

# Zur Querkraftbemessung von Biegeträgern aus stahlfaserverstärktem ultrahochfesten Beton – Teil 1: Bemessungsansatz und Datenbank

K. Metje, T. Leutbecher

**ZUSAMMENFASSUNG** Der vorliegende zweiteilige Beitrag behandelt die Querkraftbemessung von stahlfaserverstärkten Biegeträgern aus ultrahochfestem Beton (UHFB). Im Teil 1 werden der Bemessungsansatz und eine 185 Querkraftversuche umfassende Datenbank präsentiert. Der Bemessungsansatz orientiert sich an Eurocode 2 und der DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ und berücksichtigt additiv die Traganteile des faserfreien Betonquerschnitts, einer konventionellen Querkraftbewehrung aus Betonstahl und der Wirkung der Fasern im Schubriss. Er soll in dieser Form Eingang in die DAfStb-Richtlinie „Ultrahochfester Beton“ finden. Erstmals wird beim Ansatz der Tragwirkung aus Fasern zwischen Bauteilen mit gegliedertem Querschnitt und Bauteilen mit Kompaktquerschnitt unterschieden, was eine wirtschaftlichere Bemessung von Bauteilen mit gegliedertem Querschnitt ermöglicht. Alle aus der Literatur verfügbaren Datensätze wurden vor Aufnahme in die Datenbank kritisch überprüft und die angegebenen Baustoffkenngrößen – dort, wo notwendig – normiert. Anhand der Datensätze der Querkraftdatenbank erfolgen im Teil 2 des Beitrags die Überprüfung und statistische Auswertung des vorgeschlagenen Bemessungsansatzes.

## STICHWÖRTER

Bemessung, Hochleistungsbeton, Schub, Nachrechnung

## Design of ultra-high performance fibre-reinforced concrete girders subjected to shear – Part 1: design approach and database

**ABSTRACT** This contribution consists of two parts and focuses on the design of ultra-high performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC) girders subjected to shear. Part 1 presents the design approach and a database including 185 shear tests. The design approach is based on Eurocode 2 and DAfStb-Guideline „Steel Fibre Reinforced Concrete“ and superimposes the shear bearing resistance of the concrete cross-section without fibres, the resistance of conventional shear reinforcement and the resistance of the fibres activated in the shear crack. The approach is expected to be considered with the forthcoming DAfStb-Guideline „Ultra-High Performance Concrete“. For the first time, structural members with I-shaped cross-section and compact cross-section are differentiated with regard to the contribution of the fibres enabling a more economic design of members with I-shaped cross-section. All data sets available from literature were critically reviewed before being included in the database and the specified material parameters were normalised where necessary. In part 2 of the contribution, the proposed design approach is reviewed and statistically evaluated by means of the data sets of the shear database.

## 1 Einleitung

Das Querkrafttragverhalten von stahlfaserverstärkten Biegeträgern aus ultrahochfestem Beton (UHFB) [1] ist seit knapp zwei Jahrzehnten Gegenstand der Forschung. In der jüngeren Vergangenheit hat die Zahl verfügbarer experimenteller Arbeiten deutlich zugenommen, sodass nun – ähnlich wie für Stahlbeton [2] und Stahlfaserbeton [3] – eine datenbankbasierte Überprüfung beziehungsweise Ableitung eines semi-empirischen Bemessungsansatzes erfolgen kann. Ein solches Vorgehen ist mit Blick auf die Regelwerksetzung für stahlfaserverstärkten UHFB in Deutschland [4] notwendig, da aufgrund der Komplexität des Zusammenspiels verschiedener Tragmechanismen bislang kein mechanisch begründetes Querkraftbemessungsmodell für stahlfaserverstärkte Betone existiert.

Im Teil 1 dieses Beitrags wird zunächst ein an Eurocode 2 (kurz: EC 2) [5], [6] und die DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ (kurz: DAfStb-RiLi SFB) [7] angelehnter Bemessungsansatz

für Querkraft präsentiert. Des Weiteren enthält der vorliegende Beitragsteil eine umfangreiche Querkraftdatenbank, deren Aufbau im Detail dargestellt und erläutert wird. Mithilfe der Datenbank wird im Teil 2 des Beitrags der vorgeschlagene Bemessungsansatz kalibriert und statistisch ausgewertet, sodass mit dem Ansatz eine ausreichend konservative Querkraftbemessung stahlfaserverstärkter UHFB-Biegeträger gewährleistet erscheint.

## 2 Bemessungsansatz für querkraftbeanspruchte Biegeträger aus stahlfaserverstärktem UHFB

### 2.1 Grundlagen des Nachweisverfahrens

Der Querkraftwiderstand stahlfaserverstärkter Biegeträger setzt sich allgemein aus den Querkrafttraganteilen des faserfreien Betonquerschnitts  $V_{Rd,c}$  (infolge Rissreibung, Widerstand der Druckzone, Dübelwirkung der Bewehrung), einer konventionellen Querkraftbewehrung aus Betonstahl  $V_{Rd,s}$  und der Wirkung

der Fasern im Schubriss  $V_{Rd,f}$  zusammen. Der Querkraftwiderstand  $V_{Rd,f}$  resultiert dabei im Wesentlichen aus der Fähigkeit der Stahlfasern Zugkräfte über Risse hinweg zu übertragen. Zur Charakterisierung des Zugtragverhaltens des gerissenen stahlfaserverstärkten Betons dient die sogenannte zentrische Nachrisszugfestigkeit. Sie ist als die maximale nominelle Betonzugspannung definiert, die unter axialem Zug im gerissenen Zustand durch die Wirkung der Fasern aufgenommen werden kann [8]. Die zentrische Nachrisszugfestigkeit wird maßgeblich durch den Fasergehalt sowie die Geometrie, Verteilung und Orientierung der Fasern bestimmt [9].

Existierende semi-empirische Bemessungsansätze für (ultra-hochfesten) Stahlfaserbeton [7], [10], [11], [12], [13], [14] sehen bei der Bestimmung des Querkraftwiderstands meist eine Superposition der drei Traganteile  $V_{Rd,c}$ ,  $V_{Rd,s}$  und  $V_{Rd,f}$  vor. Da sich die interagierenden Traganteile experimentell kaum isoliert untersuchen lassen, werden sie in den verschiedenen Bemessungsansätzen unterschiedlich bestimmt und gewichtet. Auch der hier vorgeschlagene Bemessungsansatz folgt dem Grundgedanken der Addition der verschiedenen Traganteile nach Gleichung (1).

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f} \quad (1)$$

Dabei werden die Querkraftwiderstände  $V_{Rd,c}$  und  $V_{Rd,s}$  – ähnlich wie in der DAfStb-RiLi SFB [7] – in Anlehnung an EC 2 [5], [6] bestimmt.

Für den Querkraftwiderstand des faserfreien Betonquerschnitts gilt Gleichung (2) (entspricht Gleichung (6.2a) aus [5], [6]):

$$V_{Rd,c} = \left[ C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck} [\text{N/mm}^2])^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} [\text{N/mm}^2] \right] \cdot b_w \cdot d \quad (2)$$

Mit:

$$C_{Rd,c} = 0,15/\gamma_C \quad (3)$$

$$k = 1 + \sqrt{200/d [\text{mm}]} \leq 2,0 \quad (4)$$

$$\rho_1 = A_s / (b_w \cdot d) \leq \rho_{l,max} \quad (5)$$

$$k_1 = 0,12 \quad (6)$$

$$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c, N_{Ed} > 0 \text{ für Druck} \quad (7)$$

Dabei sind  $f_{ck}$  die charakteristische Betondruckfestigkeit,  $b_w$  die kleinste Querschnittsbreite der Zugzone,  $d$  die statische Nutzhöhe,  $\gamma_C$  der Teilsicherheitsbeiwert für Beton,  $\rho_1$  der geometrische Biegebewehrungsgrad,  $\rho_{l,max}$  der maximal anrechenbare geometrische Biegebewehrungsgrad ( $\rho_{l,max} = 0,06$ ; siehe hierzu Teil 2 des Beitrags),  $A_s$  die Querschnittsfläche der Biegebewehrung,  $A_c$  die Bruttoquerschnittsfläche und  $N_{Ed}$  der Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft.

Der Querkraftwiderstand mit Querkraftbewehrung aus Betonstahl ergibt sich nach Gleichung (8) (entspricht Gleichung (6.13) aus [5], [6]):

$$V_{Rd,s} = (A_{sw}/s) \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\cot\theta + \cot\alpha) \cdot \sin\alpha \quad (8)$$

Mit:

$$z = 0,9 \cdot d, \text{ jedoch nicht größer als}$$

$$z = d - 2c_{v,l} \geq d - c_{v,l} - 30 \text{ mm} \quad (9)$$

$$\cot\theta = 1,2 + 2,4 \cdot \sigma_{cp}/f_{cd} \geq 1,0, \sigma_{cp} > 0 \text{ für Druck} \quad (10)$$

Dabei sind  $A_{sw}$  die Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung aus Betonstahl,  $s$  der Bügelabstand,  $f_{ywd}$  der Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung aus Betonstahl,  $\alpha$  der Winkel zwischen Querkraftbewehrung und der rechtwinklig zur Querkraft verlaufenden Bauteilachse,  $c_{v,l}$  das Verlegemaß der Längsbewehrung in der Betondruckzone und  $f_{cd}$  der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit.

Da der Betontraganteil in Gleichung (1) additiv berücksichtigt wird, darf die Druckstrebenneigung  $\theta$  nach Gleichung (10) – anders als nach Gleichung (6.7aDE) aus [6] – nicht innerhalb gewisser Grenzen frei gewählt werden, sondern orientiert sich streng an der Richtung der Hauptdruckspannungen im ungerissenen Zustand unmittelbar vor der Rissbildung (= Richtung  $\beta_r$ , in der der Schubriss zu erwarten ist). Abgeleitet aus der Hauptnormalspannungshypothese gilt für die Rissrichtung im ebenen Spannungszustand [15]:

$$\cot\beta_r = \sqrt{1 + \sigma_x / f_{ct}}, \quad \sigma_x > 0 \text{ für Druck} \quad (11)$$

Dabei sind  $\sigma_x$  die Längsspannung und  $f_{ct}$  die Zugfestigkeit des Betons.

Gleichung (11) wird in [16] durch eine lineare Funktion angenähert:

$$\cot\beta_r = 1,2 + 0,2 \cdot \sigma_{cp}/f_{ctm}, \sigma_{cp} > 0 \text{ für Druck} \quad (12)$$

Dabei sind  $\sigma_{cp}$  die Längsspannung und  $f_{ctm}$  die mittlere Zugfestigkeit des Betons.

