

1 Einleitung

Beton ist weltweit ein etablierter Baustoff geworden und hat das Bauen im 20. Jahrhundert eindeutig geprägt. Durch eine kontinuierliche Weiterentwicklung des Baustoffes Beton ist es möglich geworden, auch Bereiche für den Massivbau zu erobern die vor Jahrzehnten noch dem Stahlbau vorbehalten waren. Der momentan hohe Stand der Technik im Bereich der Betontechnologie ist unter anderem am Burj Khalifa in Dubai zu erkennen. Für den Turm und die Flügel wurden 180.000 Kubikmeter Beton verbaut. 165.000 Kubikmeter davon wurden hochgepumpt, zuletzt bis in eine Höhe von 606 Metern [1].

Neben Spannbetonbauweise und konventionellem Stahlbeton wurde auch schon immer versucht, die Bewehrung durch zusätzlich eingebrachte Stahlfasern zu reduzieren (Kombibewehrung) oder gar zu ersetzen. Allerdings scheiterte die Einführung von rein faserbewehrtem Beton im konstruktiven Bereich an den fehlenden mechanischen Grundlagen. Somit blieb nur der Weg einer Zulassung im Einzelfall. Regularien und Prüfmethode für eine Anwendung im Bauwesen wurden erstmals in den 1990er Jahren von Organisationen wie zum Beispiel dem Verband deutscher Stahlfaserhersteller e.V. geschaffen [2] [3]. Die Anwendung dieser Merkblätter beschränkte sich jedoch lediglich auf Bauteile mit niedrigem Gefährdungspotential wie z.B. Fundamente, Industrieböden und Verkehrsflächen.

Eine weitere Entwicklung in der Betontechnologie ist der sog. Selbstverdichtende Beton (SVB) bzw. nach heute üblicher englischer Diktion Self-Compacting-Concrete (SCC). Dieser geht aus der Forschung von Professor Okamura und seinem Dissertanten Kazamasa Ozawa in Japan Ende der 1980er Jahre hervor. [4] Ermöglicht wurde dieser Beton durch neue Betonverflüssiger auf Polycarboxylatester (PCE) – Basis. Ein SCC ist in der Lage sich ohne äußere Einwirkung selbst zu entlüften. Somit ist eine optimale Befüllung der Schalung ohne Rüttlereinsatz möglich. Gleichzeitig ermöglicht dieser Beton sowohl das Ausfüllen von schwer zugänglichen Bereichen, als auch komplexen Geometrien.

Um neben dem leichteren Befüllen der Schalung durch SCC auch noch eine Zeiterparnis hinsichtlich der Ausschulfristen zu erreichen, kam bei der vorliegenden Forschungsarbeit der Schnellzement SupraCem 45 (SC 45) des Industriepartners Schretter & Cie zum Einsatz. Dieser Mayenite-haltige Schnellzement besitzt eine Europäische technische Zulassung (Nr. 08/0027). Er ist mit Fruchtsäuren verzögerbar und kann somit für Fertigteilproduktionen eingesetzt werden. Durch das schnellere Erhärten des Betons ergeben sich kürzere Verweilzeiten in der Schalung und damit höhere Taktfrequenzen. Ebenso ist kein zusätzlicher Energieaufwand sowohl für die Wärmebe-



handlung des Betons in der Schalung, als auch zur Erhöhung der Frischbetontemperatur durch Erwärmen des Anmachwassers oder der Gesteinskörnung notwendig. Zudem kann man die Reifezeit der Betonfertigteile von 28 auf 7 Tage reduzieren und benötigt einen geringeren Lagerplatz als bisher.

Gegenwärtig wird in der Fertigteilindustrie bereits SCC oder rein stahlfaserbewehrter Beton eingesetzt. Besonders im Tunnelbau und der Tübbingproduktion gibt es vereinzelte Beispiele, in denen diese Techniken erfolgreich angewandt wurden. Allerdings ist kein Bericht über den Einsatz von rein stahlfaserbewehrten Tübbingungen auf schnellzementbasiertem SCC in der Literatur gefunden worden. Neben den oben beschriebenen Vorteilen, die sich aus der Verwendung dieses Zementes ergeben, würden durch die Verwendung von Stahlfasern sowohl eine flächenmäßige Reduzierung der notwendigen Produktionshalle einhergehen als auch die Arbeitsschritte, die sich durch die Herstellung und Verarbeitung der Armierungskörbe ergeben, wegfallen.

In der vorliegenden Arbeit soll gezeigt werden, in wie weit die fließfähige Konsistenz des SCC auf die Faserorientierung Einfluss nimmt. Aus diesen Erkenntnissen soll eine Produktionsoptimierung für die Tübbingproduktion vorgenommen werden, um einen möglichst hohen Anteil von „gerichteten“ Fasern zu erhalten.

Diese Untersuchungen wurden während der Anstellung im Modul 1 des Christian-Doppler Labors für Zement- und Betontechnologie in Innsbruck vorgenommen.

1.1 Zielsetzung und Motivation

Ziel dieser Arbeit ist es, die Einflussfaktoren für eine zielgerichtete Faserorientierung im selbstverdichtenden Beton zu untersuchen. Zusätzlich sollen die Erkenntnisse dieser Forschungstätigkeit für eine Optimierung der Produktion von rein faserbewehrten Tübbingungen mit SCC auf Basis von Schnellzement SupraCem 45 (SC 45) nutzbar gemacht werden. Damit wäre die Möglichkeit gegeben, Tübbinge produktiver und auf kleinerer Produktionsfläche zu produzieren. Letztendlich soll gezeigt werden, wie man eine optimale Faserverteilung und Faserorientierung in Tübbingungen erreicht.

