

Schlagfestigkeit von faserbewehrtem Beton

Von Justus Bonzel, Düsseldorf, und Jürgen Dahms, Eckernförde

Übersicht

Bei dynamischer Beanspruchung, wie durch wechselnde, stoßartige oder sich häufig wiederholende Lasten, ist die von Baustoffen beliebig oft aufnehmbare Lasthöhe in der Regel deutlich geringer als bei einer dauernden Beanspruchung durch vorwiegend ruhende Lasten. Da für bestimmte Anwendungsfälle, wie z. B. für Rammpfähle, Dalben, Eisenbahnschwellen, Kranbahnträger, Maschinenfundamente und Schutzräume, eine große dynamische Belastbarkeit vorteilhaft ist, wurde der Frage nachgegangen, ob und in welchem Maße sie durch Faserzusätze zum Frischbeton verbessert werden kann. Zur Klärung dieser Frage wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie in den Jahren 1974 bis 1978 umfangreiche Versuche durchgeführt.

Die Versuche ergaben, daß durch die Zugabe von Stahlfasern zwar die Druck- und Zugfestigkeit nur geringfügig oder nicht, dagegen die Schlagfestigkeit und das Arbeitsvermögen des Betons deutlich verbessert wurden. Für ausreichende Frischbetonverarbeitbarkeit und verbessertes Festbetonverhalten sollte der Gehalt an Stahlfasern etwa 2 Vol.-% nicht unter- und etwa 3 Vol.-% nicht überschreiten. Die Ergebnisse von lediglich orientierenden Versuchen mit anderen Fasern weisen darauf hin, daß das Festbetonverhalten mit geeigneten Glasfasern ebenfalls, mit den einbezogenen Kunststofffasern jedoch nicht wesentlich verbessert werden kann. Die sachgerechte Herstellung von Faserbeton setzt spezielle Erfahrungen mit diesem Baustoff voraus.

1. Allgemeines

Betonbauteile werden in der Regel vorwiegend durch ruhende Lasten, in zahlreichen Fällen jedoch auch dynamisch durch wechselnde, stoßende oder sich häufig wiederholende Lasten beansprucht. Bei einer solchen dynamischen Beanspruchung ist die von den Baustoffen beliebig oft aufnehmbare Lasthöhe in der Regel deutlich geringer als bei dauernder Beanspruchung durch vorwiegend ruhende Lasten. Eine große dynamische Belastbarkeit des Betons, wie für die Aufnahme stoßartig wirkender Lasten, kann für eine Reihe von Anwendungsfällen, wie z. B. für Rammpfähle, Dalben, Eisenbahnschwellen, Kranbahnträger, Maschinenfundamente, Treppentore, Reaktordruckbehälter und jede Art von Schutzräumen, von Interesse sein.

Über Herstellung, Eigenschaften und Anwendung von Faserbeton sowie sein Tragverhalten wurde verschiedentlich berichtet, siehe u. a. [1 bis 8]. In der Literatur finden sich auch Hinweise auf eine Verbesserung der Widerstandsfähigkeit des Betons gegen dynamische bzw. stoßartige Belastungen durch die Zugabe von Fasern, siehe u. a. [9 bis 11]. Da die darüber vorliegenden Erfahrungen jedoch noch sehr lückenhaft waren und frühere Untersuchungen gezeigt hatten [12], daß der Widerstand von Beton gegen stoßartige Beanspruchungen mit Hilfe der Schlagfestigkeit beurteilt werden kann, wurden in den Jahren 1974 bis 1978 mit finanzieller Unterstützung durch die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), Köln, im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, umfangreiche Untersuchungen über die Schlagfestigkeit von Faserbeton durchgeführt. Über einige Ergebnisse dieser Untersuchungen wurde bereits in [7] berichtet.*

2. Art und Umfang der Untersuchungen

Mit den in Abschnitt 1 genannten Untersuchungen sollte den Fragen nachgegangen werden, ob und wie mit einem Faserzusatz die Schlagfestigkeit von Beton deutlich verbessert werden kann, ohne die Frischbeton- und andere Festbetoneigenschaften wesentlich zu beeinträchtigen. Dazu war in Vorversuchen zunächst abzuklären, welche Fasergehalte dazu gegebenenfalls mindestens erforderlich sind, ab welchen Fasergehalten der Frischbeton nicht mehr ausreichend verarbeitbar ist und wie sachgerechter Faserbeton zusammengesetzt sein muß. In den Vorversuchen war außerdem das Prüfverfahren für die Ermittlung der Schlagfestigkeit von Beton so zu optimieren, daß damit die Schlagfestigkeit sowohl von Faserbeton als auch von Beton ohne Fasern vergleichend geprüft und beurteilt werden konnte.

Mit den auf diese Vorversuche aufbauenden Hauptversuchen wurden anschließend der Einfluß des Gehalts an Stahlfasern (Serie 1), der Einfluß von Form und Abmessungen der Stahlfasern (Serie 2) und orientierend der Einfluß der Faserart (Serie 3) auf die Schlagfestigkeit untersucht. Die Versuche der Serien 1 und 2 wurden nur mit Stahlfasern durchgeführt, weil nur von ihnen für die Verbesserung der Festbetoneigenschaften von Beton mit mindestens 16 mm Größtkorn nach dem derzeitigen Stand der Erkenntnisse eine große Wirksamkeit zu erwarten war. Um dabei auch einen Anhalt für die derzeitigen Beeinflussungsmöglichkeiten der Betoneigenschaften durch sehr verschiedene Fasern zu bekommen, wurden in die Versuche über den Einfluß der Faserart (Serie 3) außer verschiedenen Stahlfasern lediglich für orientierende Untersuchungen auch Polypropylenfasern und Glasfasern mit hohem Alkaliwiderstand einbezogen.

Zur Beurteilung des durch Fasern veränderten Betonverhaltens und zum Aufzeigen von Grenzen der Anwendbarkeit von Faserzusätzen zum Beton wurden bei den Hauptversuchen die Betonzusammen-

*) Bei der Auswertung der Ergebnisse der Hauptversuche hat Herr Dipl.-Ing. J. Krell mitgearbeitet.

setzung variiert und außer der Schlagfestigkeit auch die wesentlichsten Frischbetoneigenschaften und andere zur Beurteilung des Tragverhaltens wichtige Festbetoneigenschaften bestimmt.

3. Vorversuche

Den Erläuterungen in Abschnitt 2 entsprechend wurden Vorversuche für die Prüfung der Schlagfestigkeit sowie für die für Faserbeton mit hoher Schlagfestigkeit geeignete Betonzusammensetzung und geeigneten Fasergehalte durchgeführt.

3.1 Prüfung der Schlagfestigkeit

Die Schlagfestigkeit sollte mit dem in [12] beschriebenen Verfahren geprüft werden, dessen Ergebnisse aufgrund früherer Versuche und Überlegungen eine qualitative Aussage über das Verhalten von Betonbauteilen gegenüber Schlagbeanspruchungen in der Praxis gestatten. Jedoch mußte mit Hilfe von Vorversuchen die für die hier zu untersuchenden Betone geeignete Fallhöhe für den 50 kg schweren Fallbären des Fallwerkes festgelegt werden. Angestrebt wurde eine Fallhöhe, mit der die Beanspruchung durch wiederholte stoßartige Belastung, wie z. B. bei Rammpfählen, ausreichend nachgeahmt wird und bei der die bis zum Bruch erforderlichen Schlagzahlen für den Beton ohne Fasern nicht zu klein und für den Faserbeton nicht zu groß waren. Die Versuche wurden an den Betonen nach Tafel 1 mit Fallhöhen von 80, 100, 130 und 150 cm durchgeführt. Aufgrund der Versuchsergebnisse (siehe Tafel 1) wurde für die Prüfung der Schlagfestigkeit bei den weiteren Versuchen eine Fallhöhe von 100 cm festgelegt.

Tafel 1 Vorversuche zur Ermittlung einer geeigneten Fallhöhe beim Schlagversuch (PZ 35 F, Z = 400 kg/m³; w/z = 0,42)

Beton	Faser-		Rhein-	Ver-	Druck-	Spalt-	Betonalter 28 Tage							
	Gehalt	Nr. nach Tafel 3					kies- sand Sieb- linie	dich- tungs- maß	festig- keit N/mm ²	zug- festig- keit N/mm ²	Schlagfestigkeit Schlaganzahl bis Bruch bei Fallhöhe in cm			
											80	100	130	150
1	—		A/B 16	1,21	49,7	—	82	26	10	6				
2	2	1	A 8	1,57	57,8	5,8	1073	432	64	46				
3	2	1	A 16	1,50	42,5	—	316	51	18	11				
4	1	1	A/B 16	1,35	52,4	4,3	252	75	22	17				
5	1,5	1	A/B 16	1,49	54,2	5,6	951	201	61	27				
6	2,0	1	A/B 16	1,63	59,3	6,3	1425	219	93	53				
7	2,5	1	A/B 16	1,61	61,0	6,5	2167	058	79	40				
8	2,5	1	B 16	1,87	53,2	7,7	>10000	231	157	121				
9	2,0	2	B 16	1,87	53,1	6,0	227	98	67	36				
10	2,0	3	B 16	1,70	54,6	5,9	333	76	52	19				
11	0,2	11	B 16	1,48	48,5	3,1	30	14	5	4				
12	0,4	11	B 16	1,56	47,8	3,0	20	17	—	5				

3.2 Geeignete Zusammensetzung für Faserbeton

Bei den Vorversuchen zur Ermittlung der für Faserbeton hoher Schlagfestigkeit geeigneten Betonzusammensetzung und Fasergehalte wurde von einem Beton ohne Fasern mit einem Zementgehalt von 400 kg/m³, einem w/z-Wert von 0,42 und einem Rheinkies-sandgemisch mit der Sieblinie A/B 16 nach DIN 1045 (siehe Tafel 2, Beton 1) ausgegangen, der bei den Versuchen nach [12] eine vergleichsweise hohe Schlagfestigkeit aufwies. Diesem Beton wurden unterschiedliche Gehalte überwiegend der Faser 1, aber auch der Fasern 2 und 3 nach Tafel 3 zugegeben. Zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons mit höheren für die Festbetoneigenschaften wirksamen Fasergehalten wurden Größtkorn und Kornzusammensetzung des Zuschlags variiert und der Zementgehalt bis auf 500 kg/m³ vergrößert. Betonzusammensetzungen, Fasergehalte und Ergebnisse dieser Vorversuche gehen aus Tafel 2 hervor.