Reineck [15] kalibriert Gleichung (12) auf den Bemessungswert der Betondruckfestigkeit (ohne Berücksichtigung des Beiwerts  $\alpha_{cc}$ ) für einen Beton der Festigkeitsklasse C30 ( $f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$  und  $f_{ctm} = 2,9 \text{ N/mm}^2$ ), woraus sich im Zähler der Gleichung (6.7aDE) aus [6] der Vorfaktor 1,4 ergibt:

$$\cot\beta_r = 1,2 + 0,2 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{ctm}} = 1,2 + 0,2 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \cdot \frac{30/1,5}{2,9} \approx 1,2 + 1,4 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \quad (13)$$

Wird Gleichung (12) in gleicher Weise für UHFB der Festigkeitsklasse C150 ( $f_{ck} = 150 \text{ N/mm}^2$  und  $f_{ctm} = 8,5 \text{ N/mm}^2$ ) kalibriert, erhält man aufgrund des niedrigeren Verhältnisses zwischen Zug- und Druckfestigkeit den Vorfaktor 2,4, der in Gleichung (10) verwendet wird:

$$\cot\beta_r = 1,2 + 0,2 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{ctm}} = 1,2 + 0,2 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \cdot \frac{150/1,5}{8,5} \approx 1,2 + 2,4 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \quad (14)$$

Der Querkraftwiderstand infolge Wirkung der Stahlfasern im Schubriss wird – in Anlehnung an Gleichung (R.6.2d) aus [7] – nach Gleichung (15) ermittelt:

$$V_{Rd,f} = b_w \cdot h \cdot \eta_F \cdot f_{ctfd} \quad (15)$$

Mit:

$$f_{ctfd} = \alpha_{CF} \cdot f_{ctfk} / \gamma_{CF} \quad (16)$$

$$f_{ctfk} = \kappa_F \cdot f_{ctf0} \quad (17)$$

Dabei sind  $h$  die Querschnittshöhe,  $\eta_F$  ein Beiwert zur Berücksichtigung des Verlaufs der Schubrissöffnung ( $\eta_F = 1,0$  für Bauteile mit gegliedertem Querschnitt;  $\eta_F = 0,7$  für Bauteile mit Kompaktquerschnitt; siehe hierzu Teil 2 des Beitrags),  $\alpha_{CF}$  der Beiwert zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen,  $\gamma_{CF}$  der Teilsicherheitsbeiwert für die Nachrisszugfestigkeit und  $\kappa_F$  der Beiwert zur Berücksichtigung der Faserorientierung im Bauteil ( $\kappa_F = 1,0$  für Bauteile mit gegliedertem Querschnitt;  $\kappa_F = 0,5$  für Bauteile mit Kompaktquerschnitt; siehe hierzu Teil 2 des Beitrags).

Der aus Baustoffprüfungen abgeleitete Grundwert der zentrischen Nachrisszugfestigkeit  $f_{ctf0}$  (Abschnitt 3.3) wird mit Gleichung (17) unter Berücksichtigung der Faserorientierung im Schubriss des Bauteils mit dem Beiwert  $\kappa_F$  in einen charakteristischen Wert  $f_{ctfk}$  überführt. Gegenüber [7] bleibt der Einfluss der Bauteilgröße auf den Variationskoeffizienten der Nachrisszugfestigkeit auf der sicheren Seite liegend unberücksichtigt (entspricht Beiwert  $\kappa_G = 1,0$  nach [7]).

Dies kann damit begründet werden, dass die Nachrisszugfestigkeit des stahlfaserverstärkten UHFB aufgrund der gegenüber normalfestem Stahlfaserbeton deutlich größeren Faseranzahl je Querschnittseinheit selbst bei kleiner Querschnittsfläche deutlich weniger streut.

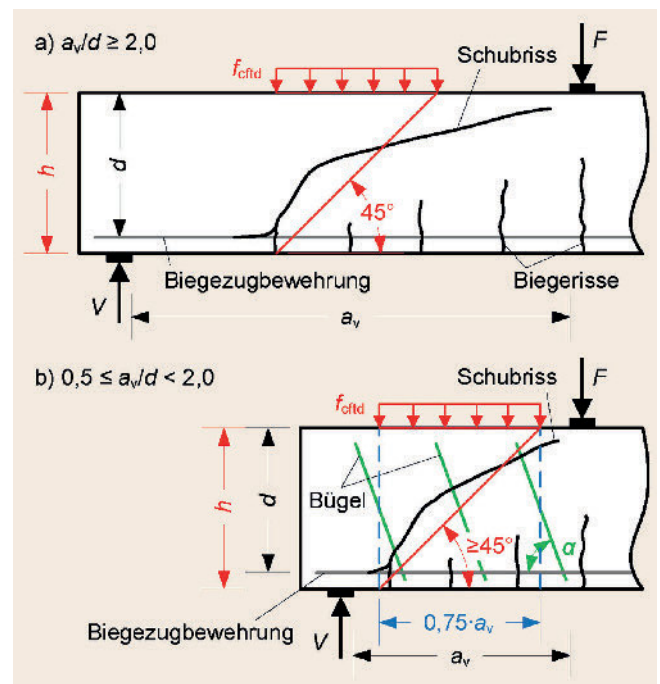
Die Wirkung der Fasern wird in Gleichung (15) – analog DAfStb-RiLi SFB – für die vertikale Projektion einer um  $\theta = 45^\circ$  (entspricht  $\cot \theta = 1,0$ ) geneigten theoretischen Schubrissfläche angesetzt, die sich über die Breite  $b_w$  und die Höhe  $h$  aufspannt (Bild 1a).

Der Querkraftwiderstand gegenüber Versagen der Betondruckstrebe  $V_{Rd,max}$  steht nicht im Fokus dieser Arbeit. In Druck-Querzug-Versuchen an scheibenförmigen Bauteilen sowie in Torsionsversuchen hat sich jedoch gezeigt, dass die Anwendung des Abminderungsbeiwerts für die Betonfestigkeit  $v_1$  nach NDP zu 6.2.3 (3) in [6] für gerissenen, stahlfaserverstärkten UHFB deutlich konservative Druckstrebenfestigkeiten liefert [17], [18]. Es liegt daher nahe, die Gln. (6.9) und (6.14) aus EC 2 unter Berücksichtigung von [6] für UHFB zu übernehmen.

## 2.2 Bauteile mit auflagnaher Einzellast

Bei oberseitiger Eintragung einer Einzellast im Bereich  $0,5d \leq a_v < 2d$  darf nach EC 2 der Bemessungswert der einwirkenden Querkraft  $V_{Ed}$  mit dem Faktor  $\beta = a_v/2d$  abgemindert werden. Dadurch wird berücksichtigt, dass ein Teil der auflagnahen Lasten direkt ins Auflager abgeleitet wird und nicht über eine vertikale Zugstrebe in Form von Querkraftbewehrung hochgehängt werden muss. Dieser Kraftfluss stellt sich bei direkter Auflagerung unabhängig vom verwendeten Beton ein, sodass die Regel auch für Bauteile aus UHFB übernommen werden kann.

Da in der Modellbildung für auflagnahen Lasten (Bild 1b) die Zugstrebe durch Querkraftbewehrung aus Betonstahl und/oder Stahlfasern ausgebildet werden kann, berücksichtigt Gleichung (18) additiv den Widerstand der Querkraftbewehrung aus Betonstahl und die im Bereich zwischen Lastenleitung und Auflager vorhandene Wirkung der Fasern.



**Bild 1.** Ansatz des Querkrafttraganteils aus Faserwirkung a) für große Schubslankheit und b) bei auflagnaher Einzellast (hier beispielhaft für  $h \approx 0,75 \cdot a_v$ ) Grafik: K. Metje

Fig. 1. Approach of the shear load bearing mechanism due to fibres a) for large shear span-to-depth ratio and b) for a girder with load near to support (here exemplarily for  $h \approx 0,75 \cdot a_v$ ) Source: K. Metje

$$V_{Rd,s} + V_{Rd,f} = A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot \sin \alpha + \min[0,75 \cdot a_v; h] \cdot b_w \cdot f_{ctfd} \quad (18)$$

Gemäß EC 2 darf bei der Bestimmung des Querkraftwiderstands nur die Querkraftbewehrung in einem mittleren Bereich von  $0,75 \cdot a_v$  berücksichtigt werden. Entsprechend wird in Gleichung (18) auch die Wirkung der Fasern auf die vertikale Projektion der Länge  $0,75 \cdot a_v \leq h$  begrenzt.

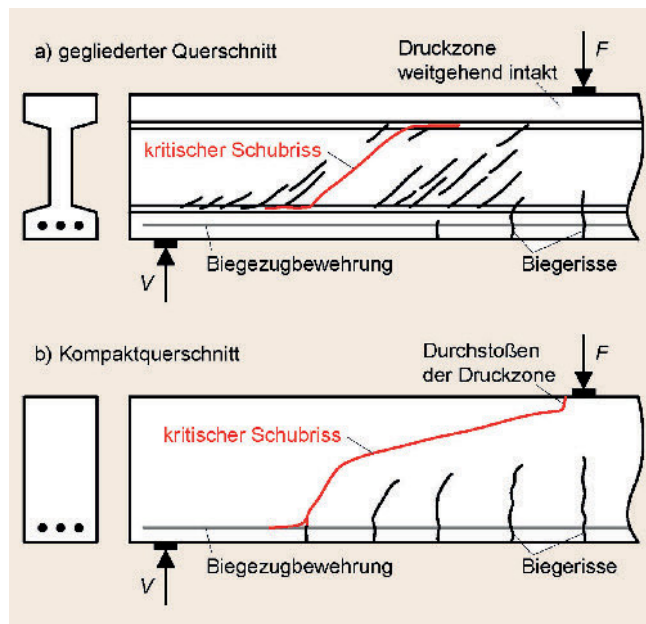
## 3 Die UHFB-Querkraftdatenbank

### 3.1 Übersicht und Abgrenzung

Die UHFB-Querkraftdatenbank soll die vergleichende Auswertung eines Großteils der aktuell verfügbaren Querkraftversuche an Biegeträgern aus UHFB ermöglichen. Die in der Literatur publizierten Versuche werden hierzu nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- ultrahochfester Beton ( $118 \text{ N/mm}^2 \leq f_{cm} \leq 224 \text{ N/mm}^2$ ),
- glatte gerade Stahlfasern ( $6 \text{ mm} \leq l_f \leq 40 \text{ mm}$ ;  $0,15 \text{ mm} \leq \phi_f \leq 0,50 \text{ mm}$ ) oder faserfreier UHFB,
- Biegebewehrung aus geripptem Betonstahl oder Spannstahllichtzen,
- Schubslankheit  $1,7 \leq a/d \leq 5,4$ ,
- Biegeschub- oder Schub-Zug-Versagen im Experiment,
- Angaben zur Ermittlung der Druckfestigkeit und der Nachrisszugfestigkeit sind dokumentiert.

