

Einfluss auf den Beton

Stahlfasern: Eigenschaften und Wirkungsweisen

Markus Schulz, Herne

Seit Mitte der 70er-Jahre wurden die Baustoffeigenschaften von Stahlfaserbeton erfasst und Grundlagen für die Bemessung geschaffen. Stahlfasern haben einen wesentlichen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit des Betons. Die positive Wirkung von Stahlfasern macht sich bei Biegezug- und Schubfestigkeit, beim Riss- und Verformungsverhalten sowie beim Verhalten bei stoßartiger Belastung und bei Schwellbeanspruchungen bemerkbar. Bei der Bemessung von Stahlfaserbetonquerschnitten unterscheidet man zwei Zustände. Abhängig von der Bemessung zugrunde gelegten Zustand empfiehlt es sich, Stahlfasertypen zu verwenden, die im Bereich der Erstrisslast bzw. im Nachbruchverhalten die optimale Wirkung erzielen. Der Beitrag gibt eine Übersicht über die unterschiedlichen Stahlfasertypen und ihre spezifischen Eigenschaften.

1 Einleitung

Die Idee, Baustoffe, die hohe Druckspannungen aufnehmen können, aber lediglich geringe Zugspannungen, mit Faserzusätzen zu verstärken, ist alt. Schon die Römer gaben ihrem betonähnlichen Baustoff „Opus Caementicium“ Fasern in Form von Strohhalmen und Haaren bei, um Risse zu vermeiden [1]. Das erste Patent meldete A. Berard 1874 in den USA an [2], als er Beton durch die Zugabe von Stahlabfällen verstärken wollte. Erst Anfang der 60er-Jahre wurde der Prozess vor allem in den USA durch intensive

Forschung beschleunigt. In Deutschland wurde Stahlfaserspritzbeton erstmalig zwischen 1974 und 1976 im Rahmen von Großversuchen bei einer Untertageanlage eingesetzt [2]. Hauptgründe für den zuerst nur zögerlichen Einsatz waren neben den damals noch hohen Kosten der Stahlfasern vor allem geringe Erfahrungen und die fehlende Einbindung in das Regelwerk [3]. Seit Mitte der 70er-Jahre wurden die Baustoffeigenschaften erfasst und Grundlagen für die Bemessung von Stahlfaserbetonbauteilen geschaffen. Der Deutsche Beton Verein (DBV)

brachte drei Merkblätter heraus, 1984 „Stahlfaserspritzbeton“, das später erweitert wurde und sich allgemein mit der Technologie von Stahlfaserbeton und Stahlfaserspritzbeton befasst [4] (Fassung 1992), 1991 „Grundlagen zur Bemessung von Industriefußböden aus Stahlfaserbeton“ [5] und 1992 „Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau“ [6]. Alle drei Merkblätter wurden 1996 redaktionell überarbeitet.

Seit 1998 beschäftigt sich eine Arbeitsgruppe mit der Erstellung eines neuen Merkblatts, das alle Aspekte, wie z.B. Anwendung, Baustoffkennwerte, Bemessung, Prüfung und Überwachung, erfassen soll. Auch in anderen europäischen Nachbarländern wurde die Notwendigkeit einer Regelung von Stahlfaserbeton erkannt. Als Beispiel seien hier die SIA 162 der Schweiz [7] und die seit 1999 in Bearbeitung befindliche österreichische Richtlinie „Faserbeton“ angeführt. 1999 wurden in Deutschland geschätzte 35 000 t Stahlfasern eingebaut.

2 Stahlfasertypen

2.1 Gefräste Stahlfasern

Gefräste Stahlfasern werden von rotierenden Fräsern aus Stahlbrammen herausgearbeitet (Bild 1). Je nach Ausbildung der Messer auf dem Fräskopf und der Vorschubgeschwindigkeit der Bramme können die Faserbreite und die Faserdicke beeinflusst werden. Gefräste Stahlfasern haben einen sichelförmigen Querschnitt und sind um ihre Längsachse tordiert. Sie besitzen eine glatte Außenfläche und eine sehr raue Innenfläche (Bild 2).

Durch die starke Wärmeentwicklung und schnelle Abkühlung beim Fräsprozess wird das Ausgangsmaterial gehärtet und von einer

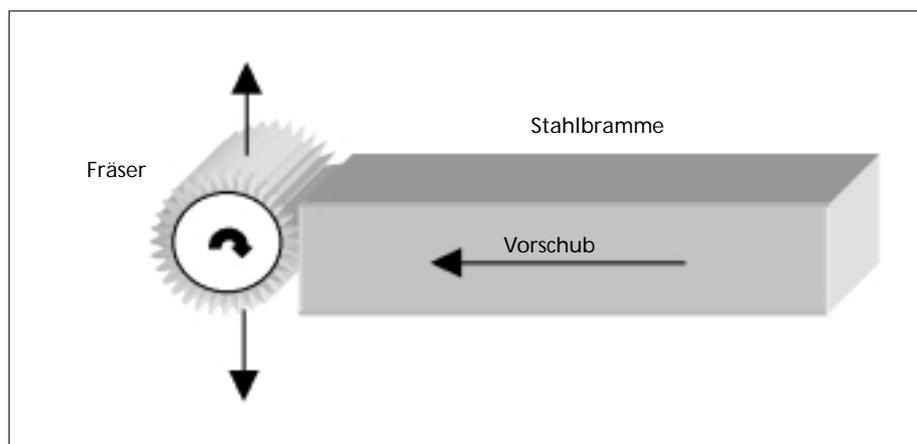


Bild 1: Schema Herstellung gefräster Stahlfasern

Grafik: Vulkan Harex

Der Autor:

Dipl.-Ing. Markus Schulz studierte Bauingenieurwesen mit Schwerpunkt Bauwirtschaft an der Universität Dortmund. Nach Abschluss seines Studiums begann er 1998 seine Tätigkeit bei der Vulkan Harex Stahlfasertechnik GmbH & Co. KG, wo er 1999 die Leitung der Technischen Abteilung übernahm. Er ist seit 1998 als Mitglied des Arbeitskreises „Stahlfaserbeton“ des DBV an der Ausarbeitung des Merkblatts „Stahlfaserbeton“ beteiligt und seit 1999 Mitglied des Arbeitskreises „Faserbeton“ des Österreichischen Beton-Vereins, in dem eine neue Richtlinie „Faserbeton“ erarbeitet wird. Seit Mitte 2000 ist er zusätzlich im Unterausschuss des DAfStb an der Erarbeitung der Richtlinie „Stahlfaserbeton“ beteiligt.

leicht blau schimmernden Oxidschicht überzogen, die den Fasern einen begrenzten Rostschutz verleiht. Die Fasern haben eine Länge von 32 mm und eine Dicke von rd. 0,40 mm.