Die Motivation zu diesem Thema entstand zum einen durch das FFG-Projekt „Tübbingbauweise – Neu“ Nr. 813678 unter der Leitung von Prof. Walter Lukas, an dem der Autor bereits beteiligt war, zum anderen durch Entwicklungsprojekte, die der Autor im Forschungs- und Entwicklungslabor der Firma Schretter & Cie GmbH & Co KG in Vils betreuen durfte.

In dem FFG- Projekt Nr. 813678 wurde versucht, das Betonieren der Fertigteile durch Einpumpen von SCC zu ermöglichen und den Bewehrungsgrad durch das Zuführen der Fasern zu minimieren. Im Laufe des Forschungsprojektes wurde dann auch dazu übergegangen, rein faserbewehrte Bauteile zu produzieren. Durch Anheben der Betonfestigkeiten wurde auch gleichzeitig nachgewiesen, dass trotz einer Reduzierung des



Querschnittes die gleichen Bauteilfestigkeiten erreicht wurden wie mit einem herkömmlich produzierten Tübbing. Nach den Druckversuchen an der Universität Innsbruck war an den Bruchflächen eine Vorzugsrichtung der Fasern visuell wahrnehmbar.

Um herauszufinden, ob die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, die nur durch einzelne geprüfte Tübbinge erhalten worden waren, hinsichtlich der Faserorientierung und Festigkeiten gegeben ist, wurde eine Versuchsserie von sieben Tübbingen im kleineren Maßstab in Vils produziert und geprüft. Die Ergebnisse bestätigten die Annahmen, dass die Fasern eine Orientierung aufwiesen und die Festigkeiten in einer für Beton üblichen Spannweite lagen.

Auch bei diesem FFG-Projekt kam schon der Schnellzement SC 45 zum Einsatz. Er wurde durch Weinsäure auf eine Verarbeitungszeit von 50 Minuten verzögert. Bewusst wurde derselbe Zementgehalt wie bei der Standardrezeptur der Fa. Max Bögl für den Tübbingbau in Brixlegg, nämlich 420 kg/m^3 , verwendet. Die dort angewendete Tübbingrezeptur ermöglichte durch Wärmebehandlung in der Schalung und warmes Anmachwasser eine Ausschallfrist von 8 Stunden. Mit dem SC 45 war dies ohne zusätzliche Energie bereits nach 4 Stunden möglich. Diese Zeit- und Energieersparnis, so wurde dem Autor vom damaligen kaufmännischen Leiter der Feldfabrik versichert, wäre für eine neue Produktion, vorausgesetzt es bestünde genug Erfahrung mit dem Zement, sicherlich sehr interessant.

Allerdings gibt es bereits Tunnelbauwerke die mit rein stahlfaserbewehrten Tübbingen hergestellt wurden. Da wäre zum einen der Channel Tunnel Rail Link (CTRL) in Großbritannien [5], der Oenzbergertunnel in der Schweiz [6] sowie der Tunnel für die Metro Linie 9 in Barcelona [7]. In [8] wird über den „Hobson Bay Abwassertunnel“ in Auckland/Neuseeland berichtet, bei dem eine Einsparung von 10% der Gesamtkosten durch den Einsatz dieser Technologie im Vergleich zu einer Tübbingproduktion mit konventioneller Bewehrung erzielt werden konnte. Diese Tübbinge wurden allerdings mit herkömmlichem Zement und üblichen Rüttelbetonrezepturen produziert.

Da der SCC im Bereich der Fertigteilproduktion eine zunehmende Rolle spielt, ist es von besonderem wissenschaftlichen Interesse, zielsichere Vorhersagen über die Orientierung und Verteilung der Fasern im Bauteil zu treffen. Diese ist durch die Zusammensetzung des SCC's, dem Fasergehalt, Einfüllverfahren und nicht zuletzt von der Konsistenz abhängig. Die oben genannten Einflüsse sollen an einer definierten Mischung untersucht werden.

Im Allgemeinen ist man der Auffassung, dass die Stahlfasern im Beton isotrop und homogen verteilt sind. Dies führt immer zu einem gewissen Anteil von Fasern, die bei einer bestimmten Belastung nicht statisch tragend sind. Mit dieser Arbeit soll gezeigt werden, dass man diesen Anteil von nicht wirksamen Fasern stark reduzieren kann. Um das Verhalten von Fasern während des Fließens beobachten zu können, war es not-



wendig, eine Ersatzflüssigkeit zu entwickeln, welche ein weitgehend ähnliches rheologisches Verhalten wie der Leimanteil des SCC's besaß. Mit dieser Ersatzflüssigkeit wurden verschiedene Einfüllverfahren, so wie das Verhalten von Fasern in einer laminaren Strömung untersucht. Die Untersuchungsergebnisse finden sich in Kapitel 3.