Der Festigkeitsbereich wird bewusst weit gefasst, um auch den Übergang zum hochfesten Beton abzubilden. Die Eingrenzung der Fasergeometrie erfolgt vor dem Hintergrund, dass bei stahlfaserverstärktem UHFB aufgrund der gegenüber normal- oder hochfestem Beton deutlich besseren Verbundqualität in der Regel



**Bild 2.** Typisches Rissbild a) bei Schub-Zug-Versagen eines stahlfaserverstärkten Biegeträgers mit gegliedertem Querschnitt und b) bei Biegeschubversagen eines Biegeträgers mit Kompaktquerschnitt. Grafik: K. Metje  
Fig. 2. Typical crack pattern a) for shear-tension failure of a fibre-reinforced girder with I-shaped cross-section and b) for diagonal tension failure of a girder with compact cross-section. Source: K. Metje

glatte gerade (Mikro-)Fasern ohne mechanische Verankerung zum Einsatz kommen.

Bisherige datenbankbasierte Studien zur Querkrafttragfähigkeit stahlfaserverstärkter Biegeträger [3], [19], [20], [21] differenzieren bei der Auswertung nicht zwischen Bauteilen mit gegliedertem Querschnitt (näherungsweise I-förmiger Querschnitt) und Bauteilen mit Kompaktquerschnitt (näherungsweise rechteckförmiger Querschnitt), obwohl sich Rissbildung und Versagensart für beide Querschnittsformen deutlich unterscheiden [22] (**Bild 2**). Für stahlfaserverstärkte UHFB-Biegeträger mit gegliedertem Querschnitt haben Studien gezeigt, dass der kritische Schubriss geradlinig verläuft und sich nach ausgeprägter Mehrfachrissbildung gleichmäßig im Bereich des dünnen Steges öffnet [23], [24], [25], [26] (Schub-Zug-Versagen). UHFB-Biegeträger mit Kompaktquerschnitt zeigen hingegen einen typischen Biegeschubriss [22], [27], [28], [29], dessen Breite in Richtung des gezogenen Querschnittsrandes zunimmt. Mit Blick auf die Relevanz der Rissbreite für die Wirksamkeit der Fasern, wird im Folgenden hinsichtlich der Querschnittsform unterschieden.

Die UHFB-Querkraftdatenbank enthält insgesamt 185 Versuche (**Tabelle 1**). Davon wurden 127 Versuche an Biegeträgern

mit gegliedertem Querschnitt ([23], [24], [25], [26], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42]) und 58 Versuche an Biegeträgern mit Kompaktquerschnitt ([22], [27], [28], [29], [43], [44], [45], [46], [47], [48]) durchgeführt.

Berücksichtigt wurden 120 3-Punkt- und 57 4-Punkt-Versuche mit frei drehbarer Lagerung sowie acht Versuche mit sogenannter „Substrukturtechnik“, die unter Ausnutzung der Symmetriebedingungen an einer Trägerhälfte durchgeführt wurden [24].

**Tabelle 2** und **Tabelle 3** im Anhang enthalten die vollständigen Datensätze der in die Datenbank aufgenommenen Versuche.

### 3.2 Ansatz der Druckfestigkeit

In den einzelnen Studien wurde die Betondruckfestigkeit begleitend an Würfeln oder Zylindern unterschiedlicher Abmessung bestimmt. Für die Auswertung des Bemessungsansatzes aus Abschnitt 2 wird die Druckfestigkeit am Zylinder mit  $d/h = 150/300$  mm benötigt. Die in den Quellen angegebenen Druckfestigkeiten  $f_{c,i}$  müssen daher auf  $f_{cm}$  gemäß Gleichung (19) umgerechnet werden.

$$f_{cm} = k_{c,i} \cdot f_{c,i} \quad (19)$$

Hierzu werden nachfolgend Umrechnungsfaktoren  $k_{c,i}$  aus den Untersuchungen von Riedel et al. [49], [50] sowie Metje & Leutbecher [22] abgeleitet. **Bild 3** zeigt für unterschiedlichen Grobkorn- und Feinkorn-UHFB das Verhältnis der Druckfestigkeiten von Zylindern mit  $d/h = 100/200$  mm (Cyl100) und Würfeln mit  $d = 100$  mm (Cube100). Der Einfluss der Probenschlankheit ist für faserfreien UHFB unabhängig vom Durchmesser des Größtkorns  $d_g$  mit  $f_{c,cyl}/f_{c,cube} = 0,99 \approx 1,0$  (insgesamt fünf Serien aus [22], [49]) innerhalb der natürlichen Streuung vernachlässigbar. Gleiches konnte in [49] auch für den Einfluss des Probekörpervolumens festgestellt werden, das heißt  $f_{c,cyl150}/f_{c,cyl100} \approx 1,0$ . Für Proben mit Fasern [22], [50] ergeben sich, je nach Mischungszusammensetzung, unterschiedliche Verhältniswerte zwischen 0,97 und 0,90, wobei  $f_{c,cyl}/f_{c,cube}$  für alle Serien in Abhängigkeit des Fasergehalts annähernd linear abnimmt.

Für die Auswertung der Querkraftdatenbank werden vereinfachend alle am Zylinder ermittelten Druckfestigkeiten mit dem Faktor  $k_{c,i} = 1,0$  umgerechnet. Bei Würfeln wird unterschieden: Für Proben ohne Fasern wird  $k_{c,i} = 1,0$  und für Proben mit Fasern  $k_{c,i} = 0,94$  angesetzt. Auf eine weiter gehende Differenzierung wird angesichts der teilweise unvollständigen Quellenlage und des nur geringen Einflusses der Druckfestigkeit auf den Querkraftwiderstand ( $V_{Rd,c}$ ) verzichtet. Die jeweils verwendeten Umrechnungsfaktoren  $k_{c,i}$  sowie die damit erhaltenen normierten Zylinderdruckfestigkeiten  $f_{cm}$  sind für alle Datensätze in den Tabellen 2 und 3 im Anhang angegeben.

**Tabelle 1.** Anzahl, Querschnittsform und Bewehrungskonfiguration der in der Querkraftdatenbank enthaltenen Versuche  
Table 1. Number, type of cross-section, and reinforcement configuration of tests included in the shear database

Konfiguration:	gegliederter Querschnitt	Kompaktquerschnitt	Summe
Gesamtanzahl	127	58	185
davon ohne/mit Fasern	19/108	18/40	37/148
davon ohne/mit Vorspannung	63/64	49/9	112/73
davon ohne/mit Querkraftbewehrung aus Betonstahl	100/27	56/2	156/29



### 3.3 Ansatz der Nachrisszugfestigkeit

#### 3.3.1 Ausgangslage

Prinzipiell kann die Nachrisszugfestigkeit von Stahlfaserbeton in zentrischen Zugversuchen direkt bestimmt werden [12], [51], [52], [53]. Da solche Versuche jedoch anspruchsvoll und fehleranfällig sind, haben sich in der Baustoffprüfung indirekte Verfahren etabliert. Zu diesen zählen Biegeversuche an Balken [7], [10], [54], [55], [56], Versuche an Kreisringplatten [57] oder Spaltzugversuche [58]. Die so erhaltenen Ergebnisse repräsentieren nicht unmittelbar das tatsächliche Werkstoffverhalten unter Zugbeanspruchung, sondern bedürfen weiterer Interpretation und Umrechnung [59], [60], [61]. Bei allen Auswertungen gilt es zudem zu bedenken, dass sich, abhängig von der Schalungsgeometrie und der Betonierichtung, eine unterschiedliche Faserverteilung und -orientierungen in den Proben einstellen kann.

In den hier betrachteten 24 Studien aus den Tabellen 2 und 3 im Anhang wurden insgesamt 22 verschiedene Methoden und Probengeometrien zur Charakterisierung des Nachrissverhaltens verwendet. Einige Quellen enthalten keinerlei Information über die experimentelle Ermittlung der Nachrisszugfestigkeit, sondern lediglich das Ergebnis einer numerischen Rückrechnung (Inverse-Analysis [62], [63], [64], [65]). Der Vergleich der verschiedenen Nachrisszugfestigkeiten beziehungsweise ihre Umrechnung in einen Grundwert der zentrischen Nachrisszugfestigkeit  $f_{\text{ctf0}}$  als Referenz für eine vergleichende Auswertung ist daher äußerst schwierig.

Diese Problematik wurde bereits von anderen Autoren erkannt [3], [8], [19], [21], [24], [53], [66], und es hat Anläufe gegeben, aus vorliegenden Versuchsdaten Nachrisszugfestigkeiten abzuleiten. Heek et al. [3] und Lantsoght [19] verfolgten den Ansatz, die Nachrisszugfestigkeit aus den Ergebnissen begleitender Biegeversuche, Spaltzugversuche oder zentrischer Zugversuche abzuleiten. Da solche Begleitversuche nicht in allen Fällen umfassend dokumentiert waren, wurden fehlende Werte mithilfe empirischer Gleichungen ergänzt. Kodsy & Morcoux [21] hingegen leiten für ihre datenbankbasierte Studie die Nachrisszugfestigkeit nicht aus den Ergebnissen von Begleitversuchen ab, sondern legen sie ausgehend von der Nachrisszugfestigkeit von „Referenzbetonen“ fest. Dabei unterstellen Kodsy & Morcoux Proportionalität zwischen Fasergehalt und Nachrisszugfestigkeit. Die unterschiedliche Wirksamkeit verschiedener Fasergeometrien bleibt hingegen unberücksichtigt. Die Methodik und Ergebnisse aus [21] sind daher kritisch zu hinterfragen.

Die Idee der Ableitung der Nachrisszugfestigkeit aus den Ergebnissen von Begleitversuchen, analog [3] und [19], wird im Folgenden für die UHFB-Querkraftdatenbank im Grundsatz übernommen und – dort, wo notwendig – durch ergänzende Betrachtungen unterstützt.

#### 3.3.2 Methodik zur Normierung

Die in den einzelnen Quellen angegebenen Nachrisszugfestigkeiten werden – wie nachfolgend beschrieben – unter Berücksichtigung der Versuchsart (Faktor  $\beta$ ) und der Größe des Probenquerschnitts in einen Grundwert der zentrischen Nachrisszugfestigkeit  $f_{\text{ctf0}}$  überführt.

Direkte Zugversuche wurden in [24], [29], [36], [46] an Zugknochen und in [37], [38] an (gekerbten) Prismen durchgeführt.

Für die so ermittelten zentrischen Nachrisszugfestigkeiten  $f_{\text{ctf,dt}}$  wird, ebenso wie für die in [34], [35], [40], [44] durch Inverse-Analysis aus den Ergebnissen von Biegeversuchen rechnerisch bestimmten zentrischen Nachrisszugfestigkeiten  $f_{\text{ctf,IA}}$ ,  $\beta = 1,0$  angenommen.

