriechen des Betons liegen z. T. widersprüchliche Versuchsergebnisse vor. Nach [Lit 35] führte die Zugabe von 0,3 Vol.-% Polypropylenfasern bzw. 1 Vol.-% Stahlfasern zu einer deutlichen Erhöhung der Kriechverformungen um 20 bzw. 40 %. Hierfür ist keine eindeutige Erklärung bekannt. Es ist nicht auszuschließen, dass der erhöhte Luftgehalt des Stahlfaserbetons gegenüber dem Vergleichsbeton eine Rolle spielt. Außer in der Faserzugabe unterschieden sich die Mischungen nur in der Zusatzmenge des Fließmittels, die beim Faserbeton etwa doppelt so groß war wie beim Ausgangsbeton. Bei anderen Versuchen [Lit 53] führte die Zugabe von Stahlfasern (3 Vol.-%) dagegen zu einer Verringerung des Kriechens. Beide Ergebnisse sind aber nicht ohne Weiteres vergleichbar, da in [Lit 35] Betone mit grober Gesteinskörnung und in [Lit 53] Mörtel untersucht wurden.

Durch Austausch von 10 % Portlandzement gegen Silikastaub konnte bei den in [Lit 35] beschriebenen Versuchen das Kriechen der Faserbetone etwa auf die Werte des Ausgangsbetons ohne Fasern gesenkt werden.

Das Schwinden des Betons wird durch Zugabe von Fasern i. a. nur wenig beeinflusst. Bei gut verarbeitbaren Betonen wurde z. B. bei Zugabe von 1 Vol.-% Stahlfasern eine Verringerung der Schwindverformungen um 15 bis 20 % beobachtet, während bei Mischungen mit steifer Konsistenz und dementsprechend mehr Poren kein Einfluss festzustellen war [Lit 75].

5.7 Reißneigung bei behindertem Schwinden

Werden die Schwindverformungen von unbewehrtem Beton be- oder verhindert, so können sich bereits bei mäßig scharfen Austrocknungsbedingungen breite Spaltrisse bilden. Durch

eine nicht vorgespannte Bewehrung lassen sich zwar Risse nicht verhindern, aber die Rissbreiten auf ein unschädliches Maß beschränken. Fasern wirken in dieser Hinsicht wie eine sehr fein verteilte Bewehrung. Die Risse wachsen jeweils nur bis zum Erreichen einer Stahlfaser, danach bilden sich neue Risse. Insgesamt entstehen im Faserbeton bei gleicher Dehnung kleinere Risse als im Normalbeton [Lit 68]. Werden die Fasern durch Vorspannung aktiviert, können Risse vermieden werden [Lit 22].

Versuche mit Betonringen, deren Schwindverformungen durch einen starren Stahlkern praktisch vollständig verhindert wurden, haben gezeigt, dass es durch Zusatz geeigneter Fasern in ausreichender Menge möglich ist, das sich beim Schwinden des Betons ausbildende Mikrorissssystem so zu stabilisieren, dass auch bei scharfen Austrocknungsbedingungen keine sichtbaren Risse (Rissbreiten über 0,01 mm) entstehen. Als besonders geeignet erwiesen sich für diesen Zweck vorgereckte und dadurch in ihrem E-Modul verbesserte Polypropylenfasern [Lit 47] und Polyacrylnitrilfasern DOLANIT [Lit 29]. Mit Ersteren wurden gute Erfolge bei einer Zugabemenge von 2 Vol.-%, mit Letzteren bei einer Zugabemenge von 1 Vol.-% erzielt. Untersuchungen an Acrylfaserbeton haben ergeben, dass bei ausreichender Dosierung der Fasern keine Schwindrisse infolge plastischen Schwindens oder durch Schwinden des erhärteten Betons auftreten [Lit 31]. Auch mit Stahlfasern (2 Vol.-%) konnte die Rissbreite auf Werte $< 0,1$ mm beschränkt werden.

Bei hochfestem Faserbeton können Risse zwar nicht vermieden, jedoch durch die Fasern überbrückt werden. Die Nachbehandlung des hochfesten Faserbetons ist wegen des hohen Zementleimgehalts sehr wichtig [Lit 51].

5.8 Dauerhaftigkeit

Voraussetzung für die Dauerhaftigkeit von Faserbeton ist, dass die durch den Faserzusatz bewirkten Eigenschaften auf Dauer erhalten bleiben. Dies ist nur dann gewährleistet, wenn die Fasern im eingebetteten Zustand ausreichend beständig sind. Vorteilhaft in Bezug auf die chemische Zusammensetzung von alkaliresistenten Fasern sind alkalimetallfreie Stoffe und die Zugabe der Komponenten ZrO_2 , MgO , FeO und TiO_2 [Lit 79].

5.8.1 Glasfaserbeton

Fasern aus Silikatgläsern (A- oder E-Glas) werden schon nach kurzer Zeit durch den alkalischen Zementstein so stark angegriffen, dass sie ihre Wirksamkeit im Beton weitgehend verlieren. Aber auch bei Beton, der mit Fasern aus alkaliwiderstandsfähigem Soda-Zirkon-Glas (AR-Glas) bewehrt ist, wurde ein Abfall der Zug- und Biegezugfestigkeit mit der Zeit beobachtet. An Probepplatten aus Glasfaserbeton wurde nach 2jähriger Lagerung im Freien ein Abfall der Biegezugfestigkeit und der zentrischen Zugfestigkeit um ein Drittel gegenüber dem 28-Tage-Wert festgestellt [Lit 55]. Gleichzeitig ging die an Zugproben im Alter von 28 Tagen gemessene Dehnung unter Höchstlast von rd. 10 ‰ bei 657 Tage alten Proben auf rd. 3 ‰ zurück [Lit 5]. In einer anderen Versuchsreihe [Lit 52] betrug die Schlagfestigkeit von Faserbeton mit AR-Glasfasern nach 3jähriger Unterwasserlagerung nur noch gut ein Viertel des ursprünglich vorhandenen Werts (vgl. Bild 22). Bei Luftlagerung ging die Schlagfestigkeit im gleichen Zeitraum dagegen nur um etwa 10 % zurück.

Das ungünstige Verhalten des wassergelagerten Glasfaserbetons ist im Wesentlichen auf drei Ursachen zurückzuführen. Zum einen ist es die Anlösung der Oberfläche der Glasfasern im alkalischen Milieu der zementgebundenen Matrix und die damit einhergehende Versprödung der Faser. Eine zweite Ursache dürfte eine mechanische Beanspruchung der empfindlichen Glasfasern durch scharfkantige Hydratationsprodukte sein, die eine Art Beißangewirkung ausüben. Es wurde nämlich beobachtet, dass sich bei Wasserlagerung die Zwischenräume

innerhalb der aus mehreren Einzelfäden bestehenden Fasern mit kristallinem Material, vorwiegend Calciumhydroxid, füllen [Lit 39]. Drittens wirkt sich die mit der Zeit immer fester werdende Einbindung der Glasfasern in die Matrix in Richtung einer Versprödung des Bruchverhaltens des Glasfaserbetons aus.

Bei der neuen Generation alkaliwiderstandsfähiger Glasfasern (Cem-FIL 2) soll das Langzeitverhalten gegenüber den in den genannten Untersuchungen verwendeten Glasfasern erheblich verbessert sein. Glasfaserbetone der zweiten Generation weisen eine verbesserte Dauerhaftigkeit durch Zugabe von puzzolanischen oder latent hydraulischen Zusatzstoffen (Trass, Flugasche, Microsilica) auf [Lit 32].

Für die Herstellung von Glasfaserbeton kann auch ein kalkarmer Spezialzement (Calcium Silicates - C_4A_3S -CS-slag type low alkaline cement, abgekürzt CGC) verwendet werden, der in Verbindung mit alkaliwiderstandsfähigen Glasfasern (AR-Glas mit 20 M.-% ZrO_2) zum Einsatz kommt. Nach [Lit 2] wird die Oberfläche der Glasfasern aufgrund des niedrigen pH-Wertes der Matrix chemisch kaum beansprucht, und die Fasern werden auch nicht durch Calciumhydroxidkristalle blockiert. Dies führt zu einer deutlich verbesserten Dauerhaftigkeit (Bild 25).

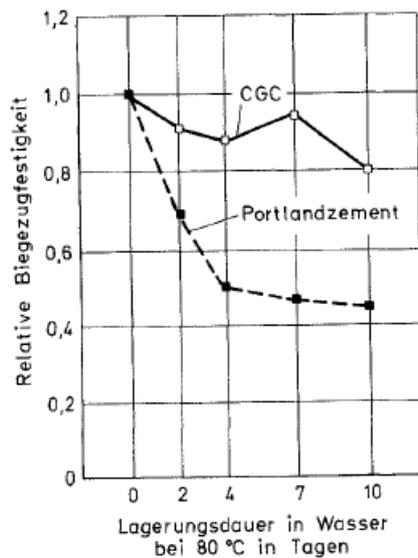


Bild 25: Abfall der Biegezugfestigkeit von Glasfaserbeton mit CGC (kalkarmer Spezialzement) bzw. mit normalem Portlandzement bei Lagerung in heißem Wasser. 3 M.-% Glasfasern aus AR-Glas mit 20 M.-% ZrO_2 [Lit 2]

5.8.2 Stahlfaserbeton

Bei Bauteilen aus Stahlfaserbeton, die der Witterung ausgesetzt sind, ist mit der Bildung von Rostflecken auf der Oberfläche zu rechnen (Bild 26), wenn diese nicht imprägniert oder beschichtet wurde oder wenn keine Fasern aus nicht rostendem Stahl verwendet worden sind. Eine Schwächung der Stahlfasern durch Korrosion und damit eine Beeinträchtigung ihrer günstigen Wirkung ist dagegen allenfalls in der karbonatisierten Zone, in Bereichen mit unzulässig hohem Chloridgehalt oder im Bereich von breiten Rissen zu befürchten, wenn gleichzeitig auch noch die für eine Korrosion erforderliche Feuchtigkeit vorhanden ist. In der Literatur finden sich keine Hinweise auf schwerwiegende durch Korrosion der Stahlfasern verursachte Schäden.

Die Druckfestigkeit von Stahlfasermörtel, der 10 Jahre lang ständig in Meerwasser gelagert worden war, hatte um 10 % abgenommen, während sich die Festigkeit von unbewehrtem Mörtel unter den gleichen Bedingungen um 40 % verringert hatte. Die Biegezugfestigkeit von Stahlfasermörtel hatte in 10 Jahren um 30 % abgenommen, betrug aber immer noch 10,3 N/mm² [Lit 1].



Bild 26: Rostende Fasern führen nicht zu Abplatzungen an der Oberfläche [Lit 12]

Untersuchungen an einer 23 Jahre der Witterung ausgesetzten Stahlfaserbetonprobe ergaben ungewöhnlich hohe Biegezug- und Zugfestigkeitswerte, ein ausgeprägt duktileres Verhalten und sehr geringe Carbonatisierungstiefen [Lit 41].

5.8.3 Kunststofffaserbeton

Die in Tabelle 2 aufgeführten Kunststofffasern sind im Zementstein überwiegend gut beständig. Über ein Nachlassen ihrer Wirksamkeit konnten in der Literatur keine Hinweise gefunden werden.

5.9 Frostwiderstand, Frost- und Taumittelwiderstand

Nach [Lit 6] verhält sich Faserbeton bei einer Beanspruchung durch wiederholte Frost-Tau-Wechsel ähnlich wie vergleichbarer Normalbeton. Haupteinflussgrößen sind das Luftporensystem und der Wasserzementwert.