Mit dem Konzept einer Tübbingproduktion mit SCC auf Schnellzementbasis und reiner Stahlfaserbewehrung wäre somit eine Möglichkeit gegeben, eine produktivere, Platz und Energie sparende Herstellung zu verwirklichen. Dies ist besonders bei Stollenbauten im alpinen Bereich von Vorteil. Als möglicher Einsatz dieses Verfahren wurde der Kraftwerksstollenbau des Gemeinschaftskraftwerks Inn (GKI) angenommen. Das in Pfunds ansässige Betonwerk Hilti & Jehle, welches quasi vor Ort ist, wurde daher als möglicher Produktionsort gewählt. Von Vorteil ist, dass dieses Werk auch schon Lieferant des SCC's für die Innenschale des Finstermünztunnels war und daher auf Seiten des Betonproduzenten eine Fachkenntnis für diese Art von Sonderbeton vorhanden ist [9]. Gleichzeitig sind die Silokapazitäten sowie die dort verwendeten Betonzusatzstoffe bekannt. Auf Grundlage dieser Voraussetzungen und den Rezepturen des FFG-Projektes wurde eine SCC-Rezeptur entwickelt. Da es sich bei SupraCem 45 wegen der schnellen Bindezeit und dem erhöhten Sulfatgehalt nicht um einen Normzement nach EN 197-1 sondern nach Europäisch technischer Zulassung ETA 08/0027 zugelassenen Zement handelt, wurden trotzdem in Kapitel 4 neben der Erstprüfung auch weitere Untersuchungen vorgenommen um den Beton vergleichbar mit Betonen nach EN 206-1 zu machen.

Zur besseren Veranschaulichung sind die Bestandteile der Dissertation in Abbildung 1 graphisch dargestellt.

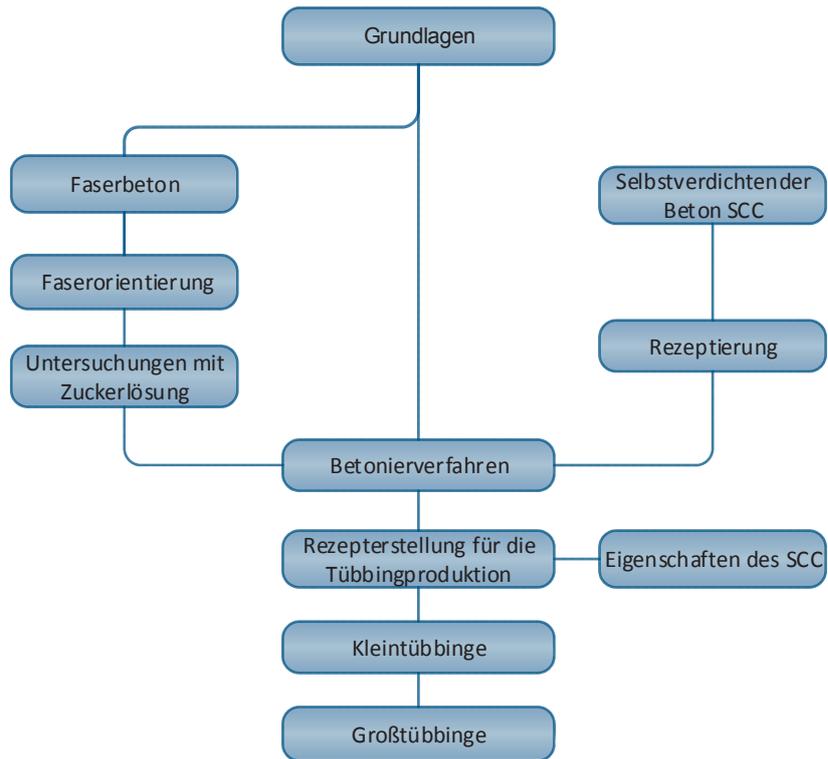


Abbildung 1 Bestandteile der Dissertation



2 Grundlagen

Schon seit jeher wurden Fasern verwendet um Baustoffe tragfähiger zu machen und Risse zu vermeiden. Allerdings handelte es sich nicht um Stahlfasern sondern um organische Naturfasern wie zum Beispiel Tierhaare und Stroh. Diese wurden in Lehm- und ungebrannten Tonziegeln verwendet um bei diesen ein duktileres Materialverhalten zu erreichen. Ein Beispiel für ein aus solchem Material errichtetem Bauwerk ist das 27 Meter hohe Minarett von Agadez welches nun bereits seit über 500 Jahren seine Dauerhaftigkeit beweist [10].

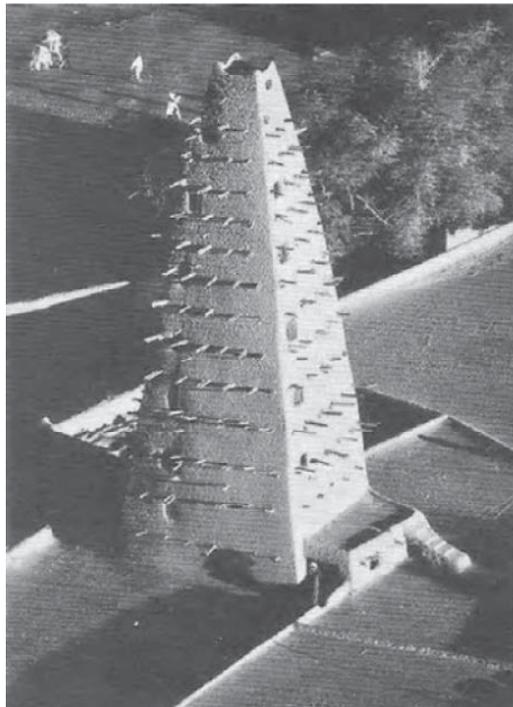


Abbildung 2 Minarett von Agadez [10]

Die Verwendung dieser Faserarten waren allerdings durch die Entwicklung höherfester Baustoffe ähnlich dem Römerbeton, dem sog. „Opus Caementitum“, nicht mehr notwendig. Zugleich war die Festigkeit dieser Fasern geringer als der „neue“ Baustoff und ein höherfestes Fasermaterial stand nicht zur Verfügung [11]. Dies hatte zur Folge, dass das Wissen über den Faserverbundbaustoff, welches von Generation zu Generation weitergegeben wurde, in Vergessenheit geriet.