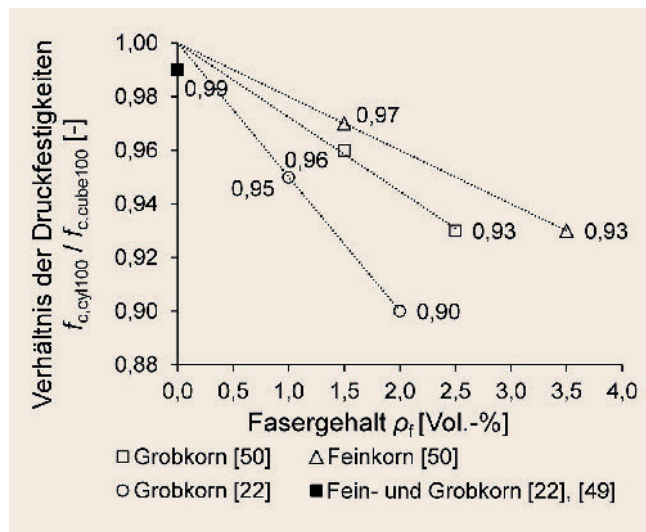
In den Studien [22], [23], [25], [26], [27], [30], [31], [39], [47], [48] wird der verwendete stahlfaserverstärkte UHFB durch die Nachrissbiegezugfestigkeit  $f_{\text{ctf,fl}}$  charakterisiert. Zur Umrechnung der Nachrissbiegezugfestigkeit in die zentrische Zugfestigkeit wurden von Leutbecher & Rebling [8], [67] vergleichend 3-Punkt-Versuche nach DIN EN 14651 [55] und direkte Zugversuche an aus Balken herausgesägten Zugproben durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die im 3-Punkt-Versuch bei kleiner Mittendurchbiegung ( $\delta_1 = 0,47 \text{ mm}$ ) beziehungsweise Rissöffnung ( $\text{CMOD}_1 = 0,5 \text{ mm}$ ) bestimmte Nachrissbiegezugfestigkeit  $f_{\text{R,1}}$  in guter Näherung mit dem Faktor  $\beta = 0,37$  in die zentrische Nachrisszugfestigkeit umgerechnet werden kann. Zum gleichen beziehungsweise einem ähnlichen Ergebnis kommen die Autoren in [3], [19], [21], [66] auf Basis theoretischer Überlegungen. Die Umrechnung mit  $\beta = 0,37$  wird daher auch hier für die UHFB-Querkraftdatenbank verwendet.

Die Studien [28], [43] geben Nachrisspaltzugfestigkeiten  $f_{\text{ctf,sp}}$ , gemessen an Zylindern, und [42], gemessen an Würfeln an. Für normal- und hochfeste Faserbetone verwendet Lantsoght [19] zur Umrechnung in die zentrische Nachrisszugfestigkeit ohne nähere Begründung  $\beta = 0,37$ . Für stahlfaserverstärkten UHFB lässt sich nach Auswertung verschiedener Untersuchungen [25], [68], [69], [70] und eigener Versuche (insgesamt 22 Datensätze) kein entsprechender beziehungsweise – allgemein – kein offensichtlicher Zusammenhang zwischen Nachrisspaltzugfestigkeit und zentrischer Nachrisszugfestigkeit feststellen. Für die Studien [28], [43] und [42] wird  $f_{\text{ctf0}}$  daher auf andere Weise abgeschätzt (Abschnitt 3.3.3).

Bei prismatischen Probekörpern mit kleinen Querschnittsabmessungen stellt sich erfahrungsgemäß eine stärker unidirektionale Faserorientierung parallel zu den geschalteten Oberflächen ein [71]. Im zentrischen Zugversuch oder Biegeversuch werden dann höhere Nachrisszugfestigkeiten als an Probekörpern mit größeren Querschnittsabmessungen ermittelt [53], [69], [72]. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird  $f_{\text{ctf0}}$  bei Proben, deren kleinsten Querschnittsabmessung 51 mm (2 in) unterschreitet, zusätzlich mit dem Faktor 0,85 abgemindert (betrifft [24], [27], [29], [31], [33], [36], [38], [39], [46]). In [33] fehlen konkrete Angaben zur Geometrie der Probekörper, an denen die sehr hohe Nachrissbiegezugfestigkeit von 50 N/mm<sup>2</sup> bestimmt wurde. Für die Umrechnung in  $f_{\text{ctf0}}$  wird angenommen, dass dies an kleinformatigen Probekörpern geschah.

#### 3.3.3 Überprüfung der Plausibilität und Ergänzung fehlender Daten

Die nach Abschnitt 3.3.2 bestimmten zentrischen Nachrisszugfestigkeiten  $f_{\text{ctf0}}$  sind in **Bild 4** über das Produkt aus Fasergehalt  $\rho_f$  (in Vol.-%) und Faserschlankheit ( $l_f/\phi_f$ ) aufgetragen. 20 der insgesamt 38 Datensätze repräsentieren Rezepturen mit ähnlicher Fasergeometrie ( $l_f = 13 \text{ mm}$  und  $0,16 \text{ mm} \leq \phi_f \leq 0,22 \text{ mm}$ ), sodass für diese ein angenähert linearer Zusammenhang zwischen  $f_{\text{ctf0}}$  und  $\rho_f \cdot (l_f/\phi_f)$  erwartet werden kann. Die Regressionsanalyse für 14 dieser Datensätze (Kreise) liefert die folgende Beziehung (gestrichelte Linie in Bild 4):



**Bild 3.** Verhältnis der Druckfestigkeiten für Zylinder mit  $d/h = 100/200$  mm (Cyl100) und Würfel mit  $d = 100$  mm (Cube100) nach [22], [49], [50]  
Grafik: K. Metje  
Fig. 3. Ratio of compressive strength of cylinder with  $d/h = 100/200$  mm (Cyl100) and cube with  $d = 100$  mm (Cube100) acc. to [22], [49], [50]  
Source: K. Metje

$$f_{ctf0} [\text{N/mm}^2] = 0,07 \cdot \rho_f [\text{Vol.-%}] \cdot (l_f / \phi_f) \quad (20)$$

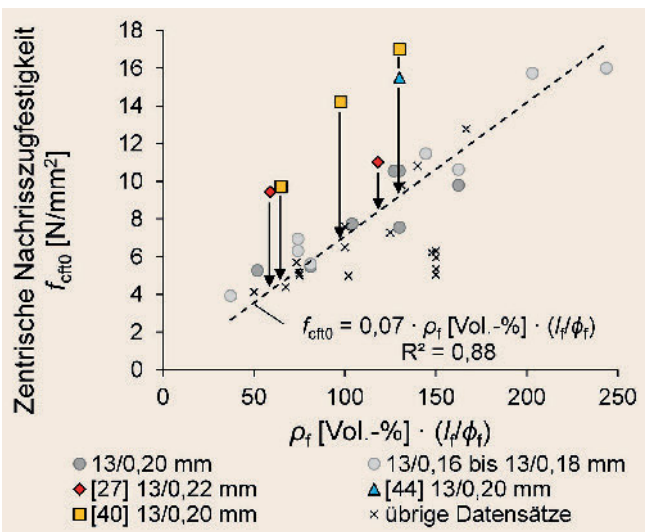
Die Ergebnisse von Yang et al. [40], Ahmad et al. [27] und Bae et al. [44] weichen auf unplausible Weise von der Regressionsgeraden ab. Die hohen Werte von [44] sind möglicherweise auf die Anwendung der Inverse-Analysis nach JCI-S-001-2003 [65] zurückzuführen, mit der laut Graybeal & Baby [70] die zentrische Nachrisszugfestigkeit tendenziell überschätzt werde. Eine abschließende Ermittlung der Ursache ist jedoch nicht möglich. Vereinfachend wird  $f_{ctf0}$  daher für die Datensätze aus [40], [27] und [44] nach Gleichung (20) festgelegt.

Auch für die Versuche aus [42], [43] und [28], für die aus Begleitversuchen ausschließlich Nachrisspaltzugfestigkeiten vorliegen, sowie für die Versuche S6(0.5), S6(1.0), S6(1.5) und S13(0.5) aus [29], für die lediglich die in Begleitversuchen ermittelte Rissspannung, nicht jedoch die Nachrisszugfestigkeit dokumentiert wurde, wird  $f_{ctf0}$  ersatzweise mithilfe von Gleichung (20) bestimmt.

Die nach Abschnitt 3.3.2 normierten beziehungsweise nach Gleichung (20) ergänzten/korrigierten Grundwerte der zentrischen Nachrisszugfestigkeit  $f_{ctf0}$  sind für alle Datensätze in den Tabellen 2 und 3 im Anhang angegeben.

## 4 Resümee und Ausblick

Im Zuge der Recherche und Sichtung international verfügbarer experimenteller Arbeiten zum Querkrafttragverhalten stahlfaserverstärkter UHFB-Biegeträger hat sich gezeigt, dass die veröffentlichten Versuchsdaten in vielen Fällen nicht ohne weiteres zur Überprüfung des in diesem Beitrag vorgeschlagenen Bemessungsansatzes verwendet werden können. Vielmehr mussten die in der Literatur angegebenen Druckfestigkeiten und Nachrisszugfestigkeiten vor dem Hintergrund der verwendeten Probengrößen und Methoden der Bestimmung kritisch hinterfragt und für die Auswertung normiert werden. Hierzu werden im vorliegenden Beitrag Umrechnungsfaktoren  $k_{c,i}$  und  $\beta$  vorgeschlagen.



**Bild 4.** Nach Abschnitt 3.3.2 normierte zentrische Nachrisszugfestigkeit für 38 Datensätze (Rezepturen) mit Fasern (gestrichelte Linie: lineare Regression für Fasern mit  $l_f = 13$  mm und  $\phi_f = 0,16$  bis  $0,20$  mm) Grafik: K. Metje  
Fig. 4. Axial post-cracking tensile strength of 38 datasets (mixture designs) containing fibres, normalised acc. to Section 3.3.2 (dashed line: linear regression for fibres with  $l_f = 13$  mm and  $\phi_f = 0,16$  to  $0,20$  mm) Source: K. Metje

Für die in Spaltzugversuchen ermittelten Nachrisszugfestigkeiten kann gegenwärtig kein allgemeiner Umrechnungsfaktor angegeben werden. Für diesen Fall beziehungsweise wenn Angaben gänzlich fehlen, kann die Nachrisszugfestigkeit hilfsweise mittels einer Regressionsfunktion nach Gleichung (20) abgeschätzt werden.

In zukünftigen experimentellen Arbeiten sollte die Nachrisszugfestigkeit als die wichtigste mechanische Kenngröße des Stahlfaserbetons nach möglichst einheitlicher Versuchsmethodik bestimmt und dokumentiert werden. Vorgeschlagen wird der 3-Punkt-Versuch nach DIN EN 14651, wie er nach der zukünftigen DAfStb-Richtlinie „Ultrahochfester Beton“ vorgesehen ist. Zudem wären experimentelle und statistische Untersuchungen zur Normierung der mit verschiedenen Methoden bestimmten Nachrisszugfestigkeiten wünschenswert.