2.2 Drahtfasern

Bei der Herstellung von Drahtfasern werden Drähte verschiedener Durchmesser je nach gewünschter Stahlfasertyp durch zwei gegenläufige Walzen geführt (Bild 3). Hierbei werden die Drähte in ihre spezielle Form gebogen und auf Länge geschnitten. Andere Verfahren sind z.B. das Stanzverfahren. Die Faserlängen liegen zwischen 25 mm und 60 mm, die Faserdurchmesser zwischen rd. 0,50 mm und 1,10 mm. Die Zugfestigkeiten der Stahlfasern hängen neben der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials auch vom Herstellungsverfahren ab. Üblich sind Zugfestigkeiten zwischen 1 000 N/mm² und 1 400 N/mm². Zur Verankerung in der Betonmatrix sind die meisten Drahtfasern mit Endhaken ausgebildet (Bild 4).

Einige Hersteller bieten Drahtfasern mit zusätzlicher Prägung an, um den Verbund zwischen Stahlfaser und Mörtelmatrix zu verbessern. Um bei Fasern mit hohem Längen- zu Durchmesserverhältnis die Verarbeitbarkeit zu erleichtern, werden Einzelfasern auch in zu Bündeln verklebter Form angeboten.

2.3 Blechfasern

Bei der Herstellung von Blechfasern werden Bleche zu Fasern geschnitten, wobei sie durch Druck verformt werden und dabei Endhaken ausgebildet werden können (Bild 5). Auch bei Blechfasern werden z.T. Prägungen aufgebracht, um den Verbund zu verbessern, die Abmessungen sind ähnlich wie bei den übrigen Stahlfasertypen (Bild 6). Die Zugfestigkeiten von Blechfasern sind i.d.R. niedriger, da die Güte der Ausgangsmaterialien meistens geringer ist.

3 Einflüsse der Fasern

Stahlfasern gelten im Sinne der DIN 1045 als Betonzusatzstoffe, und die meisten handelsüblichen Stahlfasern besitzen eine Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung als Zusatzstoff für Beton. Bei den in der Praxis üblichen Stahlfasergehalten von bis zu 40 kg/m³ sind nach den heutigen Erfahrungen keine wesentlichen Änderungen der Betonrezeptur nötig, die Kenntnis über die verschiedenen Beeinflussungen ist jedoch hilfreich und bei höheren Dosierungen unumgänglich.

3.1 Anwendungsgebiete der Stahlfasertypen

Soll in erster Linie die Biegezugfestigkeit bzw. das Materialverhalten nach Abweichen vom elastischen Ast der Last-Verformungskurve und dem Erstriss beeinflusst werden, so sind Stahlfasern mit gutem Verbund zur Mörtelmatrix und einer möglichst großen Oberfläche von Vorteil. Die Fasern müssen schon beim Auftreten kleinster Mikrorisse in der Lage sein, die Kerbspannungen an der Risswurzel zu verringern und entlang ihrer Einbindelänge zu verteilen. Die Aufweitung von Mikrorissen und das Zusammenwachsen mehrerer Mikrorisse zu einem Makroriss wird somit behindert. Um dies zu erreichen, ist eine möglichst gleichmäßige Verteilung und eine große Faseranzahl wichtig. Die Faserlänge ist hier nur von untergeordneter Bedeutung.

Sollen Stahlfasern das Materialverhalten im Zustand II verbessern, müssen sie rissüberbrückend wirken, also in der Lage sein, Kräfte über die Rissufer zu übertragen. Hier eignen sich besonders lange, dünne Stahlfasern mit ausgeprägten Endverankerungen. Die Eigensteifigkeit der Fasern sollte möglichst hoch sein, um den Widerstand gegen Herausziehen zu erhöhen. Eine Profilierung oder auch Wellung der Fasern wirkt günstig.

3.2 Stahlfasergehalt

Der Einfluss der Stahlfasern steigt mit zunehmendem Fasergehalt. In Abhängigkeit von der Fasergeometrie wird der Fasergehalt jedoch durch die gegebenenfalls verminderte Verarbeitbarkeit beschränkt [8]. Stahlfasern mit hohen Längen zum Durchmesserverhältnis können bei hohen Dosierungen zur so genannten „Igelbildung“ neigen. Außerdem können sich die Betoneigenschaften aufgrund von mangelhafter möglicher Verdichtung verschlechtern [9]. Im Ort beton sind Stahlfasergehalte zwischen 20 kg/m³ und 50 kg/m³ üblich, bei Spritzbeton liegen die Dosierungen heute zwischen 30 kg/m³ und 80 kg/m³.



Bild 2: Geprägte Stahlfaser mit glatter Außen- und rauer Innenseite
Foto: Vulkan Harex