Bei Frost-Tausalz-Versuchen wurden an Faserbeton mit Polyacrylnitrilfasern DOLANIT VF 11 (1 Vol.-%) nur unbedeutend stärkere Abwitterungen festgestellt als am Ausgangsbeton ohne Fasern, der - aus Gründen der Verarbeitbarkeit - mit einem etwas niedrigeren Wasserzementwert hergestellt wurde [Lit 26].

Bild 27 zeigt die Ergebnisse von Frost-Tau-Versuchen an Glasfaserbeton mit AR-Glas. Bei scharfer Beanspruchung (Gefrieren und Auftauen in Wasser) sank der dynamische E-Modul von konventionellem Glasfaserbeton auf 65 % des Ausgangswertes ab. Dies deutet auf eine spürbare Schädigung hin. Bei Verwendung des im Kapitel 5.8 erwähnten japanischen Spezialzementes CGC war der E-Modul nach 300 Frost-Tauwechseln noch unverändert, und es wurden kaum Abwitterungen beobachtet.

Bei mäßiger Beanspruchung (Gefrieren an Luft, Auftauen in Wasser) zeigte auch der Glasfaserbeton mit normalem Portlandzement einen hohen Frostwiderstand.

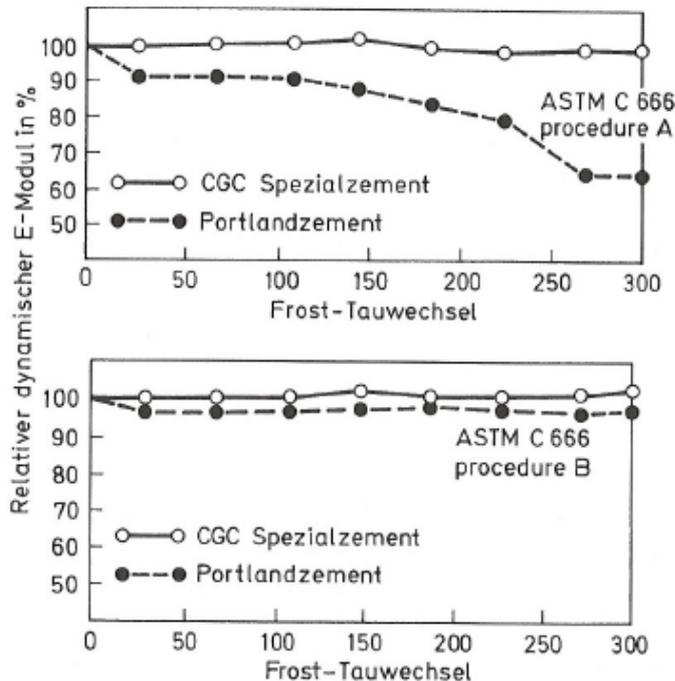


Bild 27: Frostwiderstand von Glasfaserbeton mit CGC (kalkarmer Spezialzement) bzw. mit normalem Portlandzement bei Prüfung nach ASTM C 666; 3,5 M.-% AR-Glasfasern mit 20 M.-% ZrO₂ [Lit 2].
 Oben: Gefrieren in Wasser, Auftauen in Wasser
 Unten: Gefrieren an Luft, Auftauen in Wasser

5.10 Hitzebeständigkeit, Brandverhalten

Start- und Landebahnen für Düsenflugzeuge mit Nachbrenner und für Senkrechtstarter werden durch plötzliche Einwirkung von Gasströmen mit sehr hohen Temperaturen (≈ 700 bis 1500 °C) und Geschwindigkeiten (≈ 400 bis 1000 m/s) beansprucht. Dies führt häufig zu einer starken Erosion der Betonoberfläche.

Durch Zusatz von 25 mm langen nicht rostenden Stahlfasern in einer Menge von 0,8 bis 1,2 Vol.-% konnte nach [Lit 83] ein hoher Widerstand gegenüber einer solchen Beanspruchung erzielt werden. Es muss allerdings durch besondere Maßnahmen beim Einbau und u. U. durch eine nachträgliche Behandlung der Oberflächen dafür gesorgt werden, dass keine Fasern aus der Oberfläche herausragen oder sich lösen, weil dies zu Beschädigungen der Triebwerke und Reifen oder zu Verletzungen des Bodenpersonals führen kann.

Das schlagartige Versagen von hochfestem Beton im Brandfall wird durch die Zugabe von ca. 2 kg/m^3 Polypropylenfasern vermieden. Die Fasser vermeiden das Aufbauen eines hohen Dampfdrucks, der zum Abplatzen des Betons führen würde.

5.11 Verschleißwiderstand

Welcher Zusatz von Fasern den Verschleißwiderstand verbessert, hängt von der Art der Beanspruchung ab. Bei Prallbeanspruchung verhält sich Faserbeton sehr günstig. Bei schleifender oder rollender Beanspruchung bestimmen die Härte der Betonoberfläche und der Verschleißwiderstand der verwendeten Gesteinskörnung die Abtragsrate. In diesem Fall

bringen Fasern kaum eine Verbesserung. Sie können sogar zu etwas höheren Abtragsraten führen, wenn der Wasserzementwert aufgrund der Faserzugabe erhöht werden muss, um eine ausreichende Verarbeitbarkeit zu erzielen [Lit 1]. Bei Stahlfaserbeton kann der Verschleiß durch Reibscheiben zehnmal höher sein als bei Normalbeton [Lit 65]. Beton mit Acrylfasern weist jedoch keine solchen Nachteile auf.

5.12 Transportvorgänge

Durch die Verringerung der Rissbreiten bei Faserbeton werden Transportvorgänge von Gasen und Flüssigkeiten erschwert [Lit 68]. Je nach Fasergehalt ist eine Reduzierung der Eindringtiefe von bis zu 60 % möglich [Lit 25].

Bei hohem Fasergehalt (> 2 Vol.-%) können die schlechte Verdichtbarkeit und Probleme mit der gleichmäßigen Verteilung der Fasern den positiven Effekt der Faserzugabe aufheben [Lit 51, Lit 25, Lit 81].

Bei unzureichend nachbehandeltem Beton zeigt sich deutlich eine größere Durchlässigkeit durch kapillare Vorgänge. Daher ist eine wirksame Nachbehandlung sehr wichtig für dichten Faserbeton [Lit 25].

Fasern können in günstigen Fällen die Betondurchlässigkeit um 30 bis 50 % gegenüber stabstahlbewehrtem Beton reduzieren [Lit 81].

6 Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton [Lit 4]

Die Bemessung von Stahlfaserbeton wird in Deutschland durch die entsprechende Richtlinie des DAfStb geregelt [Lit 15].

6.1 Tragverhalten

Zum besseren Verständnis einiger Regelungen in der Richtlinie wird nochmals auf das Tragverhalten von Stahlfaserbeton eingegangen. Betrachtet wird ein Querschnittssegment eines unbewehrten Betons, der unter Zug- oder Biegezugbeanspruchung steht (Bild 5 links). Beim Überschreiten einer bestimmten Zugspannung beginnt der Beton zu reißen: Es entsteht ein (Makro-)Riss. Für diesen Moment können auf Mikrostrukturebene vier Zonen unterschieden werden. Die erste Zone ist der Bereich des Makrorisses. Hier werden keine Zugspannungen mehr von einem Rissufer zum anderen übertragen. Daran schließt die Zone der Kornverzahnung an. Die Kornverzahnung führt dazu, dass im Bereich der Risswurzel noch Zugspannungen in gewissem Umfang übertragen werden können. Je kleiner die Rissweite w ist, desto größer sind die übertragbaren Zugspannungen. Die dritte Zone ist der Bereich der Mikrorissbildung (bruchmechanisch auch als Bruchprozesszone bezeichnet). Hier werden in Abhängigkeit der verschmierten Rissweite nennenswerte Zugspannungen übertragen. Daran schließt sich der ungeschädigte Bereich an. Hier werden Zugspannungen proportional zur aufgetragenen Zugdehnung übertragen, wobei die Zugdehnung nur wenig unterhalb der Zugbruchdehnung des Betons liegt.

Im Vergleich zum unbewehrten Beton ist rechts im Bild 5 der Querschnitt eines Stahlfaserbetons dargestellt. Der Stahlfaserbetonquerschnitt steht ebenfalls unter einer Zug- oder Biegezugbeanspruchung. Der markanteste Unterschied zum unbewehrten Beton besteht in der ersten Zone (Bereich des Makrorisses): Die Stahlfasern „vernähen“ die Rissufer und es werden nennenswerte Zugspannungen über den Riss übertragen. In den Zonen zwei (Kornverzahnung) und drei (Mikrorissbildung) übernehmen die Stahlfasern Anteile der Zugkraft. Im ungestörten Bereich herrscht voller Verbund der Stahlfasern. Die Stahlfasern nehmen Zugkraftanteile auf und zwar gegenüber dem Beton im Verhältnis der Elastizitätsmodule (E-Modul Stahl zu E-Modul Beton).

Aus dem Tragverhalten auf Mikrostrukturebene resultiert das Tragverhalten auf Makroebene. Im Bild 28 ist das Last-Verformung-Verhalten eines Zugstabs dargestellt [Lit 15]. Verglichen wird das Bruch- und Nachbruchverhalten bei Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton.

Wird bei dem Zugstab aus Beton verformungsgesteuert eine Zugkraft F aufgebracht, so steigt die Zugkraft linear mit der Verformung Δl an. Erreicht die aufgetragene Zugspannung die Zugfestigkeit des Betons, so reißt der Querschnitt. Eine Zugkraftaufnahme nach der Höchstlast ist nicht gegeben.

Anders verhält sich ein Stahlbeton-Zugstab. Wird dieser Zugstab kontinuierlich gedehnt, so erfolgt bei Erreichen der Zugfestigkeit des Betons eine Umlagerung auf den Stahl. Bei weiterem Aufbringen einer Zugdehnung nimmt der Betonstahl weiter Last auf bis in Bereiche sehr hoher Dehnungen. Es handelt sich hierbei um ein duktileres Bauteilverhalten, da ein Bruch durch sehr hohe Dehnungen vorangekündigt wird.

Ein Stahlfaserbeton-Zugstab liegt im Materialverhalten zwischen unbewehrtem Beton und Stahlbeton. Wird eine Zugverformung auf einen Stahlfaserbeton-Zugstab mit unterkritischem Stahlfasergehalt aufgebracht, so nimmt die Zugkraft bis zum Erreichen der Zugfestigkeit zu. Beim Peak findet eine Lastumlagerung vom Beton auf die Stahlfasern statt. Bei weiterer Steigerung der Zugverformung sinkt die Lastaufnahme zunächst stärker ab. Dies liegt am

unterkritischen Stahlfasergehalt. Unterkritisch bedeutet, dass praxisübliche Fasergehalte von 20 kg/m^3 bis 60 kg/m^3 vorhanden sind. Mit diesen Fasergehalten kann die Zugfestigkeit des Betons im Querschnitt nicht komplett übernommen werden (Anmerkung: hierzu wären Fasergehalte von 100 kg/m^3 und mehr erforderlich). Bei weiterem Aufbringen einer Zugverformung sinkt die Lastaufnahme des Stahlfaserbetons langsam ab, da nach und nach Stahlfasern durch die hohe Beanspruchung aus dem Beton herausgezogen werden. Das komplette Versagen von Stahlfaserbeton auf Zug findet bei sehr hohen Verformungen statt, die in der Praxis nicht vorkommen.

