Verstärkungsfasern für Faserbeton

Autor(en): **Grünthaler, Karl-Heinz**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **107 (1989)**

Heft 26

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-77136

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

schaft verabschiedet und dem Parlament unterbreitet werden.

Leistungsprofil ausarbeiten

Die CIMEX wird noch in diesem Sommer das Leistungsprofil (Pflichtenheft) sowie die Bewertungskriterien (Kriterienkatalog) für die CIM-Bildungszentren ausarbeiten. Die Veröffentlichung eines zweiten CIMEX-Berichtes mit detaillierten Informationen zu den Ausschreibungsbedingungen ist vorgesehen.

Aufbau der Zusammenarbeitsstrukturen

Die Zeit bis zum geplanten Programmbeginn anfangs 1990 sollte von Industrie und Wissenschaft für den Aufbau der notwendigen Zusammenarbeitsstrukturen – wie sie oben skizziert wurden – genutzt werden. Erfreulicherweise sind in verschiedenen Regionen der Schweiz sogenannte CIM-Arbeitsgruppen mit Vertretern aus Wirtschaft, Wissenschaft und kantonalen Regierungen entstanden, welche sich speziell dieser Problematik zuwenden.

Forschungsbeiträge heute schon möglich

Es ist darüber hinaus heute schon möglich, Forschungsbeiträge bei der Kommission zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (KWF) für CIM-Forschungsvorhaben zu beantragen. Eine KWF-Unterstützung setzt u.a. voraus, dass die Wirtschaft rund 50 Prozent der Kosten eines Forschungsvorhabens selbst trägt und dass eine nichtgewinnorientierte Forschungsstätte (z.B. Hochschulinstitute, HTLs) daran beteiligt ist. Die jüngste Entwicklung der Beitragsgesuche lässt erkennen, dass CIM innerhalb der KWF-Fördertätigkeit zunehmend an Gewicht gewinnt (Bild 8).

Schlussfolgerung

Auf der Basis

- einer aussagekräftigen Lagebeurteilung sowie
- eines im Verbund Wirtschaft, Sozialpartner, Wissenschaft und Staat ausgearbeiteten Aktionsprogrammes

hat die CIMEX wesentlich zu einer breiten Bewusstseinsbildung über die strategische Bedeutung neuzeitlicher Produktionsansätze für unsere industrielle Wettbewerbsfähigkeit beigetragen. Die jüngsten Entwicklungen in den verschiedensten Regionen der Schweiz geben Anlass zu einer optimistischen Einschätzung der noch harrenden Umsetzung des CIM-Aktionsprogrammes. Die Überzeugung und Bereitschaft, den eingangs erwähnten Zielbalken durch gemeinsame Anstrengungen nach oben zu hieven, ist in Wirtschaft, Wissenschaft und Staat manifest. Bei der Suche nach Mitteln und Wegen für dieses gemeinsame Unterfangen setzt das geplante CIM-Aktionsprogramm klare Leitlinien. Es ist nun in erster Linie Aufgabe des Parlamentes, zu dieser Vorlage Stellung zu nehmen.

Adresse des Verfassers: Dr. rer. pol. *Christoph Meier*, Bundesamt für Konjunkturfragen, 3001 Bern.

Verstärkungsfasern für Faserbeton

Die intensiven Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Faserverbundwerkstoffe führten zu interessanten Fasermaterialien, mit denen die Anforderungen für die Verstärkung von Metallen, Kunststoffen und spröden nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffen weitgehend erfüllt werden können. Ein genereller Überblick über kommerziell verfügbare Verstärkungsfasern, deren Eigenschaften und Herstellungsmethoden wird gegeben. Die Eignung solcher Fasern für die Verstärkung von Zement wird anhand der mechanischen Eigenschaften und chemischen Verträglichkeit bewertet.

Herstellung und Eigenschaften anorganischer Fasern

Drähte

Drähte mit unterschiedlicher Zusammensetzung und einer grossen Bandbreite der mechanischen Kennwerte

VON KARL-HEINZ GRÜNTHALER, FRANKFURT/M.

sind heute kommerziell verfügbar. Zu Verstärkungszwecken werden sie – abgesehen von Drahtglas, Reifencord und in geringem Umfang Faserbeton – erst seit etwa zehn Jahren eingesetzt.