2.1 Allgemeines zu (Stahl-)Faserbeton

Beton ist ein mannigfaltig einsetzbarer günstiger Baustoff, der je nach Anforderung speziell designet werden kann. Dies ist auch der Grund warum heutzutage die Ausführung der meisten Bauvorhabens ohne Beton zwar denkbar aber nicht wirtschaftlich ist. Besonders in den letzten Dekaden hat es Entwicklungen im Bereich der Betontechnologie gegeben, die das Bauen mit Beton revolutioniert haben. So ist es möglich Betone her-



zustellen die besondere Frisch- und Festbetoneigenschaften aufweisen. Diese entsprechen speziellen Anforderungen, und weisen gleichzeitig eine hohe Dauerhaftigkeit auf. Als Beispiel sollen hier Ultrahochfeste Betone (UHPC), selbstverdichtende Betone (SCC), aber auch die Faserbetone genannt werden.

Dem Vorteil der Vielseitigkeit von Beton stehen aber auch immer Nachteile des Baustoffs gegenüber. Zum einen besitzt Beton eine sehr geringe Zugfestigkeit im Vergleich zur Druckfestigkeit (ca. 10 %), zum anderen ein unvorteilhaftes Bruchverhalten.

Um die Zugfestigkeit eines Betonbauteils erhöhen zu können gibt es letztlich drei Möglichkeiten [12]:

- Baustoffliche Maßnahmen (z.B. durch Zugabe von Reaktionsharzen)
- Aktive Einflussnahme auf den Beanspruchungszustand im Beton (z.B. Vorspannung); Dies ist eher problematisch, da eine Begrenzung oder Vermeidung der Zugspannung dennoch notwendig ist.
- Verbundbauweise; Kombination mit zugfesten Baustoffen

Die gute Verarbeitbarkeit des Betons begünstigt insbesondere die Verbundbauweise und ist daher der zielführende Weg, um die Zugfestigkeit des Bauteils zu erhöhen. Bei dieser Bauweise können nach einem Versagen des Betons die auftretenden Zugkräfte durch die eingebetteten Baustoffe übernommen werden. Somit ist die Zugfestigkeit eines Betonbauteils auch nach einem Überschreiten der Zugfestigkeit des Betons noch gegeben. Diese eingebetteten Baustoffe werden im Betonbau Bewehrung genannt. Prinzipiell werden drei Arten der Bewehrung unterschieden.

Die Erste ist eine sog. Stab- oder Mattenbewehrung, die vor der Betonage in die Schalung eingebracht wird und daher innerhalb des Bauteils liegt. Vereinzelt können auch an der Oberfläche Gewebegewebe aufgebracht werden die die Aufgabe der Ableitung von Zugkräften übernehmen. Letzteres Verfahren wird allerdings häufig nur in der Sanierung von Betonbauteilen zum Einsatz gebracht.

Die Zweite ist die Faserbewehrung. Die Fasern werden während des Anmischens des Betons diesem zugegeben und mit diesem gleichzeitig in die Schalung eingebracht.

Als dritte Variante der Bewehrung ist selbstverständlich eine Kombination aus beiden vorhergenannten Bewehrungstypen denkbar.

Die einfache und wenig fehleranfällige Produktion von Faserbetonbauteilen führt zwar bei ausreichender Dosierung zu einer Steigerung der Zugfestigkeit und einem Herabsetzen der Sprödigkeit des Betons, beinhaltet allerdings auch eine Reihe von Schwierigkeiten:

- Natürliche Fasern sind für den Einsatz im Beton wegen ihres geringen E-Moduls und der schlechten Hafteigenschaft eher ungeeignet.

Daher wurden Fasern entwickelt, die für die Anwendung in Beton besser geeignet sind. Hierbei unterscheidet man zwischen organischen und anorganischen Fasern. In Abbildung 3 ist diese Aufteilung schematisch dargestellt.

Dass es für die Entwicklung und Optimierung der Fasern einige Zeit bedurfte, mag man daran sehen, dass das erste Patent „Zugabe von metallischen Abfällen zum Beton“ 1874 an *Bernard* verliehen wurde [12], jedoch erst in den 1960er Jahren die ersten Projekte in Stahlfaserbetonbauweise im Kraftwerksbau verwirklicht wurden.

- Auch sind aus betontechnologischer Sicht in der Herstellung und Verarbeitung von Faserbeton einige Besonderheiten zu beachten. Beispielsweise können Fasern die Konsistenz des Betons relativ stark verändern und damit die Betonförderverfahren und den Einbau beeinflussen.