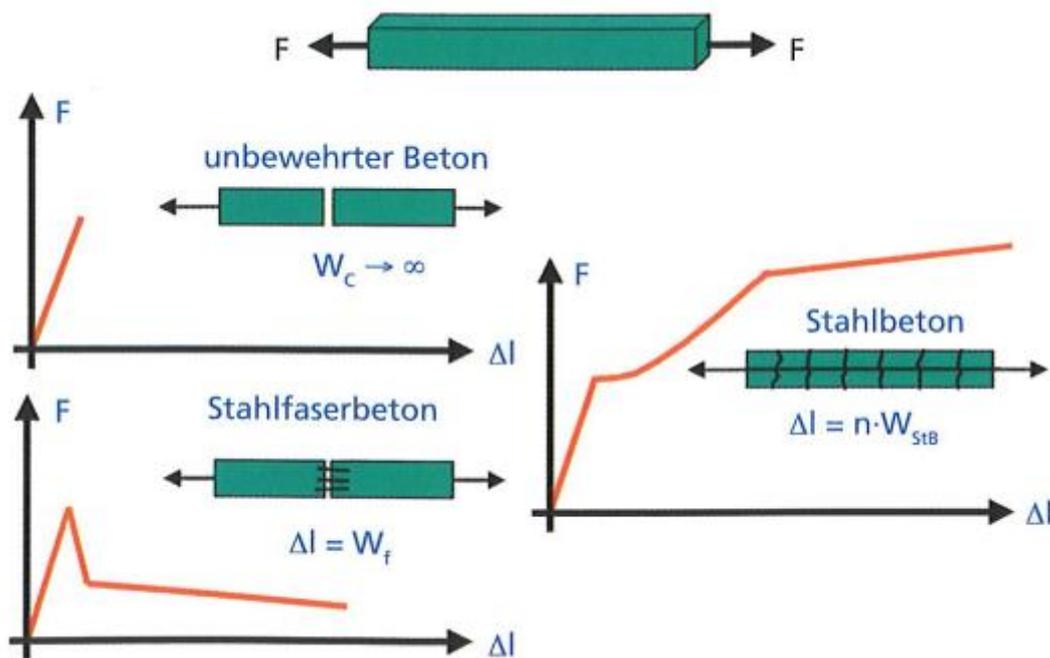


Bild 28: Last-Verformung-Verhalten von Stahlfaserbeton im Vergleich zu unbewehrtem Beton und zu Stahlbeton [Lit 15]

Ist beim Stahlbeton der Stahl ausreichend verankert, so lässt sich im Bauteilquerschnitt ein Gleichgewicht der Kräfte rechnerisch ermitteln. Dem Stahl werden die Zugkräfte zugeordnet, dem Beton die Druckkräfte. Die Stahl(zug)spannungen und die Beton(druck)spannungen lassen sich genau berechnen. Bei Stahlfaserbeton lassen sich die Stahlzugspannungen in der einzelnen Faser nicht exakt berechnen. Daher ist auch ein Querschnittsgleichgewicht aufgrund dieses Materialverhaltens nicht erreichbar. Liegt jedoch ein Gleichgewichtssystem am Gesamttragsystem (Systemgleichgewicht) vor, so ist Stahlfaserbeton einsetzbar. Mindestens eine der drei folgenden Voraussetzungen muss dafür gemäß Richtlinie Stahlfaserbeton [Lit 15] erfüllt sein:

- Schnittgrößenumlagerung innerhalb statisch unbestimmter Systeme (dies ist beispielsweise bei Fundamentplatten der Fall)
- Kombination mit Betonstahlbewehrung
- Normdruckkräfte infolge äußerer Einwirkungen (dies ist bei Wänden in der Regel der Fall)

6.2 Faserauswahl

Stahlfasern sind in ihren Eigenschaften (insbesondere Schlankheit, Zugfestigkeit und Formgebung) so gestaltet, dass ein Versagen der Fasern nicht durch Abreißen, sondern durch langsames Herausziehen erfolgt. Beim langsamen Herausziehen erfolgt die Kraftübernahme

vom Beton auf die Faser durch die Mantelreibung (und gegebenenfalls noch durch formschlüssige Verankerung). In einem auf Biegezug beanspruchten Querschnitt mit sich öffnendem Riss geben bei zunehmender Rissöffnung die außen liegenden Fasern langsam Kraft an weiter innenliegende Fasern ab. Dies ist ein duktileres Versagen mit Vorankündigung durch große Verformungen. Ein solches Versagen ist erwünscht. Bei zu langen Fasern würde der Versagensmechanismus „Abreißen“ sein. Dies würde bei biegezugbeanspruchtem Querschnitt mit sich öffnendem Riss dazu führen, dass Kräfte schlagartig von einer Faser auf die nächste umgelagert würden. Es könnte sich ein „Reißverschluss“-Effekt einstellen mit vergleichsweise schnellem Versagen des Bauteils bei kleinen Verformungen.

Im Hinblick auf die Faserauswahl wurden bei der Richtlinie im Anwendungsbereich Einschränkungen vorgenommen: Zugelassen sind Stahlfasern mit formschlüssiger, mechanischer Verankerung. Mechanisch verankerte Fasern sind in der Regel gewellte oder gekröpfte Fasern oder Fasern mit aufgestauchten Köpfen. Mit dieser Regelung wird sichergestellt, dass der über lange Jahre gewonnene Erfahrungsschatz durch Faser- und Bauteilzulassungen in die Anwendung einfließt. Weiterhin erzwingt diese Regelung die Wahl von leistungsfähigen Fasern.

Betontechnisch betrachtet sind Stahlfasern Betonzusatzstoffe; sie müssen in der Stoffraumrechnung berücksichtigt werden. Die Fasern selbst sind in ihren Eigenschaften und in ihrer Qualitätskontrolle in der europäischen Norm DIN EN 14889-1 [Lit 19] geregelt.

6.3 Klassifikation

Die Richtlinie nimmt eine Klassifizierung des Stahlfaserbetons anhand der Nachrissbiegezugfestigkeit in Leistungsklassen vor. Es gibt zwei Leistungsklassen:

- Leistungsklasse L1 für kleine Verformungen
- Leistungsklasse L2 für größere Verformungen und in Kombination mit Betonstahlbewehrung

Die Leistungsklassen umfassen den Bereich von 0 N/mm^2 bis $3,0 \text{ N/mm}^2$ Nachrissbiegezugfestigkeit (Bild 29). Durch die Klassifizierung wird das wichtigste Leistungsmerkmal von Stahlfaserbeton für alle Baubeteiligten eindeutig beschrieben ist. Dies erleichtert den Umgang mit Stahlfaserbeton in der Tragwerksplanung, in der Betonherstellung und in der Bauausführung.

Die Bezeichnung des Stahlfaserbetons erfolgt durch den Buchstaben L für Leistungsklasse und durch zwei Zahlenwerte, also z. B. L 0,9/1,2. Der erste Zahlenwert steht für die Nachrissbiegezugfestigkeit in der Leistungsklasse 1 (Verformung 1; Durchbiegung von 0,5 mm) und wird in der Tragwerksplanung für Gebrauchstauglichkeitsnachweise herangezogen. Der zweite Zahlenwert steht für die Nachrissbiegezugfestigkeit in der Leistungsklasse 2 (Verformung 2; Durchbiegung von 3,5 mm) und wird in der Tragwerksplanung für Tragfähigkeitsnachweise bzw. bei Stahlfaserbeton mit Betonstahlbewehrung auch für Gebrauchstauglichkeitsnachweise herangezogen werden.

Für die Verwendung der obersten beiden Leistungsklassen ist eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder Zustimmung im Einzelfall erforderlich, da hier eine extrem hohe Ausnutzung von Stahlfaserbetonen vorgenommen werden soll.

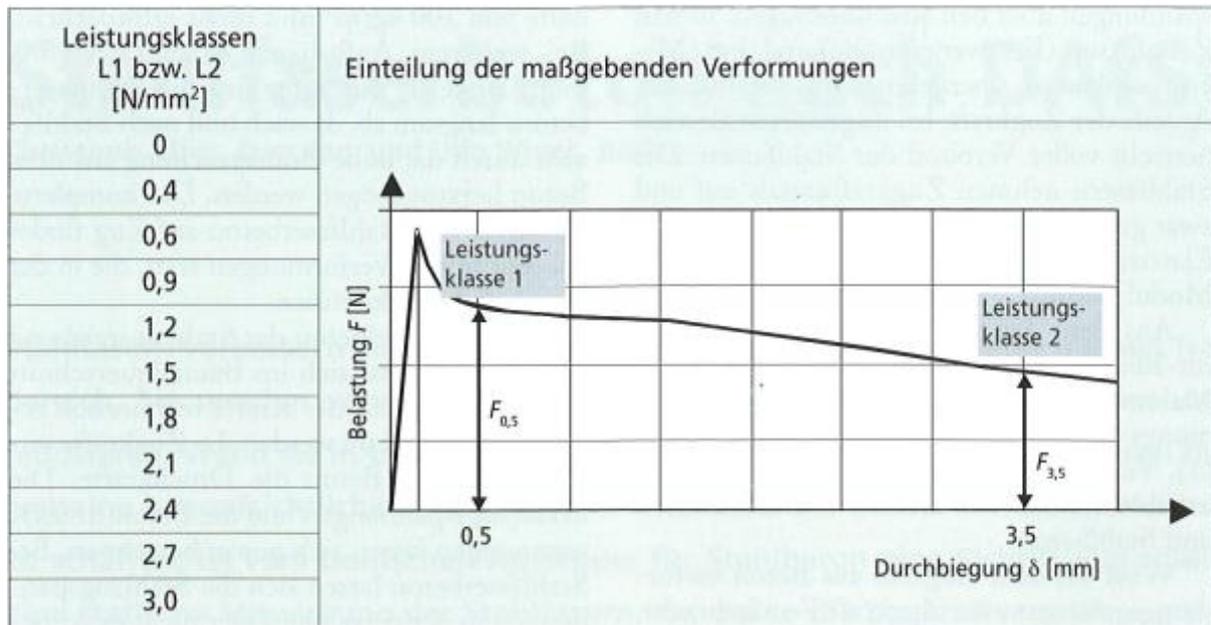


Bild 29: Klassifizierung von Stahlfaserbeton

6.4 Ermittlung der Leistungsfähigkeit und Berücksichtigung der Faserwirkung in der Tragwerksplanung

Die Wirkung von Stahlfasern in der Bemessung wird in drei Schritten ermittelt:

- Schritt 1: Bestimmung von charakteristischen Werten (Leistungsklassen aus Versuchsergebnissen)
- Schritt 2: Bestimmung der Rechenwerte
- Schritt 3: Ableitung der Bemessungswerte

Schritt 1 ist vom Betonhersteller auszuführen. Die Schritte 2 und 3 nimmt der Tragwerksplaner vor.

Schritt 1: Charakteristische Werte (Leistungsklassen)

Maßgebendes Leistungsmerkmal des Stahlfaserbetons im Hinblick auf die Nutzung der statisch wirksamen Fasern ist seine Nachrisszugfestigkeit und Nachrissbiegezugfestigkeit. Diese Leistungsfähigkeit im Nachbruchverhalten wird durch Biegezugversuche an mindestens sechs Balken mit den Abmessungen von 150 mm x 150 mm x 700 mm ermittelt. Die Versuche werden verformungsgesteuert durchgeführt, um den abfallenden Ast der Kraft-Durchbiegungs-Linie zu erhalten.

Das Versuchsende ist bei einer Durchbiegung des Stahlfaserbetonbalkens von 3,5 mm erreicht. Der Versuchsaufbau ist in Bild 30 dargestellt. Die Verformungsaufnehmer sind am Prüfkörper anzubringen, um verfälschende Einflüsse aus der Verformung der Prüfmaschine auszuschließen.