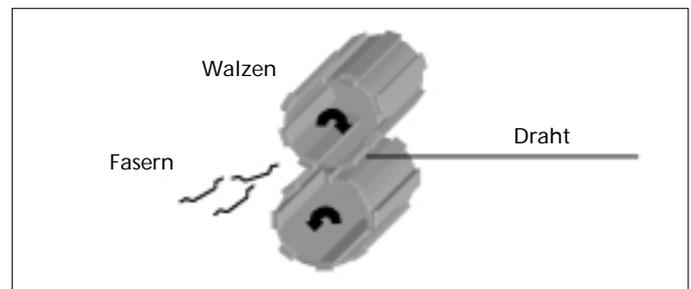


Bild 3: Schema Herstellung von Drahtfasern
Grafik: Vulkan Harex



Bild 4: Drahtfaser mit Endhaken
Foto: Vulkan Harex



Bild 5: Schema Herstellung von Blechfasern
Grafik: Vulkan Harex



Bild 6: Blechfaser mit Prägung
Foto: Vulkan Harex

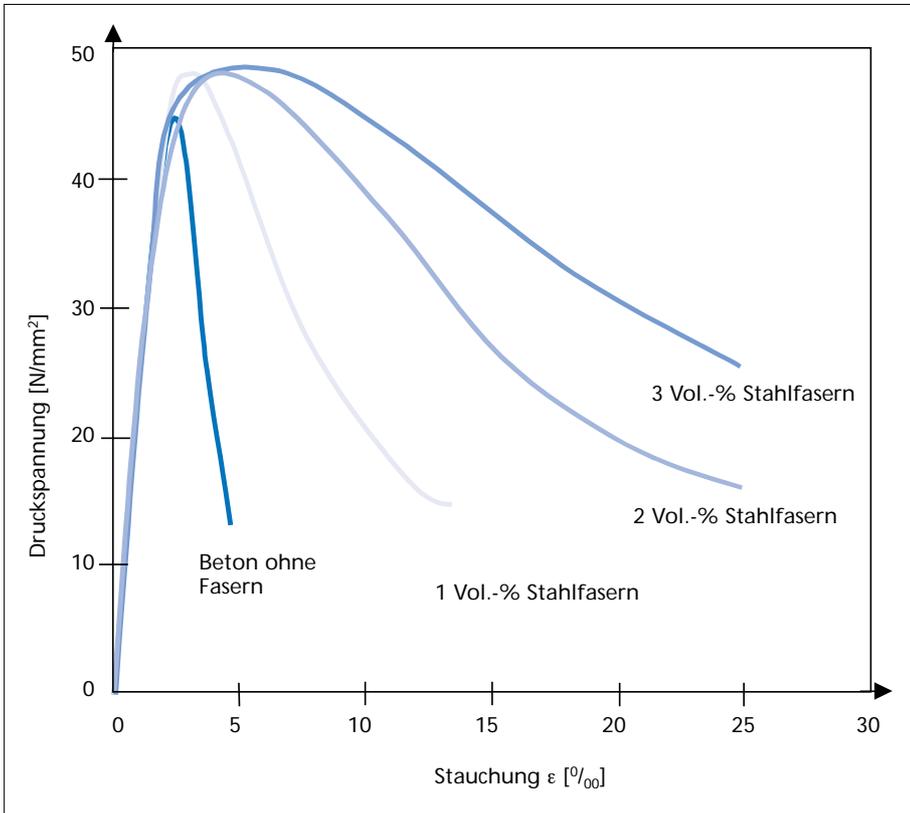


Bild 7: Steigerung der Druckfestigkeit durch Zugabe von Stahlfasern Grafik: Vulkan Harex, Quelle: [12]

3.3 Orientierung der Fasern

Im Allgemeinen geht man von einer gleichmäßigen dreidimensionalen Verteilung der Stahlfasern in der Betonmatrix aus. Je nach Bauteilgeometrie, gewähltem Größtkorn und der Fließrichtung des Betons bei der Verdichtung kann es zu Faserorientierungen kommen. Bei dünnwandigen Bauteilen kann dies vorteilhaft sein, wenn die Stahlfasern in Richtung der Hauptzugspannungen ausgerichtet worden sind. Um die positiven Effekte durch Stahlfaserorientierung zu erfassen, empfiehlt es sich, bei dünnen Bauteilen eine zusätzliche Prüfung an Probekörpern durchzuführen, die in ihrer Geometrie den späteren Bauteilen entsprechen.

4 Einflüsse auf Frisch- und Festbetoneigenschaften

4.1. Frischbetoneigenschaften

Stahlfasern haben einen wesentlichen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit des Betons. Je nach Dosierung wird die Pumpbarkeit erschwert und der Verdichtungsaufwand nimmt zu. Dies kann bei hohen Dosierungen zur Verschlechterung von Festbetoneigenschaften aufgrund von Fehlstellen im Betongefüge führen. Dieser Effekt wird jedoch wesentlich von der Fasergeometrie beeinflusst.

Durch Stahlfasern wird das Zusammenhaltvermögen der Frischbetonmischung verbessert. Dies kann bei der Verwendung von

Stahlfaserspritzbeton zu geringeren Dosierungen des Beschleunigers führen.

Die Zugabe von Stahlfasern zum Beton führt zu einem Rückgang des Ausbreitmaßes, der durch Zugabe geeigneter Zusatzmittel ausgeglichen werden kann. Dieser Rückgang ist je nach Fasertyp unterschiedlich. Bei Spritzbetonversuchen der Deutsche Montan Technologie GmbH, Essen, (DMT) in Zusammenarbeit mit der TU Dresden mit 30 mm langen Drahtfasern betrug der Rückgang rd. 1,5 cm je 20 kg/m² zugegebener Stahlfasern.

4.2 Festbetoneigenschaften

Festbetoneigenschaften können durch die Zugabe von Stahlfasern, je nach Stahlfasertyp und Höhe der Dosierung, deutlich verbessert werden. Die positive Wirkung von Stahlfasern macht sich bei Biegezug- und Schubfestigkeit, beim Riss- und Verformungsverhalten sowie beim Verhalten bei stoßartiger Belastung und Schwellbeanspruchungen bemerkbar.

4.2.1 Druckfestigkeit

Bei Versuchen mit Fasergehalten von 1 Vol.-% konnte an 20-cm-Würfeln nach DIN 1048 Teil 1 eine Steigerung der Druckfestigkeit um rd. 7 % beobachtet werden [9]. Bei noch höheren Dosierungen (2 Vol.-%, 2,5 Vol.-% und 3 Vol.-%) lagen die Werte im Mittel um etwa 22 % höher als bei vergleichbarem Nullbeton (Bild 7). Dies lässt sich durch das geänderte Quersugverhalten erklären [2]. Sichtbar wird der Einfluss der Stahlfasern jedoch nicht durch die recht geringfügig höheren Druckfestigkeiten, sondern durch die veränderten Stauchungswerte [10]. Betrachtet man das Last-Verformungs-Diagramm, erkennt man, dass die Maximalwerte erst bei größeren Stauchungen erreicht werden. Weiterhin ist ersichtlich, dass der Abfall der Kurve nach Erreichen der Höchstlast weniger stark ausgeprägt ist und so ein wesentlich duktileres Materialverhalten vorliegt. Dieser Effekt ist abhängig von Stahlfasertyp und Dosierung. Da sich der Verarbeitungsaufwand bei hohen Dosierungen wesentlich erhöht [8] und sich der Stahlfaserbeton bei sehr hohen Fasergehalten nur sehr schwer ausreichend verdichten lässt, ist dies für die Praxis jedoch von untergeordneter Bedeutung.