Aufgrund dieser Versuche wurde für die Faserbetone der Hauptversuche eine Betonzusammensetzung mit einem Zementgehalt von 400 kg/m³, einem w/z-Wert von 0,42 und einem Rheinkies-sandgemisch mit der Sieblinie B 16 nach DIN 1045 festgelegt. Für einen ausreichend verarbeitbaren Faserbeton wurde die Konsistenz auf ein Verdichtungsmaß nach DIN 1048 Teil 1 von höchstens 1,70 begrenzt. In Fällen nicht ausreichender Verarbeitbarkeit sollte die Zementleimmenge durch Anheben des Zementgehalts auf 430 kg/m³

Tafel 2 Vorversuche zur Ermittlung einer geeigneten Betonzusammensetzung (PZ 35 F; w/z = 0,42)

Beton	Faser- Gehalt	Nr. nach Tafel 3	Ze- ment- gehalt	Rhein- kies- sand Sieb- linie	Ver- dich- tungs- maß	Betonalter 28 Tage		
						Druck- festig- keit	Spalt- zug- festig- keit	Schlag- festigkeit (Fallhöhe 100 cm) Schlaganzahl bis Bruch
	Vol.-%		kg/m ³			N/mm ²	N/mm ²	
1	—		400	A/B 16	1,21	49,7	—	26
2	1	1	400	A/B 16	1,35	52,4	4,3	75
3	1,5	1	400	A/B 16	1,49	54,2	5,6	201
4	2,0	1	400	A/B 16	1,63	59,3	6,3	219
5	2,5	1	400	A/B 16	1,61	61,0	6,5	1058
6	2,0	1	400	A 8	1,57	57,8	5,8	432
7	2,0	1	450	B 8	1,72	54,4	5,7	158
8	2,0	1	400	A 16	1,50	42,5	—	51
9	2,0	1	400	B 16	1,72	63,5	6,6	378
10	3,5	1	450	B 16	1,90	52,2	7,5	142
11	2,5	1	500	B 16	1,61	59,4	6,0	321
12	3,5	1	500	B 16	1,88	67,0	8,8	472
13	3,0	1	500	B 16	1,73	65,3	7,1	660
14	2,0	2	400	B 16	1,87	53,1	6,0	98
15	2,0	3	400	B 16	1,70	54,6	5,9	76
16	2,0	3	400	B 16	1,78	53,6	—	96
17	3,5	3	400	B 16	1,95	46,5	5,0	76
18	3,5	3	450	B 16	2,00	54,4	—	91
19	1,5	3	450	B 16	1,44	53,7	—	102
21	2,5	3	450	B 16	1,57	60,2	—	246

Tafel 3 Fasern

Nr.	Her- steller	Art	Abmessungen der Einzelfasern in mm		Form	Sonstiges
			Durch- messer	Länge		
1	E	Stahl	0,4	25	glatt	Einzelfaser mit Messing überzogen
2	A	Stahl	0,3	25	glatt	Einzelfaser
3	A	Stahl	0,4	25	glatt	Einzelfaser
4	B	Stahl	0,3	25	glatt	Einzelfaser
5	B	Stahl	0,4	30	glatt	Einzelfaser
6	B	Stahl	0,4	30	abgewinkelt	Einzelfaser
7	C	Stahl	0,4	25	gewellt	Einzelfaser
8	B	Stahl	0,4	30	abgewinkelt	zu Faserbündel verklebte Einzelfasern
9	B	Stahl	0,4	40	abgewinkelt	zu Faserbündel verklebte Einzelfasern
10	B	Stahl	0,5	50	abgewinkelt	zu Faserbündel verklebte Einzelfasern
11	F	Kunststoff Polypropylen	0,05	50	fibrilliert	Roving aus Einzelfasern
12	D	Glas (Cemfil)	0,01	50	glatt	Roving aus Einzelfasern

vergrößert werden. Bei den lediglich orientierenden Versuchen mit Glasfasern sollte für die Betonzusammensetzung den Empfehlungen des Faserherstellers gefolgt werden.

Die aufgrund der Ergebnisse der Vorversuche sehr wirksame Stahlfaser 1 (siehe Tafel 3) konnte in die Hauptversuche nicht einbezogen werden, weil zu diesem Zeitpunkt die Produktion dieser Faser eingestellt worden war.

4. Versuchsdurchführung der Hauptversuche

4.1 Ausgangsstoffe

Die Betone wurden mit einem Portlandzement Z 35 F nach DIN 1164, Werk A, mit einer mittleren Druckfestigkeit von 23 N/mm² nach 2 Tagen und von 49 N/mm² nach 28 Tagen sowie mit einer mittleren spezifischen Oberfläche von 3040 cm²/g hergestellt. Als Zuschlag wurden Rheinkies sand nach DIN 4226 Teil 1 aus dem Raum Düsseldorf in den Korngruppen 0/2, 1/2, 2/8 und 8/16 mm aus mehreren Lieferungen sowie ein Quarzsand 0/0,2 mm aus dem Raum Köln und als Zugabewasser Düsseldorfer Leitungswasser verwendet.

Die Untersuchungen über den Einfluß des Gehalts an Stahlfasern (Serie 1) wurden mit glatten Stahlfasern eines Herstellers (Faser 3 nach Tafel 3) durchgeführt. In die Untersuchungen über den Einfluß von Form und Abmessungen der Stahlfasern (Serie 2) wurden die Fasern 2 bis 10 der Tafel 3 einbezogen. Sie unterschieden sich

(siehe Tafel 3) durch das Herstellwerk, die Faserabmessungen (Durchmesser zwischen 0,30 und 0,50 mm sowie Länge zwischen 25 mm und 50 mm), die Form der Einzelfaser (glatt, gewellt und mit Endhaken) und die Lieferform (Einzelfasern und zu Faserbündeln verklebte Fasern). Im Rahmen der Versuche über den Einfluß der Faserart (Versuchsserie 3) wurden zum Vergleich mit den Ergebnissen über Stahlfaserbeton fibrillierte, zu Rovings verarbeitete Polypropylenfasern (Faser 11 nach Tafel 3) und glatte, zu Rovings verarbeitete Glasfasern mit hohem Alkaliwiderstand (Faser 12 nach Tafel 3) verwendet. Sowohl die Kunststofffasern als auch die Glasfasern wurden im Ausland hergestellt und in der Bundesrepublik Deutschland von Lizenznehmern vertrieben.

4.2 Zusammensetzung und Herstellung des Betons und der Prüfkörper

Auf der Grundlage der Vorversuche (siehe Abschnitt 3.2) wurden die Betone so zusammengesetzt und die Fasern so zugegeben, daß die einzelnen Fasern möglichst gleichmäßig im Frischbeton verteilt wurden, daß eine Faserkonzentration (eine sogenannte „Igelbildung“) weitgehend vermieden wurde und daß sich die Betone noch ausreichend verdichten ließen. Bei der Betonzusammensetzung des Glasfaserbetons wurde den Empfehlungen des Faserherstellers gefolgt. Die Betonzusammensetzungen gehen aus Tafel 4 hervor. Bei den Stahlfaserbetonen und beim Beton mit Polypropylenfasern wurde ein Kiessandgemisch 0/16 mm mit einer Sieblinie B 16 nach DIN 1045 verwendet, für den Glasfaserbeton ein Kiessandgemisch 0/8 mm mit einer Sieblinie B 8 nach DIN 1045.

Die Betone für die Untersuchung über den Einfluß des Fasergehalts (Serie 1) wurden mit Gehalten von 0, 1, 2, 2,5 und 3 Vol.-% (bezogen auf das Betonvolumen) der Faser 3 (Tafel 3) hergestellt. Bei den Untersuchungen über den Einfluß von Form und Abmessungen der Stahlfasern (Serie 2) lag der Gehalt der Fasern 2 bis 10 den Empfehlungen der Stahlfaserhersteller entsprechend jeweils zwischen 1,5 und 2,5 Vol.-% (bezogen auf das Betonvolumen). Die Betone für die Untersuchungen über den Einfluß der Faserart (Serie 3) enthielten 1 Vol.-% Polypropylenfasern (Beton 15 nach Tafel 4) bzw. 3 Vol.-% Glasfasern (Beton 16 nach Tafel 4).

Alle Betonausgangsstoffe wurden gewichtsmäßig abgemessen und zugegeben, alle Frischbetone in Chargen von 150 l in einem 250 l-Tellermischer gemischt. Zunächst wurden Zement, Zuschlag und Wasser 1,5 Minuten vorgemischt. Anschließend wurden die Stahlfasern, die als Einzelfasern vorlagen, über ein Rundlochsieb 31,5 mm DIN 4187 Teil 1 während einer Minute in den laufenden Mischer gegeben. Die zu Faserbündeln verklebten Stahlfasern wurden nach dem Vormischen ohne Sieb und ohne besondere Maßnahmen in den laufenden Mischer gegeben. Nach Zugabe aller Fasern wurde jeder Beton noch 0,5 Minuten weiter gemischt. Beim Beton mit Kunststofffasern und beim Beton mit Glasfasern wurden zunächst Zement und Zuschlag in den stehenden Mischer und danach die Fasern während 0,5 Minuten in den laufenden Mischer gegeben. Anschließend wurde das Zugabewasser zugegeben und der Beton noch 2 Minuten gemischt.

Für die Prüfung der Schlagfestigkeit, der Druckfestigkeit, der Zugfestigkeit und des Druck-Elastizitätsmoduls wurden Betonzylinder mit 15 cm Durchmesser und 30 cm Höhe nach DIN 1048 Teil 1 hergestellt, für die Prüfung des Kriechens und des Schwindens Betonzylinder mit 15 cm Durchmesser und 60 cm Höhe in Anlehnung an DIN 1048 Teil 1 und bei den Betonen 1 bis 5 (Tafel 4) für die Prüfung der 28-Tage-Druckfestigkeit sowie zur Einstufung in die Betonfestigkeitsklassen außerdem 20-cm-Betonwürfel nach DIN 1048 Teil 1.

Tafel 4 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften der Hauptversuche

Beton	Faser		Betonzusammensetzung				Zement- gehalt kg/m ³	Roh- dichte kg/dm ³	Ver- dich- tungs- maß	Luft- gehalt Vol.-%	
	Gehalt Vol.-%	Nr. nach Tafel 3	Zement	Zu- schlag	Gew.-Teil: Fasern	Wasser					
1	0		1	4,51	0	0,42	400	2,39	1,36	0,3	
2	1	3	1	4,38	0,20	0,42		2,46	1,46	0	
3	2		1	4,31	0,40	0,42		2,50	1,61	0,1	
4	2,5		1	4,28	0,50	0,42		2,52	1,71	0,3	
5	3		1	4,25	0,60	0,42		2,55	1,78	0	
6	1,5		9	1	3,90	0,27	0,42	430	2,47	1,55	0,1
7		10	1	3,90	0,27	0,42	2,47		1,65	0	
8	2,0	2	1	3,87	0,37	0,42	2,48		1,70	0,2	
9		5	1	3,87	0,37	0,42	2,50		1,68	0	
10		6	1	3,87	0,37	0,42	2,49		1,65	0	
11		7	1	3,84	0,46	0,42	2,51		1,60	0	
12	2,5	8	1	3,84	0,46	0,42	2,53		1,83	0	
13		3	1	4,28	0,50	0,42	400		2,49	1,67	1,5
14		4	1	4,28	0,50	0,42			2,52	1,61	0,3
15	1	11	1	4,38	0,03	0,42	400		2,38	1,65	0
16	3	12	1	1	0,10	0,50	850	2,16	< 1,04	0	

Nach dem Einfüllen des Betons wurden die Prüfkörper auf einem Rütteltisch (rd. 3 000 U/min und 1 mm Schwingungsbreite) je nach Fasergehalt, Verdichtungswilligkeit des Betons und Prüfkörperabmessungen zwischen 20 und 100 s lang gerüttelt und praktisch vollständig verdichtet, die Betone 1 bis 15 nach Tafel 4 mit einer Auflast von 0,42 N/cm² bei Zylindern und von 0,14 N/cm² bei Würfeln. Nach der Herstellung wurden alle Prüfkörper bis zur Prüfung nach DIN 1048 Teil 1 gelagert, die Prüfkörper für die Schlagfestigkeit, für das Kriechen und für das Schwinden wie die Prüfkörper für die Druckfestigkeit und die Zugfestigkeitsprüfkörper wie die Prüfkörper für die Spaltzugfestigkeit.

4.3 Prüfung des Betons

4.3.1 Frischbetoneigenschaften

Am Frischbeton wurde die Beschaffenheit augenscheinlich beurteilt, der Luftgehalt mit Hilfe der nachträglich durchgeführten Stoffraumrechnung bestimmt und die Rohdichte sowie als Konsistenzmaß das Verdichtungsmaß nach DIN 1048 Teil 1 ermittelt. Der Stoffraumrechnung lagen das Mengenverhältnis bei Zugabe der Ausgangsstoffe in den Mischer und die ermittelte Frischbetonroh-dichte zugrunde. Bei der augenscheinlichen Beurteilung wiesen die Betone eine homogene Beschaffenheit auf, eine sogenannte „Igelbildung“ wurde weitgehend vermieden. Die zahlenmäßigen Ergebnisse der Frischbetonuntersuchungen sind ebenfalls in Tafel 4 zusammengestellt.