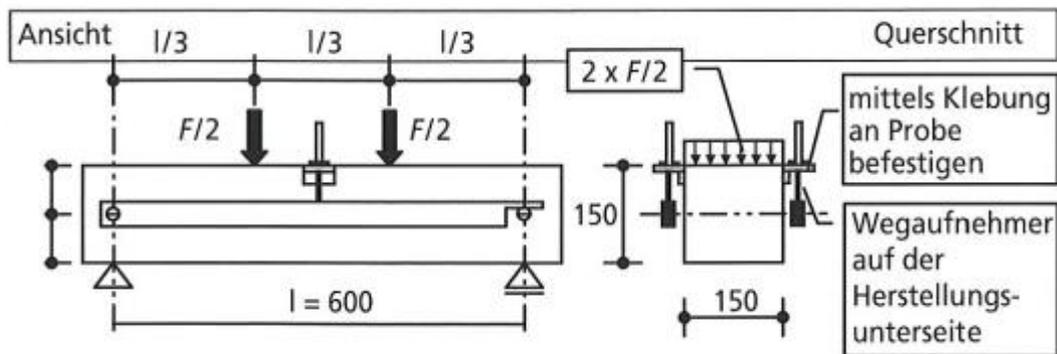
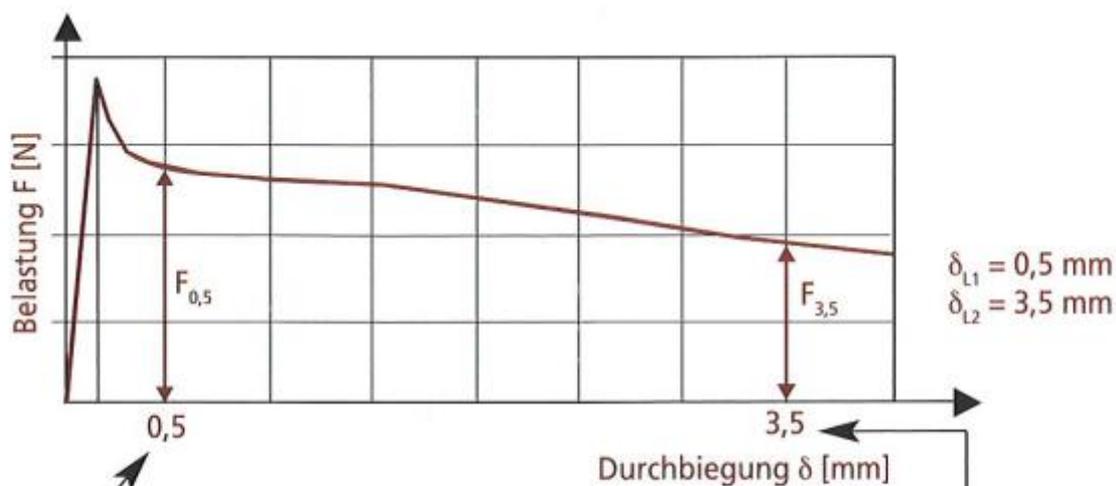


Bild 30: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Stahlfaserbeton (Abmessungen in mm) [Lit 4]

Ergebnis dieser Versuche sind Kraft-Durchbiegungs-Kurven. Beispielhaft ist dies in Bild 31 gezeigt. Durch Ablesung der Lastwerte bei 0,5 mm und 3,5 mm Durchbiegung ergeben sich unter Anwendung der Gleichungen in Bild 31 Nachrissbiegezugfestigkeiten für die Verformung 1 (kleine Verformungen) und für die Verformung 2 (große Verformungen). Für die Ermittlung einer Leistungsklasse ist in Tabelle 4 ein Beispiel gegeben.



$$f_{cfm, L1}^f = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \frac{F_{0,5, i} \cdot l}{b_i \cdot h_i^2}$$

$$f_{cfm, L2}^f = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \frac{F_{3,5, i} \cdot l}{b_i \cdot h_i^2}$$

$$f_{cfk, Li}^f = e^{(L \cdot f_{cfm, Li}^f - k_s \cdot L_s)} \leq 0,51 \cdot f_{cfm, Li}^f$$

mit:

- $f_{cfm, Li}^f$ Mittelwert der Einzelprüfergebnisse der Nachrissbiegezugfestigkeit [N/mm²]
- $f_{cfk, Li}^f$ charakteristischer Wert der Nachrissbiegezugfestigkeit [N/mm²]
- $L \cdot f_{cfm, Li}^f$ Mittelwert der logarithmierten Einzelprüfergebnisse $f_{cf, Li, i}^f$ [N/mm²]
- L_s Standardabweichung der logarithmierten Einzelprüfergebnisse der Serie [N/mm²]
- k_s Fraktilefaktor für unbekannte Standardabweichung für das 5 %-Quantil mit 75 % Aussagewahrscheinlichkeit

Bild 31: Belastung-Durchbiegung-Beziehung zur Ermittlung der Nachrissbiegezugfestigkeiten [Lit 4]

Tabelle 4: Ermittlung einer Leistungsklasse anhand eines Beispiels (Auswertung von sechs Balken)

Probennummern	$f_{\text{cf}, L1, i}^f$ [N/mm ²]	$\ln(f_{\text{cf}, L1, i}^f)$ [N/mm ²]
1	2,15	0,77
2	1,92	0,65
3	2,61	0,96
4	1,85	0,62
5	2,69	0,99
6	3,17	1,15
$f_{\text{cfm}, L1}^f$ bzw. $Lf_{\text{cfm}, L1}^f$	2,40	0,86
s bzw. Ls	0,51	0,21
V bzw. LV	0,21	0,25
k_s	–	2,336
$f_{\text{cfm}, L1}^f$	–	1,43
$f_{\text{cfk}, L1}^f = e(Lf_{\text{cfm}, L1}^f - k_s \cdot Ls) = e(0,86 - 2,336 \cdot 0,21) = 1,43 \geq 1,22 = 0,51 \cdot 2,40 = 0,51 \cdot f_{\text{cfm}, L1}^f$ Ergebnis: Leistungsklasse 1,2 bei der Verformung 1		

Darin bedeutet:

- $f_{\text{cf}, L1, i}^f$ Einzelprüfergebnisse der Nachrissbiegezugfestigkeit bei der Verformung 1 [N/mm²]
- $\ln(f_{\text{cf}, L1, i}^f)$ Logarithmierte Einzelprüfergebnisse der Nachrissbiegezugfestigkeit bei der Verformung 1 [N/mm²]
- $f_{\text{cfm}, L1}^f$ Mittelwert der Einzelprüfergebnisse der Nachrissbiegezugfestigkeit bei der Verformung 1 [N/mm²]
- $Lf_{\text{cfm}, L1}^f$ Mittelwert der logarithmierten Einzelprüfergebnisse $f_{\text{cf}, L1, i}^f$ bei der Verformung 1 [N/mm²]
- S Standardabweichung der Einzelprüfergebnisse der Serie [N/mm²]
- Ls Standardabweichung der logarithmierten Einzelprüfergebnisse der Serie [N/mm²]
- V Variationskoeffizient der Einzelprüfergebnisse der Serie
- LV Variationskoeffizient der logarithmierten Einzelprüfergebnisse der Serie
- k_s Fraktilenfaktor für unbekannte Standardabweichung für das 5%-Quantil mit 75 % Aussagewahrscheinlichkeit; hier für die Probenzahl $n = 6$
- $f_{\text{cfk}, L1}^f$ charakteristischer Wert der Nachrissbiegezugfestigkeit bei der Verformung 1 [N/mm²]

Schritt 2: Rechenwerte

Der zweite Schritt zur Feststellung der Leistungsfähigkeit von Stahlfaserbeton liegt in der Ermittlung der Rechenwerte. Hierbei werden gemäß der Gleichung in Bild 32 die Nachrissbiegezugfestigkeiten auf Nachrisszugfestigkeiten umgerechnet. Die Nachrisszugfestigkeit ist eine fiktive Festigkeit des Stahlfaserbetons in der Zugzone nach Überschreiten der Zugfestigkeit des reinen Betons. Die tatsächlich in den Stahlfasern auftretenden Zugkräfte werden auf die Fläche der Betonzugzone bezogen; die resultierende Krafrichtung ist normal zur Rissfläche orientiert. In die Formel zur Ermittlung der Rechenwerte geht ein Geometriefaktor ein. In flächenartigen Bauteilen (z. B. Bodenplatten) orientieren sich im Allgemeinen die Fasern statisch gesehen günstig.

mit $f_{ctR, Li}^f = \kappa_F^f \cdot \kappa_G^f \cdot \beta_{Li} \cdot f_{ctfk, Li}^f$
 $f_{ctR, Li}^f$ = Rechenwert der zentrischen Nachrisszugfestigkeit [N/mm²]
 $f_{ctfk, Li}^f$ = charakteristischer Wert der Nachrissbiegezugfestigkeit [N/mm²]
 β_{L1} = 0,40 Umrechnungsfaktor für Leistungsklasse 1
 β_{L2} = 0,25 Umrechnungsfaktor für Leistungsklasse 2
 κ_G^f = Geometriefaktor zur Berücksichtigung der Bauteilgeometrie (flächen- oder balkenartig)
 $\kappa_G^f = 1,0 + A_c \cdot 0,5 \leq 1,70$
 mit A_c = Zugzone des Stahlfaserbetons
 κ_F^f = Faktor zur Berücksichtigung der Faserorientierung (siehe unten)

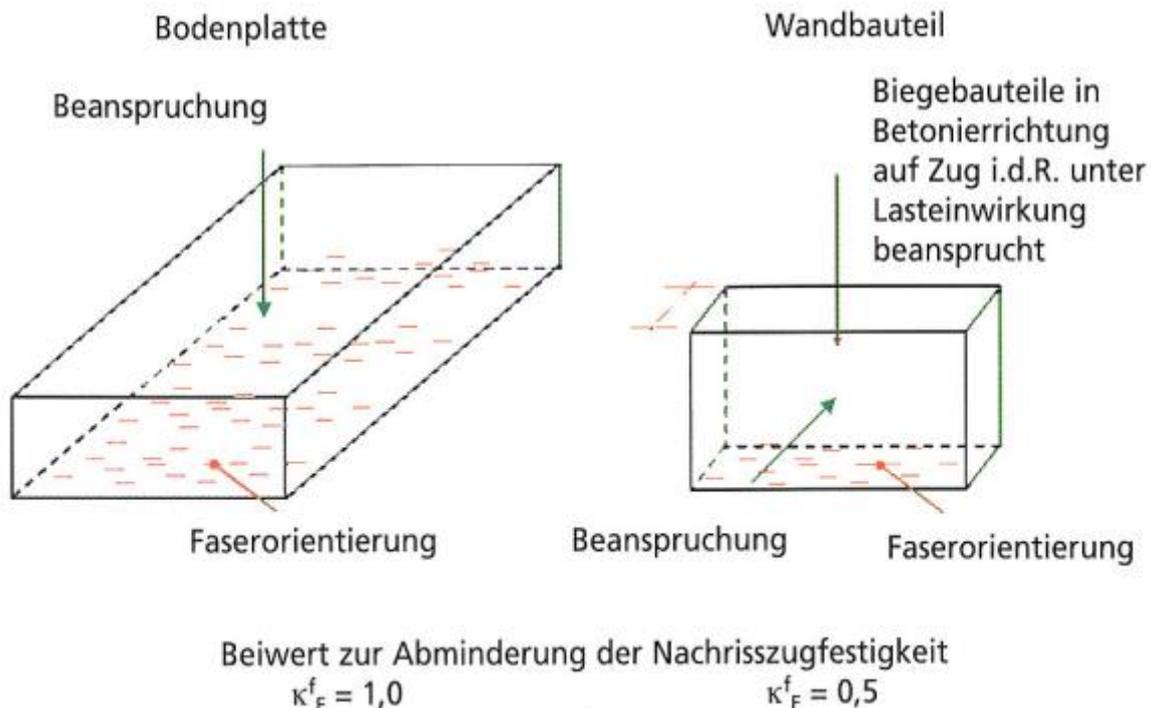


Bild 32: Ermittlung der Rechenwerte aus den Leistungsklassen

Während im Fahrmischer die Fasern weitgehend homogen verteilt sind [Lit 3], kann infolge des Betoniervorgangs eine Orientierung stattfinden. Diese Orientierung kann statisch gesehen günstig oder ungünstig wirken. Beim Einbringen des Betons in Bodenplatten richten sich die Fasern horizontal aus. Die Fasern liegen dann in der Richtung, in der später Biegezugspannungen im Bauteil auftreten. Ihre Orientierung ist günstig, daher ist der Geometriefaktor gleich eins. Werden vertikale Bauteile betoniert - wie beispielsweise Wände

- so orientiert sich die Mehrzahl der Fasern ebenfalls horizontal. Die Faserorientierung passt dann jedoch nicht zur Richtung der Zugspannungen, da die Biegezugspannungen aufgrund von Lastenwirkungen in der Regel in Betonierrichtung auftreten (siehe Bild 32). In der Richtlinie wurde dieser Effekt durch einen Abminderungsfaktor berücksichtigt. Die Rechenwerte für Wände sind 50 % kleiner als die Rechenwerte für Bodenplatten.