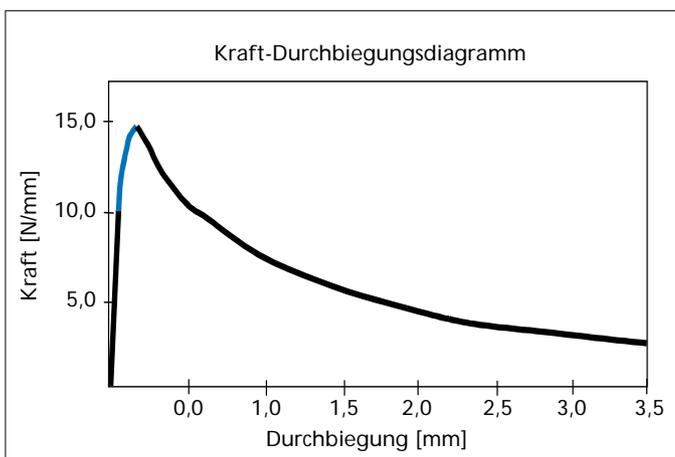


Bild 8: Abweichen der Lastverformungskurve vom ideal-elastischen Ast Grafik: Vulkan Harex, Quelle: [11]

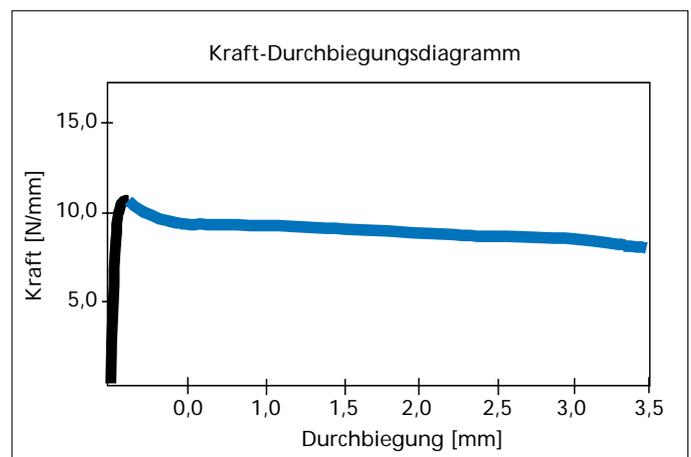


Bild 9: Verformungskurve nach Rissbildung Grafik: Vulkan Harex, Quelle: [11]

Derzeit sind Stahlfasergehalte um 0,25 Vol.-% bis 1,0 Vol.-% gebräuchlich, da sie je nach Stahlfaserart die Grenze für eine problemlose Verarbeitung darstellen. Für die verschiedenen Fasertypen sind in den Zulassungen des Deutschen Instituts für Bautechnik die jeweiligen Höchstdosierungen angegeben. Bei den in der Praxis üblichen Faserdosierungen kann davon ausgegangen werden, dass sich Druckfestigkeiten wie bei vergleichbaren Betonen ohne Stahlfasern ergeben.

4.2.2 Biegezugfestigkeit

Bei der Bemessung von Stahlfaserbetonquerschnitten unterscheidet man zwei Zustände. Im Zustand I ist der Beton in der Zugzone ungerissen, während im Zustand II von einem gerissenen Querschnitt in der Zugzone ausgegangen wird. Je nach dem der Bemessung zugrunde gelegten Zustand empfiehlt es sich, Stahlfasertypen zu verwenden, die im Bereich der Erstrisslast bzw. im Nachbruchverhalten die optimale Wirkung erzielen.

Zustand I

Stahlfasern, die vor der Rissbildung bzw. bei sehr kleinen Rissweiten wirken sollen, müssen einen über die Faserlänge verteilt wirkenden Verbund erreichen. Hierfür eignen sich Fasern, die eine möglichst große und raue Oberfläche besitzen [11]. Dafür bieten sich dünne und vom Kreisquerschnitt abweichende Stahlfasern an.

Der zweite wichtige Aspekt ist die gleichmäßige Verteilung der Stahlfasern in der Mörtelmatrix. Stahlfasern, die beide Kriterien erfüllen, wirken hauptsächlich in der Phase zwischen dem Abweichen der Last-Verformungskurve vom ideal elastischen Ast und dem Erstriss (Übergang vom Mikroriss zum Makroriss, Bild 8). Sobald die zuerst auftretenden Mikrorisse, die im Grenzbereich zwischen Mörtel und Zuschlag beginnen und sich im Zementstein fortsetzen, auf Stahlfasern treffen, werden die dort auftretenden Kerbspannungen aufgenommen und die Rissentwicklung wird behindert.

Zustand II

Stahlfasern, die nach der Rissbildung wirken sollen, müssen in der Lage sein, Risse zu überbrücken und Kräfte über die Rissufer hinweg zu übertragen (Bild 9). Hierfür sind Stahlfasern geeignet, die ausgeprägte Endverankerungen, wie z.B. Haken, besitzen. Die Haken verankern die Stahlfaser in der Mörtelmatrix und werden beim Erreichen der Streckgrenze des Stahls herausgezogen [11] (Endhaken werden aufgebogen). Durch den Einsatz von Drahtfasern mit hohem Längen-/Durchmesser-Verhältnis kann ein ausgeprägtes duktileres Materialverhalten erreicht werden. Allerdings wird auch die Verarbeitung mit steigendem l/d-Verhältnis schwieriger, da es zur Zusammenballung der Fasern, der so genannten Igelbildung, kommen kann.