Die Herstellung von Drähten erfolgt fast ausschliesslich durch Umformen in fester Phase. Hier ist in erster Linie das Düsenziehverfahren zu nennen, das auf alle duktilen Metalle und Legierungen angewendet werden kann. Die Grenzen dieses Verfahrens werden beim Übergang zu kleinen Drahtdurchmessern (<30 µm) und bei der Umformung von hochfesten oder gar spröden Materialien erreicht.

Ausgangsmaterialien in fester Form bilden auch die Basis für Prozesse zur Herstellung von Drahtabschnitten bzw. Drahtwolle. Ihre Herstellung erfolgt über die Zerspanung von Walzdrähten oder durch Umformung geeigneter Halbzeuge.

In einem für kleine Drahtdurchmesser interessanten Verfahren wird ein Drahtbündel in einer gemeinsamen Hülle ausgezogen, wobei die Einzeldrähte durch einen zähen Schmiermittelfilm voneinander getrennt sind. Nach Beendigung des Umformprozesses wird die Hülle durch Ablösen in Säure entfernt. Drahtdurchmesser von 8, 12 und 25 µm sind herstellbar; ein Drahtbündel enthält 90 bis 300 Einzeldrähte.

Andere Verfahren, die, was die produzierte Menge betrifft, nur geringe technische Bedeutung haben, basieren auf der Umformung von geschmolzenen Metallen. Es handelt sich um den Melt-Spinning-Prozess und das Melt-Drag-Verfahren.

Beim Melt-Spinning-Prozess wird das geschmolzene Metall aus einer nicht benetzbaren Düse ausgepresst und erstarrt während des freien Fluges zu einem mehr oder weniger runden Draht.

Beim Melt-Drag-Verfahren wird das aus einer Düse bzw. einem Spalt aus dem Schmelztiegel austretende flüssige Metall in etwa 0,25–2 mm Entfernung von der Düse auf einer gekühlten Trommel aus Stahl aufgespult. Dieses Verfahren eignet sich aufgrund der hohen Abschreckrate zur Herstellung von Bändern aus amorphen Metallen (metallische Gläser).

Die Zugfestigkeit von Stahldrähten ist in weiten Grenzen einstellbar. Während rostfreie Stahldrähte im weichen Zustand eine Zugfestigkeit bis etwa 1200 MPa aufweisen, können Drähte aus Kohlenstoffstahl durch hohe Kaltverformung auf mehr als 4000 MPa eingestellt werden. Daneben sind auch spezielle aus härtbaren Legierungen erhältlich, die sich durch besondere Warmfestigkeit auszeichnen. Der E-Modul liegt für alle Stahldrähte bei etwa 200 GPa. Nachteilig für die Anwendung zu Verstärkungszwecken ist die hohe Dichte von Stahldrähten von etwa 8 g/cm³.

Glasfasern

Bei weitem die grösste Bedeutung als Einlagerungsmaterial für Verstärkungszwecke haben heute Glasfasern erlangt. Aus der grossen Palette sind E-, S-, R-Glas mit den Zusammensetzungen

	E-Glas %	S-Glas %	R-Glas %
SiO_2	53–54	62–65	60
CaO/MgO	20–24		
CaO			6
MgO		10–15	9
Al_2O_3	14–15,5	20–25	25
B_2O_3	6,5–9		

die wichtigsten Vertreter.

Die Herstellung von Textilglasfasern erfolgt überwiegend im Spinnverfahren, wobei das aufbereitete Glas einer Schmelzwanne aus Platin-Rhodium zugeführt wird. Die Schmelzwanne besitzt am Boden bis zu 2000 Lochnippel mit Durchmessern von 1 bis 2 mm, aus denen das flüssige Glas austritt und zu Fäden verzogen wird; Ziehgeschwindigkeiten bis 3000 m/min sind realisierbar. Die Glaseinbringung in die Platinwanne erfolgt entweder flüssig aus der Glasschmelzwanne oder in Form von Glaskugeln.