Schritt 3: Bemessungswerte

Der dritte Schritt ist die Ermittlung der Bemessungswerte der zentrischen Nachrisszugfestigkeit. Die Bemessungswerte werden letztendlich in der tragwerksplanerischen Berechnung (Statik) als Materialwiderstand angesetzt. Die Bemessungswerte $f_{ctd, Li}^f$ ergeben sich aus den Rechenwerten $f_{ctR, Li}^f$, multipliziert mit dem Abminderungsfaktor α_c^f für Dauerstandverhalten und dividiert durch den Teilsicherheitsbeiwert γ_{ct}^f (Bild 7).

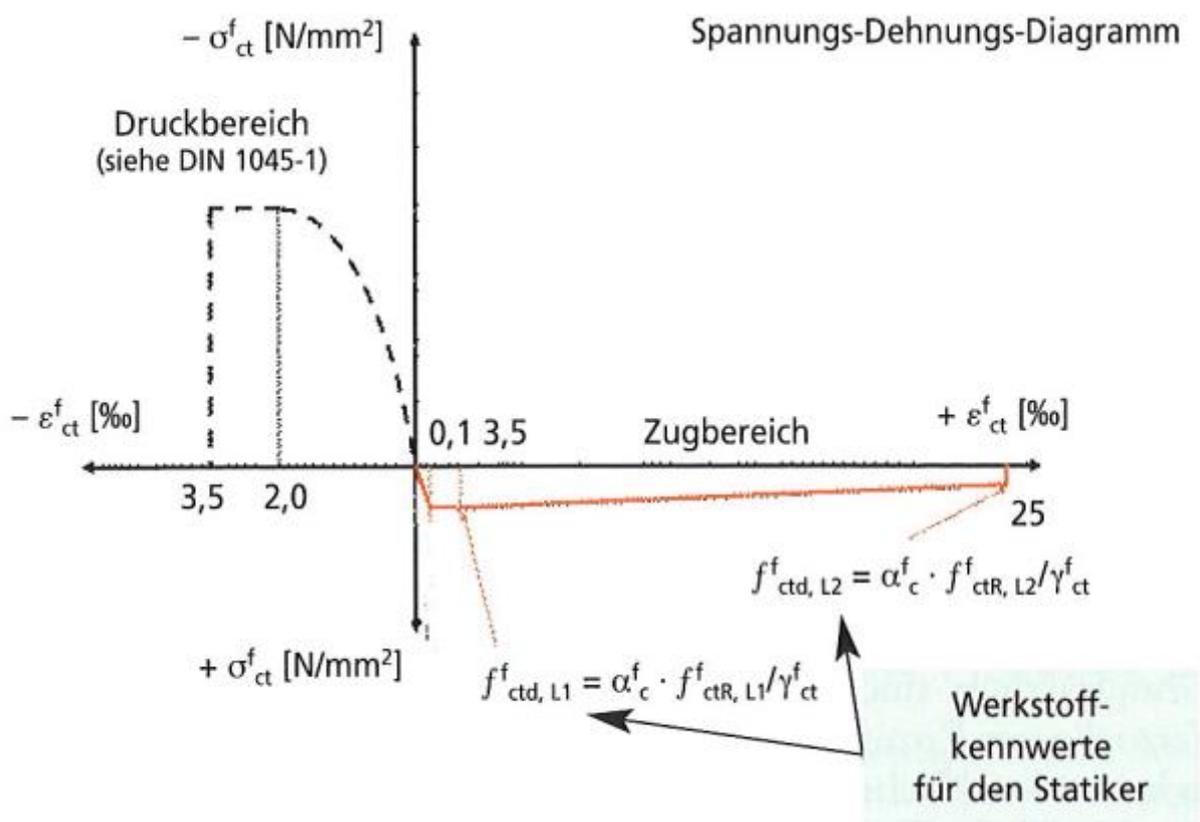


Bild 33: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Stahlfaserbeton sowie Ermittlung der Bemessungswerte aus Rechenwerten

In Bild 33 ist:

- $f_{ctd, Li}^f$ = Bemessungswert der zentrischen Nachrisszugfestigkeit [N/mm²]
- $f_{ctR, Li}^f$ = Rechenwert der zentrischen Nachrisszugfestigkeit [N/mm²]
- γ_{ct}^f = Teilsicherheitsbeiwert; z. B. 1,25 für die Nachrisszugfestigkeit von Stahlfaserbeton mit oder ohne Betonstahlbewehrung
- α_c^f = 0,85; auf das Bemessungskonzept abgestimmter Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung von Langzeitwirkungen auf die Nachrisszugfestigkeit des Stahlfaserbetons

In Bild 33 ist weiterhin das Spannung-Dehnung-Diagramm von Stahlfaserbeton angegeben.

Im Druckbereich gibt es keinen Unterschied zwischen Normalbeton ohne Fasern und Stahlfaserbeton; es gelten die Regelungen der DIN 1045-1 [Lit 18]. Im Zugbereich wurde die Spannungs-Dehnungs-Linie bis zu einer Dehnung von 25 ‰ ausgewiesen. Damit ist sie kompatibel zur Spannungs-Dehnungs-Linie von Betonstahl in der Stahlbetonnorm [Lit 18].

Die so ermittelten Bemessungswerte der zentrischen Nachrisszugfestigkeiten finden Eingang in die Bemessung von Bauteilen auf

- Biegezug,
- Querkraft und
- Durchstanzen

sowie als ansetzbaren Beitrag der Stahlfasern zur Verringerung der Betonstahlmenge bei der Mindestbewehrung.

6.5 Anwendungsbereich der Richtlinie Stahlfaserbeton

Die Richtlinie Stahlfaserbeton gilt für die Bemessung und Konstruktion von Tragwerken des Hoch- und Ingenieurbaus aus Stahlfaserbeton sowie Stahlfaserbeton mit Betonstahlbewehrung bis einschließlich zur Druckfestigkeitsklasse C50/60, also für den Bereich des Normalbetons. **Die Richtlinie gilt nicht für:**

- a) Bauteile aus vorgespanntem Stahlfaserbeton: In der Kombination von Spannbeton und Stahlfaserbeton liegen derzeit zu wenig Erfahrungen und Kenntnisse vor, um eine allgemeine Öffnung von Regelungen zuzulassen.
- b) gefügedichten und haufwerksporigen Leichtbeton:
Für die Kombination von Leichtbeton und Stahlfasern liegen derzeit ebenfalls zu wenig Erfahrungen und Kenntnisse vor.
- c) hochfesten Beton der Druckfestigkeitsklassen ab C55/67:
Hochfester Beton entwickelt eine höhere Verbundfestigkeit zu den Stahlfasern. Die Stahlfasern werden erheblich besser verankert. Der gewünschte Versagensmechanismus des langsamen Herausziehens ist nicht sichergestellt. Bei den für Normalbeton üblicherweise verwendeten Stahlfasern ist davon auszugehen, dass diese Fasern im hochfesten Beton durch Abreißen versagen. Entsprechende extrem hochfeste Fasern müssten im hochfesten Beton eingesetzt werden. Insgesamt liegen hierzu auch zu geringe Erfahrungen vor. Die Anwendungskombination „hochfester Beton“ und „Stahlfasern“ wurde daher in der Richtlinie ausgeschlossen.
- d) Stahlfaserbeton ohne Betonstahlbewehrung in den Expositionsklassen XD2, XS2, XD3 und XS3, bei denen die Stahlfasern rechnerisch in Ansatz gebracht werden:
Forschungsergebnisse zeigen, dass Fasern beim Vorliegen dieser Expositionsklassen stark korrodieren und dann reißen können. Eine über die Lebensdauer des Bauwerks hinweg aufrecht erhaltene Nachrisszugfestigkeit des Stahlfaserbetons wird damit nicht sichergestellt werden können. Technische Lösung für solche Einsatzbedingungen sind Edelstahlfasern.
- e) selbstverdichtenden Beton:
Eine der großen Herausforderungen beim selbstverdichtenden Beton ist, dass keine Sedimentation der groben Gesteinskörnungen in diesem mehlkornreichen Beton stattfindet. Stahlfasern haben im Vergleich zu anderen Betonausgangsstoffen eine hohe spezifische Dichte, die grundsätzlich eine Sedimentation erwarten ließe. Andererseits ist denkbar, dass die Stahlfasern ähnlich wie grobe Gesteinskörner beim selbstverdichtenden Beton in Schwebelage gehalten werden. Insgesamt liegen in Deutschland zu wenig Erfahrungen und Kenntnisse vor (hier wäre Forschungsbedarf).
- f) Stahlfaserspritzbeton:

Im Stahlfaserspritzbeton finden eher kurze Fasern Anwendung. Der Anwendungsbereich wurde daher in der Richtlinie ausgeschlossen.

Die in den Punkten a) bis e) beschriebenen Anwendungsfälle für Stahlfaserbeton wurden aufgrund fehlender umfangreicher praktischer Erfahrungen in der Richtlinie zunächst ausgeschlossen. In diesen Fällen müssen vorerst allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen oder Zustimmungen im Einzelfall erwirkt werden, um den Erfahrungshorizont zu erweitern. Eine Zulassung könnte beispielsweise bei Wänden erwirkt werden, um die Abminderung der Faserbetonleistungsfähigkeit durch den ungünstigen Beiwert für die Faserorientierung zu reduzieren. Voraussetzung hierzu wären sicherlich entsprechende Untersuchungen und Nachweise z. B. auf der Basis von geeigneten Betonierverfahren.

Sinngemäß ist die Anwendung dieser Richtlinie auch auf nicht tragende Bauteile möglich. Die Anwendung der Richtlinie sollte hierfür im Einzelfall vereinbart werden.