Der vorgeschlagene Bemessungsansatz differenziert beim Ansatz der Tragwirkung aus Fasern zwischen Bauteilen mit gegliedertem Querschnitt und Bauteilen mit Kompaktquerschnitt, da sich Rissbildung und Versagensart für beide Querschnittsformen deutlich unterscheiden. Die Abgrenzung von Bauteilen mit gegliedertem Querschnitt und Bauteilen mit Kompaktquerschnitt sowie die Begründung der für die beiden Querschnittsformen in Teilen unterschiedlich festgelegten Modellparameter erfolgen im Teil 2 des Beitrags, zusammen mit der Überprüfung und statistischen Auswertung der Modellsicherheit des vorgeschlagenen Bemessungsansatzes.

Dieser Beitrag ist der erste Teil einer zusammenhängenden zweiteiligen Veröffentlichung. Teil 2 wird in der kommenden Ausgabe des Bauingenieurs publiziert.

## Literatur

- [1] Fehling, E.; Schmidt, M.; Walraven, J. et al.: Ultrahochfester Beton UHPC. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2013 – Lebensdauer und Instandsetzung, Brandschutz. Ernst & Sohn, Berlin, 2013, Band 2, S. 117-239.
- [2] Reineck, K.-H.; Dunkelberg, D. (eds.): ACI-DafStb databases 2015 with shear tests for evaluating relationships for the shear design of structural concrete members without and with stirrups. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DafStb Heft 617, Beuth Verlag, Berlin, 2017.
- [3] Heek, P.; Look, K.; Minelli, F. et al.: Datenbank für querkraftbeanspruchte Stahlfaserbetonbauteile. In: Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), Heft 3, S. 144-154. <https://doi.org/10.1002/best.201600075>.
- [4] Schmidt, M.; Leutbecher, T.; Piotrowski, S. et al.: The German Guideline for ultra-high performance concrete. In: Toutlemonde, F.; Resplendino, J. (eds.): UHPFRC 2017, Design and Building with UHPFRC: New large-scale implementations, recent technical advances, experience and standards. Proceedings of the AFGC-ACI-fib-RILEM International Conference on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, Montpellier, 2017, pp. 545-554.
- [5] DIN EN 1992-1-1:2011+A1:2015, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Deutsche Fassung, März 2015.
- [6] DIN EN 1992-1-1/NA:2013+NA/A1:2015, Eurocode 2 NDP: Nationaler Anhang – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Deutsche Fassung, Dezember 2015.
- [7] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DafStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“. Beuth Verlag, Berlin, November 2012.
- [8] Leutbecher, T.; Rebling, J.: Experimentelle Untersuchungen zur Ableitung der zentrischen Nachrisszugfestigkeit von UHFB aus Biegeversuchen. In: Bauingenieur 93 (2018), Heft 11, S. 463-472. <https://doi.org/10.37544/0005-6650-2018-11-81>.
- [9] Duque, L. F. M.; Graybeal, B.: Fiber orientation distribution and tensile mechanical response in UHPFRC. In: Materials and Structures, Vol. 50 (2017), Iss. 55. <http://dx.doi.org/10.1617/2Fs11527-016-0914-5>.
- [10] NF P18-710:2016, National addition to Eurocode 2 – Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC). Association Française de Normalisation, April 2016.
- [11] SIA 2052:2016+C1:2017, Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) – Baustoffe, Bemessung und Ausführung. Korrigenda C1 zum Merkblatt SIA 2052:2016. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Juli 2017.
- [12] JSCE (Japan Society of Civil Engineers). Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC). In: Concrete Engineering Series, No. 82 (2008).
- [13] Fédération Internationale du Béton: fib Model Code for Concrete Structures 2010. Ernst & Sohn, Berlin, October 2013.
- [14] Thiemicke, J.; Fehling, E.: Proposed Model to predict the Shear Bearing Capacity of UHPC-Beams with combined Reinforcement. In: Fehling, E.; Middendorf, B.; Thiemicke, J. (eds.): Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials. Proceedings of HiPerMat 2016, Kassel, 2016, pp. 63-64 + Langfassung (9 Seiten).
- [15] Reineck, K.-H.: Hintergründe zur Querkraftbemessung in DIN 1045-1 für Bauteile aus Konstruktionsbeton mit Querkraftbewehrung. In: Bauingenieur 76 (2001), Heft 4, S. 168-179.
- [16] Fédération Internationale de la Précontrainte: Practical design of structural concrete. FIP Report, SETO, London, September 1999.
- [17] Leutbecher, T.: Zur Druckfestigkeit und Drucksteifigkeit des infolge Querzugs gerissenen ultrahochfesten Betons. In: Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019), Heft 10, S. 756-766. <http://dx.doi.org/10.1002/best.201900043>.
- [18] Oettel, V.; Empelmann, M.: Druckstrebentragfähigkeit von vorgespannten UHPFRC-Hohlkästen unter Torsion und kombinierter Beanspruchung. In: Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), Heft 3, S. 182-192. <http://dx.doi.org/10.1002/best.201300061>.
- [19] Lantsogh, E. O. L.: Database of Shear Experiments on Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups. In: Materials, Vol. 12 (2019), Iss. 6, 917. <https://doi.org/10.3390/ma12060917>.
- [20] Lantsoght, E. O. L.: How do steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete beams without stirrups? In: Composites Part B: Engineering, Vol. 175 (2019), 107079. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107079>.
- [21] Kodsy, A.; Morcou, G.: Comparing Shear Strength Prediction Models of Ultra-High-Performance Concrete Girders. In: Shehata, H.; El-Badawy, S. (eds.): Sustainable Issues in Infrastructure Engineering, SUCI. Springer-Verlag, Cham, 2021, pp. 23-39. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-62586-3\\_3](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-62586-3_3).
- [22] Metje, K.; Leutbecher, T.: Experimental investigations on the shear bearing behavior of prestressed ultra-high performance fiber-reinforced concrete beams with compact cross-section. In: Structural Concrete, Vol. 22 (2021), Iss. 6, pp. 3746-3762. <https://doi.org/10.1002/su.co.202100337>.
- [23] Bertram, G.: Experimentelle Untersuchungen zum Querkrafttragverhalten von Spannbetonträgern aus UHPC mit und ohne Stegöffnungen. In: Bauingenieur 90 (2015), Heft 9, S. 444-455.
- [24] Schramm, N.; Fischer, O.: Querkraftversuche an profilierten Spannbetonträgern aus UHPFRC. In: Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019), Heft 4, S. 641-652. <http://dx.doi.org/10.1002/best.201900022>.
- [25] Voo, Y. L.; Foster, S. J.; Gilbert, R. I.: Shear Strength of Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete Prestressed Girders without Stirrups. In: Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 4 (2006), Iss. 1, pp. 123-132. <http://dx.doi.org/10.3151/jact.4.123>.
- [26] Voo, Y. L.; Poon, W. K.; Foster, S. J.: Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Ultrahigh-Performance Concrete Beams without Stirrups. In: Journal of Structural Engineering, Vol. 136 (2010), Iss. 11, pp. 1393-1400. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000234](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000234).
- [27] Ahmad, S.; Bahij, S.; Al-Osta, M. A. et al.: Shear Behavior of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) Beams Reinforced with High-Strength Steel Bars. In: ACI Structural Journal, Vol. 116 (2019), Iss. 4, pp. 3-14. <http://dx.doi.org/10.14359/51714484>.
- [28] Hussein, L.; Amleh, L.: Shear behaviour of UHPFRC beams without stirrups. In: Bastien, J.; Rouleau, N.; Fiset, M. et al. (eds.): Proceedings of The 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Québec, 2014, pp. 437-442.
- [29] Yavaş, A.; Hasgul, U.; Turker, K. et al.: Effective Fiber Type Investigation on the Shear Behavior of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concrete Beams. In: Advances in Structural Engineering, Vol. 22 (2019), Iss. 7, pp. 1591-1605. <https://doi.org/10.1177/2F1369433218820788>.
- [30] Baby, F.; Marchand, P.; Toutlemonde, F.: Shear Behavior of Ultrahigh Performance Fiber-Reinforced Concrete Beams: I – Experimental Investigation. In: Journal of Structural Engineering, Vol. 140 (2014), Iss. 5, 04013111. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000907](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000907).
- [31] Graybeal, B. A.: Structural Behavior of Ultra-High Performance Concrete Prestressed I-Girders. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report FHWA-HRT-06-115, McLean, 2006.
- [32] Hasgul, U.; Yavaş, A.; Birol, T. et al.: Steel Fiber Use as Shear Reinforcement on I-Shaped UHP-FRC Beams. In: Applied Sciences, Vol. 9 (2019), Iss. 24, pp. 5526. <https://doi.org/10.3390/app9245526>.
- [33] Hegger, J.; Tuchlinski, D.; Kommer, B.: Untersuchungen an Spannbetonträgern aus UHPC. In: BFT INTERNATIONAL 72 (2006), Heft 1, S. 14-20.
- [34] Mészöly, T.; Randl, N.: Shear Behavior of Fiber-Reinforced Ultra-High Performance Concrete Beams. In: Engineering Structures, Vol. 168 (2018), Iss. 8, pp. 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.075>.
- [35] Lee, J. H.: Shear Strength of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete I-shaped Beams. Seoul National University, Dissertation, 2017.
- [36] Pansuk, W.; Nguyen, T. N.; Sato, Y. et al.: Shear capacity of high performance fiber reinforced concrete I-beams. In: Construction and Building Materials, Vol. 157 (2017), Iss. 12, pp. 182-193. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.057>.
- [37] Telleen, K.; Noshirvani, T.; Galrito, R. et al.: Experimental investigation into the shear resistance of a reinforced UHPFRC web element. In: Fischer, G.; Geiker, M.; Hededal, O. et al. (eds.): Proceedings of the 8th PhD Symposium in Civil Engineering, Copenhagen, 2010, pp. 291-296.
- [38] Thiemicke, J.: Zum Querkrafttragverhalten von UHPC-Balken mit kombinierter Bewehrung aus Stahlfasern und Stabstahl. Universität Kassel, Dissertation. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 25, kassel university press, Kassel, 2015.
- [39] Wipf, T.; Phares, B.; Sritharan, S. et al.: Design and Evaluation of a Single-Span Bridge Using Ultra-High Performance Concrete. Iowa State University, Center for Transportation Research and Education, Report IHRB Project TR-529, Ames, 2009.
- [40] Yang, L.-H.; Joh, C.; Kim, B.-S.: Shear Behaviour of Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete Beams Without Stirrups. In: Magazine of Concrete Research, Vol. 64 (2012), Iss. 11, pp. 979-993. <https://doi.org/10.1680/mac.11.00153>.
- [41] Yavaş, A.; Goker, C. O.: Impact of Reinforcement Ratio on Shear Behavior of I-Shaped UHPC Beams with and without Fiber Shear Reinforcement. In: Materials, Vol. 13 (2020), Iss. 7, pp. 1525. <https://doi.org/10.3390/ma13071525>.
- [42] Zheng, H.; Fang, Z.; Chen, B.: Experimental Study on Shear Behavior of Prestressed Reactive Powder Concrete I-Girders. In: Frontiers of