Ein weiteres Verfahren ist das Stabziehverfahren, bei dem eine Batterie von parallel angeordneten, kalibrierten Glasstäben in eine Ofenzone geführt wird. Am Stabende bilden sich durch die Erhitzung Glastropfen aus, die senkrecht nach unten fallen und dabei einen Faden nachziehen, der aufgespult werden kann. Die mechanischen Eigenschaften von Glasfasern unterliegen gewissen Schwankungen, da die Festigkeit mit der Zeit durch Alterung zurückgeht; sie wird z.B. durch Einwirkung von Luftfeuchtigkeit beschleunigt. So geht die Festigkeit von E-Glasseide nach 100 Tagen trockener Auslagerung auf 90 Prozent der Ausgangsfestigkeit und nach 100 Tagen Auslagerung bei 100 Prozent Luftfeuchtigkeit auf 70 Prozent der Ausgangsfestigkeit zurück.

Die Ausgangsfestigkeit beträgt bei E-Glas etwa 3500 MPa, bei R-Glas 4500 MPa, der E-Modul 73 GPa (E-Glas) bzw. 86 GPa (R-Glas).

Die genannten Glasfasern genügen den Anforderungen beim Einsatz zur Verstärkung von Zement und Beton nicht, da bei Einwirkung alkalischer Lösungen eine Zerstörung des Glasnetzwerkes verbunden mit dem Verlust der Faserfestigkeit eintritt.

Aus diesem Grund wurden an verschiedenen Stellen Entwicklungsarbeiten mit dem Ziel der Herstellung alkalibeständiger Glasfasern durchgeführt, zur technischen Reife kamen allerdings nur die in England entwickelten und von Pilkington-Brothers hergestellten CEMFIL-Glasfasern. Ihre Alkalibeständigkeit ist wesentlich höher als diejenige von E-Glasfasern, sie wird durch Zusatz von Zirkondioxid erzielt.

Glasfasern werden für den Einsatz als Verstärkungskomponente vielfach mit einer Schicht versehen, die einerseits die Haftung zur Matrix verbessern soll, anderseits aber auch zur Erhöhung der chemischen Verträglichkeit beitragen kann.

Die herstellungsbedingt anfallenden Kurzfasern aus Basalt und Schlackengläsern sind zwar kostengünstig, haben aber für Verstärkungszwecke kaum Bedeutung, da ihre Eigenschaften sehr stark variieren. Dies gilt auch für Faserdurchmesser und -länge. Gesundheitsschädliche Wirkung inhalierbarer Durchmesserfraktionen kann nicht ausgeschlossen werden.

Kohlenstoffasern

Ein besonders breites Angebot an unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften bieten die Kohlenstoffasern. Sie sind chemisch resistent, temperaturbeständig und leicht. Sie sind sowohl zur Verstärkung von Kunststoffen als auch von Metallen geeignet.

Die Herstellung erfolgt durch Karbonisierung von Textilfasern, Zellulose oder Polyacrylnitril oder aber auch aus Teer.

Die Textilfasern werden bei etwa 150 bis 250 °C zunächst einer sogenannten Cyclisierungsbehandlung unterworfen, anschliessend einer Oxidationsbehandlung bei 200 bis 300 °C, wobei zur Verhinderung der Schrumpfung eine Zugspannung an die Fasern angelegt wird. Anschliessend wird die eigentliche Verkokung bei etwa 1200 °C im Inertgas ausgeführt. Graphitierung erfolgt unter Argon bei Temperaturen bis 3000 °C. Auch hier wird zur Ausrichtung der sich bildenden Graphit-Kristallite in Richtung der Faserachse eine Zugkraft ausgeübt.

Je nach Art der Wärmebehandlung können also ganz unterschiedliche Eigenschaften eingestellt werden. Man unterscheidet:

	Zugfestigkeit MPa	E-Modul GPa
normalfeste Kohlenstoffasern	3500	235
hochfeste Kohlenstoffasern	4600	250
Hochmodul-Kohlenstoffasern	2500 2800	400 500

Besonders preiswert und daher interessant für Massenanwendungen sind aus Teer hergestellte Fasern. Der Kohlenstoffgehalt des Ausgangsmaterials liegt schon bei etwa 99,5 Prozent (vergleichbarer Wert für Zellulose 45 Prozent). Die Karbonisierung erfolgt bei Temperaturen um 1200 °C. Graphitierung bei höherer Temperatur ist möglich.