7 Anwendungsgebiete für Faserbetone

Faserbeton weist gegenüber unbewehrtem Beton vor allem folgende verbesserten Eigenschaften auf:

- verzögerte Rissbildung und kontrollierte Rissentwicklung
- zähes Bruchverhalten
- erhöhte Schlag- und Stoßfestigkeit
- geringe Rissempfindlichkeit bei scharfen Temperaturwechseln
- Aufgrund dieser Eigenschaften kann Faserbeton - erforderlichenfalls mit zusätzlicher Betonstahlbewehrung - vorteilhaft wie folgt eingesetzt werden [Lit 74, Lit 1, Lit 38, Lit 40, Lit 75, Lit 36]:
- Für dynamisch beanspruchte Konstruktionen, wie Tragwerke in Erdbebengebieten, explosionsgefährdete Bauwerke, Bauteile mit Schussbelastung, Anprallschutzkonstruktionen, Wasserbauten mit Beanspruchung durch Kavitation oder Aufprall von grobem Geschiebe, Küstenbefestigungen, Rammpfähle, Maschinenfundamente, Getriebegehäuse.
- Für Industrieböden, Flugplatzbefestigungen und Brückenbeläge. Hier ist eine günstige Beeinflussung der Rissbildung vor allem im jungen Beton zu erwarten, wo eine konventionelle Bewehrung wenig wirksam ist. Anstelle breiter Einzelrisse entstehen nur feine Haarrisse. Weitere Vorteile sind die erhöhte Kerbschlagzähigkeit, die verbesserte Kantenfestigkeit, ein besseres Verhalten bei Stoßbeanspruchung und die Möglichkeit zur Reduzierung der Plattendicke bei gegebener Belastung im Vergleich zu einer konventionell bewehrten Stahlbetonplatte.
- Für dünnwandige Bauteile, bei denen die Unterbringung und der Korrosionsschutz einer konventionellen Bewehrung problematisch wären. Beispiele sind Schalen, Falterwerke, Rohre, Fassadenelemente, Raumzellen, Lärmschutzwände, Tribünenelemente, Winkelstufen, integrierte Schalungen, Containerboxen.
- Für die örtliche Verstärkung besonders hoch beanspruchter Bereiche von Stahl- oder Spannbetonbauteilen, etwa zur Verbesserung der Schubtragfähigkeit von Balken oder Pflzdecken, als Ersatz oder Ergänzung der Bügelbewehrung im Verankerungsbereich von Spanngliedern.
- Für Bodenplatten bei Baugruben im Grundwasser ohne Grundwasserabsenkung. Durch die Faserbewehrung kann der Abstand der Anker für die Auftriebssicherung der Bodenplatte vergrößert werden.
- Zur Herstellung der Sekundärbarriere beim Bauen mit Beton beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen. Die Fasern bewirken eine Verringerung der Rissbreite und erschweren damit das Eindringen von Flüssigkeiten in den gerissenen Beton.
- Als Stahlfaserspritzbeton im Berg- und Tunnelbau und zur Instandsetzung von Stahl- und Spannbetonkonstruktionen.
- Als Instandsetzungsmörtel, beispielsweise für Silos, Staudämme, Brücken, Fassaden (auch als Spritzmörtel mit Glas- oder Kunststofffasern), Bauteile mit hohem Feuerwiderstand (Stahlfasern). Wichtig ist hierbei der Widerstand gegen die Bildung von breiten Rissen und gegen Abplatzungen. Bei sehr hohen Temperaturen bis zu 1600 °C sind Fasern aus nicht rostendem Stahl zu verwenden.

8 Fasermatten- und Gittermattenbeton

8.1 Fasermatten und Gittermatten aus Stahl

Die Weiterentwicklung von SIFCON [Lit 82] stellt SIMCON (Slurry Infiltrated Mat Concrete, Fasermattenbeton [Lit 33]) dar. Dabei entfällt das aufwendige Einstreuen der Fasern in die Schalung. Dafür wird eine aus Kurzfasern bestehende Fasermatte verwendet. Sie setzt sich aus Einzelfasern zusammen, die aufgrund ihrer Form und Länge von 12 bis 16 cm so ineinander verflochten sind, dass sie sich in dieser Erscheinungsform in ihrer Gesamtheit als Matte handhaben lassen (Bild 34). Die Fasern werden durch das sog. Dünndrahtgießen gewonnen. Dabei handelt es sich um das Abgießen einer Metallschmelze auf eine wassergekühlte Metalltrommel. Beim Auftreffen der Schmelze erstarrt der Schmelzstreifen und ergibt eine Faser. Die Faserseite, die beim Gießen mit der wassergekühlten Trommel in Berührung kommt, zieht sich zusammen, wodurch die Faser auf dieser Seite eine konvexe Oberfläche ausbildet und die gegenüberliegende Oberfläche eine konkave Form bekommt.

Eine Fasermatte erhält man auch, wenn Fasern aus Stahldrähten, die in beliebig lange Stücke geschnitten und wahllos zusammengehäuft sind, durch dünne Stahlgitter auf der Ober- und Unterseite zusammengehalten werden. Die Matten können in veränderlicher Dicke hergestellt werden (Bild 35).

Werden Stahlgitter in mehreren Schichten übereinandergelegt, wobei der senkrechte Abstand der Matten untereinander variabel gestaltet werden kann, so erhält man Gittermatten. Dabei treten Maschenweiten überwiegend zwischen 5 und 50 mm und Drahtstärken von meist 0,25 bis 1,0 mm auf. Der Zusammenhalt der Gitter untereinander wird durch Verrödeln erzeugt (Bild 36). Das Verformungsvermögen von Bauteilen, die mit Gittermatten bewehrt sind, ist sehr groß, sodass beim Gittermattenbeton auch von DUCON (Ductile Concrete [Lit 33]) gesprochen wird. Beim SIMCON und DUCON ist der Stahlgehalt merklich geringer als beim SIFCON.

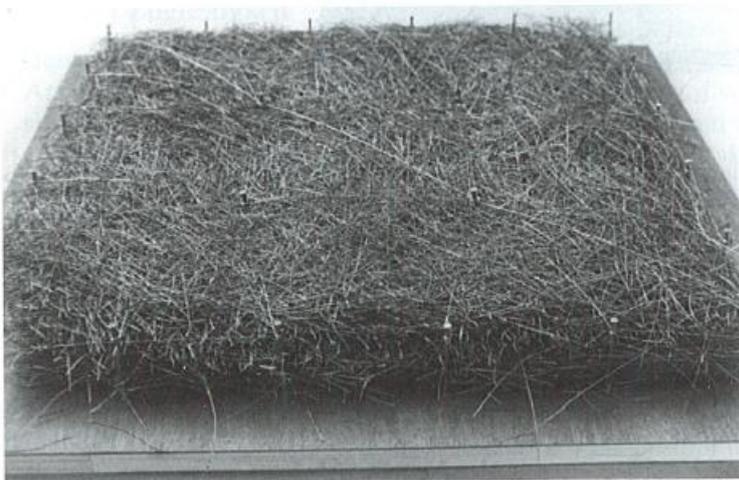


Bild 34: Fasermatte; die Fasern wurden durch Dünndrahtgießen erzeugt [Lit 33]

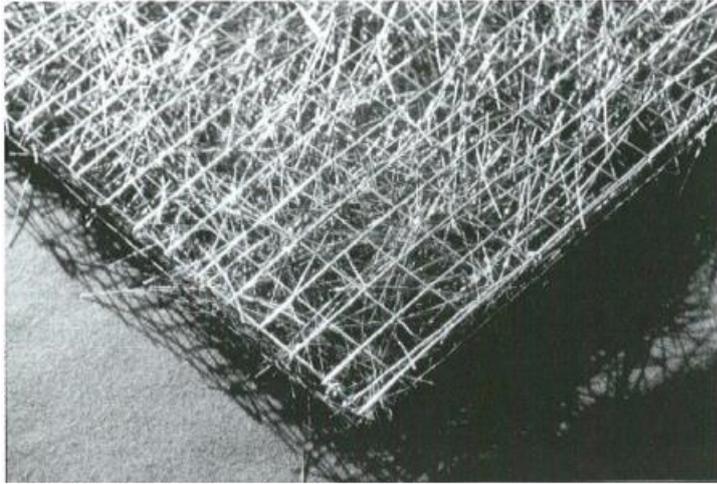


Bild 35: Fasermatte aus Stahldrähten mit unterschiedlicher Länge; sie werden durch oben- und unten liegende Gitternetze zusammengehalten [Lit 33]



Bild 36: Gittermatte; mehrlagig [Lit 33]

8.2 Herstellung von Fasermatten- und Gittermattenbeton

Fasermatten und Gittermatten werden in die Schalung an den Stellen eingelegt, an denen mit dem Auftreten von Zugspannungen gerechnet wird. Die Matten können an die Form der Schalung angepasst werden. Zur Herstellung von Deckschichten, z. B. von Fußböden oder verkehrsbeanspruchten Flächen, werden die Matten auf den Untergrund (Planum) oder auf die Oberfläche von bereits erhärtetem oder frischem Beton aufgelegt. Durch eine Staffelung der Mattenlagen können Mattenstöße ausgeführt werden.

Nachdem die Matten in Position gebracht worden sind, erfolgt, wie bei beim SIFCON, eine Infiltration mit Zementmörtel. Dieser muss ein gutes Fließvermögen aufweisen und möglichst lange verarbeitbar sein, um eine hohlraumfreie Füllung der Mattenlage und dichte Umschließung der Drähte oder Fasern zu gewährleisten. Insgesamt besteht die Gefahr der Bildung von Verdichtungsporen, deren Anteil größer sein kann als bei normalen Betonen. Bei größeren Gehalten an Fasern führen diese Poren zu einer deutlichen Reduzierung der Festigkeit. Eine Vacuumbehandlung der Oberfläche ist möglich. Es ist auf eine wirksame Nachbehandlung zu achten, weil der Infiltrationsmörtel einen hohen Anteil an feinen Bestandteilen enthält und dadurch besonders Risse gefährdet ist. Wegen der Faserbewehrung kommt es jedoch meist nur zu feinen Rissen an der Oberfläche.

8.3 Eigenschaften

8.3.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit von Fasermatten- und Gittermattenbeton nimmt mit zunehmendem Fasergehalt zu. Die Festigkeitssteigerung ist bei Faserausrichtung senkrecht zur einwirkenden Druckkraft wesentlich stärker als bei einem Faserverlauf parallel zur Kraftachse. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die senkrecht zur Druckkraft wirkenden Fasern die Risse bedingte Aufweitung des Prüfkörpers in Querrichtung sehr stark behindern und damit das Risswachstum bremsen. Das Versagen kündigt sich durch ein Aufquellen des Querschnittes an, das mit der Bildung von anfänglich feinen Längsrissen verbunden ist. Auch beim kraftgesteuerten Druckversuch kann ein ausgeprägter abfallender Ast der Spannungs-Dehnungs-Linie gemessen werden. Die Stauchung bei Höchstlast nimmt ebenfalls mit steigendem Fasergehalt zu und erreicht Werte bis über 10 %. Der Bruch verläuft duktil. Bei horizontaler Anordnung der Gitterlagen mit einem Fasergehalt von ca. 5 Vol.-% ist eine 30 bis 40 %-ige Steigerung der Druckfestigkeit gegenüber einem faserfreien Mörtel oder einem Probekörper mit parallel zur Krafrichtung angeordneten Gitternetzen zu verzeichnen. Wird der Fasermatten- oder Gittermattenbeton zur Umschnürung von Druckgliedern verwendet, kann eine Steigerung der Aufnahme der Druckkraft des Druckgliedes um bis zu 75 % erzielt werden.

8.3.2 Zugfestigkeit

Beim Vorhandensein von Fasermatten im Betonquerschnitt steigt die Zugfestigkeit an. Der Anstieg ist mit zunehmendem Fasergehalt größer und wird von der Faserorientierung bestimmt. Parallel zur Krafrichtung orientierte Fasern führen zu einer merklichen Steigerung, während senkrecht zur Zugkraft verlaufende Fasern praktisch keine Wirkung zeigen. Beim zentrischen Zugversuch ist bei Fasergehalten bis zu 5 Vol.-% eine Zunahme der Zugfestigkeit etwa auf das 5 fache des Wertes bezogen auf die unbewehrte Matrix zu verzeichnen. Bei der Biegezugfestigkeit ist die Steigerung größer und liegt bei dem 6- bis 8fachen des Wertes eines unbewehrten Probekörpers. Beim Gittermattenbeton ist die Steigerung der gemessenen Zugfestigkeit gegenüber einem unbewehrten Probekörper im Mittel nur etwa halb so groß wie bei dem Fasermattenbeton. Die Spannungs-Durchbiegungs-Linie zeigt jedoch einen grundsätzlich anderen Verlauf. Dies ist in Bild 37 dargestellt.