Zudem liegt im Allgemeinen eine homogene Verteilung der Faserorientierung vor. Dadurch ist auch durch einen erhöhten Materialaufwand in der Regel der benötigte Bewehrungsquerschnitt für die Übernahme der Zugkräfte entsprechend einer vergleichbaren stabförmigen Bewehrungen nicht zu erreichen. Jedoch gibt es auch die Auffassung, die beispielsweise *Wietek* [13] vertritt, dass ein Faserbeton nicht als Zweikomponentensystem wie der Stahlbeton gesehen werden kann, sondern als eigener Baustoff verstanden werden muss, der daher eines eigenen Bemessungssystems bedarf.

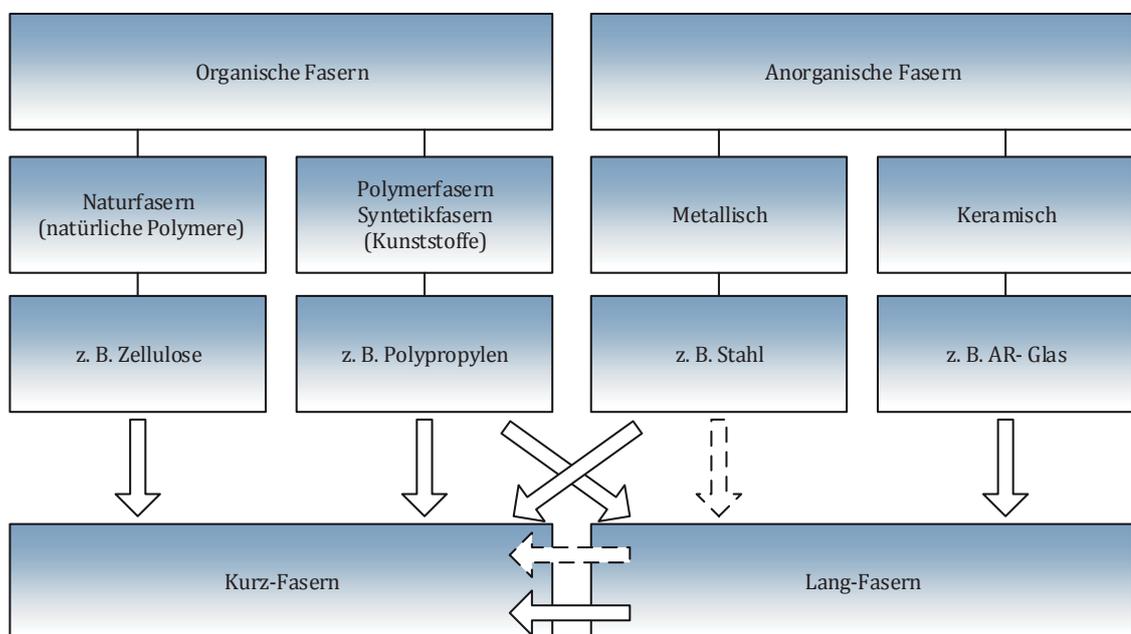


Abbildung 3 Schematische Darstellung der Gruppen unterschiedlicher Faserarten in der Bautechnik [11]



Außerdem können Fasern neben der statischen Wirkweise, auch andere Aufgaben wie Brandschutz oder bessere Verarbeitbarkeit (Reduzierung von Entmischung und „Bluten“) übernehmen. Grundsätzlich ist bei Faserbeton jedoch darauf zu achten, dass es sich hierbei um einen Beton nach Norm (ÖNORM B4710-1; DIN 1045 oder EN 206-1) handelt, der mit Fasern versetzt wird. Von diesem Baustoff wird somit verlangt, dass er mit üblichen bautechnischen Geräten und Mitteln herstellbar und verarbeitbar ist.

Anders verhält es sich mit Faserzementen, deren bekannteste Vertreter wohl Eternit sein dürfte. Hier werden üblicherweise dünne Bauteile in einem speziellen Verfahren hergestellt und nicht durch einen Betonmischer der üblichen Art.

Die signifikanten Vorteile die Stahlfaserbeton besitzt, sollen hier genannt werden:

- Vereinfachung des Bauablaufes (Entfall von Bewehrungsplanung, -einbau, -kontrolle, -abnahme und -lagerung; Vermeidung von Bewehrungsfehlern; leichteres Verdichten des Betons, da keine Rüttelgassen einzuhalten sind)
- Verbesserung des Rissverhaltens (keine tiefe Makrorissbildung, die zu Dauerhaftigkeitsproblemen führt)
- Erhöhte Duktilität sowohl im Zug- als auch im Druckbereich
- Geringere Abplatzneigung an Kanten, da die Fasern auch oberflächennah wirken und Faserbeton eine bis zu 20 % höhere Schlagfestigkeit im Vergleich zu normalen Beton besitzt [14]
- Erhöhte Abriebfestigkeit
- Verbessertes Brandverhalten beim Einsatz von Polypropylen-Fasern
- Verringerung des Schwindmaßes

2.2 Anwendungen und Normen

Der Grund für den geringen Einsatz von Faserbeton in Baukonstruktionen liegt unzweifelhaft an der lange fehlenden Normung und Regelung der Bemessung. Daher beschränkte sich die Anwendung meist auf Bauteile mit geringem Gefährdungspotential sowie an solchen, an denen der Nachweis der Tragfähigkeit im Grenzzustand ohne Berücksichtigung der Stahlfasern geführt werden konnte. Für alle anderen Einsätze von Stahlfaserbeton war in Deutschland, bis zur Einführung der DAfStb Richtlinie „Stahlfaserbeton“ im Jahre 2011, eine Zulassung im Einzelfall oder eine bauaufsichtliche Zulassung durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBT) notwendig. Bei diesen erteilten Zulassungen wurde allerdings beim Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit die Lastaufnahme durch die Stahlfasern berücksichtigt.