Diese sogenannten Pitch-Kohlenstoffasern reichen zur Zeit in ihren Eigenschaften noch nicht an die aus Textilfasern gewonnenen Kohlenstoffasern heran. Die Zugfestigkeit beträgt 800 MPa, der E-Modul 33 GPa. Nach Angaben von Herstellern können in Zukunft wesentlich bessere mechanische Eigenschaften erwartet werden.

Siliziumkarbidfasern/-Whisker

Siliziumkarbidfasern mit Faserdurchmessern zwischen 100 und 150 µm werden durch Abscheidung aus der Gasphase hergestellt. Als Substrat dienen etwa 10 µm dicke Wolframdrähte oder Kohlenstoffasern, die durch direkten Stromdurchgang auf etwa 1200 °C beheizt werden. Die Siliziumkarbidabscheidung erfolgt durch thermische Reduktion von Siliziumtetrachlorid mittels Wasserstoff. Die Wachstumsgeschwindigkeit der Schicht ist mit etwa 2,5 µm/s gering. Siliziumkarbidfasern haben eine relativ niedrige Dichte, sie sind thermisch stabil und chemisch beständig. Die Zugfestigkeit liegt bei 2800...3200 MPa, der E-Modul beträgt 400 GPa. Die Fasern sind aufgrund der hohen Kosten nur im Bereich Luft- und Raumfahrt einsetzbar.

Anforderungen an Fasern für die Bewehrung einer zementgebundenen Matrix

Chemische Beständigkeit
- Stabilität im feuchten Medium (Korrosion)
- Stabilität im alkalischen Medium

Mechanische Eigenschaften
- Zugfestigkeit und Steifigkeit
- Zähigkeit

Niedrige Dichte
Benetzbarkeit und Haftung zur Matrix

Verarbeitbarkeit
- leicht zu vereinzeln
- Flexibilität

Gesundheitlich unbedenklich
Kostengünstig

Tabelle 1. Anforderungen an Fasern für die Bewehrung einer zementgebundenen Matrix

Ein anderes in Japan entwickeltes Herstellungsverfahren beruht auf der Pyrolyse von siliziumorganischen Verbindungen. Die resultierenden Fasern weisen Faserdurchmesser im Bereich von 15 µm, also vergleichbar mit Kohlenstoffasern auf. Sie sind herstellungsbedingt röntgenamorph und rekristallisieren bei Einsatztemperaturen oberhalb 1100 °C.

Unter Whiskern versteht man haarförmige Einkristalle, deren Längenausdehnung einige Millimeter bis Zentimeter bei Durchmessern von <1 bis einige Mikrometer beträgt.

Die Herstellung von Whiskern erfolgt vorzugsweise durch Abscheidung aus der Gasphase über metallorganische Verbindungen. Gewisse Bedeutung haben Siliziumnitrid (Si_3N_4), Siliziumkarbid (SiC) und Aluminiumoxid (Al_2O_3) erlangt.

Bei SiC-Whiskern existieren zwei Modifikationen:

Die sogenannten α-SiC-Whisker mit hexagonaler Kristallstruktur haben Durchmesser von 10 bis 100 µm und Längen bis 60 mm. Die Zugfestigkeit liegt nach Messungen des Battelle-Instituts bei ≦ 5000 MPa. Ihre Produktion wurde bereits vor mehr als 15 Jahren aufgenommen, jedoch bald wieder eingestellt.

Die kubischen β-SiC-Whisker entstehen durch thermische Reduktion von gasförmigen Siliciumverbindungen wie Methyltrichlorsilan, Siliziumtetrachlorid oder anderen Verbindungen. In Japan gibt es auch Produkte, die über Pyrolyse vor Reiss-Schaden hergestellt werden. Es erfolgt eine Umsetzung des durch thermische Einwirkung entstehenden Kohlenstoffs mit dem in den Schalen enthaltenen Siliziumdioxid.