Beim Fasermattenbeton stellt sich nach dem Überschreiten der Höchstlast ein abfallender Ast ein. Die Steilheit der Spannungsabnahme wird bestimmt durch den Widerstand, der überwunden werden muss, um die Fasern aus ihrer Einbettung herauszuziehen, wobei es wegen ihrer größeren Länge gegenüber dem üblichen Faserbeton auch zum vermehrten Erreichen der Streckgrenze und zu einem Reißen der Fasern kommen kann.

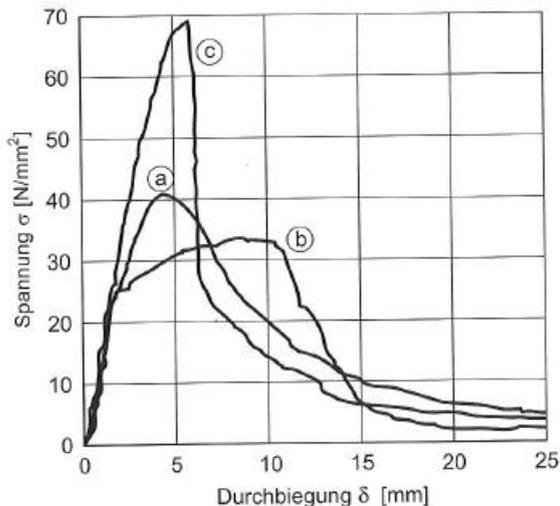


Bild 37: Spannung-Durchbiegung-Linien beim Biegezugversuch mit Balken aus (a) Fasermattenbeton und Gittermattenbeton mit (b) normalfestem und (c) hochfestem Stahl

Beim Gittermattenbeton kommt es nach einem näherungsweise linearen Spannungs-Durchbiegungs-Anstieg (Bereich 1) zu einer ersten Rissbildung mit einer im Rissbereich auftretenden Umlagerung der Biegezugkraft auf die in Balkenlängsrichtung verlaufenden Drähte, die aufgrund der infolge der Querdrähte sehr guten Verankerung anschließend ins Fließen kommen. Bei weiterer Kraftsteigerung bis zur Höchstlast findet eine ausgeprägte Mehrfachrissbildung statt, was zu einer erheblichen Zunahme der Durchbiegung führt (Bereich 2). Sobald einzelne Fasern beim Erreichen ihrer Zugfestigkeit reißen, kommt es zu einem Abfall der ertragbaren Last verbunden mit einem weiteren Zuwachs der Durchbiegung (Bereich 3), die im Wesentlichen durch die Rissaufweitung hervorgerufen wird, wobei immer mehr Drähte reißen. Gittermattenbeton weist im Vergleich mit Fasermattenbeton, SIFCON, Faserbeton und Stahlbeton die größte Duktilität auf.

Auf das Kraft-Verformung-Verhalten des Gittermattenbetons im Biegeversuch hat die Stahlqualität, d. h. Festigkeit und Streckgrenze des Stahls, einen wesentlichen Einfluss. Bei hochfesten Stählen steigt die im Bereich 1 erreichbare maximale Spannung an. Der Bereich 2 bildet sich aber nicht aus, weil es zum Schubversagen des Bauteils bzw. Balkens kommt. Der Bruch tritt schlagartig ein.

8.3.3 Elastizitätsmodul

Die Matrix des Fasermatten- und Gittermattenbetons besteht aus einem hochfesten Zementmörtel mit relativ kleinem Größtkorn. Demzufolge ist der Elastizitätsmodul des Betons kleiner als der eines Normalbetons üblicher Zusammensetzung. Bei einem Fasergehalt bis ca. 2 bis 3 Vol.-% ist keine wesentliche Veränderung gegenüber einer faserfreien Matrix zu erkennen. Die Werte liegen in der Größenordnung von 20 000 bis 25 000 N/mm². Bei höheren Fasergehalten zeigt sich eine Abhängigkeit vom Verlauf der Fasern in Bezug zur Krafrichtung. Bei Belastung parallel zur Faserrichtung steigt der Elastizitätsmodul deutlich an und erreicht Werte zwischen 25 000 und 30 000 N/mm², während bei einer senkrecht zur Faserrichtung einwirkenden Last nur eine geringfügige Erhöhung des Elastizitätsmoduls zu verzeichnen ist.

8.3.4 Langzeitverformungen

8.3.4.1 Kriechen

Die Kriechverformung des Fasermatten- und Gittermattenbetons ist im Mittel etwas kleiner als die des unbewehrten Betons. Die Ursache liegt in der kriechbedingten Zunahme der Verbundspannung zwischen Stahlfaser und Beton und der damit einhergehenden Umlagerung von inneren Kräften auf die Fasern. Bei Entlastung bleibt die Rück Verformung nahezu unbeeinflusst vom Fasergehalt.

8.3.4.2 Schwinden

Die Schwindneigung der Matrix ist wegen des hohen Bindemittelgehaltes und der feinen Gesteinskörnung gegenüber einem Normalbeton wesentlich höher. Die Fasermatten- und Gittermattenbewehrung führt zu einer starken Behinderung der Schwindverkürzung, sodass die Schwindverformungen im Mittel geringer ausfallen als bei Normalbeton.

8.4 Anwendung

SIMCON und DUCON kommen im Gegensatz zu SIFCON mit Stahlgehalten meist zwischen 2 und 10 Vol.-% aus. Aus diesem Grund sind diese von den Stoffkosten her gesehen wirtschaftlicher als jener. Einsatzmöglichkeiten bestehen in der Ausbildung von Verschleiß- und Deckschichten auf Oberflächen, die einer rollenden, schleifenden oder schlagenden Beanspruchung hoher Intensität ausgesetzt sind. Dies gilt sowohl für die Neuerstellung als auch die Instandsetzung geschädigter Bereiche. Im Betonbau mit wassergefährdenden Stoffen wird durch die Faserbewehrung das Rissverhalten positiv beeinflusst und damit der Eindringwiderstand der Bauteile im gerissenen Zustand erhöht. Die relativ hohe Zugfestigkeit verbunden mit einem duktilen Bruchverhalten sind dort vorteilhaft zu nutzen, wo eine Erhöhung der Tragfähigkeit und des Verformungsvermögens von Bauteilen aus Beton gefordert ist. Ein Bemessungskonzept entsprechend demjenigen von Bauteilen aus Stahlbeton liegt vor [Lit 33].

9 Literatur

- Lit 1: ACI Committee 544: State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. ACI Publication SP-81, S. 411-432, 1984; ebenso: Concrete International 4 Heft 5, S. 9-30, 1982
- Lit 2: Akihama, S.; Sucnaga, T.; Tanaka, M.; Hayashi, M.: Properties of GFRC with low alkaline cement. In: Fiber reinforced concrete, properties and applications. ACI SP-105, American Concrete Institute, Detroit, S. 189-209, 1987
- Lit 3: Alfes, Ch.: Qualitätssicherung von Stahlfaserbeton im Transportbetonwerk. BWI - Betonwerk International Heft 6, S. 212-218, 2006
- Lit 4: Alfes, Ch.; Wiens, U.: Stahlfaserbeton nach DAfStb-Richtlinie. Beton, Heft 4, S. 128-135, 2010
- Lit 5: Amtliche Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen (Otto-Graf-Institut) der Universität Stuttgart: Forschungsvorhaben Faserbeton. Teil II: Einfluss von Alterung, Lagerung und langfristig wirkender ruhender Belastung auf die Festigkeit und das Verformungsverhalten von Glasfaserbeton. Stuttgart 1979
- Lit 6: Balaguru, P. N.; Ramakrishnan, V.: Freeze-thaw durability of fiber reinforced concrete. ACI Journal 83 Heft 3, S. 374-382, 1986
- Lit 7: Barr, B.: The fracture characteristics of FRC materials in shear. In: Fiber reinforced concrete, properties and applications. ACI SP-105. American Concrete Institute, Detroit, S. 27/53, 1987
- Lit 8: Barr, B.; Baghli, A.: A repeated drop-weight impact testing apparatus for concrete. Magazine of Concrete Research Vol. 40 No. 144, S. 167/176, September 1988
- Lit 9: Bauer, K.; Schuster, U.; Heinisch, K.: Vereinzeln und Einmischen von DOLANIT®-Fasern in Baustoffe im RADIP-Doppelwellen-Fluidmischer.
- Lit 10: Bielak, E.: Herstellung von Faserbeton. Darmstädter Massivbau-Seminar, Darmstadt, 1990
- Lit 11: Breitenbücher, R.; Wörner, J.-D.: Ein neuer Hochleistungsbeton, beton Heft 12, S. 861/866, 1995
- Lit 12: Brockmann, G.; Dahl, J.; Hansel, D.; Jonas, W.; Riech, H.: Stahlfaserbeton: Ein neuer Baustoff und seine Perspektiven. Die Bibliothek der Technik, Band 136, Verlag Moderne Technik, 1996
- Lit 13: Czarnecki v., J.: Hochfester Beton für Schutzbauten, Ober- und grenzflächenanalytische Untersuchungen, Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Erding, Juni 1996
- Lit 14: Craig, J.; Parr, J. A.; Germain, E.; Mosquera, V; Kamilaes, S.: Fiber reinforced beams in torsion. ACI Journal Vol. 83 Heft 6, S. 934-942, 1986
- Lit 15: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie Stahlfaserbeton, 3/2010
- Lit 16: Deutscher Beton-Verein: Merkblatt Stahlfaserspritzbeton (Fassung Februar 1984). Beton- und Stahlbetonbau 79 (1984) Heft 3, S. 134-136; ebenso DBV-Merkblatt-Sammlung. Eigenverlag Deutscher Beton-Verein, Wiesbaden, 2. Ausgabe, April 1987