4.3.2 Festbetoneigenschaften

Am Festbeton vorwiegend der Betone 1 bis 15 nach Tafel 4 wurden im Alter von 28 Tagen die Druckfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit, die Zugfestigkeit, der Druck-Elastizitätsmodul, die Schlagfestigkeit und Verformungen infolge Belastung bei den Kurzzeit-Druckversuchen und bei den Schlagversuchen sowie bei den Betonen 1 bis 5 nach Tafel 4 das Kriechen unter konstanter Druckbelastung und das Schwinden während des Kriechens ermittelt. Bei den lediglich orientierenden Versuchen mit Beton 16 (Glasfaserbeton) wurden nur die Druckfestigkeit und die Schlagfestigkeit bestimmt.

Die Druckfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit und der Druck-Elastizitätsmodul wurden an Betonzylindern 15/30 cm – die Druckfestigkeit der Betone 1 bis 5 zusätzlich an 20-cm-Würfeln – nach DIN 1048 Teil 1 ermittelt. Die Druckfestigkeit und die Spaltzugfestigkeit wurden außerdem an Betonzylindern 15/30 cm mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit von 2‰ je Minute (Steuerung über den Druckplattenabstand mit Hilfe von 3 Induktivgebern) bestimmt. Die Zugfestigkeit der Betone 1 bis 11 sowie 13 und 15 wurde an Betonzylindern 15/30 cm im direkten Zugversuch nach [13] mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 0,05 N/mm² je Minute ermittelt. Die Schlagfestigkeit wurde an Betonzylindern 15/30 cm in einem Fallwerk mit einem 50 kg schweren Fallbären, einer Fallhöhe von 100 cm und einer Schlagfolge im Abstand von etwa 2,5 Sekunden nach [12] geprüft. Als Schlagfestigkeit wurde dabei die Bruchschlagzahl, d. h. die Anzahl der Schläge bis zum völligen Bruch des Prüfkörpers, bestimmt.

An Verformungen infolge Belastung wurden bei den Kurzzeit-Druckversuchen mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit und bei den Schlagversuchen die Längsstauchung und die Querdehnung der Betonzylinder 15/30 cm mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen bestimmt. Die Kennwerte für die Steuerung dieser Versuche, die jeweils vorhandene Belastung und die dabei erhaltenen Verformungsergebnisse wurden nach entsprechender Verstärkung auf Lochstreifen registriert und mit einem Kleinrechner ausgewertet. Die bei den Schlagversuchen der Verformung zuzuordnende Last wurde mit einer zwischen Rammhaube und Betonzylinder angeordneten Kraftmeßdose, siehe [12], bestimmt. Bei den Kurzzeit-Druckversuchen wurden die maximale Volumenverringering mit Hilfe der

Längs- und Querverformungen und außerdem die Fläche unterhalb des Druckspannungs-Längsstauchungs-Diagramms bis zum Wiederabfall der Druckspannung auf 25 % der Druckfestigkeit errechnet.

Das Kriechen der Betone 1 bis 5 nach Tafel 4 bei konstanter Druckbelastung wurde an 2 Zylindern 15/60 cm je Beton während dreijähriger Lagerung im klimatisierten Raum bei 20° C und 65 % relativer Luftfeuchte nach [14] bestimmt. Die Prüfkörper wurden dazu im Alter von 28 Tagen mit einem Drittel der 28-Tage-Druckfestigkeit der nach DIN 1048 Teil 1 geprüften Betonzylinder 15/30 cm belastet. Parallel zum Kriechen wurde das Schwinden ebenfalls an Betonzylindern 15/60 cm ermittelt. Die Verformungen des Kriech- und der Schwindprüfkörper wurden an 2 gegenüberliegenden Stellen sowohl mit Setzdehnmessern (Meßlänge 40 cm) als auch mit mittig angeordneten, 15 cm langen Dehnungsmeßstreifen gemessen. Das Kriechen wurde als Differenz der beim Kriechversuch ermittelten Gesamtverformung, der elastischen Verformung und des

Tafel 5 Festbetoneigenschaften der Hauptversuche im Alter von 28 Tagen

Beton nach Tafel 4	Faser		Druckfestigk. 20-cm- Würfel nach DIN 1048 Teil 1	Zy- linder nach DIN 1048 Teil 1	N/mm ² Ø 15 cm; h 30 cm gleiche Verform- - Ge- schwind.	Spaltzugfestigk.- N/mm ²		Zug- festig- keit N/mm ²	Schlag- festig- keit (Mittel von 8 Ver- suchen) Schlag- anzahl bis Bruch	Druck- E- Modul 10 ⁴ N/mm ²
	Gehalt	Nr. nach Tafel 3				nach DIN 1048 Teil 1	gleich- Verform- - Ge- schwind.			
1	0		63,0	48,1	48,0	3,8	—	3,1	27	3,70
2	1	3	67,3	56,3	51,9	4,0	3,9	3,3	127	3,90
3	2		77,6	60,7	57,3	6,3	5,7	3,5	216	3,55
4	2,5		75,9	64,1	64,1	7,3	6,3	3,3	490	3,34
5	3		76,6	69,5	63,6	8,1	6,8	3,2	559	3,37
6	1,5		9	59,9	51,6	6,0	6,0	3,1	130	3,16
7		10	56,7	54,7	6,3	5,8	3,0	132	—	
8		2	60,5	60,8	6,3	5,2	2,8	177	2,79	
9	2,0	5	64,2	55,7	6,5	5,9	3,3	158	3,29	
10		6	60,9	55,8	7,4	7,1	3,4	256	3,19	
11		7	60,7	57,3	6,9	6,5	3,4	172	3,36	
12	2,5	8	61,0	54,6	6,9	7,0	—	263	2,59	
13		3	64,9	59,3	6,5	5,7	3,0	396	3,24	
14		4	61,4	57,4	6,2	6,1	—	155	3,26	
15	1	11	58,0	45,3	41,7	3,9	—	2,9	27	2,96
16	3	12		60,2	—	—	—	—	306	—

Schwindens ermittelt. Die auf die Prüfspannung bezogenen Kriechwerte wurden errechnet.

Die Mittelwerte der Ergebnisse der Prüfung auf Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, Zugfestigkeit, Schlagfestigkeit und Druck-Elastizitätsmodul sind in Tafel 5 zusammengestellt. Für die Betone 1 bis 5 nach Tafel 4 sind Einzelwerte der Schlagfestigkeit sowie die daraus ermittelten Standardabweichungen und Variationskoeffizienten in Tafel 6 enthalten. Die Last und die Verformungen der Betone 1, 2, 5 und 16 nach Tafel 4 beim Schlagversuch sowie ihre Veränderung mit zunehmender Schlagzahl sind als Beispiel für das Verhalten der geprüften Betone bei schlagartiger Beanspruchung in den Bildern 1 bis 4 (siehe Abschnitt 5.2.5) aufgetragen. Die Verformungen beim Kurzzeit-Druckversuch und die daraus errechneten Werte sind in Tafel 7 zusammengestellt. Die Verformungen sind in Tafel 7 sowie in den Bildern 5 bis 7 in μ -Dehnung (μD) angegeben (μ entspricht tausendstel Millimeter je Meter).

Tafel 6 Einzelergebnisse der Schlagfestigkeit der Betone (Bruchschlagzahl nach Abschn. 4.3.2) 1 bis 5 nach Tafel 4

Lfd. Nr. des Probekörpers	Schlagfestigkeit der Betone Nr.				
	1	2	3	4	5
1	34	154	121	549	564
2	35	84	126	613	516
3	39	156	264	354	313
4	23	113	172	284	465
5	17	198	241	293	284
6	27	108	304	721	540
7	16	86	191	351	1247
8	26	114	307	758	546
9	13	51	110	321	397
10	10	48	108	184	349
Mittelwert	24	111	194	443	522
Standard- abweichung	10	48	79	201	274
Variations- koeffizient %	42	43	41	45	53

5. Erörterung der Ergebnisse

5.1 Allgemeines

Bei der Erörterung der Untersuchungsergebnisse wurden die Ergebnisse der Vorversuche zur Erweiterung des Überblicks mit herangezogen, in die Auswertung in der Regel jedoch nicht, weil sie nur der Vorklärung bestimmter Fragen dienten (siehe Abschnitt 3), aber mit den Ergebnissen der Hauptversuche oft nicht voll vergleichbar waren. Die Erörterungen erstrecken sich überwiegend auf Stahlfaserbeton, da nur Stahlfaserbeton in größerem Umfang untersucht wurde.

Tafel 7 Verformungskennwerte beim Druckversuch mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit

Beton nach Tafel 4	Druckfestigkeit N/mm ²	Längsstauchung in μ -Dehng. bei ... % der Druckfestigk.								Querdehnung in μ -Dehnung				max. Volumenverring.		Fläche unterh. d. Kraftlängsstauchungskurve von 0 bis -25 % der Druckfestigkeit
										bei ... % der Druckfestigkeit		Belastung in % der Druckfestigkeit	max. Dehnung gemessen	$\frac{\Delta V}{V}$ in μ D	errechnet	
		30 %	50 %	80 %	100 %	- 80 %	- 50 %	- 25 %	30 %	50 %	80 %					
1	48	881	1223	1804	2566	3310	4030	5184	68	120	239	100	988	90	803	24 598
2	51	835	1190	1877	2965	5221	10021	18378	77	134	300	100	1426	85	754	89280
3	57	718	1153	2077	5036	12978	22562	43307	90	161	453	98	2548	77	808	246751
4	64	801	1298	2430	7185	16764	26808	46256	95	177	625	97	3188	72	911	313080
5	63	961	1514	3109	9197	19793	33029	55346	100	205	1031	93	3310	70	874	371930
8	60	964	1522	3018	8253	15902	22999	34378	106	220	1261	92	3192	65	816	233637
11	57	706	1141	2073	5317	11996	17316	27197	94	176	575	98	3237	73	777	171168
12	54	1130	1739	3751	10039	16810	27623	38946	109	270	2094	85	2692	57	785	234059
13	59	789	1304	2522	6594	11636	18305	31626	93	186	727	96	3231	72	947	194797
14	57	623	1071	2126	5469	10370	16419	28030	91	182	623	98	3299	75	849	168533
15	41	684	1070	1767	2816	4677	7605	14858	66	121	274	99	1824	87	849	57605

5.2 Betoneigenschaften

5.2.1 Frischbetoneigenschaften

Der Faserzusatz zum Beton beeinflusst von den Frischbetoneigenschaften im wesentlichen nur die Verarbeitbarkeit. Bei dafür geeignetem Frischbeton verbesserte er das Zusammenhaltevermögen, erschwerte jedoch in der Regel seine sachgerechte Verdichtung. Es zeigte sich auch, daß bei Faserbeton nicht ohne weiteres mit den bisherigen Erfahrungswerten von den üblichen Konsistenzmaßen, die auch bei Beton ohne Fasern die Verarbeitbarkeit nicht exakt beschreiben, sondern nur eine Hilfe bei ihrer Beurteilung darstellen, auf seine Verarbeitbarkeit geschlossen werden kann. Die Beurteilung der Frage, bis zu welchen Konsistenzmaßen der jeweilige Faserbeton noch sachgerecht verarbeitet werden kann, setzt daher entsprechende Erfahrungen mit diesem Beton voraus.

Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde die Verarbeitbarkeit augenscheinlich und mit Hilfe des Verdichtungsmaßes nach DIN 1048 Teil 1 beurteilt. Das Verdichtungsmaß lag bei den untersuchten Stahlfaserbetonen zwischen 1,35 und 2,00 (Vorversuche) sowie zwischen 1,46 und 1,83 (Hauptversuche), beim Beton mit Kunststofffasern zwischen 1,48 und 1,56 (Vorversuche) und bei 1,65 (Hauptversuche) und bei den dazugehörigen Nullbetonen (Beton ohne Fasern) bei 1,21 (Vorversuche) bzw. 1,36 (Hauptversuche). Es nahm bei sonst gleichem Beton mit wachsendem Fasergehalt sowie mit wachsender Faserlänge zu. Sinngemäß dürfte letzteres auch für Glasfaserbeton mit nicht überhöhtem Zementanteil gelten. Der nach Anweisung der Glasfaserhersteller hergestellte und hier lediglich orientierend untersuchte Glasfaserbeton hatte ein Verdichtungsmaß von 1,04. Er kann hier zum Vergleich aber nicht herangezogen werden, weil er eine völlig andere Zusammensetzung aufwies als die übrigen Betone der Hauptversuche.

Die Frischbeton-Rohdichte betrug bei den Stahlfaserbetonen der Hauptversuche je nach Faseranteil 2,46 bis 2,53 kg/dm³, beim Beton mit Kunststofffasern 2,38 kg/dm³ und beim entsprechenden Nullbeton (Beton ohne Fasern) 2,39 kg/dm³. Der nicht vergleichbare Glasfaserbeton wies eine Frischbeton-Rohdichte von 2,16 kg/dm³ auf. Der Luftgehalt des verdichteten Frischbetons lag – abgesehen von einer Ausnahme (1,5 Vol.-% beim Beton 13 nach Tafel 4) – unter 0,3 Vol.-%. Alle Betone der Hauptversuche waren praktisch vollständig verdichtet. Die Stahlfaserbetone waren bis zu einem Verdichtungsmaß von etwa 1,83 unter üblichen Laborbedingungen praktisch vollständig verdichtbar, erforderten jedoch ab einem Verdichtungsmaß von etwa 1,40 eine Verdichtung mit Auflast auf dem Rütteltisch.

5.2.2 Druckfestigkeit

Die 28-Tage-Druckfestigkeit der nach DIN 1048 Teil 1 hergestellten und untersuchten Betonzylinder 15/30 cm lag beim Stahlfaserbeton zwischen 42 und 67 N/mm² (Vorversuche) bzw. zwischen 56 und 70 N/mm² (Hauptversuche), beim Beton mit Kunststofffasern bei 48 N/mm² (Vorversuche) bzw. bei 45 N/mm² (Hauptversuche) und beim Nullbeton (Beton ohne Fasern) bei 50 N/mm² (Vorversuche) bzw. bei 48 N/mm² (Hauptversuche), siehe Tafeln 1, 2 und 5. Der nur

orientierend untersuchte und mit den vorgenannten Betonen nicht vergleichbare Glasfaserbeton wies bei dieser Prüfung im Rahmen der Hauptversuche eine 28-Tage-Druckfestigkeit von 60 N/mm² auf, sie lag damit im Druckfestigkeitsbereich der Stahlfaserbetone. Die zur Bestimmung der Betonfestigkeitsklasse nach DIN 1048 Teil 1 während der Hauptversuche geprüften 20-cm-Würfel der Betone 1 bis 5 und 15 nach Tafel 5 ergaben eine 28-Tage-Druckfestigkeit zwischen 67 und 78 N/mm² für den Stahlfaserbeton, von 58 N/mm² für den Beton mit Kunststofffasern und von 63 N/mm² für den Nullbeton. Sie war beim Stahlfaserbeton um 10 bis 28 %, beim Beton mit Kunststofffasern um 28 % und beim Nullbeton um 31 % größer als die der entsprechenden Betonzylinder nach DIN 1048 Teil 1. Die Druckfestigkeit der während der Hauptversuche parallel dazu mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit geprüften Zylinder 15/30 cm betrug mit Stahlfaserbeton 52 bis 64 N/mm², beim Beton mit Kunststofffasern 42 N/mm² und beim dazugehörigen Nullbeton 48 N/mm², siehe Tafel 5. Sie machte 86 bis 100 %, i. M. 93 %, der nach DIN 1048 Teil 1 an Betonzylindern 15/30 cm ermittelten Druckfestigkeit aus. Durch die Zugabe von Stahlfasern nahm die 28-Tage-Betondruckfestigkeit bis zu einem Fasergehalt von 3 Vol.-%, bezogen auf das Betonvolumen, mit wachsendem Fasergehalt zu, wenn der Beton dabei noch verarbeitbar und praktisch vollständig verdichtbar war. Die Festigkeitszunahme gegenüber dem Nullbeton betrug – beurteilt an den Betonzylindern nach DIN 1048 Teil 1 – etwa 17 % bei 1 Vol.-% Fasern, i. M. 21 % bei 1,5 Vol.-% Fasern, i. M. 28 % bei 2 Vol.-% Fasern, i. M. 30 % bei 2,5 Vol.-% Fasern und etwa 44 % bei 3 Vol.-% Fasern und war klein – gemessen an dem für Faserbeton erforderlichen Aufwand. Sie war bei den 20-cm-Würfeln nach DIN 1048 Teil 1 noch geringer und machte gegenüber dem Nullbeton beim Beton mit 1 Vol.-% Stahlfasern nur etwa 7 % und bei den Betonen mit 2, 2,5 und 3 Vol.-% Stahlfasern i. M. nur 22 % aus.

Der Einfluß von Abmessungen und Form der Stahlfasern auf die 28-Tage-Druckfestigkeit kann in Tafel 5 an den Betonen 3, 8, 9 und 10 mit einem Fasergehalt von 2 Vol.-% und Druckfestigkeiten von 61, 60, 64 und 61 kg N/mm², an den Betonen 4, 11, 12, 13 und 14 mit einem Fasergehalt von 2,5 Vol.-% und Druckfestigkeiten von 64, 61, 61, 65 und 61 N/mm² sowie an den Betonen 6 und 7 mit einem Fasergehalt von 1,5 Vol.-% und Druckfestigkeiten von 60 und 57 N/mm² betrachtet werden. Dabei entsteht der Eindruck, daß sich bei Beton mit 1,5 Vol.-% Fasern die abgewinkelte und gebündelte Faser 9 mehr als die abgewinkelte und gebündelte Faser 10, beim Beton mit 2 Vol.-% Fasern die glatte Faser 5 mehr als die glatten Fasern 2 und 3 und die abgewinkelte Faser 6 sowie beim Beton mit 2,5 Vol.-% Fasern die glatte Faser 3 mehr als die glatte Faser 4, die gewellte Faser 7 und die abgewinkelte, gebündelte Faser 8 auswirken. Die dabei festgestellten Unterschiede dürfen jedoch nicht überbewertet werden, weil sie gering sind und im Bereich möglicher Streuungen liegen und weil für eine gesicherte Aussage mehr Versuche notwendig sind.

Die Druckfestigkeit des Betons mit Kunststofffasern war mit 92 bis 98 % der Festigkeit des Nullbetons durchweg geringfügig kleiner als die des Nullbetons, eine Druckfestigkeitssteigerung durch Kunststofffasern kann aus den Ergebnissen der allerdings nur orientierenden Versuche mit Kunststofffasern nicht abgeleitet werden.

5.2.3 Spaltzugfestigkeit und Zugfestigkeit

Die nach DIN 1048 Teil 1 untersuchte Spaltzugfestigkeit lag beim Stahlfaserbeton zwischen 4,3 und 8,8 N/mm² (Vorversuche) bzw. zwischen 4,0 und 8,1 N/mm² (Hauptversuche), beim Beton mit Kunststofffasern bei 3,0 N/mm² (Vorversuche) bzw. bei 3,9 N/mm² (Hauptversuche) und beim Nullbeton (Beton ohne Fasern) bei 3,8 N/mm² (Hauptversuche), siehe Tafeln 1, 2 und 5. Die Spaltzugfestigkeit der während der Hauptversuche parallel dazu mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit geprüften Zylinder 15/30 cm aus Stahlfaserbeton betrug 3,9 bis 7,1 N/mm². Sie machte damit 82 bis 101 %, i. M. 92 %, der nach DIN 1048 Teil 1 ermittelten Spaltzugfestigkeit aus. Die während der Hauptversuche im achsialen Zugversuch an Zylindern 15/30 cm ermittelte Zugfestigkeit lag beim Stahlfaserbeton zwischen 2,8 und 3,5 N/mm², beim Beton mit Kunststofffasern bei 2,9 N/mm² und beim Nullbeton bei 3,1 N/mm².

Durch die Zugabe von Stahlfasern nahm die Spaltzugfestigkeit mit größer werdendem Fasergehalt zu. Ihre Zunahme gegenüber dem Nullbeton betrug bei 1 Vol.-% Fasern etwa 5 %, bei 1,5 Vol.-% Fasern i. M. 61 %, bei 2 Vol.-% Fasern i. M. 75 %, bei 2,5 Vol.-% Fasern i. M. 75 % und bei 3 Vol.-% Fasern etwa 113 %. Wie schon bei der Druckfestigkeit (siehe Abschnitt 5.2.2) kann auch aus den Ergebnissen über die Spaltzugfestigkeit (siehe Tafel 5) ein gesicherter Einfluß von Form und Abmessungen der Stahlfasern auf die Spaltzugfestigkeit von Stahlfaserbeton nicht abgeleitet werden.

Die Zugfestigkeit der Stahlfaserbetone machte 90 bis 113 %, i. M. 103 %, des Nullbetons aus. Die Festigkeitsunterschiede waren gering und lagen durchweg im Bereich der Streuungen. Eine gesicherte Zunahme der Zugfestigkeit durch die Zugabe von Stahlfasern ist daraus nicht abzuleiten. Aufgrund einer ersten Untersuchung über die Ursache dieser Feststellung könnte die Nichtverbesserung der Zugfestigkeit durch Stahlfasern auf eine gewisse Orientierung der Stahlfasern senkrecht zur Einfüllrichtung der stehend hergestellten Betonzylinder zurückzuführen sein. Zur Klärung dieser Frage sowie der damit zusammenhängenden Beeinflussung der Betoneigenschaften und der ggf. erforderlichen Maßnahmen zur Verbesserung der Herstellung von Stahlfaserbeton sind weitere Untersuchungen notwendig.

Die Spaltzugfestigkeit und die Zugfestigkeit des Betons mit Kunststofffasern wiesen die gleiche Größenordnung wie die entsprechenden Festigkeiten des Nullbetons auf, eine Festigkeitssteigerung durch Kunststofffasern kann aus den allerdings nur orientierenden Untersuchungen mit Kunststofffasern nicht abgeleitet werden.

5.2.4 Festigkeitsverhältniswerte

Durch einen Stahlfaserzusatz bedingte Änderungen der im Kurzzeitversuch ermittelten Festigkeiten (siehe Abschnitte 5.2.2 und 5.2.3) wirkten sich erwartungsgemäß auch auf die Festigkeitsverhältniswerte aus. Beim Stahlfaserbeton mit 1,5 bis 3 Vol.-% Fasern war die nach DIN 1048 Teil 1 an Betonzylindern ermittelte Druckfestigkeit 8,6- bis 10,0-, i. M. 9,3mal so groß wie die nach DIN 1048 Teil 1 an Betonzylindern 15/30 cm ermittelte Spaltzugfestigkeit und

17,3- bis 21,7-, i.M. 19,5mal so groß wie die an Betonzylindern 15/30 cm ermittelte Zugfestigkeit. Die entsprechenden Werte betragen beim Nullbeton (Beton ohne Fasern) und beim Beton mit Kunststofffasern i.M. 12,2 (Druckfestigkeit zu Spaltzugfestigkeit) und i.M. 15,5 (Druckfestigkeit zu Zugfestigkeit).