Zur Zeit geraten die Whisker aufgrund ihres geringen Durchmessers (≦ 1 µm) in die Kritik, da sie inhalierbar sind und ähnliche Wirkung wie Asbestfasern aufweisen könnten. Zur Verstärkung von Massenprodukten sind Whisker aufgrund ihrer hohen Kosten uninteressant.

Keramische Fasern

Bei kommerziellen keramischen Fasern handelt es sich um Kurzfasern, die zunächst zum Zwecke der thermischen Isolation entwickelt wurden. Sie sind auf Basis von Aluminiumsilikaten mit unterschiedlichen Aluminiumoxid gehalten aufgebaut (45–95 Prozent Al_2O_3, 5–55 Prozent SiO_2) und werden durch Zerteilung entsprechend zusammengesetzter Schmelzen nach dem Schleuder-, Zentrifugier- oder Düsen-Blasverfahren hergestellt. Die Faserdurchmesser und mechanischen Kennwerte unterliegen grösseren Schwankungen:

Faserdurchmesser	0,5 7	µm
Zugfestigkeit	400 1500	MPa
E-Modul	70	GPa

Nach entsprechender Aufbereitung können solche Fasern auch für Verstärkungszwecke eingesetzt werden. Kurzfasern aus nahezu reinem Al_2O_3 werden angeboten. Diese Fasern weisen wesentlich engere Toleranzen im Durchmesser und in den mechanischen Eigenschaften auf:

Faserdurchmesser	3	µm
Zugfestigkeit	2000	MPa
E-Modul	300	GPa

Ausgangsmaterialien für keramische Langfasern mit 85–100 Prozent Al_2O_3 Anteil sind aluminiumorganische Verbindungen, die entsprechend pyrolysiert werden.

Folgende Eigenschaften werden angegeben:

	Sumitomo «Alumina Fiber»	Du Pont «Fiber FP»
Dichte g/cm³	3,25	3,9
Zugfestigkeit MPa	1800	1400
E-Modul GPa	210	390

Asbest

Natürlich vorkommende Fasern hoher thermischer und chemischer Stabilität mit Werten der Zugfestigkeit zwischen 700 und 4500 MPa und einem E-Modul im Bereich von 140 GPa bis 180 GPa. Die heutigen Kenntnisse über die kanzerogene Wirkung von Asbestfasern führten zu intensiven Entwicklungsarbeiten mit dem Ziel, bei den Hauptprodukten, wie thermische Isolation, Dichtungsmassen, Asbestzement und Bremsbelägen, Asbest durch geeignete syntetische Fasern unkritischer Durchmesser zu ersetzen.

Herstellung und Eigenschaften organischer Fasern

Die grosse Palette der organischen Fasern weist im allgemeinen mittlere Zugfestigkeit und geringe Steifigkeit aus. Der geringe E-Modul ist der Grund dafür, dass organische Fasern bisher weniger Beachtung als Einlagerungsmaterial für Zement bzw. zementgebundene Matrix fanden, da durch sie keine echte Verstärkung erzielt werden kann. Sie wirken lediglich als Rissbarrieren. Neuerdings wird diese Eigenschaft jedoch gezielt während der Abbindephase von Beton genutzt, um unerwünschte Rissbildung zu vermeiden. Ausserdem wurden spezielle Fasern für die Einlagerung in zementgebundene Matrix zur Substitution von Asbest entwickelt und kommerzialisiert. Damit muss auch diesen Fasern in Zukunft entsprechende Beachtung geschenkt werden.

Einige wichtige Vertreter aus dem organischen Bereich sind:

Polypropylenfasern (PP)

Alkalibeständig gewinnen sie an Bedeutung als Einlagerung in Zement. Neue Entwicklungen weisen höhere Steifigkeit auf (bis 18 GPa) z.B. die dänische Entwicklung «Krenit».

Polyvinylalkoholfasern (PVA)

Sie werden in unterschiedlichen Modifikationen angeboten, die sich im Faserdurchmesser und im E-Modul unterscheiden. Der E-Modul kann dabei bis zu 25 GPa erreichen. Besonders ausgeprägt sind Alkaliresistenz und Alterungsbeständigkeit der Fasern. Sie sind nicht gesundheitsschädlich.

Polyesterfasern

Sie zeichnen sich ebenfalls durch chemische Beständigkeit in saurem und basischem Milieu aus. Nachteilig ist ihre geringe Bindefestigkeit zur Zementmatrix.