- Lit 17: Deutscher Betonverein E. V. und Institut Textile de France: Bauen mit Textilien 2, Heft 2, 1999
- Lit 18: DIN 1045-1:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion; 2008
- Lit 19: DIN EN 14889-1: Fasern für Beton – Teil 1: Stahlfasern – Begriffe, Festlegungen und Konformität“, 11/2006
- Lit 20: Druckschrift DUPONT Engineering Fibre Products Division, Genf: Wir stellen vor die hochbelastbare Para-Aramidfaser KEVLAR, 07/86
- Lit 21: Forkel, K.; Friedrich, J.; Masthoff, R.; Kasnik, F.; Knezek, J.; Langner, V.; Pridal, J.: Herstellung von glasfaserverstärktem Beton und Untersuchung der Zementbeständigkeit der Armierungsfasern. Bauplanung - Bautechnik 45. Jg. Heft 11/12, S. 502-507, 1991
- Lit 22: Gaber, K.; Klink, Th.: Vorgespannte Fasern im Beton / Prestressed fibres in concrete. Betonwerk + Fertigteiltechnik / Concrete precasting plant and technology Heft 11, S. 90/96, 1995
- Lit 23: Gopalaratnam, V. S.; Shah, S. P: Properties of steel fiber reinforced concrete subjected to impact loading. ACI Journal Vol. 83, Heft 1, S. 117-126, 1986
- Lit 24: Gopalaratnam, V. S.: Fracture and impact resistance of steel fiber reinforced concrete. Dissertation Northwestern University, Juni 1985
- Lit 25: Grahlke, Ch.; Ebbert, J.: Stahlfaserbeton als Baustoff für dichte Bauteile, beton Heft 10, S. 594/597, 1994
- Lit 26: Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S.: Beton. Art, Herstellung und Eigenschaften. Verlag Ernst & Sohn, 2001
- Lit 27: Hähne, H.: Dolanit: Hochfeste Acrylfasern für technische Einsatzgebiete. Chemiefaser/ Textilindustrie 33/85, S. 839/846, Dezember 1983
- Lit 28: Hähne, H.; Schuster, K.: Dolanit für technische Einsatzgebiete. Hochfeste Acrylfasern. Hoechst. High Chem Magazin Heft 1, S. 66/70, 1986
- Lit 29: Hähne, H.; Karl, S.; Wörner, J.: Properties of polyacrylonitrile über reinforced concrete. In: Fiber reinforced concrete, properties and applications. ACI SP-105, American Concrete Institute, Detroit, S. 211/223, 1987
- Lit 30: Hähne, H.; Techen, H.; Wörner, J.-D.: Eigenschaften von mit Polyacrylnitril-Fasern verstärktem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 88, Heft 1, S. 5/8, 1993
- Lit 31: Hähne, H.; Wörner, J.-D.: Acrylfaserbeton für schwindrißgefährdete Bauteile. Beton- und Stahlbetonbau 87, Heft 6, S. 140/142, 1992
- Lit 32: Halm, J.: Ausgangsstoffe, Herstellverfahren und Eigenschaften von Glasfaserbeton. DBV-Merkblätter Faserbeton Wiesbaden Selbstverlag, S. 40/45
- Lit 33: Hauser, S.: Hochfester Fasermattenbeton SIMCON Neu, DUCON. Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt, 1999
- Lit 34: Höllein, G., Schmideder, F., Sopp, N.: Biegezugfester faserverstärkter Mörtel und Beton, LGA-Bericht, Nürnberg, Juli 1987
- Lit 35: Houde, J.; Prezeau; A.; Roux, R.: Creep of concrete containing fibers and silica fume. In: Fiber reinforced concrete, properties and applications. ACI SP-105, American Concrete Institute, Detroit, S. 101/118, 1987

- Lit 36: Hummert, G.: Feuerfesttechnik mit WIREX-Stahlfasern. TIZ-Fachberichte 103, Heft 5, S. 279, 1979
- Lit 37: Hummert, G.: Arten und Abmessungen von Stahlfasern für Stahlfaserspritzbeton, konstruktiver Ingenieurbau - berichte Heft 42, S. 27/30. Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum. Vulkan-Verlag, Essen 1984
- Lit 38: Hummert, G.: Industrieböden aus Stahlfaserbeton, beton 37, Heft 2, S. 47/50, 1987
- Lit 39: Jaras, A. C.; Litherland, K. L.: Microstructural features in glass fibre reinforced cement composites. RILEM Symposium on fibre reinforced cement and concrete, S. 327/334, 1975
- Lit 40: Kaiser, U.: Glasfaserbeton - ein zeitgemäßes Baumaterial, beton 38, Heft 11, S. 431/434, 1988
- Lit 41: Kern, E.; Schorn, H.: 23 Jahre alter Stahlfaserbeton. Beton- und Stahlbetonbau 86, Heft 9, S. 205/208, 1991
- Lit 42: Kießling, A.: http://www.baumann-online.de/ho_alois-kiessling/facharbeiten/Filter/Filter.htm, private Internetseite, 2010
- Lit 43: Klos, H.: Asbestzement. Technologie und Projektierung. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1967
- Lit 44: Komlos, K.; Babal, B.: Schlagfestigkeit von Faserbeton. TIS -Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau 34, Heft 4, S. 274/282, 1992
- Lit 45: Kontrollierte Eigenschaften. Hoechst High Chem Magazin, Heft 11, S. 43/44, 1991
- Lit 46: Kordina, K.; Wydra, W.; Diederichs, M.: Untersuchungen zur Biegezugfestigkeit von thermisch hoch beanspruchtem Stahlfaserbeton. Abschlussbericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, August 1986
- Lit 47: Krenchel, H.; Shah, S.: Applications of polypropylene fibers in Scandinavia. Concrete International 7, Heft 7, S. 32/34, 1985
- Lit 48: Krenchel, H.; Shah, S.: Restrained shrinkage tests with PP-fiber reinforced concrete. In: Fiber reinforced concrete, properties and applications. ACI SP-105, American Concrete Institute, Detroit, S. 141/158, 1987
- Lit 49: Kustermann, A.; Zimbelmann, R. K.; Keuser, M.; Grimm, R.: Hochfeste Bindemittel und Zuschlagstoffe für hochfeste Betone unterschiedlicher Güte für Schutzanlagen der militärischen Infrastruktur. Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Heft 3, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2005
- Lit 50: Lankard, D. R.: Slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON): Properties and applications. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 42, S. 277/286, 1985
- Lit 51: Lemberg, M.: Dichtschichten aus hochfestem Faserbeton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 465, S. 21/26. Beuth-Verlag, Berlin 1996
- Lit 52: Majumdar, A. J.; Nurse, R. W.: Glass fibre reinforced cement. Materials Science and Engineering 15, S. 101 ff., 1974
- Lit 53: Mangat, P. S.; Motamedi Azari, M.: A theory for the creep of steel fiber reinforced cement matrices under compression. J. Mat. Sci. 20, S. 1119/1133, 1985

- Lit 54: Meyer, A.: Glasfaserbeton. Betonwerk + Fertigteil-Technik 39, Heft 9, S. 625/630, 1973
- Lit 55: Meyer, A.: Erstes Schalendach aus Glasfaserbeton in Deutschland, beton 27, Heft 4, S. 142/148, 1977
- Lit 56: Meyer, A.: Faserbeton. Zement-Taschenbuch 47, S. 453/477. Bauverlag, Wiesbaden, Berlin 1979
- Lit 57: Meyer, A.: Zusammensetzung und Eigenschaften der Faserbeton-Matrix. Betonwerk + Fertigteil-Technik 52, Heft 1, S. 52/58, 1986
- Lit 58: Meyer, A.: Glasfaserbeton - Baustoff mit Zukunft. Beton, Heft 6, S. 277/281, 1991
- Lit 59: Meyer, A.: Wellcrete - eine fortschrittliche Technologie für die kostengünstige Produktion hochwertiger Faserbetonprodukte / Wellcrete - an advanced technology for the production of high-quality fibrous concrete products. Betonwerk + Fertigteiltechnik / Concrete precasting plant and technology, Heft 8, S. 70/78, 1991
- Lit 60: Moens: Steel wire fibre optimization. Summary of contribution to Fib. Reinforced Concrete Conference, Delft 1973
- Lit 61: o. A.: Acrylfasern - Anwendung in Beton und Mörtel. Österreichische Bauzeitung, Heft 28, S. 24/26, 1991
- Lit 62: Ramakrishnan, V; Gollapudi, S.; Zellers, R.: Performance characteristics and fatigue strength of polypropylene fiber reinforced concrete. In: Fiber reinforced concrete, properties and applications. ACI SP-105. American Concrete Institute, Detroit, S. 159/177, 1987
- Lit 63: Ramakrishnan, V; Oberling, G.; Tatnall, P: Flexural fatigue strength of steel fiber reinforced concrete. In: Fiber reinforced concrete, properties and applications. ACI SP-105, American Concrete Institute, Detroit, S. 225/245, 1987
- Lit 64: Rehm, G.: Forschungsvorhaben Faserbeton. Teil 1: Literaturlauswertung. Forschungsbericht, Universität Stuttgart. Informatives Verbundzentrum Raum und Bau der Fraunhofer-Gesellschaft, 1979.
- Lit 65: Rock, R.: Spritzbeton unter Verwendung von hochfesten Acrylfasern. Zement und Beton, Heft 1, S. 32/34, 1992)
- Lit 66: Schnütgen, B.: Bemessung von Stahlfaserbeton und ihre Problematik, konstruktiver Ingenieurbau - berichte Heft 37, S. 9/13. Aus dem Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum. Vulkan-Verlag, Essen 1981
- Lit 67: Schnütgen, B.: Lastaufnahme durch Stahlfasern in gerissenem Beton, konstruktiver Ingenieurbau - berichte Heft 38/39, S. 108/111. Aus dem Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum. Vulkan-Verlag, Essen 1981
- Lit 68: Schnütgen, B.: Technologie des Stahlfaserbetons und Stahlfaserspritzbetons. DBV-Merk-blätter Faserbeton. Selbstverlag, Wiesbaden, 1992, red. überarb. 1996
- Lit 69: Sharma, A. K.: Shear strength of steel fiber reinforced concrete beams. ACI Journal Vol. 83, Heft 4, S. 624/628, 1988

- Lit 70: Sklocement Beneš: <http://www.sklocement.cz/mikrovyz.htm>, Internetauftritt, 2010
- Lit 71: Soroushian, P; Bayasi, Z.: Prediction of the tensile strength of fiber reinforced concrete: a critique of the composite material concept. In: Fiber reinforced concrete, properties and applications ACI SP-105, American Concrete Institute, Detroit, S. 71/84, 1987
- Lit 72: Stiller, W. K.: Stahlbeton - Stahlfaserbeton: Das Grenztragverhalten von Rechteckquerschnitten unter Impulsbelastung. konstruktiver Ingenieurbau - berichte Heft 38/39, S. 118/123. Aus dem Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum, Vulkan-Verlag, Essen 1981
- Lit 73: Studinka, J.: Faserzement ohne Asbest. Hoechst High Chem Magazin, Heft 1, S. 62/65, 1986
- Lit 74: Swamy, R. N.: Fibereinforcement of cement and concrete. Materials and Structures Vol. 8, N° 45, Heft 3, S. 235/254, 1975
- Lit 75: Swamy, R. N.: Use of steel fibres in reinforced and prestressed concrete structural members. In FIP State of Art Report - Special concretes, S. 15/21. Federation Internationale de la Precontrainte, Wexham Springs, 1982
- Lit 76: Swamy, R.; Jones, R.; Chiam, T.: Shear transfer in steel fiber reinforced concrete. In: Fiber reinforced concrete, properties and applications. ACI SP-105, American Concrete Institute, Detroit, S. 565/592, 1987
- Lit 77: Tsukamoto, M.: Untersuchung zur Durchlässigkeit von faserfreien und faserverstärkten Bauteilen mit Trennrissen. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 440, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1994
- Lit 78: Wischers, G.: Faserbewehrter Beton, beton 24 (1974) Heft 3, S. 95/99, und Heft 4, S. 137/ 141; ebenso: Betontechnische Berichte 1974, S. 45/70. Beton-Verlag, Düsseldorf 1975
- Lit 79: Wojnárovits, L.: Korrosion verschiedener Silikatfasern in gesättigtem Kalkwasser. Silikatechnik, Heft 1, S. 54/59, 1991
- Lit 80: Wörner, J.-D.: Faserarten und -eigenschaften; Darmstädter Massivbau-Seminar, Darmstadt, 1990
- Lit 81: Wörner, J.-D.; Tsukamoto, M.: Zur Durchlässigkeit von faserverstärkten Betonbauteilen mit Trennrissen. Beton- und Stahlbetonbau 88, Heft 3, S. 68/74, 1993
- Lit 82: Wörner, J.-D.; Breitenbücher, R.: Ein neuer Hochleistungsbeton, SIFCON - Slurry Infiltrated Fibre Concrete. Sonderdruck aus beton 45, Heft 12, S. 861/866, 1995
- Lit 83: Wu, G.: Steel fiber reinforced heat resistant pavement. In: Fiber reinforced concrete, properties and applications. ACI SP-105, American Concrete Institute, Detroit, S. 323/350, 1987
- Lit 84: Zerna, W.; Schnütgen, B.: Some remarks on properties of steel fibre reinforced concrete. Beitrag zu: Fibre Reinforced Concrete Conference, Delft 1973