- Structural and Civil Engineering, Vol. 13 (2019), Iss. 3, pp. 618-627. <http://dx.doi.org/10.2749/222137816819259149>.
- [43] Aziz, O. Q.; Ali, M. H.: Shear Strength and Behaviour of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPC) Deep Beams without Web Reinforcement. In: International Journal of Civil Engineering, Vol. 2 (2013), Iss. 3, pp. 85-96.
- [44] Bae, B.-I.; Lee, M.-S.; Choi, C.-S. et al.: Evaluation of the Ultimate Strength of the Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Beams. In: Applied Sciences, Vol. 11 (2021), Iss. 7, pp. 2951. <http://dx.doi.org/10.3390/app11072951>.
- [45] Bunje, K.; Fehling, E.: About shear force and punching shear resistance of structural elements of Ultra High Performance Concrete. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslücke, C. (eds.): Ultra High Performance Concrete (UHPC). Proceedings of HiPerMat 2004, Kassel, 2004, pp. 401-411.
- [46] Lim, W. Y.; Hong, S. G.: Shear Tests for Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) Beams with Shear Reinforcement. In: International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol. 10 (2016), Iss. 2, pp. 177-188. <http://dx.doi.org/10.1007/s40069-016-0145-8>.
- [47] Pourbaba, M.; Joghataie, A.; Mirmiran, A.: Shear Behavior of Ultra-High Performance Concrete. In: Construction and Building Materials, Vol. 183 (2018), Iss. 9, pp. 554-564. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.117>.
- [48] Ridha, M. M. S.; Sarsam, K. F.; Al-Shaarbaf, I. A. S.: Experimental Study and Shear Strength Prediction for Reactive Powder Concrete Beams. In: Case Studies in Construction Materials, Vol. 8 (2018), Iss. 6, pp. 434-446. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.03.002>.
- [49] Riedel, P.; Leutbecher, T.; Piotrowski, S. et al.: Einfluss der Probekörpergeometrie auf die Ergebnisse von Druckfestigkeitsprüfungen an ultrahochfestem Beton. In: Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018), Heft 8, S. 598-607. <http://dx.doi.org/10.1002/best.201800027>.
- [50] Riedel, P.; Leutbecher, T.: Einfluss der Faserorientierung und des Fasergehalts auf die Druckfestigkeit von ultrahochfestem Beton. In: Beton- und Stahlbetonbau 115 (2020), Heft 10, S. 789-800. <http://dx.doi.org/10.1002/best.202000020>.
- [51] RILEM TC 162-TDF, Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Uni-axial tension test for steel fibre reinforced concrete, Recommendations. In: Materials and Structures, Vol. 34 (2001), Iss. 1, pp. 3-6.
- [52] Graybeal, B. A.; Baby, F.: Development of a direct tension test method for ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. In: ACI Materials Journal, Vol. 110 (2013), Iss. 2, pp. 177-186.
- [53] Wille, K.; El-Tawil, S.; Naaman, A. E.: Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. In: Cement & Concrete Composites, Vol. 48 (2014), pp. 53-66. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.015>.
- [54] RILEM TC 162-TDF, Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Bending test, Final recommendation. In: Materials and Structures, Vol. 35 (2003), Iss. 9, pp. 579-582.
- [55] DIN EN 14651:2007: Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern – Bestimmung der Biegezugfestigkeit (Proportionalitätsgrenze, residuelle Biegezugfestigkeit). Deutsche Fassung, Dezember 2007.
- [56] ASTM C1609 / C1609M-12. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). ASTM International, West Conshohocken (PA), 2012.
- [57] ASTM C1550-12a. Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel). ASTM International, West Conshohocken (PA), 2012.
- [58] ASTM C496 / C496M-17. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken (PA), 2017.
- [59] RILEM TC 162-TDF, Test and design methods for steel fibre reinforced concrete:  $\sigma$ - $\epsilon$ -design method, Final recommendation. In: Materials and Structures, Vol. 36 (2003), Iss. 262, pp. 560-567.
- [60] di Prisco, M.; Colombo, M.; Dozio, D.: Fibre-reinforced concrete in fib Model Code 2010: principles, models and test validation. In: Structural Concrete, Vol. 14 (2013), Iss. 4, pp. 342-361. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201300021>.
- [61] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Erläuterungen zur DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ DAfStb Heft 614, Beuth Verlag, Berlin, November 2015.
- [62] Kitsutaka, Y.: Fracture Parameters by Polylinear Tension-Softening Analysis. In: Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123 (1997), Iss. 5, pp. 444-450. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:5\(444\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:5(444)).
- [63] Chanvillard, G.: Caractérisation des performances d'un béton renforcé de fibres à partir d'un essai de flexion. Partie 1: De la subjectivité des indices de ténacité (Characterisation of fibre reinforced concrete's performance after a flexural test – Part 1: On subjectivity of toughness indices). In: Materials and Structures, Vol. 32 (1999), Iss. 6, pp. 418-426. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02482713>.
- [64] Chanvillard, G.: Caractérisation des performances d'un béton renforcé de fibres à partir d'un essai de flexion. Partie 2: Identification d'une loi de comportement intrinsèque en traction (Characterisation of fibre reinforced concrete's performance after a flexural test – Part 2: Identification of an intrinsic behaviour relationship in tension). In: Materials and Structures, Vol. 32 (1999), Iss. 8, pp. 601-605. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02480495>.
- [65] JCI-S-001-2003: Method of test for fracture energy of concrete by use of notched beam. Japan Concrete Institute, 2003.
- [66] Oettel, V.; Matz, H.; Empelmann, M.: Bestimmung der zentrischen Nachrisszugfestigkeit von UHPFRC mithilfe gekerbter 3-Punkt-Biegezugversuche. In: Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019), Heft 4, S. 255-264. <https://doi.org/10.1002/best.201800092>.
- [67] Leutbecher, T.; Rebling, J.: Predicting the postcracking strength of ultra-high performance fiber reinforced concrete by means of three-point bending tests according to EN 14651. In: Structural Concrete, Vol. 20 (2019), Iss. 6, pp. 2081-2095. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201900070>.
- [68] Graybeal, B. A.: Characterization of the Behavior of Ultra-High Performance Concrete. University of Maryland, Dissertation, 2005.
- [69] Mészöly, T.; Randl, N.: An Advanced Approach to Derive the Constitutive Law of UHPFRC. In: Architecture Civil Engineering Environment, Vol. 11 (2018), Iss. 1, pp. 89-96. <http://dx.doi.org/10.21307/ACEE-2018-009>.
- [70] Graybeal, B. A.; Baby, F.: Tension Testing of Ultra-High Performance Concrete. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report FHWA-HRT-17-053, McLean, 2019.
- [71] Riedel, P.; Leutbecher, T.: Effect of Fiber Orientation on Compressive Strength of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. In: ACI Materials Journal, Vol. 118 (2021), Iss. 2, pp. 199-209. <https://doi.org/10.14359/51730417>.
- [72] Ankaý, B.; Metje, K.; Mönig, T. et al.: Ultrasonic characterisation of steel fibre orientation in ultra-high performance concrete. In: AMA Service GmbH (Hrsg.): Tagungsband 20. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme, Nürnberg, 2019, S. 310-317. <http://dx.doi.org/10.5162/sensoren2019/4.1.4>.



**Kevin Metje, M.Sc.**

metje@bau.uni-siegen.de, Tel. 0271 740 4029

Foto: Universität Siegen



**Prof. Dr.-Ing.  
Torsten Leutbecher**

leutbecher@bau.uni-siegen.de, Tel. 0271 740 2592

Foto: Universität Siegen

Universität Siegen, Lehrstuhl für Massivbau  
Paul-Bonatz Str. 9-11, 57068 Siegen

Der komplette Fachaufsatz (inkl. Anhang mit Tabelle 2 und 3) findet sich in unserem E-Paper und in unserer eLibrary (DOI: 10.37544/0005-6650-2022-03-67)



Bezeichnungen in Tabelle 2 und Tabelle 3											
$f_{c,i}$	Betondruckfestigkeit gemäß Autorenangabe										
Form	Probengeometrie im Druckversuch: Cyl150 entspricht Zylinder mit $d/h = 150/300$ mm; Cyl100 entspricht Zylinder mit $d/h = 100/200$ mm; Cyl176 entspricht Zylinder mit $d/h = 76/152$ mm; Cube100 entspricht Würfel mit $d = 100$ mm; Cube51 entspricht Würfel mit $d = 51$ mm										
$k_{c,i}$	Faktor zur Umrechnung in die Zylinderdruckfestigkeit Cyl150 (Abschnitt 3.2)										
$f_{cm}$	Normierte mittlere Zylinderdruckfestigkeit Cyl150 ( $d/h = 150/300$ mm)										
$d_g$	Durchmesser des Größtkorns der Gesteinskörnung										
$\rho_t$	Fasergehalt										
$l_f$	Faserlänge										
$\phi_f$	Faserdurchmesser										
$f_{ctm,dt}$	Mittlere zentrische Nachrisszugfestigkeit, gemessen in direkten Zugversuchen, Wert gemäß Autorenangabe										
$f_{ctm,IA}$	Mittlere zentrische Nachrisszugfestigkeit, berechnet mittels Inverse-Analysis, Wert gemäß Autorenangabe										
$f_{ctm,fl}$	Mittlere Nachrissbiegezugfestigkeit, gemessen in 3-Punkt- oder 4-Punkt-Biegeversuchen, Wert gemäß Autorenangabe										
$f_{ctm,sp}$	Mittlere Nachrissspaltzugfestigkeit, gemessen in Spaltzugversuchen, Wert gemäß Autorenangabe										
$\beta$	Faktor zur Umrechnung in die zentrische Nachrisszugfestigkeit (Abschnitt 3.3)										
$f_{ctf0}$	Für die Auswertung verwendeter Grundwert der zentrischen Nachrisszugfestigkeit (Abschnitt 3.3)										
$d$	Statische Nutzhöhe										

$h$	Querschnittshöhe
$b_w$	Kleinste Breite der Zugzone
$\rho_l$	Geometrischer Biegebewehrungsgrad
$\rho_w$	Geometrischer Querkraftbewehrungsgrad (Querkraftbewehrung aus Betonstahl)
$f_{ywm}$	Mittlere Streckgrenze der Querkraftbewehrung aus Betonstahl
$\sigma_{c,exp}/f_{cm}$	Verhältnis zwischen der Betonlängsspannung (aus Vorspannung) und der mittleren Zylinderdruckfestigkeit zum Zeitpunkt des Querkraftversuchs
$a/d$	Schubschlankeit
Setup	Konfiguration des Querkraftversuchs: 3-P bedeutet 3-Punkt-Biegeversuch; 4-P bedeutet 4-Punkt-Biegeversuch; Sub bezeichnet die an der TU München verwendete „Substrukturtechnik“ [24]
$V_{exp}$	Höchstwert der im Versuch gemessenen Querkraft
$V_c$	Querkrafttraganteil des faserfreien Betonquerschnitts ohne Längsspannung (linker Summand in eckiger Klammer in Gleichung (2), Abschnitt 2.1)
$V_p$	Querkrafttraganteil des faserfreien Betonquerschnitts infolge Längsspannung (rechter Summand in eckiger Klammer in Gleichung (2), Abschnitt 2.1)
$V_s$	Querkrafttraganteil der konventionellen Querkraftbewehrung aus Betontahl (Gleichung (8), Abschnitt 2.1)
$V_f$	Querkrafttraganteil infolge Wirkung der Fasern im Schubriss (Gleichung (15), Abschnitt 2.1)
$V_{cal}$	Rechnerischer Querkraftwiderstand als Summe der Traganteile $V_c$ , $V_p$ , $V_s$ und $V_f$ (Gleichung (1), Abschnitt 2.1) bzw. als Summe der Traganteile $V_s$ und $V_f$ (Gleichung (18), Abschnitt 2.2)