Polyacrylnitrilfasern

Den speziellen Anforderungen für Faserzement-Produkte angepasst, weisen sie einen relativ hohen E-Modul von nahezu 20 GPa, verbunden mit guter Hydrolyse- und Alkalibeständigkeit auf. Die Grenzflächenhaftung zu Zement ist gut.

Polyaramidfasern

Bezüglich ihrer mechanischen Eigenschaften in einer Ausnahmestellung

übertreffen sie die Festigkeit und Steifigkeit von Glasfasern, weisen jedoch chemische Beständigkeit auf und besitzen geringe Dichte.

Organische Naturfasern

Zellulose u.a. sind aufgrund geringer Festigkeit und mangelnder Verrottungsbeständgkeit wenig zur Einlagerung in Zementmatrix geeignet.

Kostensituation

Für die Beurteilung der Kostenfrage ist der Volumenpreis von Fasermaterialien von entscheidender Bedeutung, da die zu erzielenden mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs dem Faservolumenanteil direkt proportional sind. Aufgrund der Kosten, die für 1 m³ Beton pro 1 Volumenprozent Faseranteil aufzuwenden sind, können aus der Palette verfügbarer Einlagerungsmaterialien für die Verstärkung von Massenprodukten lediglich billige keramische Fasern, Stein und Mineralwolle und Kunststoffasern (Polypropylen) in Betracht gezogen werden. Inwieweit in Zukunft auch noch Pitch-C-Fasern interessant werden, hängt von deren weiterer Preisentwicklung ab. Alle anderen Fasermaterialien liegen derzeit bei Volumenpreisen pro Volumenprozent, die sie nur für Spezialanwendungen in Frage kommen lassen.

Diese Feststellung hat allerdings nur im Augenblick Gültigkeit, denn die Preise unterliegen mehr oder weniger grossen Schwankungen. Zukunftsprognosen über die Preisentwicklung werden oft versucht, sind aber relativ unzuverlässig, denn die Preise werden entscheidend von der Nachfrage beeinflusst, und diese ist nur schwer abzuschätzen, da sie nicht zuletzt auch vom Erfolg der laufenden Entwicklungsarbeiten abhängt.

Als Beispiel für den Trend in der Preisentwicklung seien die Kohlenstoffasern erwähnt. Sie haben innerhalb von 20 Jahren eine Preisreduzierung von 90 bis 95 Prozent durchlaufen. Auch für Polyaramid war eine ähnliche Entwicklung zu beobachten.

Bei Glasfasern und Stahldrähten ist allerdings kaum mehr mit Preisreduktionen zu rechnen, da hier die Herstellungsverfahren einen hohen Stand der Technik erreicht haben und die Nettokosten hauptsächlich durch Rohstoffpreise, Fertigung und Energiebedarf bei der Herstellung bestimmt werden.

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Zusammenfassung eines Referates, das anlässlich des Lehrganges «Faserbeton» vom 17./18. Oktober 1988 in der Technischen Akademie Esslingen gehalten wurde.

Eigenschaften kommerziell verfügbarer Fasern: anorganische Fasern

Fasertyp	Dichte g/cm³	Zugfestigkeit MPa	E-Modul GPa	Faserdurchmesser µm	Faserlänge*)	Beständigkeit in Zement	Preis DM/kg
Chrysotilasbest	2,6	1000–3500	160	<1	K	+	1–2
Glasfasern							
- E-Glas	2,6	2000–3500	75	8–15	L, K	–	5–10
- CEMFIL	2,7	1500–2500	70–80	12–20	L, K	(+)	ca. 10
Schlacken-, Gesteinswolle	2,8	500–1100	90 bis 150	1–15	K	– bis (+)	ca. 1
Stahldraht gezogen	7,8	500–2000	200	ab 100	L, K	+	2–20
Profildrähte	7,8	800	200	400 bis > 1000	K	+	2–5
Aluminiumoxidfasern	3,3–3,9	1400–2000	300–350	3–20	L, K	(+)	70–400
Mullitfasern	2,5–2,8	800–1400	100–150	2–3	K	–	2,5–5
Kohlenstoffasern	1,6–1,9	600–4000	40–400	8–15	L, K	+	40–150
Siliziumkarbid							
- Faser	2,6	900–3600	100–400	15–150	L, K	+	900–3000
- Whisker	3,2	bis 14 000	480	≦ 1	K	+	600