5.2.5 Schlagfestigkeit

Die mittlere Schlagfestigkeit der Betonzylinder 15/30 cm (die Anzahl der Schläge bis zum Bruch bei einer Fallhöhe von 100 cm) lag beim Stahlfaserbeton zwischen 51 und 1231 (Vorversuche) bzw. zwischen 127 und 559 (Hauptversuche), beim Beton mit Kunststofffasern bei etwa 16 (Vorversuche) bzw. bei etwa 27 (Hauptversuche) und beim Nullbeton (Beton ohne Fasern) bei etwa 26 (Vorversuche) bzw. bei etwa 27 (Hauptversuche), siehe Tafel 5. Der nur orientierend untersuchte und mit den vorgenannten Betonen nicht vergleichbare Glasfaserbeton wies bei dieser Prüfung im Rahmen der Hauptversuche eine Schlagfestigkeit von 306 auf, die Größenordnung der Schlagfestigkeit entsprach damit etwa der der Stahlfaserbetone. Wie aus Tafel 6 für die Betone 1 bis 5 hervorgeht, war jedoch die Streuung der Schlagfestigkeit groß. Sie nahm mit größer werdender Schlagfestigkeit zu und lag als Standardabweichung zwischen 10 und 274 und als Variationskoeffizient zwischen 41 und 53 %.

Durch die Zugabe von Stahlfasern wurde die Schlagfestigkeit des Betons deutlich verbessert. Sie war bei 1 Vol.-% Stahlfasern bereits etwa 4,7mal so groß, bei 1,5 Vol.-% Stahlfasern i.M. 4,9mal so groß, bei 2 Vol.-% Stahlfasern i.M. 7,5mal so groß, bei 2,5 Vol.-% Stahlfasern i.M. 11mal so groß und bei 3 Vol.-% Stahlfasern etwa 21mal so groß wie die des Nullbetons. Betrachtet man den Einfluß von Abmessungen und Form der Stahlfasern auf die Schlagfestigkeit des Betons (siehe Tafel 5), so entsteht der Eindruck, daß sich beim Beton mit 2 Vol.-% Fasern die glatte Faser 3 und die abgewinkelte Faser 6 mehr als die glatten Fasern 2 und 5 auswirken und daß sich beim Beton mit 2,5 Vol.-% Fasern die glatte Faser 3 am stärksten und auch die abgewinkelte, gebündelte Faser 8 mehr als die glatte Faser 4 und die gewellte Faser 7 auswirken. Zur Erhärtung und zur Systematisierung solcher Feststellungen sind jedoch weitere Versuche notwendig.

Die Schlagfestigkeit des vergleichbaren Betons mit Kunststofffasern wies die gleiche Größenordnung wie die des Nullbetons auf, eine Verbesserung der Schlagfestigkeit durch Kunststofffasern kann aus den allerdings nur orientierenden Versuchen mit Kunststofffasern nicht abgeleitet werden.

In den Bildern 1 bis 4 sind die beim Schlagversuch bestimmten Längs- und Querdehnungen sowie die den Verformungen zuzuordnende, mit einer zwischen Rammhaube und Betonzylinder angeordneten Kraftmeßdose gemessene Last für jeweils 3 Prüfkörperzustände von kennzeichnenden Betonen als Beispiel dargestellt. Auf eine Darstellung der Werte von Beton mit Kunststofffasern wurde verzichtet, weil sich sein Verhalten beim Schlagversuch nicht wesentlich von dem des Nullbetons (Beton ohne Fasern) unterschied. Als Prüfkörperzustände wurden dargestellt das Verhalten nach ei-

nem Schlag (Zustand 1), das Verhalten nach einer so großen Anzahl von Schlägen, daß die Querdehnung gerade noch oder nicht mehr erfassbar war (Zustand 3) und das Verhalten bei etwa der Hälfte der Schlagzahlen von Zustand 3 (Zustand 2). – Ein Vergleich der Bilder 1 bis 4 macht deutlich, daß sich alle 4 Betone beim ersten Schlag sehr ähnlich verhalten. Ihre maximale Lastanzeige lag bei etwa 750 kN.

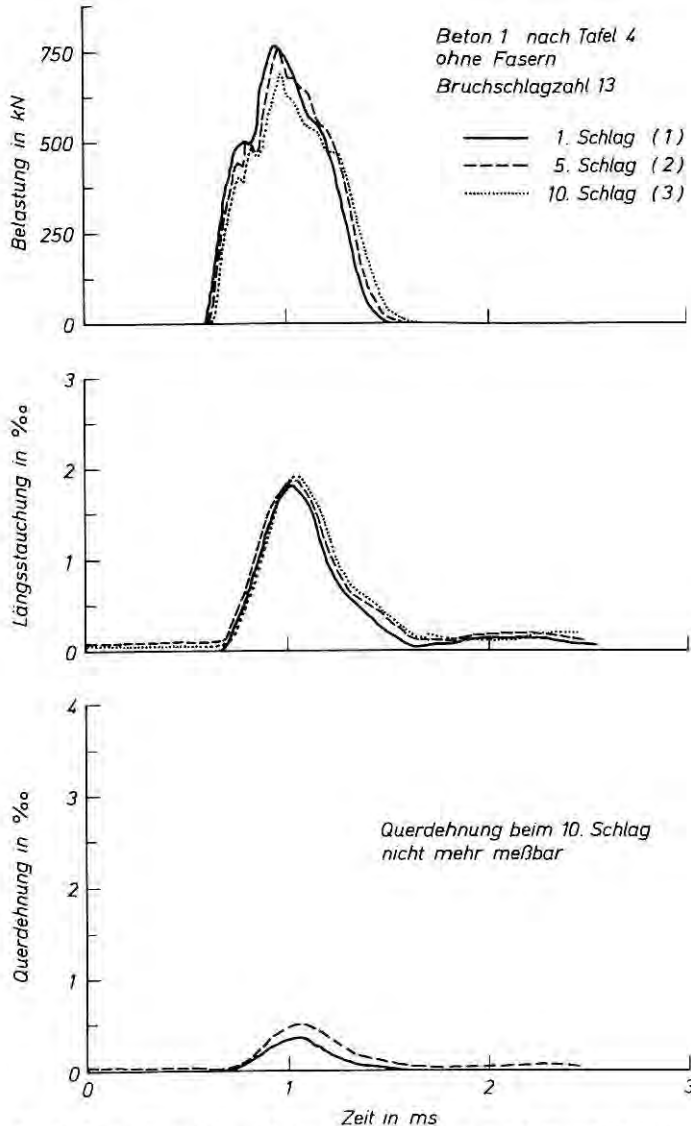


Bild 1 Lastaufnahme und Verformungsverhalten von Beton ohne Fasern beim Schlagversuch

ihre Längsstauchung bei etwa 2‰ und ihre Querdehnung bei etwa 0,4‰. Bei der weiteren Belastung zeigten aber die Faserbetone ein anderes Verhalten als der Nullbeton. Beim Nullbeton (siehe Bild 1) änderten sich dabei Lastaufnahme und Längsstauchung zunächst nicht wesentlich. Die Querdehnung blieb lange klein, wurde dann aber plötzlich so groß, daß im Zustand 3 der Dehnungsmeßstreifen

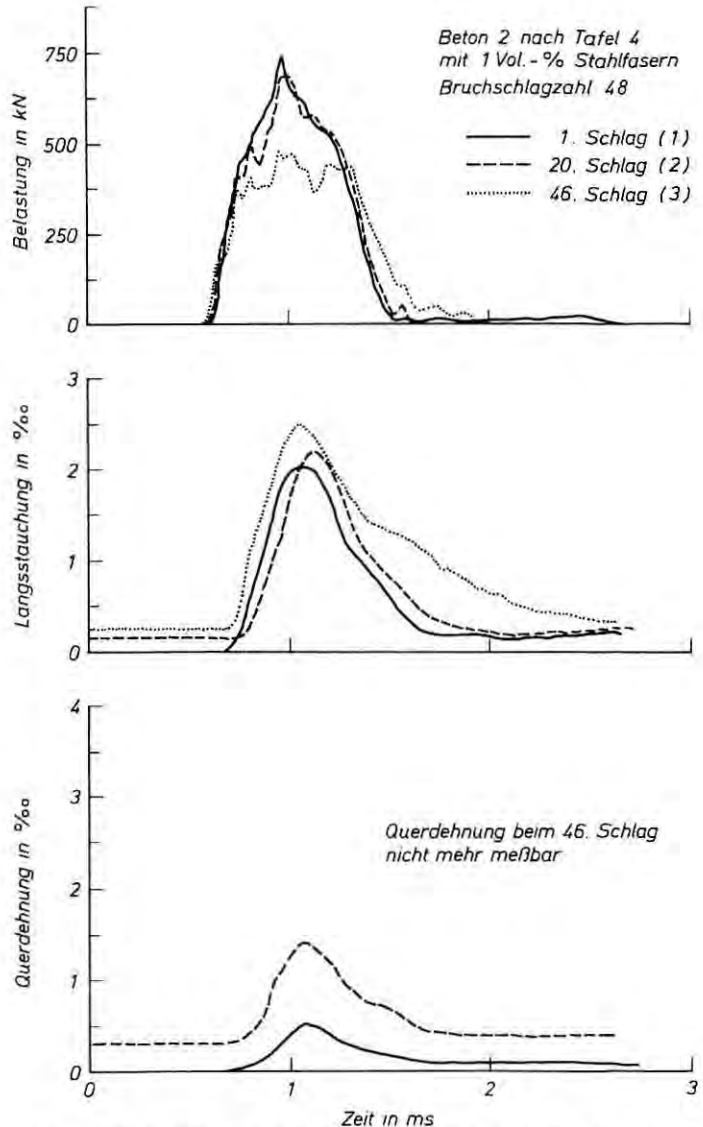


Bild 2 Lastaufnahme und Verformungsverhalten von Beton mit 1 Vol.-% Stahlfasern beim Schlagversuch

bereits gerissen war und danach der Bruch bald eintrat. Beim Stahlfaserbeton konnten eine kontinuierliche und stärkere Zunahme der Längsstauchung und der Querdehnung und eine entsprechende Abnahme der Lastaufnahme festgestellt werden, die um so ausgeprägter waren, je höher der Fasergehalt war. So betrug z. B. beim Faserbeton mit 3 Vol.-% Stahlfasern die maximale Lastanzeige im Zu-

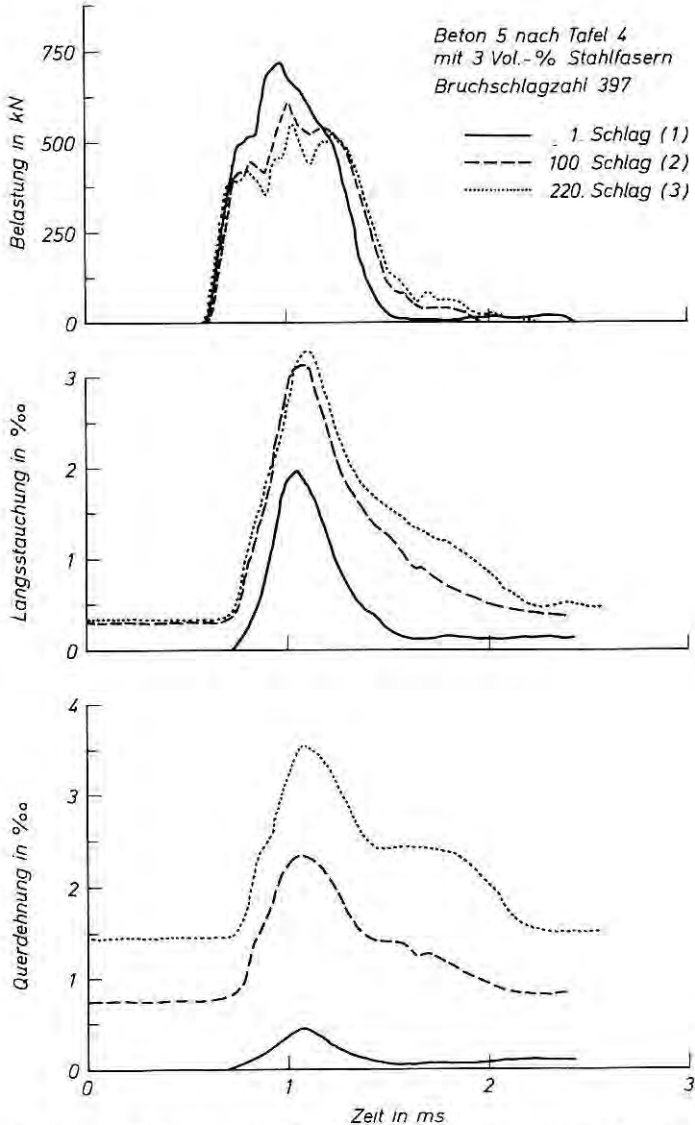


Bild 3 Lastaufnahme und Verformungsverhalten von Beton mit 3 Vol.-% Stahlfasern beim Schlagversuch

stand 2 noch etwa 600 kN und im Zustand 3 noch etwa 540 kN, die Längsstauchung im Zustand 2 etwa 3,1‰ und im Zustand 3 etwa 3,3‰ und die Querdehnung im Zustand 2 etwa 2,3‰ und im Zustand 3 etwa 3,5‰. Beim Glasfaserbeton wurden eine maximale Lastanzeige von etwa 675 kN im Zustand 2 und von etwa 625 kN im Zustand 3, eine Längsstauchung von etwa 2,4‰ im Zustand 2 und von etwa