4.2.3 Zugfestigkeit

Im Unterschied zur Biegezugfestigkeit ist der Einfluss auf die zentrische Zugfestigkeit

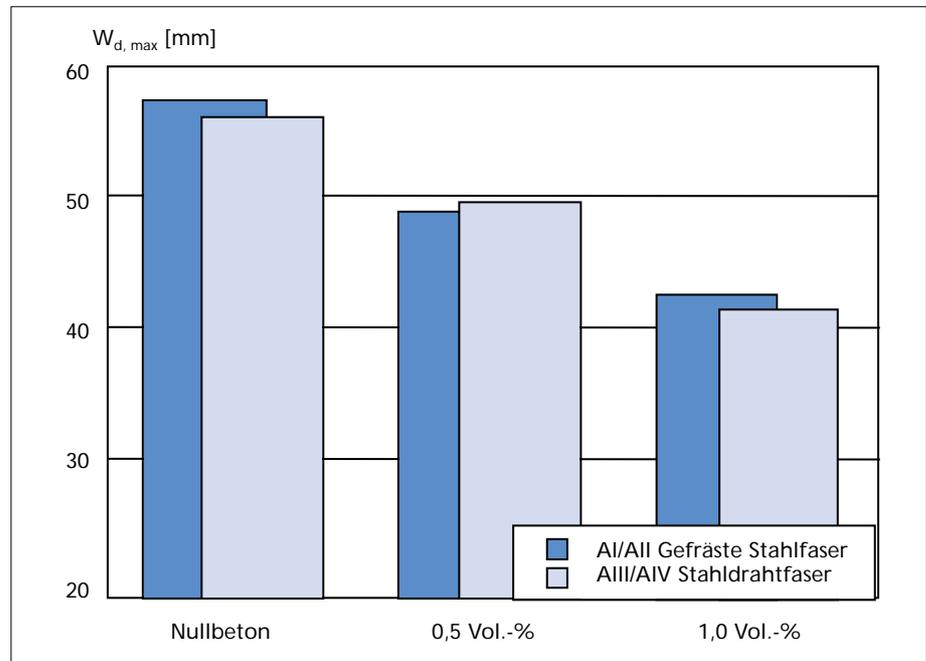


Bild 10: Verringerung der Verschleißtiefe durch Zugabe von Stahlfasern

Grafik: Vulkan Harex, Quelle: [10]

gering. Grund hierfür ist, dass der Stahlfaserbeton keine Möglichkeiten zu Spannungsumlagerungen im Querschnitt hat. Bei Querschnitten unter Biegung kann sich die Spannungsnulldlinie bei abnehmender Zugfestigkeit im Bereich der größten Dehnungen in Richtung der Druckspannungen verschieben [2], so dass sich ein neuer Gleichgewichtszustand einstellt.

4.2.4 Schubfestigkeit

Durch die gleichmäßig dreidimensional in der Betonmatrix verteilten Stahlfasern werden sowohl Risse überbrückt als auch deren Aufweitung behindert, so dass die Verzahnung der Rissufer gegeneinander erheblich verbessert wird. Diese Wirkung ist wesentlich abhängig vom Stahlfasertyp und der Höhe der Dosierung, so dass bei geeigneter Wahl eine Schubsicherung durch Stahlfasern möglich ist. Für höhere Schubspannungen bietet sich eine Kombination von Stahlfaserbeton mit Stabstahlbewehrung an.

4.2.5 Schlagfestigkeit

Versuche, bei denen ein Fallgewicht aus einer definierten Höhe auf einen zylindrischen Prüfkörper aus Stahlfaserbeton fallen gelassen und die Schlagfestigkeit über die Anzahl der bis zum Bruch benötigten Schläge definiert wurde, haben gezeigt, dass deren Schlagfestigkeit bis zu 20-mal höher sein kann als die vergleichbarer Betone ohne Stahlfasern [9]. Je nach Faserart und Dosierung lassen sich große Steigerungen des Widerstands gegen

schlagartige Belastungen beobachten. Stangenberg erklärt dies über die stark ausgeprägte innere Reibung zwischen Fasern und Beton bzw. über die Dämpfung bei dieser Beanspruchungsart [12]. Zur Verbesserung bei stoßartigen Belastungen gibt Schnütgen [13] einen Mindestfasergehalt von 0,5 Vol.-% an.

4.2.6 Verschleißverhalten

Höcker [14] stellte bei seinen Untersuchungen zum Einfluss von Stahlfasern auf das Verschleißverhalten von Betonen eine Verringerung der Verschleißtiefe um 25 % gegenüber Beton ohne Stahlfasern fest (Bild 10). Hierfür war ein Stahlfasergehalt von 1,0 Vol.-% notwendig. Bei Fasergehalten von 0,5 Vol.-% betrug die Verringerung noch mehr als 10 %. Maidl [2] führt diesen Effekt auf die auch in oberflächennahen Bereichen verstärkte Zementmatrix zurück, während beim Stahlbeton die Betonüberdeckung unverstärkt ist.

4.2.7 Schwinden

Durch die Behinderung der Rissentwicklung im Zustand I durch Stahlfasern wird das Austrocknen des Betons erschwert und der Schwindvorgang verlangsamt [15]. Dadurch sind die Schwindspannungen im noch jungen Beton geringer, und es bilden sich weniger Schwindrisse. Die maximalen Schwindspan-

Tafel: Auszug der Versuchsergebnisse nach [10]

| Fasergehalt [Vol.-%] | Anzahl der Risse | Breite größter Riss [mm] | Gesamtrissbreite [mm] |
|----------------------|------------------|--------------------------|-----------------------|
| 0,0 | 1 | 0,900 | 0,900 |
| 0,25 | 2 | 0,300 | 0,345 |
| 0,5 | 3 | 0,100 | 0,215 |
| 1,0 | 1 | 0,075 | 0,075 |
| 1,5 | 3 | 0,011 | 0,030 |

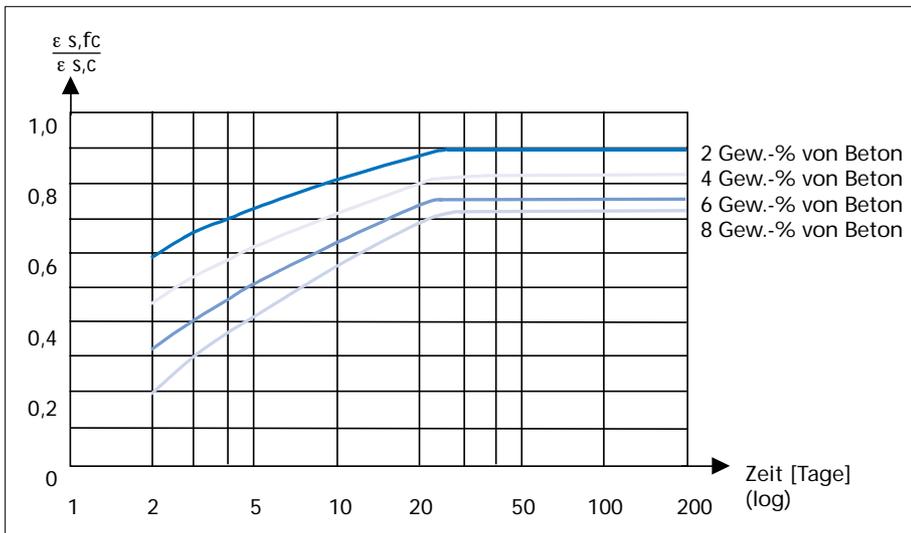


Bild 11: Schwindmaße, bezogen auf unbewehrten Beton (Proben: 40 mm x 40 mm x 160 mm) bei 60% rel. Luftfeuchte [10] Grafik: Vulkan Harex