*) K: Kurzfaser; L: Fasern mit kontinuierlicher Länge

Tabelle 2. Eigenschaften kommerziell verfügbarer anorganischer Fasern

Eigenschaften kommerziell verfügbarer Fasern: organische Fasern

Fasertyp	Dichte g/cm³	Zugfestigkeit MPa	E-Modul GPa	Faserdurchmesser µm	Faserlänge*)	Beständigkeit in Zement	Preis DM/kg
Polyaramid	1,4	2700–3000	70–130	12	L, K	+	50–100
HF-Acryl	1,18	900–1000	17–20	13–18	K	+	ca. 8
Polypropylen	0,9	600–700	9–15	15–150	K	–	ca. 6
Polyvinylalkohol	1,3	800–1000	6–25	10–27	K	+	
Polyesther	1,38	800–1100	10–19	10–50	K	(+)	
Zellulose	1,5	200–1500	5–40	15–60	K	–	billig

*) K: Kurzfasern; L: Fasern mit kontinuierlicher Länge

Tabelle 3. Eigenschaften kommerziell verfügbarer organischer Fasern

Faserauswahl für die Verstärkung von Zement

Anforderungen an Fasern für die Bewehrung einer zementgebundenen Matrix sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Einschränkungen der Faserauswahl unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten wurden genannt, so dass hier noch die Frage der chemischen Verträglichkeit für Fasern vertretbarer Kosten zu erörtern bleibt.

Eine qualitative Beurteilung der chemischen Beständigkeit ist in Tabelle 2 und 3 enthalten; im einzelnen ergeben sich für die in Betracht zu ziehenden Fasermaterialien folgende Bewertungen:

Glasfasern

Anfang der 60er Jahre wurden die Untersuchungen zur Verstärkung von Zement mit Glasfasern vorangetrieben. Als grösste Schwierigkeit stellte sich dabei die mangelnde Alkalibeständigkeit handelsüblicher Glasfasern heraus. E-Glasfasern verlieren schon nach relativ kurzer Zeit an Festigkeit, während alkalibeständige Glasfasern auch nach langer Zeit noch eine Restfestigkeit von 1000 N/mm² aufweisen. Weitere Massnahmen zur Erhöhung der Beständigkeit liegen in der Oberflächenbeschichtung.

Stahldrähte

Bei Stahldrähten ist die Verträglichkeit mit Zement recht gut, vor allem wenn rostfreie Stähle eingesetzt werden. Hier können sich sogar durch die gute Resistenz eher Probleme der Haftung ergeben, so dass Oberflächenbehandlung bzw. Oberflächenstrukturierung in Betracht gezogen werden müssen. Bei niedrig legierten Stählen findet Korrosion statt, wenn die Matrix Risse bekommt und deren Alkalität durch Karbonisierung zurückgeht.

Kohlenstoffasern

Kohlenstoffasern zeichnen sich im Gegensatz zu Glasfasern durch überragende chemische Beständigkeit aus. Es wurde experimentell nachgewiesen, dass auch nach mehrjähriger Auslagerung des Verbundwerkstoffs unter Freibewitterung praktisch keine Festigkeitsreduzierung der Fasern eintritt. Somit könnten zumindest die billigen Fasern aus Teer in Zukunft in Europa Bedeutung für die Verstärkung von Zement erlangen, wie es in Japan schon heute der Fall ist. Von seiten der Haftung treten durch das inerte Verhalten gewisse Probleme auf, anderseits bieten die dünnen Fasern genügend Oberfläche für die mechanische Verankerung.

Kunststoffasern sind in bezug auf chemische Verträglichkeit durchaus für die Einlagerung in Zement geeignet. Nachteilig ist, wie bereits an anderer Stelle erwähnt, der geringe E-Modul, der z.T. deutlich unter dem Wert für Zementstein liegt, so dass keine nennenswerte Festigkeitssteigerung, sondern nur risshemmende Wirkung erwartet werden kann. Dies ist jedoch für einige Anwendungen durchaus erwünscht, zumal als Nebeneffekt eine «Duktilisierung» der spröden Matrix auftritt.