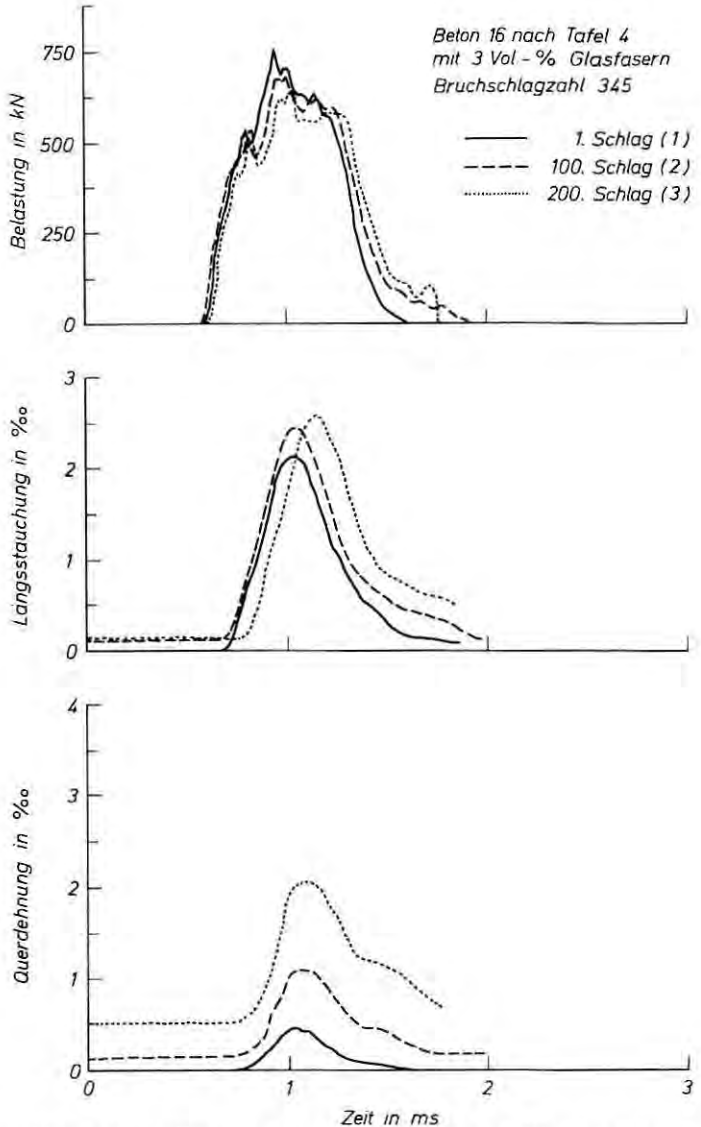


Bild 4 Lastaufnahme und Verformungsverhalten von Beton mit 3 Vol.-% Glasfasern beim Schlagversuch

2,6‰ im Zustand 3 sowie eine Querdehnung von etwa 1,2‰ im Zustand 2 und von etwa 2,1‰ im Zustand 3 festgestellt.

Das Verformungsverhalten der Betone und die Feststellungen über die Lastaufnahme beim Schlagversuch geben Hinweise auf die Wirkungsweise der Fasern und auf das grundsätzliche Verhalten der Betone beim Schlagversuch. Beim Nullbeton (Beton ohne Fasern) verursacht die Schlagbelastung zunächst Gefügestörungen und Risse an Schwachstellen. Sie können sich bei weiterer Schlagbeanspruchung ungehindert vergrößern und daher schon wenige Schläge danach zum Bruch führen. Beim Stahlfaserbeton hat die Schlagbelastung ebenfalls zunächst an Schwachstellen feine Risse zur Folge, deren Ausweitung jedoch durch die Fasern behindert wird. Es entstehen dann an anderer Stelle feine Risse, deren Ausweitung wiederum durch die Fasern behindert wird. Dadurch beteiligt sich nach und nach der gesamte Probekörper an der Lastaufnahme, und es entstehen größere Längsstauchungen und Querdehnungen als beim Nullbeton. Dieses Verhalten ist um so ausgeprägter, je wirksamer die Stahlfasern sind und je größer ihr Gehalt ist (bis zu einem oberen Grenzwert). Der Bruch tritt erst ein, wenn die Fasern so weit aus der Mörtelmatrix herausgezogen worden sind, daß sie eine deutliche Rißausweitung nicht mehr behindern können. Damit erklärt sich auch das im Vergleich zum Nullbeton deutlich größere Arbeitsvermögen sowie die deutlich größere Schlagfestigkeit des Stahlfaserbetons. – Beim Glasfaserbeton dürfte ein anderes Verhalten vorliegen; der Bruch des Probekörpers tritt dabei nicht nur durch Herausziehen der Glasfasern aus der Mörtelmatrix auf, sondern teilweise reißen Fasern sowohl gleichzeitig als auch nacheinander, sobald sie durch die sich öffnenden Risse bis zu ihrer Festigkeit auf Zug beansprucht sind. Das Arbeitsvermögen des Glasfaserbetons ist dadurch deutlich kleiner als das des Stahlfaserbetons.

5.2.6. *Druck-Elastizitätsmodul*

Der nach DIN 1048 Teil 1 ermittelte Druck-Elastizitätsmodul lag beim Stahlfaserbeton zwischen $2,59$ und $3,90 \cdot 10^4$ N/mm², beim Beton mit Kunststofffasern bei $2,96 \cdot 10^4$ N/mm² und beim Nullbeton (Beton ohne Fasern) bei $3,70 \cdot 10^4$ N/mm². Er war beim Stahlfaserbeton – abgesehen vom Beton mit 1 Vol.-% Stahlfasern – stets kleiner als beim Nullbeton und machte beim Beton mit 2 Vol.-% Stahlfasern i. M. 86 %, beim Beton mit 2,5 Vol.-% Stahlfasern i. M. 85 %, beim Beton mit 3 Vol.-% Stahlfasern etwa 91 % und im Gesamtmittel für Stahlfaserbeton 88 % der Werte des Nullbetons aus. Eine eindeutige Abhängigkeit vom Fasergehalt und von Form und Abmessungen der Stahlfasern war dabei nicht festzustellen. Beim nur orientierend untersuchten Beton mit Kunststofffasern betrug der Druck-Elastizitätsmodul rd. 80 % des Wertes des Nullbetons.

5.2.7 *Verformungen beim Kurzzeit-Druckversuch*

Zur Beurteilung des Verhaltens der unterschiedlichen Betone beim Druckversuch müssen außer der Druckfestigkeit auch die beim Druckversuch festgestellten Verformungen und die daraus ermittel-

ten Kennwerte herangezogen werden, siehe Tafel 7. Die Längsstauchung aller untersuchten Betone war – abgesehen von einer Ausnahme (Beton 12) – bei einer Belastung von 30 % der Druckfestigkeit mit Werten zwischen 623 und 964 μD (71 bis 109 % der Längsstauchung des Nullbetons) und bei einer Belastung von 50 % der Druckfestigkeit mit Werten zwischen 1070 und 1522 μD (88 bis 124 % der Längsstauchung des Nullbetons) relativ gleichmäßig. Ein systematischer Unterschied zwischen Nullbeton, Stahlfaserbeton und Beton mit Kunststofffasern sowie ein gesicherter Einfluß von Form, Abmessungen und Gehalt der Stahlfasern kann aus den Ergebnissen nicht abgeleitet werden, obwohl die Ergebnisse des orientierenden Versuchs am Kunststoffaserbeton in beiden Belastungsfällen an der unteren Grenze des jeweiligen Bereichs lagen.

Im Bereich oberhalb von 50 % der Druckfestigkeit nahm die Längsstauchung mit zunehmender Belastung mehr zu als beim Beton mit Kunststofffasern und beim Nullbeton. Ihre Zunahme war beim Stahlfaserbeton in der Regel um so ausgeprägter, je höher der Fasergehalt war. Bei der Höchstlast (Erreichen der Druckfestigkeit) lag die Längsstauchung bei den Stahlfaserbetonen mit 2 bis 3 Vol.-% Fasern je nach Fasergehalt zwischen 5036 und 10 039 μD , beim Stahlfaserbeton mit 1 Vol.-% Fasern bei 2965 μD , beim Beton mit Kunststofffasern bei 2816 μD und beim Nullbeton bei 2 566 μD . Damit war die Längsstauchung des Kunststoffaserbetons um rd. 10 %, die des Stahlfaserbetons mit 1 Vol.-% Fasern um rd. 16 % und die der Stahlfaserbetone mit 2 bis 3 Vol.-% Fasern je nach Fasergehalt bereits um rd. 100 bis 300 % größer als die des Nullbetons. Bei Weiterbelasten nach Erreichen der Höchstlast nahm die Längsstauchung aller untersuchten Betone weiter zu. Besonders ausgeprägt war die Zunahme jedoch bei den Stahlfaserbetonen, und zwar um so mehr, je größer der Fasergehalt war. Nach Wiederabfall der Belastung bis auf 25 % der Höchstlast betrug die Längsstauchung beim Nullbeton 5 184 μD , beim Kunststoffaserbeton 14 858 μD , beim Stahlfaserbeton mit 1 Vol.-% Fasern 18 375 μD und bei den Faserbetonen mit 2 bis 3 Vol.-% Fasern je nach Fasergehalt 27 197 bis 55 346 μD . Sie war damit beim Kunststoffaserbeton um rd. 190 %, beim Stahlfaserbeton mit 1 Vol.-% um rd. 250 % und bei den Stahlfaserbetonen mit 2 bis 3 Vol.-% Fasern je nach Fasergehalt um rd. 420 bis 970 % größer als beim Nullbeton.

Die Querdehnung der untersuchten Betone (Tafel 7) war bei einer Belastung von 30 % der Druckfestigkeit mit Werten zwischen 66 und 109 μD und bei einer Belastung von 50 % der Druckfestigkeit mit Werten zwischen 120 und 220 μD noch sehr klein. Die dabei festgestellten Unterschiede zeigen zwar im Gegensatz zu den Längsstauchungen bereits eine gewisse Systematik, weil die Querdehnung des Nullbetons und des Kunststoffaserbetons praktisch gleich und die des Stahlfaserbetons je nach Fasergehalt bei einer Belastung von 30 % der Druckfestigkeit um 13 bis 60 % und bei einer Belastung von 50 % der Druckfestigkeit um 12 bis 125 % größer als die des Nullbetons war, lagen aber noch im Bereich der möglichen Streuungen. Bei weiterer Belastung nahm die Querdehnung aller untersuchten Betone weiter zu. Ihre Zunahme war bei den Stahlfaserbetonen besonders ausgeprägt, und zwar um so mehr, je größer der Fasergehalt war. Die in der Nähe der Höchstlast (siehe Tafel 7) größte gemessene Querdehnung betrug beim Nullbeton 988 μD ,

beim Kunststoffaserbeton 1824 μD , beim Stahlfaserbeton mit 1 Vol.-% Fasern 1426 μD und bei den Stahlfaserbetonen mit 2 bis 3 Vol.-% Fasern 2548 bis 3310 μD . Die größte gemessene Querdehnung war damit beim Kunststoffaserbeton um rd. 85 %, beim Stahlfaserbeton mit 1 Vol.-% Fasern um rd. 44 % und bei den Stahlfaserbetonen mit 2 bis 3 Vol.-% Fasern je nach Fasergehalt um rd. 158 bis 235 % größer als beim Nullbeton.