Allerdings ist auch heute das Haupteinsatzgebiet von Stahlfaserbeton im Bereich von Industrieböden zu sehen. In Abbildung 4 ist eindeutig zu erkennen, dass dies nicht nur in Deutschland sondern auch weltweit der Fall ist. Eindeutig ist dagegen festzustellen,



dass in Deutschland der Anteil im Wohnungsbau von 5 % sehr gering und sicherlich auf die fehlende Normung zurückzuführen ist.

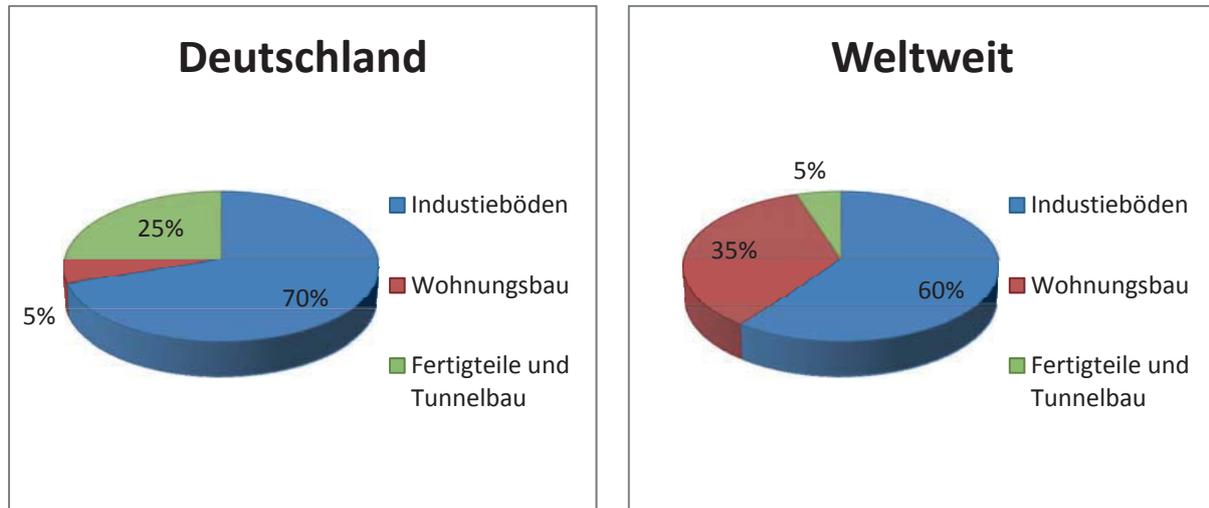


Abbildung 4 Anwendungsgebiete des Stahlfaserbetons [15]

Das Bestreben nach einer normativen Regelung ist allerdings schon relativ alt. Dies ist unter anderem an der Veröffentlichungschronik des Deutschen Beton Vereins (DBV) gut zu erkennen. Das erste DBV Merkblatt „Stahlfaserspritzbeton“ wurde bereits 1984 veröffentlicht. In der Fassung von 1992 wurde das ursprüngliche Merkblatt erweitert und befasst sich allgemein mit der Technologie von Stahlfaserbeton und Stahlfaserspritzbeton. Zudem veröffentlichte der DBV im gleichen Jahr das Merkblatt „Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau“. Bereits 1991 war vom DBV das Merkblatt „Grundlagen zur Bemessung von Industriefußböden aus Stahlfaserbeton“ herausgegeben worden. Diese drei Merkblätter wurden im Jahre 1996 nochmals redaktionell überarbeitet. Im Oktober 2001 wurde in Deutschland durch den DBV das Merkblatt „Stahlfaserbeton“ herausgegeben, welches zum ersten Mal allgemeine Standards für die Bemessung, Herstellung und Prüfung von Stahlfaserbeton festlegte. [14]

Im März 2010 wurde in Deutschland vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) die Richtlinie „Stahlfaserbeton“ veröffentlicht und 2011 baurechtlich eingeführt. Sie bietet nun ein Bemessungsverfahren für Tragwerke des Hoch- und Ingenieurbaus aus unter anderem reinem Stahlfaserbeton. Allerdings werden hier einige Arten von Sonderbetonen ausgeschlossen. Hier wären vor allem Hochfeste Betone (> C 50/60) und Selbstverdichtender Beton (SVB) zu nennen.

In Abbildung 5 sind die momentan nach Anforderung der Bauteile aus Faserbeton anzuwendenden Normen und Richtlinien für Deutschland gezeigt.