Tabelle 2. Querkraftversuche an Bauteilen mit gegliedertem Querschnitt  
Table 2. Shear tests on beams with I-shaped cross-section

Nr.	Versuchsbezeichnung	$f_{c,i}$	Form	$k_{c,i}$	$f_{cm}$	$d_g$	$\rho_f$	$l_f$	$\phi_f$	$h/l \cdot \phi_f$	$f_{ctm,dt}$	$f_{ctm,IA}$	$f_{ctm,fl}$	$f_{ctm,sp}$	$\beta$	$f_{cr0}$	$d$	$h$	$b_w$	$\rho_l$	$\rho_w$	$f_{ywm}$	$\sigma_{c,exp}/f_{cm}$	$a/d$	Setup	$V_{exp}$	$V_c$	$V_p$	$V_s$	$V_f$	$V_{cal}$	
		N/mm <sup>2</sup>		-	N/mm <sup>2</sup>	mm	Vol.-%	mm	mm	-	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	-	N/mm <sup>2</sup>	cm	cm	cm	%	%	N/mm <sup>2</sup>	-	-		kN	kN	kN	kN	kN	kN	
Baby et al. 2014, [30]																																
1	UHPFRC-A-PC-NS	203,0	Cyl100	1,00	203,0	0,5	2,5	20	0,3	67	-	-	34,5 <sup>1)</sup>	-	0,37	12,8	30,5	38,0	6,5	4,54	-	-	0,059	2,5	4-P	430,0	52,4	28,3	-	315,3	396,0	
2	UHPFRC-A(2)-PC-NS	202,0	Cyl100	1,00	202,0	0,5	2,5	20	0,3	67	-	-	34,5 <sup>1)</sup>	-	0,37	12,8	30,5	38,0	6,5	4,54	-	-	0,059	2,5	4-P	431,0	52,3	28,3	-	315,3	395,9	
3	UHPFRC-B-PC-NS	205,0	Cyl100	1,00	205,0	0,5	2,0	13	0,2	65	-	-	28,5 <sup>1)</sup>	-	0,37	10,5	30,5	38,0	6,5	4,54	-	-	0,056	2,5	4-P	507,0	52,5	27,5	-	260,5	340,5	
4	UHPFRC-A(2)-PC-WS	202,0	Cyl100	1,00	202,0	0,5	2,5	20	0,3	67	-	-	34,5 <sup>1)</sup>	-	0,37	12,8	30,5	38,0	6,5	4,54	1,90	561	0,059	2,5	4-P	544,0	52,3	28,3	83,3	315,3	479,2	
5	UHPFRC-B-PC-WS	205,0	Cyl100	1,00	205,0	0,5	2,0	13	0,2	65	-	-	28,5 <sup>1)</sup>	-	0,37	10,5	30,5	38,0	6,5	4,54	1,90	561	0,056	2,5	4-P	629,5	52,5	27,5	82,8	260,5	423,3	
6	UHPFRC-A-RC-NS	203,0	Cyl100	1,00	203,0	0,5	2,5	20	0,3	67	-	-	34,5 <sup>1)</sup>	-	0,37	12,8	30,5	38,0	6,5	10,40	-	-	-	2,5	4-P	454,5	57,5	-	-	315,3	372,8	
7	UHPFRC-B-RC-NS	205,0	Cyl100	1,00	205,0	0,5	2,0	13	0,2	65	-	-	28,5 <sup>1)</sup>	-	0,37	10,5	30,5	38,0	6,5	10,40	-	-	-	2,5	4-P	447,5	57,7	-	-	260,5	318,1	
8	UHPC-A-NF-RC-NS	187,0	Cyl100	1,00	187,0	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30,5	38,0	6,5	10,40	-	-	-	2,5	4-P	180,5	55,9	-	-	-	55,9	
Bertram 2015, [23]																																
1	T1a	151,0	Cube100	0,94	141,9	8	0,9	17	0,15	113	-	-	12,0 <sup>2)</sup>	-	0,37	4,4	31,7	40,0	5,5	3,96	-	-	0,111	3,8	3-P	234,0	38,7	33,0	-	97,7	169,4	
2	T1b	174,0	Cube100	0,94	163,6	8	0,9	17	0,15	113	-	-	13,0 <sup>2)</sup>	-	0,37	4,8	31,7	40,0	5,2	5,39	-	-	0,116	3,8	3-P	267,0	42,5	37,5	-	100,0	180,1	
3	T2a	134,0	Cube100	1,00	134,0	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31,7	40,0	6,0	3,63	-	-	0,116	3,8	3-P	134,0	40,3	35,6	-	-	75,8	
4	T2b	134,0	Cube100	1,00	134,0	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31,7	40,0	6,0	4,67	-	-	0,137	3,8	3-P	147,0	43,8	41,9	-	-	85,7	
5	T3b	162,0	Cube100	0,94	152,3	8	2,5	9	0,15	60	-	-	14,7 <sup>2)</sup>	-	0,37	5,4	31,7	40,0	6,0	4,67	-	-	0,123	3,8	3-P	408,0	45,7	42,8	-	130,5	219,0	
6	T4a	176,0	Cube100	0,94	165,4	8	0,9	17	0,15	113	-	-	13,0 <sup>2)</sup>	-	0,37	4,8	31,7	40,0	6,0	4,67	-	-	0,112	3,8	3-P	347,0	47,0	42,2	-	115,4	204,6	
7	T4b	183,0	Cube100	0,94	172,0	8	0,9	17	0,15	113	-	-	13,3 <sup>2)</sup>	-	0,37	4,9	31,7	40,0	6,0	4,67	-	-	0,108	4,4	3-P	292,0	47,6	42,4	-	118,1	208,1	
8	T5a	177,0	Cube100	0,94	166,4	8	0,9	17	0,15	113	-	-	13,0 <sup>2)</sup>	-	0,37	4,8	31,7	40,0	6,0	4,67	-	-	0,110	3,8	3-P	326,0	47,1	41,9	-	115,4	204,4	
9	T5b	179,0	Cube100	0,94	168,3	8	0,9	17	0,15	113	-	-	13,1 <sup>2)</sup>	-	0,37	4,8	31,7	40,0	6,0	4,67	-	-	0,110	3,8	3-P	299,0	47,2	42,1	-	116,3	205,7	
10	T18a	185,0	Cube100	0,94	173,9	8	0,9	17	0,15	113	-	-	13,3 <sup>2)</sup>	-	0,37	4,9	31,7	40,0	6,0	4,67	-	-	0,108	4,1	3-P	301,0	47,8	42,9	-	118,1	208,8	
11	T19b	174,0	Cube100	0,94	163,6	8	0,9	17	0,15	113	-	-	12,9 <sup>2)</sup>	-	0,37	4,8	31,7	40,0	6,0	4,67	-	-	0,114	3,5	3-P	324,0	46,8	42,5	-	114,6	203,9	
12	T22b	189,0	Cube100	0,94	177,7	8	0,9	17	0,15	113	-	-	13,5 <sup>2)</sup>	-	0,37	5,0	31,7	40,0	4,0	4,67	-	-	0,104	3,8	3-P	210,0	32,1	28,0	-	79,9	140,0	
13	T24b	175,0	Cube100	0,94	164,5	8	0,9	17	0,15	113	-	-	13,0 <sup>2)</sup>	-	0,37	4,8	61,7	70,0	4,0	4,80	-	-	0,108	3,8	3-P	316,0	53,7	52,7	-	134,7	241,1	
14	T25b	169,0	Cube100	0,94	158,9	8	0,9	17	0,15	113	-	-	12,7 <sup>2)</sup>	-	0,37	4,7	61,7	70,0	6,0	4,80	-	-	0,118	3,8	3-P	464,0	79,6	83,0	-	197,4	359,9	
15	T26b	172,0	Cube100	0,94	161,7	8	2,5	9	0,15	60	-	-	15,2 <sup>2)</sup>	-	0,37	5,6	61,7	70,0	6,0	4,80	-	-	0,110	3,8	3-P	521,0	80,1	78,8	-	236,2	395,1	