Adresse des Verfassers: Dr. *Karl-Heinz Grünthaler*, Battelle-Institut e.V., Frankfurt/M.

Polyacrylnitril-Faserbeton

In den letzten Jahren wurde eine hochfeste Acrylfaser für technische Anwendungsgebiete entwickelt. Im folgenden werden typische Kennwerte von Mörtel und Beton beschrieben, die durch Zugabe einer Polyacrylnitrilfaser erreicht werden. Die beschriebenen Untersuchungen umfassen das Druck- und Biegezugverhalten, die Rissentwicklung bei behindertem Schwinden und die Frost-Tausalz-Beständigkeit. Zur Festlegung der erforderlichen Faserlänge werden Ausziehversuche an Einzelfasern durchgeführt. Ausgehend von den positiven Eigenschaftsveränderungen werden abschliessend mögliche Anwendungsgebiete diskutiert.

In jüngster Zeit werden mehr und mehr synthetische Fasern zur Asbestsubstitution eingesetzt. Dies gilt für die verschiedensten Anwendungsbereiche wie beispielsweise für Faserzement-Produkte, Brems- und Kupplungsbeläge, Filtermedien, Dichtungen, Packungen usw.

VON HELFRIED HÄHNE, KELHEIM

Ausgehend von dem für textile Polyacrylnitril-Fasern eingesetzten copolymeren Rohstoff wurde durch chemische und verfahrenstechnische Modifizierung eine homopolymere, hochfeste Acrylfaser entwickelt. Im Rahmen der Weiterführung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurde versucht, weitere Fasertypen mit spezifischen Eigenschaften für spezielle Anwendungen herzustellen.

Im folgenden werden Untersuchungen beschrieben, die sich auf die Verwendung in Mörtel und Beton beschränken. Zunächst werden die Eigenschaften der Faser und die untersuchten Mischungen vorgestellt. Im zweiten Schritt werden Testergebnisse dokumentiert. Schliesslich folgen eine Auflistung möglicher Anwendungen und eine Diskussion der geplanten zukünftigen Untersuchungen.

Fasereigenschaften

Aufgrund ihrer molekularen und geometrischen Struktur neigen die neu entwickelten Fasern nicht zum Aufspleissen in nadelförmige Einzelfibrillen. Ein lungengängiger Feinstaub kann – im Gegensatz zu Asbest – daher weder

Typen-Bezeichnung	DOLANIT 10		DOLANIT VF 11		
Faser-Durchmesser (µm)	13	18	52	75	104
Schnittlänge (mm)	6 und 12		6 bis 24		
Reißfestigkeit (N/mm²)	900 - 1000		590 - 710	410 - 530	
Reißdehnung (%)	8 - 11		6 - 9	6 - 9	
Anfangsmodul (N/mm²)	17000-19500		16000-18300	14200-16500	

Tabelle 1. Dolanit®-Typen für zementgebundene Matrizes

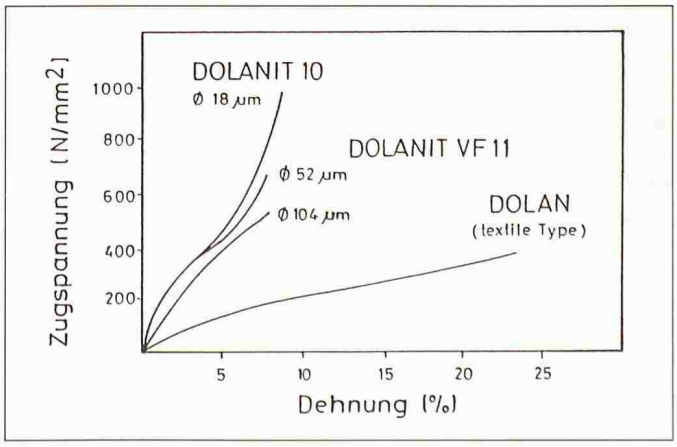

Bild 1. Spannungs-Dehnungs-Diagramm