nungen treten erst auf, wenn der Beton bereits höhere Festigkeiten besitzt.

Im Zustand II können durch Stahlfasern je nach Fasergehalt und Fasertyp Mehrfachsrisbildungen erreicht werden, d.h., dass bei höheren Fasergehalten die Rissanzahl steigt, die Summe der Rissbreiten jedoch sinkt. In den Versuchen von Grzybowski und Shah [16] wurde dies an ringförmigen Probekörpern, die um einen Stahlkern betoniert wurden, untersucht (Tafel). Außerdem setzen die nicht am Schwindprozess beteiligten Stahlfasern mit ihrem im Verhältnis zum Beton sehr hohen Elastizitätsmodul der Betondehnung einen inneren Widerstand entgegen [2]. Dieser Effekt ist bei in der Praxis üblichen Stahlfaserdosierungen von untergeordneter Bedeutung, da ihr Anteil nur rd. 0,25 % bis 1,0 % des Gesamtvolumens ausmacht.

Der Effekt der steigenden Rissanzahl und der Verringerung der Summe der Makrorissbreiten ist auch bei Biegebeanspruchung feststellbar. Entgegen der bisherigen Annahme, dass die Summe der Rissbreiten annähernd konstant bleibt, beobachtet Winterberg [17], dass mit zunehmendem Stahlfasergehalt ein steigender Anteil der Gesamtverformung im Mikrorissbereich verbleibt (Bild 11).

4.2.8 Verhalten bei hohen Temperaturen
Stahlfasern erhöhen die Wärmeleitfähigkeit des Betons. Dies tritt bei quarzitischen Zuschlägen stärker auf als bei calzitischen [15]. Dieser Effekt, der bei Heizestrichen und beheizten Industrieböden genutzt wird, sorgt für eine gleichmäßigere und schnellere Wärmeverteilung, so dass Spannungsspitzen aufgrund von Temperaturdifferenzen vermindert werden. Abplatzungen, wie sie bei Bränden bei herkömmlichem Stabstahl durch die Temperaturdifferenzen zwischen Beton und Stahl auftreten, werden stark vermindert. Außerdem werden gelöste Betonteile durch Stahlfasern auch weiterhin zusammengehalten. Da die Stahlfasern

jedoch je nach der erreichten Temperatur ihre Eigenfestigkeit verlieren, sind auch Stahlfaserbetonkonstruktionen unter Umständen nach einem Brand nicht mehr voll funktionsfähig und müssen instand gesetzt werden.

4.3 Korrosion

Beim Korrosionsverhalten von Stahlfaserbeton müssen der ungerissene und der gerissene Zustand getrennt voneinander betrachtet werden. Bei ungerissenen Probekörpern, die in unterschiedlich korrosionsfördernden Medien gelagert wurden, sind auch nach bis zu zehn Jahren keine nennenswerten Einbußen der Festigkeits- und Verformungseigenschaften festgestellt worden [2].

Im karbonatisierten Beton stoppt die Korrosion in einer Tiefe von rd. 2 mm, bei Beaufschlagung mit Chloriden bei rd. 6 mm [15]. Zwar muss in diesen Fällen mit Rostpunkten an der Oberfläche gerechnet werden, es konnten jedoch keinerlei Abplatzungen des Betons beobachtet werden. Der entstehende Druck, der durch die Volumenzunahme beim Korrosionsprozess entsteht, reicht aufgrund der geringen Querschnittsabmessungen der Stahlfasern nicht aus, um Betonanteile abzusprennen [15].

Untersuchungen an angerissenen Probekörpern haben gezeigt, dass sich unter ungünstigen Umgebungsbedingungen [18] die Festigkeits- und Verformungseigenschaften z.T. stark verschlechtern, was auf die korrosionsbedingte Verringerung des Faserdurchmessers zurückzuführen ist. Dies kann zu einem anderen Versagensmechanismus führen, wenn die Stahlfasern nicht mehr planmäßig aus der Betonmatrix herausgezogen werden, sondern reißen.

Schnütgen [15] gibt bei Rissbreiten von 0,20 mm und Lagerung in aggressiven Medien einen Faserausfall von rd. 33 % nach einem halben Jahr an. Bei Rissbreiten von unter 0,20 mm war bei gleichen Umgebungsbedingungen nur eine geringe Korrosion festzustellen.

5 Zusammensetzung von Stahlfaserbeton

5.1 Zement

Prinzipiell können in Verbindung mit Stahlfasern alle üblichen Zementarten eingesetzt werden. Bei der Entwicklung der Rezeptur für einen Stahlfaserbeton ist zu beachten, dass durch die Stahlfasern eine größere spezifische Oberfläche in den Frischbeton eingebracht wird. Um die Wirkung der Stahlfasern in der Matrix sicherzustellen, müssen diese ausreichend mit Zementleim ummantelt sein. Schnütgen [10] empfiehlt eine Erhöhung der Zementmenge um rd. 10 %. Die Erhöhung des Bindemittelgehalts führt dabei i.d.R. auch zu höheren Biegezug- und Nachrisszugfestigkeiten.