Die aus den Verformungen errechnete größte Volumenverminderung der untersuchten Betonzylinder (Tafel 7) war mit Werten zwischen 754 und 947 μD für die unterschiedlichen Betone nicht wesentlich und systematisch verschieden (für alle untersuchten Faserbetone 94 bis 118 % der Werte des Nullbetons). Sie trat aber bei verschiedenen Belastungsgraden auf, und zwar für den Nullbeton bei 90 %, für den Kunststoffaserbeton bei 87 %, für den Stahlfaserbeton mit 1 Vol.-% Fasern bei 85 % und bei den Stahlfaserbetonen mit 2 bis 3 Vol.-% Fasern – abgesehen von einer Ausnahme (Beton 12) – zwischen 65 und 77 % der Druckfestigkeit. Die unter der Druckspannungs-Längsstauchungs-Linie bis zum Wiederabfall der Belastung auf 25 % der Höchstlast bestimmte Fläche (Tafel 7) war beim Kunststoffaserbeton rd. 2,3mal so groß, beim Stahlfaserbeton mit 1 Vol.-% Fasern rd. 3,6mal so groß und bei den Stahlfaserbetonen mit 2 bis 3 Vol.-% Fasern je nach Fasergehalt rd. 6,2- bis 15mal so groß wie beim Nullbeton.

Eine zusammenfassende Betrachtung der verschiedenen Verformungskennwerte macht deutlich, daß die einbezogenen Kunststoffasern und ein Stahlfasergehalt von 1 Vol.-% sich nur geringfügig auswirken, daß aber die Stahlfaserbetone mit 2 bis 3 Vol.-% Fasern eine deutliche Verbesserung wichtiger Verformungskennwerte und damit des Arbeitsvermögens des Betons bei Belastung aufwiesen. (Glasfaserbeton konnte nicht mituntersucht werden.)

5.2.8 Kriechen

Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge sind für die Betone 1, 2, 3, 4, 5 und 15 die mit Dehnungsmeßstreifen bestimmten Kriechdehnungen in Bild 5 und die daraus ermittelten auf die Prüfspannung bezogenen Kriechdehnungen in Bild 6 aufgetragen. Bild 6 enthält auch die für diese Betone auf die Prüfspannungen bezogenen Kriechdehnungen nach DIN 4227 Teil 1 (Ausgabe Dezember 1979) für relative Luftfeuchtigkeiten von 50 bis 70 %. Bild 7 gibt den Zusammenhang zwischen der mit Dehnungsmeßstreifen und der mit Setzdehnungsmesser ermittelten bezogenen Kriechdehnung für die Betone 1 bis 4 wieder.

Die mit Dehnungsmeßstreifen ermittelte Kriechdehnung (siehe Bild 5) war beim Nullbeton am kleinsten und nahm mit wachsendem Fasergehalt zu. Sie betrug beim Stahlfaserbeton mit 1 Vol.-% Fasern i. M. 106 %, mit 2 Vol.-% Fasern i. M. 119 %, mit 2,5 Vol.-% Fasern i. M. 153 % und mit 3 Vol.-% Fasern i. M. 286 % und beim Kunststoffaserbeton i. M. 170 % der Werte des Nullbetons (Beton ohne Fasern). Somit war die Kriechdehnung des Nullbetons und des Stahlfaserbetons mit 1 Vol.-% Fasern praktisch gleich und die des Stahlfaserbetons mit 2 Vol.-% Fasern nur geringfügig größer. – Durch das Beziehen der Kriechdehnung auf die Prüfspannung änderten sich

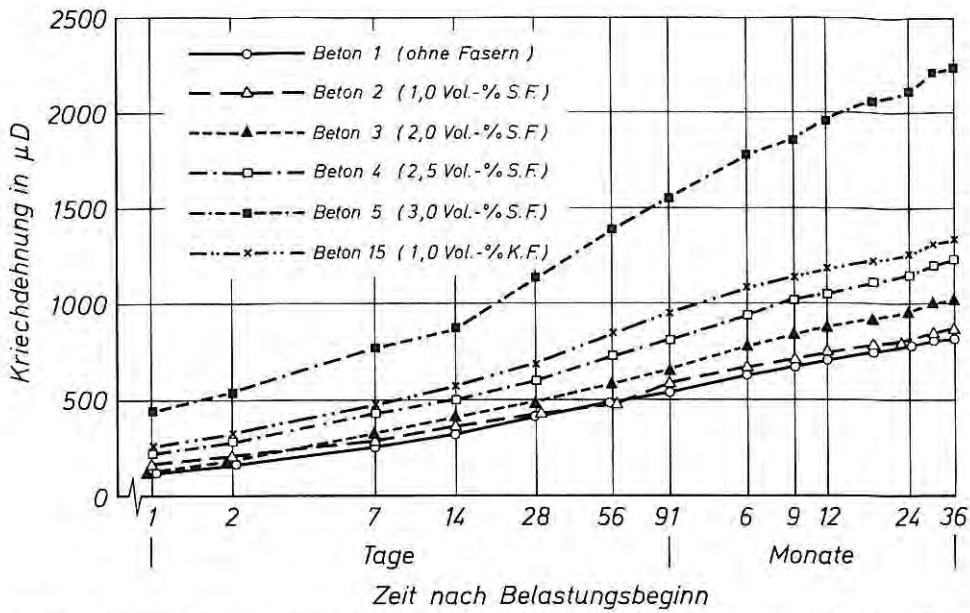


Bild 5 Kriechdehnung von Beton ohne und mit Stahl- bzw. Kunststoffasern in Abhängigkeit von der Belastungsdauer

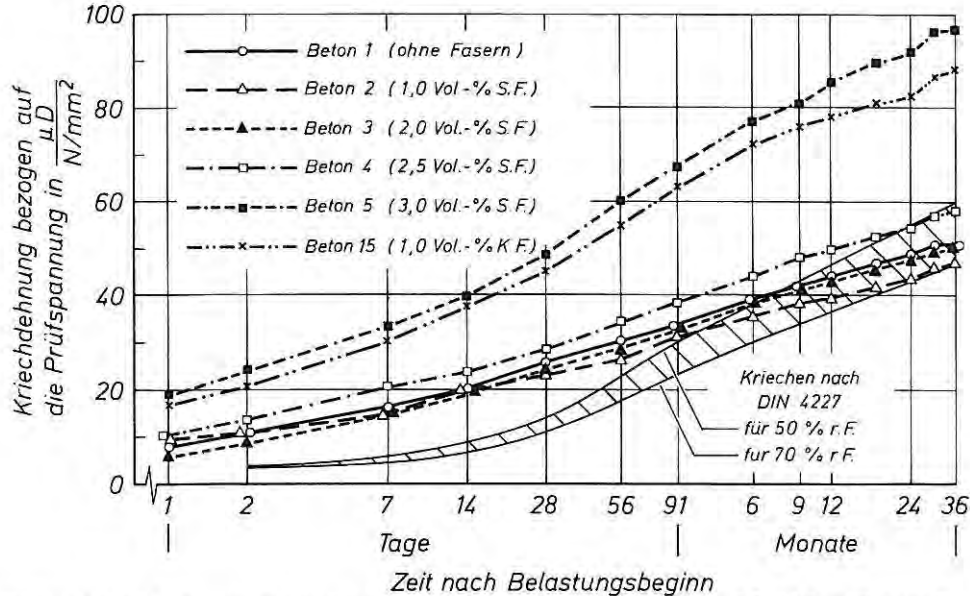


Bild 6 Auf die Prüfspannung bezogene Kriechdehnung von Beton ohne und mit Stahl- bzw. Kunststoffasern in Abhängigkeit von der Belastungsdauer

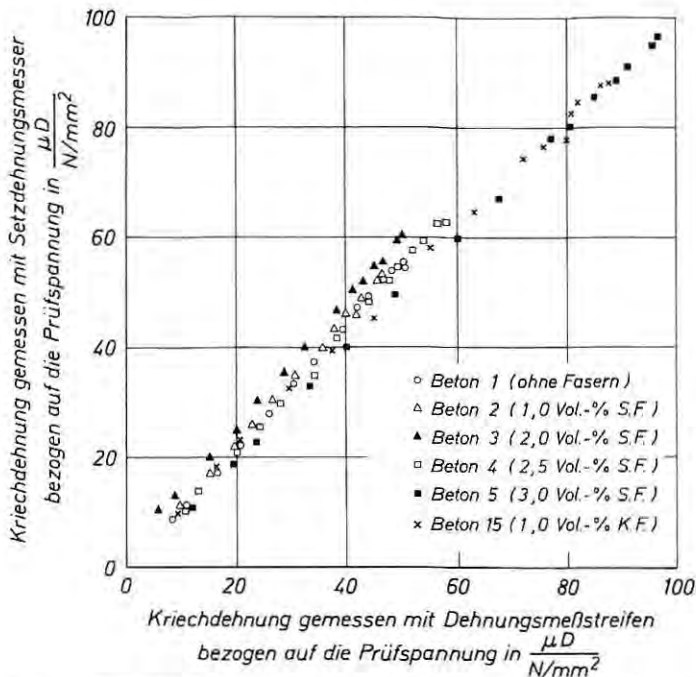


Bild 7 Zusammenhang zwischen der mit Setzdehnungsmesser und der mit Dehnungsmeßstreifen gemessenen, auf die Prüfspannung bezogenen Kriechdehnung von Beton ohne und mit Stahl- bzw. Kunststofffasern

die Verhältnisse etwas. Die mit Dehnungsmeßstreifen ermittelte auf die Prüfspannung bezogene Kriechdehnung war beim Nullbeton und bei den Stahlfaserbetonen mit 1 und 2 Vol.-% Fasern etwa gleich und beim Stahlfaserbeton mit 2,5 % Fasern nur geringfügig größer, dagegen beim Kunststofffaserbeton und beim Stahlfaserbeton mit 3 Vol.-% Fasern etwa doppelt so groß wie beim Nullbeton. – Wie aus Bild 7 hervorgeht, waren die mit Setzdehnungsmesser ermittelten Kriechwerte bei den Betonen 1, 2, 3 und 4 geringfügig größer als die mit Dehnungsmeßstreifen ermittelten Werte, bei den Betonen 5 und 15 jedoch praktisch genau so groß wie die mit Dehnungsmeßstreifen ermittelten Werte.

Aus Feststellungen über das Kriechen kann gefolgert werden, daß das Kriechen von Nullbeton und Stahlfaserbeton etwa gleich ist, wenn die Fasern im Beton gleichmäßig verteilt sind und der Beton praktisch vollständig verdichtet worden ist. Das deutlich größere Kriechen beim Stahlfaserbeton mit 3 Vol.-% Fasern könnte auf Störungen des Betongefüges durch insbesondere bei hohen Fasergehalten mögliche Faseransammlungen im Beton zurückzuführen sein. Für weitergehende Folgerungen über das Kriechen des Kunststofffaserbetons reicht der nur orientierende Versuch nicht aus. – Ein Vergleich der bezogenen Kriechdehnungen mit den Werten nach DIN 4227 (siehe Bild 6) bestätigt für den Nullbeton und für den Stahlfaserbeton mit 1 bis 2,5 Vol.-% Fasern die für Beton ohne Fa-

sern bereits früher gemachte Feststellung (siehe u. a. [14]), daß die Kriechwerte der DIN 4227 für eine Belastungsdauer zwischen 1 und 3 Jahren zufriedenstellend mit den durch Messung bestimmten Kriechwerten übereinstimmen, in jungem Alter aber deutlich kleiner sind.