Anforderung an das Faserbeton – Bauteil			
↓	↓	↓	↓
Keine (Bauteile mit niedrigem Gefährdungspotential)	baurechtliche	wasserrechtliche	Bau- und wasser- rechtliche
Eingruppierung nach Norm und Regelwerken			
Kein tragendes Bauteile nach DIN 1045	Bauteil nach DIN 1045 und DAfStb –Richtlinie „Stahlfaserbeton“ bzw. Fachnorm ggf. Zustimmung im Einzelfall oder bauaufsichtliche Zulassung	Bauteil nach DAfStb-Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit was- sergefährdenden Stoffen“	Bauteil nach DIN 1045 und DAfStb – Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen“
Nachweis			
Nutzung der Biege- zug- (ungerissen) oder Nachrissbiege- zug-festigkeit (ge- rissen)	Nachweise der Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglich- keit	Mindestbewehrung oder Dichtschicht mit Beschränkung der Rissbreiten	Nachweise der Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglich- keit sowie Nachwei- se der Dichtheit und Mindestbewehrung
Beispiele			
<ul style="list-style-type: none"> - Industriefußböden - Kellerfußböden - Verkehrsflächen - Stützmauern bis 1 m Gelände- sprung - Schächte bis 0,9 m Tiefe - Tresorbeton 	<ul style="list-style-type: none"> - Fundament- platten - Sohlplatten - Wände - Deckenplatten - Spritzbeton - Tunnelschalen - Baugruben- und Hangsicherungen - Rohre 	<ul style="list-style-type: none"> - Arbeitsflächen - Auffangwannen - Ableitkanäle - Tankstellenflä- chen 	<ul style="list-style-type: none"> - Tragende Elemente in Bauwerken mit Dichtfunktion (z.B. Sohlplatten, Wände)

Abbildung 5 Anforderungen an Faserbeton-Bauteile, Eingruppierung, Nachweis und Beispiele [16]

Auch auf europäischer Ebene ist man bestrebt, Faserbeton zu normieren. Dies zeigt sich durch die normative Regelung der Fasern in der EN 14889-1 (Stahlfaser) und -2 (Polypropylenfaser). Mit diesen Normen ist der Grundstein für eine CE-Konformitätskennzeichnung gegeben was den Einsatz von Fasern seit 2006 erheblich erleichtert hat. Eine europäische Norm zur Anwendung und Bemessung von Faserbeton gibt es allerdings noch nicht. Dafür gibt es für verschiedene Bauteile und Bauweisen in Faserbeton bereits Anwendungsregeln. Als Beispiel sollen hier Spritzbeton, Rohre und Formstücke aus Stahlfaserbeton und Betonfertigteiltergaragen erwähnt werden.



In Österreich wurde von der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB) im März 2002 erstmals die Richtlinie „Faserbeton“ eingeführt und im Juli 2008 neu überarbeitet. Allerdings ist eine Bemessung für beispielsweise Deckenplatten, Träger, Treppen und Konsolen aus reinem Faserbeton ausgeschlossen. Ähnliche Richtlinien gibt es exemplarisch in der Schweiz (SIA 162/6), in Schweden (Betonrapport 4), in den Niederlande (CUR 35; CUR 36; CUR 42 und CUR 111 E) und in Großbritannien (TR34, Anhang F).

Der Vollständigkeit halber soll an dieser Stelle darauf verwiesen werden, dass es auch außerhalb Europas bereits Regelwerke für Faserbeton gibt. Beispielhaft sollen hier Japan (JCI-SF4) Neuseeland (NZS 3101 Part 1) und die USA (ACI 544.1R-96; ACI 544.2R-89; ACI 544.3R-08; ACI 544.4R-88; ACI 544.5R-10) genannt werden.

Trotzdem gibt es mittlerweile in Deutschland schon einige Bauvorhaben, bei denen Stahlfaserbeton zum Einsatz kam. Das wohl berühmteste Bauvorhaben ist die Unterwasserbetonsohle am Potsdamer Platz in Berlin [15]. Im Bereich des Tunnelbaus sind im Rhein –Ruhr-Gebiet seit 1988 bereits 4 Tunnelbauvorhaben in 2-schaliger Bauweise durch die Firma Hochtief verwirklicht worden. Hierbei wurden über 40.000 m³ Stahlfaserpumpbeton ohne Qualitätsmängel verbaut. Für das Los 34 in Essen erteilte das Land Nordrhein-Westfalen eine Zulassung im Einzelfall für den 1-schaligen Ausbau mit Stahlfaserbeton-Tübbing [17].

Diese Anwendungen sind jedoch Ausnahmen und können nur dazu dienen zu zeigen, was technisch möglich ist. Die häufigsten Anwendungen sind auf folgende Bereiche begrenzt [14]:

- **Industriefußböden**

Das Hauptanwendungsgebiet des Stahlfaserbetons, das in der Regel nicht in das Tragwerk einbezogen wird und daher nur das Eigengewicht und die Verkehrslasten zu tragen hat, sind die Industrieböden. Außerdem gehen von diesen Bauteilen keine Gefahr für Leib und Leben aus. Zudem wird durch den Einsatz der Stahlfasern zusätzlich zur Erhöhung der Biegezugfestigkeit der Platte auch die Erhöhung der Schlagfestigkeit erreicht.

- **Betonstraßen**

Neben der Verkürzung der Bauzeit um ca. 20 % gegenüber betonstahlbewehrten Straßen besitzt eine aus Stahlfaserbeton hergestellte Fahrbahn ein viel duktileres Verhalten, was zum besseren Ableiten von Schwellbeanspruchungen durch den Gebrauchszustand führt. Dies konnte durch mehrere Versuchsstrecken gezeigt werden. Zudem hat sich gezeigt, dass durch die Erhöhung der Durchrisslast das Tragvermögen erheblich gesteigert werden kann. Dies bedeu-



tet für die Praxis, dass bei niedriger Bauteilhöhe ein höheres Schwerlastaufkommen aufgenommen werden kann.