5.2 Zuschlag

Bei der Herstellung von Stahlfaserbeton sollten Regelsieblinien im Bereich 3 nach DIN 1045 verwendet werden. Unstetige Sieblinien führen zu geringeren Festigkeiten, was besonders die Erstrisslast betrifft. Die Wahl des Grobzuschlags beeinflusst die Verteilung und Orientierung der Stahlfasern in der Betonmatrix. In internationalen Richtlinien findet man verschiedene Aussagen zum Größtkorn. So wird z.B. in der japanischen Richtlinie [19] empfohlen, das Größtkorn auf zwei Drittel der Faserlänge zu begrenzen. Im in Bearbeitung befindlichen neuen Merkblatt „Stahlfaserbeton“ des DBV wird aufgrund der Erfahrungen in den letzten Jahren auf eine solche Empfehlung verzichtet.

Der Feinkornanteil sollte bei Stahlfaserpumpbeton erhöht werden, um die Pumpbarkeit zu verbessern. Ein erhöhter Feinkornanteil führt jedoch häufig zu geringeren Biegezug- und Nachrisszugfestigkeiten.

6 Bemessung

Wie bereits in Abschnitt 1 erläutert, existieren zurzeit drei DBV-Merkblätter, die sich mit Stahlfaserbeton bzw. Stahlfaserspritzbeton befassen. In den Merkblättern „Grundlagen zur Bemessung von Industriefußböden aus Stahlfaserbeton“ [5] und „Bemessungsgrundlagen für den Stahlfaserbeton im Tunnelbau“ [6] sind Bemessungsansätze für Industrieböden und Tunnelschalen angegeben. Allerdings fehlt eine allgemeine Bemessungsgrundlage unabhängig vom jeweiligen Bauteil. Der DBV hat daher 1998 einen Arbeitskreis gegründet, der ein allgemeines Merkblatt „Stahlfaserbeton“ ausarbeitet, in dem die Bemessung erläutert wird. Um sowohl dem planenden Ingenieur als auch den ausführenden Firmen ein Werkzeug an die Hand zu geben, soll es folgende Punkte beinhalten:

1. Anwendungsbereiche
2. Begriffe, Definitionen
3. Verformungs- und Leistungsklassen
4. Bemessungskenngrößen
5. Schnittgrößenermittlung
6. Bemessung
7. Allgemeine konstruktive Regeln
8. Hinweise zur Bauausführung
9. Überwachung
10. Prüfungen

Neu sind die Einteilung von Stahlfaserbeton in Leistungs- und Verformungsklassen sowie die

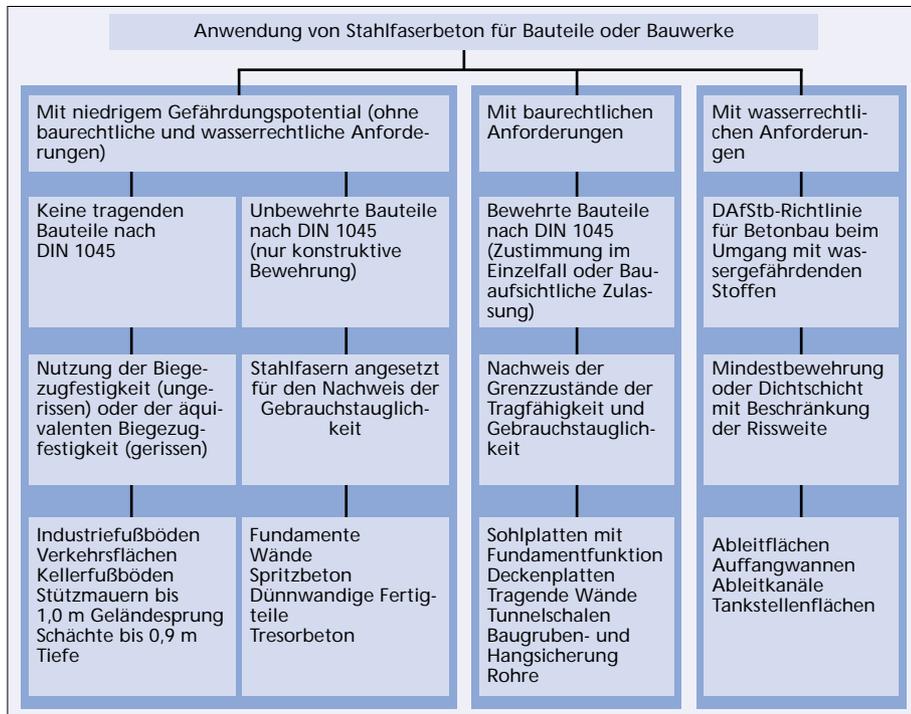


Bild 12: Stahlfaserbeton-Bemessungsgrundlagen

Grafik: Vulkan Harex (nach DBV-Merkblatt, neu, unveröffentlicht)

gesonderte Betrachtung von Bauteilen mit niedrigem Gefährdungspotential (Bild 12). Als Bauteile mit niedrigem Gefährdungspotential wurden solche definiert, die nicht tragend im Sinne der DIN 1045 sind und Bauteile, bei denen der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit auch ohne den Ansatz der Faserwirkung geführt werden kann, die Faserwirkung also nur für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit herangezogen wird.

Mit Leistung [20] wird hierbei die Fähigkeit des Stahlfaserbetons, auch nach Rissbildung Zugkräfte aufnehmen zu können, bezeichnet, wobei sie durch die bereits aus dem Tunnelbaumerkblatt bekannte äquivalente Biegezugfestigkeit klassifiziert wird. Unterschieden wird die Leistung für zwei Verformungsklassen. Die Leistungsklasse für geringe Verformungen wird dabei den Gebrauchstauglichkeitsnachweisen zugrunde gelegt, die für große Verformungen dem Tragsicherheitsnachweis. Stahlfasern, die günstig im Mikrorissbereich wirken, können nach dem neuen Merkblatt für den Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit angesetzt werden. Die Leistungsklassen erfassen andere Eigenschaften wie z.B. die Erhöhung der Biegezug- und Schlagfestigkeit nicht, sondern treffen lediglich eine Aussage über die im Zustand II aufnehmbaren Zugkräfte. Festigkeitswerte für die Schub- und Torsionsbemessung können hieraus abgeleitet werden.