6. Zusammenfassung der Feststellungen und Folgerungen

Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden durch einen Zusatz geeigneter Fasern zum Beton seine Schlagfestigkeit deutlich (bis zu rd. 20mal so groß wie beim Nullbeton), seine Druckfestigkeit und seine Spaltzugfestigkeit nur geringfügig (Druckfestigkeit bis zum 1,5fachen, Spaltzugfestigkeit bis zum 2fachen Wert des Nullbetons) und seine Zugfestigkeit nicht verbessert. Faserbetone, bei denen die Schlagfestigkeit, die Druckfestigkeit und die Spaltzugfestigkeit durch den Faserzusatz verbessert wurden, wiesen in der Regel einen etwa 10 bis 15 % kleineren Druck-Elastizitätsmodul auf und – abgesehen von den Werten zu Beginn der Belastung – eine deutliche Vergrößerung der beim Kurzzeit-Druckversuch ermittelten Verformungswerte (Vergrößerung gegenüber den Werten des Nullbetons bis zu rd. 10,7fach bei der Längsstauchung, bis zu rd. 3,4fach bei der Querdehnung und bis zu rd. 15fach bei der Fläche unter der σ - ϵ -Linie) sowie beim Kurzzeit-Druckversuch und beim Schlagversuch ein deutlich besseres Arbeitsvermögen. Die Ergebnisse der vorliegenden Versuche lassen erwarten, daß das Kriechen durch einen Stahlfaserzusatz nicht verändert wird, wenn die Fasern im Beton gleichmäßig verteilt sind und der Beton praktisch vollständig verdichtet worden ist.

Zum Einfluß der *Fasertart* ist anzumerken, daß das verbesserte Festbetonverhalten eindeutig für Stahlfaserbeton festgestellt wurde. Die lediglich orientierenden Versuche mit anderen Fasern weisen darauf hin, daß bei Feinbeton auch mit geeigneten Glasfasern (Glasfasern mit hohem Alkaliwiderstand) ein verbessertes Festbetonverhalten erwartet werden kann, daß aber Kunststofffasern, wie sie in die Versuche einbezogen wurden, wegen ihres großen Verformungsvermögens die Festbetoneigenschaften nicht wesentlich verbessern und sich daher am Tragvermögen der Betonbauteile nicht beteiligen. Die Ergebnisse und Feststellungen der Versuche machten deutlich, daß die Stahlfasern Risse bereits im Stadium ihrer Entstehung überbrücken, daß sie eine Ausweitung zu einzelnen großen Rissen verhindern, daß sie eine gleichmäßigere Verteilung der Beanspruchung bewirken und daß dadurch insgesamt eine wesentlich größere Beanspruchung aufgenommen werden kann als bei Nullbeton sonst gleicher Zusammensetzung ohne Fasern. Beim Stahlfaserbeton tritt der Bruch schließlich dadurch auf, daß die Fasern mit wachsender Beanspruchung zunehmend aus der Mörtelmatrix herausgezogen werden; beim Glasfaserbeton reißen dabei außerdem mit zunehmender Beanspruchung sowohl gleichzeitig als auch nacheinander einige Fasern.

Zur Beurteilung des Einflusses des *Fasergehaltes* müssen das Festbetonverhalten und die Verarbeitbarkeit des Frischbetons betrachtet werden. Während das Festbetonverhalten mit zunehmendem Gehalt an Stahl- bzw. an Glasfasern besser wird, solange die Fasern

gleichmäßig verteilt sind und der Frischbeton noch praktisch vollständig verdichtet worden ist, wird der Frischbeton im allgemeinen mit größer werdendem Fasergehalt schwerer verarbeitbar. Eine Optimierung des Fasergehaltes ist daher notwendig. Aufgrund der vorliegenden Versuchsergebnisse sollte der Fasergehalt von Stahlfaserbeton im allgemeinen etwa 2 Vol.-% nicht unter- und etwa 3 Vol.-% nicht überschreiten, weil ein deutlich geringerer Fasergehalt das Festbetonverhalten meist nicht genügend verbessert und weil bei Beton mit einem größeren Fasergehalt die Gefahr besteht, daß er sich nicht mehr vollständig verdichten läßt.

Die Untersuchungen ergaben darüber hinaus, daß die sachgerechte Herstellung von Faserbeton und von Bauteilen aus Faserbeton spezielle Erfahrungen mit diesem Baustoff voraussetzt und daß noch eine Reihe von Fragen einer weiteren Klärung bedürfen. Stahlfaserbeton wird im allgemeinen nicht mit Innenrüttlern zu verdichten sein, weil – insbesondere bei höheren Fasergehalten – dies in der Regel nicht möglich ist und allgemein weil dadurch ungleichmäßige Faserverteilung verursacht werden kann und die Rüttler dabei großem Verschleiß unterliegen. Das Verfahren für die Zugabe der Stahlfasern sowie für die Herstellung und den Einbau des Stahlfaserbetons muß darauf abgestimmt werden, daß eine möglichst gleichmäßige Faserverteilung im Betonbauteil erreicht wird und daß Faserkonzentrationen (sog. Igelbildungen), die in der Regel Schwachstellen des Betongefüges darstellen und – insbesondere in größerer Zahl – das sonst gute Festbetonverhalten des Stahlfaserbetons wesentlich beeinträchtigen können, vermieden werden. Auch Ursache und Abhilfemaßnahmen der bei den Betonzylindern 15/30 cm – offenbar aufgrund einer Orientierung der Stahlfasern senkrecht zur Herstellungsrichtung der Zylinder – festgestellte Nichtverbesserung der Zugfestigkeit bei Stahlfaserbeton bedürfen einer weiteren Klärung. Zur Klärung von Form und Abmessungen der Stahlfasern sind ebenfalls weitere Versuche erforderlich. Einigen dieser Fragen wird bereits in weiteren Untersuchungen nachgegangen.

7. Schlußfolgerungen

Die im Forschungsinstitut der Zementindustrie in den Jahren 1974 bis 1978 durchgeführten Untersuchungen über die Schlagfestigkeit und andere Festbetoneigenschaften von faserbewehrtem Beton gestatten die nachstehenden Folgerungen:

7.1 Durch das Zumischen geeigneter Stahlfasern zum Frischbeton konnte die Schlagfestigkeit von Beton mit darauf abgestimmter Zusammensetzung deutlich (etwa bis zum 20fachen Wert des Nullbetons) vergrößert werden.

7.2 Dagegen wurde durch einen Stahlfaserzusatz die Druckfestigkeit nur um etwa das 1,5fache, die Spaltzugfestigkeit nur um das 2fache, aber die Zugfestigkeit nicht verbessert.

7.3 Bei sachgerechtem Stahlfaserbeton war der Druck-Elastizitätsmodul durchweg um 10 bis 15 % kleiner und waren – abgesehen von den Werten zu Beginn der Belastung – die beim Kurzzeit-Druckversuch ermittelten Verformungskennwerte oberhalb der Ge-

brauchsspannungen sowie bei Weiterbelastung nach Erreichen der Höchstlast deutlich größer als beim entsprechenden Beton ohne Fasern.

7.4 Das Verformungsverhalten und die Feststellungen über die Lastaufnahme beim Schlagversuch geben Hinweis über die Wirkungsweise der Stahlfasern und weisen – ebenso wie die Schlagfestigkeit und wie die Verformungskennwerte beim Kurzzeit-Druckversuch – auf ein deutlich besseres Arbeitsvermögen des Stahlfaserbetons im Vergleich zum Nullbeton hin.

7.5 Das Kriechen unter Dauerdruckbelastung dürfte durch einen Stahlfaserzusatz nicht verändert werden, wenn die Fasern im Beton gleichmäßig verteilt sind und der Beton praktisch vollständig verdichtet worden ist.

7.6 Der Gehalt an Stahlfasern muß auch auf ausreichende Verarbeitbarkeit des Frischbetons abgestimmt sein. Er sollte in der Regel für die Verbesserung der Festbetoneigenschaften 2 Vol.-% nicht unter- und 3 Vol.-% nicht überschreiten.

7.7 Zur sicheren Vermeidung von Konzentrationen und nicht beabsichtigter Orientierung von Stahlfasern sowie zur weiteren Klärung des Einflusses von Form und Abmessungen der Stahlfasern sind weitere Untersuchungen notwendig.

7.8 Die Ergebnisse von lediglich orientierenden Versuchen mit anderen Fasern weisen darauf hin, daß das Festbetonverhalten mit geeigneten Glasfasern ebenfalls, mit den einbezogenen Kunststofffasern jedoch nicht verbessert werden kann.

SCHRIFTTUM

- [1] Wischers, G.: Faserbewehrter Beton. beton 24 (1974) H. 3, S. 95/99, und H. 4, S. 137/141; ebenso Betontechnische Berichte 1974, Beton-Verlag, Düsseldorf 1975, S. 45/70.
- [2] Glasfaserbeton (Beiträge verschiedener Autoren). Der Heidelberger Portländer 1975, H. 2.
- [3] Swamy, R. N., und P. S. Mangat: The onset of cracking and ductility of steel fiber concrete. Cem. and Concr. Res. 5 (1975) Nr. 1, S. 37/53.
- [4] Swamy, R. N., und H. Stavrides: Influence of the method of fabrication on strength properties of steel fiber concrete. Matériaux et Constructions 9 (1976) Nr. 52, S. 243/253.
- [5] Merkblatt Stahlfaserspritzbeton. beton 27 (1977) H. 2, S. 66/68.
- [6] Wischers, G.: Aufnahme und Auswirkungen von Druckbeanspruchungen auf Beton. beton 28 (1978) H. 2, S. 63/67, und H. 3, S. 98/103; ebenso Betontechnische Berichte 1978, Beton-Verlag, Düsseldorf 1979, S. 31/56.
- [7] Dahms, J.: Herstellung und Eigenschaften von Faserbeton. beton 19 (1979) H. 4, S. 139/143; ebenso Betontechnische Berichte 1979, Beton-Verlag, Düsseldorf 1980, S. 29/42.
- [8] Meyer, A.: Faserbeton. Zementtaschenbuch 1979/80. Bauverlag, Wiesbaden/Berlin 1979, S. 453/477.

- [9] Anon, N. Z.: New uses for glass fibre reinforcement. BRS News, Building Research Station Watford, England 1967, Nr. 2. S. 8/9.
- [10] Zonsveld, J. J.: Properties and testing of concrete containing fibres other than steel. RILEM Symposium 1975, London, S. 217/226.
- [11] Waller, J. A.: Carbon fibre cement composites. Civil Engineering and Public Works Review, Vol. 67, Nr. 788, April 1972, S. 357.
- [12] Dahms, J.: Über die Schlagfestigkeit des Betons für Rammpfähle. beton 18 (1968) H. 4, S. 131/136, und H. 5, S. 177/182; ebenso Betontechnische Berichte 1968, Beton-Verlag, Düsseldorf 1969, S. 49/82.
- [13] Bonzel, J., und V. Kadleček: Einfluß der Nachbehandlung und des Feuchtigkeitszustandes auf die Zugfestigkeit des Betons. beton 20 (1970) H. 7, S. 303/309, und H. 8, S. 347/352; ebenso Betontechnische Berichte 1970, Beton-Verlag, Düsseldorf 1971, S. 99/133.
- [14] Wischers, G., und J. Dahms: Kriechen von frühbelastetem Beton mit hoher Anfangsfestigkeit. beton 27 (1977) H. 2, S. 69/74, und H. 3, S. 104/108; ebenso Betontechnische Berichte 1977, Beton-Verlag, Düsseldorf 1978, S. 29/54.