- **Wohnungsbau**

Hier wird Stahlfaserbeton vor allem für Bodenplatten, Fundamente und Kellerwände eingesetzt. Hier wird der Vorteil der Rissbreitenminimierung vor allem bei WU –Bauteilen ausgenutzt. Häufig wird er aber auch in Kombination mit normaler Stahlbewehrung eingesetzt.

- **Tunnelbau**

Im Tunnelbau werden vor allem Stahlfaserbetone für Spritzbeton, Stahlfaserpumpbeton und für die Tübbingproduktion eingesetzt. Durch die Verwendung von Stahlfaserbetonen kann eine Vereinfachung im Verfahrensablauf erreicht werden, was zu einem Verringern der Bauzeit und somit auch zur Reduzierung der Baukosten führen kann. Ein weiterer Vorteil bei den Fertigteilen ist, dass die erhöhte Schlagfestigkeit zu einer geringeren Ausschussrate durch Transportschäden führt.

2.3 Wirkungsweise der Stahlfasern in Beton

In diesem Abschnitt soll zuerst ein Überblick über die unterschiedlichen Stahlfasertypen gegeben werden. Danach wird der Verbund zwischen zementgebundener Matrix und Stahldrahtfaser erläutert. Für diese Arbeit ist insbesondere die Wirkungsweise von Stahldrahtfasern mit Endverankerung und auch die Abhängigkeit der Orientierung von Bedeutung. Hierbei wird zudem der Einfluss des Fasergehaltes auf das Nachrissverhalten erläutert. Abschließend soll in diesem Kapitel auch noch Grundlegendes über die Herstellung sowie Verarbeitung des Stahlfaserbetons dargelegt werden.

2.3.1 Fasertypen

Die Wirkungsweise der Stahlfaser im Betonbauteil ist vor allem vom Fasertyp abhängig. In den EN 14889-1 werden Stahlfasern nach Material oder Form charakterisiert. Das Fasermaterial wird hierbei in fünf Gruppen unterteilt:

Gruppe I:	kalt gezogener Stahldraht
Gruppe II:	aus Blech geschnittene Fasern
Gruppe III:	aus Schmelzgut extrahierte Fasern
Gruppe IV:	aus kalt gezogenem Draht gespante Fasern
Gruppe V:	von Stahlblöcken gehobelte Fasern

Die in der Praxis am häufigsten zur Anwendung kommenden Gruppen sind die Gruppen I, II und V. Auch wenn in der Norm „gehobelt“ steht, so sind doch gefräste Fasern (Spanfasern) gemeint.



Diese der Gruppe V zugehörigen Spanfasern werden durch rotierende Werkzeuge von einer Stahlbramme abgearbeitet. Dabei ergeben sich sichelförmige Späne die rotglühend sind und sich durch die Umgebungsluft schnell abkühlen. Vom Materialgefüge her sind sie quasi martensitisch und besitzen daher ein relativ sprödes Bruchverhalten. Charakteristisch für diese Fasern ist, dass sie eine raue Innen- und eine glatte Außenseite besitzen. Diese Fasern werden in der Regel nicht mehr nachbearbeitet und besitzen im Allgemeinen eine Länge von 30 mm und eine Dicke von 0,4 mm sowie eine Zugfestigkeit von ca. 900 N/mm² [11]; [18].



Abbildung 6 Gefräste Stahlfaser (Foto: KrampeHarex)

Die der Gruppe II zugehörigen Blechfasern werden durch Abschneiden eines auf ein Coil gewickelten Blechs gewonnen. Durch den Schneidedruck ist es möglich zusätzlich eine Verformung der Faserenden sowie eine Profilierung der Faseroberfläche zu bewirken. Durch die niedrige Zugfestigkeit des Ausgangsmaterials (ca. 770 N/mm²) findet sich ihre Hauptanwendung im Estrichbereich.

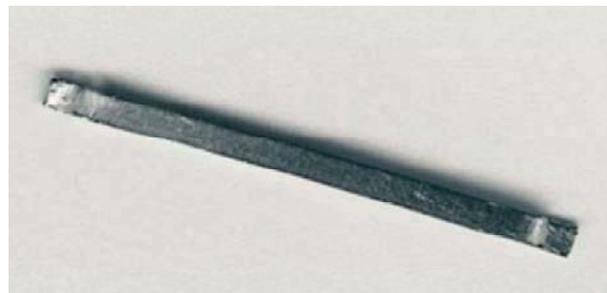


Abbildung 7 Kaltbandfasern mit Endverhakung (Foto: Krampeharex)

Die am häufigsten im Betobau zur Anwendung kommenden Stahldrahtfasern gehören zur Gruppe I. Für diese Fasern wird ein Draht gezogen (kaltverformt), was zu einem Gefüge führt welches sich gut verformen lässt. Dieser Draht wird dann durch Walzen in die gewünschte Form gebracht. Die EN 14889-1 schreibt dabei keine Formen vor, verlangt aber von jedem Hersteller, dass er die Form der Faser und für jeden Fasertyp die produktionsbedingten Abweichungen angibt. Die drei gängigsten Drahtfasern sind die gewellte Stahldrahtfaser für den Industriebodenbereich (s. Abbildung 8), die Faser mit flachgedrückten Ende für den Spritzbeton (s. Abbildung 9) und die wohl populärste Stahldrahtfaser mit Endverankerung für den Fertigteilbau (s. Abbildung 10).