Neben den im Stahlbetonbau bekannten Nachweisen im gerissenen Beton (Zustand II) soll das Merkblatt auch die zurzeit bei der Bemessung von Industriefußböden verwendeten Nachweise im Zustand I unter Ansatz der Biegezugfestigkeit erläutern. Hier werden für Bauteile mit niedrigem Gefährdungspotential nach dem jetzigen Stand die Bemessungs-

und Sicherheitsansätze aus dem Industriefußbodenmerkblatt [5] übernommen. Dies gilt sowohl für die Bemessung im Zustand I als auch im Zustand II. Für Bauteile mit baurechtlichen Anforderungen, d.h. Bauteile, in denen eine statisch erforderliche Bewehrung ersetzt werden soll, sind die Nachweise der Grenzzustände mit Hilfe der Verformungs- und Leistungsklassen zu führen.

7 Zusammenfassung

Durch die Zugabe von Stahlfasern können viele Eigenschaften des Betons verbessert werden [21]. Stahlfaserbeton ist jedoch kein „Wunderbaustoff“ und hat klare Grenzen in seinen Einsatzbereichen. Da Stahlfasern nur relativ geringe Bewehrungsquerschnitte beim Ansatz der Nachrissfestigkeit in den Grenzzuständen ersetzen können, wird sich ihr Einsatz im Wesentlichen auf Bauteile, die nur ein geringes Gefährdungspotential bergen, und Bauteile mit geringen vorhandenen Spannungen beschränken. Dies liegt zum einen am geringeren Sicherheitsniveau bei den zuerst angeführten Bauteilen [5], zum anderen an der Möglichkeit, die Bemessung mit den höheren Biegezugfestigkeiten durchzuführen [5].

Interessant ist sicherlich der rein konstruktive Einsatz zur Verbesserung des Widerstands bei Stoß- und Schlagbelastung sowie zur Verbesserung der Dichtheit und die Kombination von Stahlfasern und herkömmlicher Stabstahlbewehrung bei hochbewehrten Bauteilen.

Beim Ansatz der Nachrissfestigkeit in den Grenzzuständen bietet Stahlfaserbeton Vorteile bei hochgradig statisch unbestimmten Systemen, die Umlagerungsmöglichkeiten bieten. In Zukunft wird hier durch den Ein-

satz der Finite Elemente Methode (FEM), die berücksichtigt, dass Stahlfaserbeton auch im gerissenen Zustand in der Lage ist, Zugspannungen aufzunehmen, sicherlich noch mehr möglich sein.

In Ergänzung zum Beitrag Stahlfasern veröffentlicht beton in der Ausgabe 8/2000 einen Überblick über die Anwendungsgebiete der Stahlfasern und ihre Besonderheiten.

Literaturverzeichnis

- [1] Bölsckey, E.; Scherpke, G.: „Aktueller Stand der Forschung und Anwendung von faserverstärkten Spezialbetonen für die Tragwerksplanung-/Erneuerung in Österreich – Ein Tätigkeitsbericht“. In: Fibre Reinforced Concrete – from research to practice –, Technical University of Budapest, 1999, S. 37-45
- [2] Maidl, B.: „Stahlfaserbeton“, Ernst, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1991
- [3] Neubert, B.: „Stahlfaserbeton – Einsatzmöglichkeiten des Werkstoffs und seine Grenzen“. In: Fibre Reinforced Concrete – from research to practice –, Technical University of Budapest, 1999, S. 24-35
- [4] „Technologie des Stahlfaserbetons und Stahlfaser-spritzbetons“, DBV-Merkblatt, Fassung 1992, red. überarb. 1996
- [5] „Grundlagen zur Bemessung von Industriefußböden aus Stahlfaserbeton“, DBV-Merkblatt, Fassung 1991, red. überarb. 1996
- [6] „Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau“, DBV-Merkblatt, Fassung 1992, red. überarb. 1996
- [7] Richtlinie „Stahlfaserbeton“, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, SIA 162 (Ausgabe 1998)
- [8] Schnütgen, B.: „Technologie des Stahlfaserbetons und Stahlfaser-spritzbetons“, Vorträge der DBV-Arbeitstagung, Duisburg, 1992
- [9] Bonzel, J.; Dahms, J.: „Schlagfestigkeit von faserverstärktem Beton“, beton 31 (1981), H. 3, S. 97-101 und H. 4, S. 136-142
- [10] Schnütgen, B.: „Materialeigenschaften von Stahlfaserbeton“, Berichte des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1978, H. 31, S. 5
- [11] Schnütgen, B.: „Stahlfaserbeton für dichte Betonkonstruktionen“, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Stahlbeton- und Spannbetonbau, Bochum 1996, Studie im Auftrag der Readymix Beton AG, Ratingen
- [12] Stangenberg, F.: „Stahlfaserbeton als hervorragender Baustoff für stoßbeanspruchte Bauteile“, Bauingenieur 61 (1986), H. 61, S. 339-345
- [13] Schnütgen, B.: „Stahlfaserbeton für den Umweltschutz“, Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Falkner, Heft 142, TU Braunschweig, Schriftenreihe des IBMB, S. 287-296
- [14] Höcker, T.: „Einfluss von Stahlfasern auf das Verschleißverhalten von Betonen unter extremen Betriebsbedingungen in Bunkern von Abfallbehandlungsanlagen“, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, 1996, H. 468, S. 73-170
- [15] Winterberg, R.; Schnütgen, B.: „Steel Fibre Reinforced Concrete – Fundamentals and Technical Rules“, Vortrag vor „The Institution of Engineers in Ireland“, Dublin, 1999
- [16] Shah, S. P.; Grzybowski, M.: „Shrinkage Cracking of Fibre Reinforced Concrete“, ACI Materials Journal, title no. 87-M16, März/April 1990
- [17] Winterberg, R.: „Untersuchungen zum Reißverhalten von Stahlfaserbeton und stahlfaserverstärktem Stahlbeton“, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Mitteilung Nr. 98-3, 1998
- [18] Hannant, D.-J.: „Fibre cements and fibre concretes“, A. Wiley-Interscience publication, John Wiley & Sons, Chichester – New York – Brisbane – Toronto, 1978
- [19] Japan Society of civil Engineers (Hrsg.): „Method of Making Fiber Reinforced Concrete in the Laboratory“, Japan, 1984
- [20] Teutsch, M.: „Leistungsklassen des Stahlfaserbetons“, H. 141 der Schriftenreihe des IBMB, TU Braunschweig, 1998, S. 73-82
- [21] Nußbaum, G.; Vißmann, H.-W.: Faserbeton. In: Schriftenreihe Spezialbetone, Bd. 2, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf 1999