Nr.	Versuchsbezeichnung	$f_{c,i}$	Form	$k_{c,i}$	$f_{cm}$	$d_g$	$\rho_t$	$l_t$	$\phi_t$	$l_t/\phi_t$	$f_{ctm,dt}$	$f_{ctm,IA}$	$f_{ctm,fl}$	$f_{ctm,sp}$	$\beta$	$f_{ctt0}$	$d$	$h$	$b_w$	$\rho_l$	$\rho_w$	$f_{ywm}$	$\sigma_{c,exp}/f_{cm}$	$a/d$	Setup	$V_{exp}$	$V_c$	$V_p$	$V_s$	$V_l$	$V_{cal}$
		N/mm²		-	N/mm²	mm	Vol.-%	mm	mm	-	N/mm²	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	N/mm²	cm	cm	cm	%	%	N/mm²	-	-		kN	kN	kN	kN	kN	kN
16	T29b	183,0	Cube100	0,94	172,0	8	0,9	30	0,4	75	-	-	12,6 <sup>2)</sup>	-	0,37	4,7	61,7	70,0	6,0	4,80	-	-	0,109	3,8	3-P	476,0	81,8	83,1	-	195,8	360,7
Graybeal 2006, [31]																															
1	24S	193,0	Cyl76	1,00	193,0	0,5	2,0	12,7	0,2	63	-	-	33,5 <sup>3)</sup>	-	0,37	10,5 <sup>a)</sup>	80,2	91,3	15,2	1,94	-	-	0,044	2,8	3-P	2230,0	197,7	124,1	-	1461,7	1783,5
2	14S	193,0	Cyl76	1,00	193,0	0,5	2,0	12,7	0,2	63	-	-	33,5 <sup>3)</sup>	-	0,37	10,5 <sup>a)</sup>	80,2	91,3	15,2	1,94	-	-	0,044	2,3	3-P	1950,0	197,7	124,1	-	1461,7	1783,5
Hasgul et al. 2019, [32]																															
1	NF	145,0	Cube100	1,00	145,0	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22,5	25,0	5,0	3,57	-	-	-	4,4	4-P	37,8	26,3	-	-	-	26,3
Hegger et al. 2006, [33]																															
1	V1	180,0	Cube100	0,94	169,2	0,7	2,5	13	0,16	81	-	-	50,0 <sup>4)</sup>	-	0,37	15,7 <sup>a)</sup>	26,0	30,0	7,0	6,59	-	-	0,160	5,4	4-P	260,0	51,5	59,0	-	330,2	440,7
2	V2	202,0	Cube100	0,94	189,9	0,7	2,5	13	0,16	81	-	-	50,0 <sup>4)</sup>	-	0,37	15,7 <sup>a)</sup>	26,0	30,0	7,0	6,59	-	-	0,142	5,2	4-P	273,0	53,5	59,0	-	330,2	442,7
Mészöly & Randl 2018, [34]																															
1	B19	160,4	Cube100	0,94	150,8	0,4	2,0	15	0,2	75	-	6,3 <sup>5)</sup>	-	-	1,0	6,3	31,4	35,0	5,8	12,08	-	-	-	3,5	3-P	251,0	47,5	-	-	127,9	175,4
2	B25	188,4	Cube100	0,94	177,1	0,4	2,0	15	0,2	75	-	6,3 <sup>5)</sup>	-	-	1,0	6,3	31,4	35,0	5,8	12,08	-	-	-	3,5	3-P	320,0	50,1	-	-	127,9	178,0
3	B30	177,5	Cube100	0,94	166,9	0,4	2,0	15	0,2	75	-	6,3 <sup>5)</sup>	-	-	1,0	6,3	31,4	35,0	5,8	12,08	-	-	-	3,5	3-P	358,0	49,1	-	-	127,9	177,0
4	B20	161,9	Cube100	0,94	152,2	0,4	1,0	15	0,2	75	-	5,0 <sup>5)</sup>	-	-	1,0	5,0	31,4	35,0	5,8	12,08	-	-	-	3,5	3-P	266,0	47,7	-	-	101,5	149,2
5	B24	174,8	Cube100	0,94	164,3	0,4	1,0	15	0,2	75	-	5,0 <sup>5)</sup>	-	-	1,0	5,0	31,4	35,0	5,8	12,08	-	-	-	3,5	3-P	199,0	48,9	-	-	101,5	150,4
6	B29	186,5	Cube100	0,94	175,3	0,4	1,0	15	0,2	75	-	5,0 <sup>5)</sup>	-	-	1,0	5,0	31,4	35,0	5,8	12,08	-	-	-	3,5	3-P	308,0	50,0	-	-	101,5	151,5
7	B21	160,8	Cube100	1,00	160,8	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31,4	35,0	5,8	12,08	-	-	-	3,5	3-P	82,0	48,5	-	-	-	48,5
8	B23	169,6	Cube100	1,00	169,6	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31,4	35,0	5,8	12,08	-	-	-	3,5	3-P	63,0	49,4	-	-	-	49,4
9	B27	166,6	Cube100	1,00	166,6	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31,4	35,0	5,8	12,08	-	-	-	3,5	3-P	51,0	49,1	-	-	-	49,1
10	B1	185,2	Cube100	0,94	174,1	0,4	2,0	15	0,2	75	-	6,3 <sup>5)</sup>	-	-	1,0	6,3	31,4	35,0	5,8	12,08	3,45	590	-	3,2	4-P	540,0	49,8	-	125,7	127,9	303,4
11	B2	184,2	Cube100	0,94	173,1	0,4	2,0	15	0,2	75	-	6,3 <sup>5)</sup>	-	-	1,0	6,3	31,4	35,0	5,8	12,08	3,45	590	-	3,2	4-P	578,0	49,7	-	125,7	127,9	303,3
12	B22	154,3	Cube100	1,00	154,3	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31,4	35,0	5,8	12,08	3,45	590	-	3,5	3-P	337,0	47,9	-	125,7	-	173,5
13	B35	172,9	Cube100	1,00	172,9	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31,4	35,0	5,8	12,08	3,45	590	-	3,5	3-P	369,0	49,7	-	125,7	-	175,4
14	B15	169,7	Cube100	0,94	159,5	0,4	2,0	15	0,2	75	-	6,3 <sup>5)</sup>	-	-	1,0	6,3	31,4	35,0	5,8	12,08	2,16	590	-	3,5	3-P	443,0	48,4	-	78,6	127,9	254,9
15	B26	162,8	Cube100	0,94	153,0	0,4	2,0	15	0,2	75	-	6,3 <sup>5)</sup>	-	-	1,0	6,3	31,4	35,0	5,8	12,08	2,16	590	-	3,5	3-P	516,0	47,7	-	78,6	127,9	254,3
16	B36	169,8	Cube100	0,94	159,6	0,4	1,0	15	0,2	75	-	5,0 <sup>5)</sup>	-	-	1,0	5,0	31,4	35,0	5,8	12,08	2,16	590	-	3,5	3-P	445,0	48,4	-	78,6	101,5	228,5
17	B16	168,2	Cube100	1,00	168,2	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31,4	35,0	5,8	12,08	2,16	590	-	3,5	3-P	300,0	49,3	-	78,6	-	127,9
18	B17	170,4	Cube100	0,94	160,2	0,4	2,0	15	0,2	75	-	6,3 <sup>5)</sup>	-	-	1,0	6,3	31,4	35,0	5,8	12,08	1,44	590	-	3,5	3-P	446,0	48,5	-	52,4	127,9	228,8
19	B28	165,6	Cube100	0,94	155,7	0,4	1,0	15	0,2	75	-	5,0 <sup>5)</sup>	-	-	1,0	5,0	31,4	35,0	5,8	12,08	1,44	590	-	3,5	3-P	398,0	48,0	-	52,4	101,5	201,9
20	B18	174,9	Cube100	1,00	174,9	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31,4	35,0	5,8	12,08	1,44	590	-	3,5	3-P	253,0	49,9	-	52,4	-	102,3
Lee 2017, [35]																															
1	1-S25	166,6	Cyl100	1,00	166,6	0,5	1,5	16/20 <sup>b)</sup>	0,2	80/100 <sup>b)</sup>	-	11,0 <sup>6)</sup>	-	-	1,0	11,0	46,0	49,5	4,0	20,95	-	-	-	2,5	3-P	415,1	45,8	-	-	217,8	263,6
2	1-S35	160,2	Cyl100	1,00	160,2	0,5	1,5	16/20 <sup>b)</sup>	0,2	80/100 <sup>b)</sup>	-	10,9 <sup>6)</sup>	-	-	1,0	10,9	46,0	49,5	4,0	20,95	-	-	-	3,5	3-P	355,6	45,2	-	-	215,8	261,0
3	1-S35-A	160,2	Cyl100	1,00	160,2	0,5	1,5	16/20 <sup>b)</sup>	0,2	80/100 <sup>b)</sup>	-	10,9 <sup>6)</sup>	-	-	1,0	10,9	46,0	49,5	4,0	12,63	-	-	-	3,5	3-P	387,7	45,2	-	-	215,8	261,0
4	1-S35-B	166,6	Cyl100	1,00	166,6	0,5	1,5	16/20 <sup>b)</sup>	0,2	80/100 <sup>b)</sup>	-	11,0 <sup>6)</sup>	-	-	1,0	11,0	64,0	67,5	4,0	15,05	-	-	-	3,5	3-P	347,6	59,9	-	-	297,0	356,9
5	1-S35-C	166,6	Cyl100	1,00	166,6	0,5	1,5	16/20 <sup>b)</sup>	0,2	80/100 <sup>b)</sup>	-	11,0 <sup>6)</sup>	-	-	1,0	11,0	64,0	67,5	4,0	11,88	-	-	-	3,5	3-P	321,1	59,9	-	-	297,0	356,9
6	2-S25	163,3	Cyl100	1,00	163,3	0,5	1,5	16/20 <sup>b)</sup>	0,2	80/100 <sup>b)</sup>	-	10,5 <sup>6)</sup>	-	-	1,0	10,5	46,0	49,5	4,0	20,95	-	-	-	2,5	3-P	455,9	45,5	-	-	207,9	253,4
7	2-S35	163,3	Cyl100	1,00	163,3	0,5	1,5	16/20 <sup>b)</sup>	0,2	80/100 <sup>b)</sup>	-	10,5 <sup>6)</sup>	-	-	1,0	10,5	46,0	49,5	4,0	20,95	-	-	-	3,5	3-P	371,8	45,5	-	-	207,9	253,4
8	2-S35-B	163,3	Cyl100	1,00	163,3	0,5	1,5	16/20 <sup>b)</sup>	0,2	80/100 <sup>b)</sup>	-	10,5 <sup>6)</sup>	-	-	1,0	10,5	64,0	67,5	4,0	15,05	-	-	-	3,5	3-P	439,7	59,5	-	-	283,5	343,0
9	3-S25	170,1	Cyl100	1,00	170,1	0,5	1,0	20,0	0,2	100,0	-	7,6 <sup>6)</sup>	-	-	1,0	7,6	46,0	49,5	4,0	20,95	-	-	-	2,5	3-P	427,7	46,1	-	-	150,5	196,6
10	3-S35	170,1	Cyl100	1,00	170,1	0,5	1,0	20,0	0,2	100,0	-	7,6 <sup>6)</sup>	-	-	1,0	7,6	46,0	49,5	4,0	20,95	-	-	-	3,5	3-P	340,3	46,1	-	-	150,5	196,6
11	3-S35-B	170,1	Cyl100	1,00	170,1	0,5	1,0	20,0	0,2	100,0	-	7,6 <sup>6)</sup>	-	-	1,0	7,6	64,0	67,5	4,0	15,05	-	-	-	3,5	3-P	354,5	60,3	-	-	205,2	265,5
Pansuk et al. 2017, [36]																															
1	NS00	141,1	Cube100	1,00	141,1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35,0	40,0	5,0	5,61	-	-	-	2,9	3-P	91,0	42,6	-	-	-	42,6
2	NS08	147,7	Cube100	0,94	138,8	2	0,8	13	0,2	65	6,2 <sup>7)</sup>	-	-	-	1,0	5,3 <sup>a)</sup>	35,0	40,0	5,0	5,61	-	-	-	2,9	3-P	340,0	42,4	-	-	105,4	147,8

Nr.	Versuchsbezeichnung	$f_{c,i}$	Form	$k_{c,i}$	$f_{cm}$	$d_g$	$\rho_f$	$l_f$	$\phi_f$	$l_f/\phi_f$	$f_{ctm,dt}$	$f_{ctm,IA}$	$f_{ctm,fl}$	$f_{ctm,sp}$	$\beta$	$f_{ctt0}$	$d$	$h$	$b_w$	$\rho_l$	$\rho_w$	$f_{ywm}$	$\sigma_{c,exp}/f_{cm}$	$a/d$	Setup	$V_{exp}$	$V_c$	$V_p$	$V_s$	$V_l$	$V_{cal}$
		N/mm <sup>2</sup>		-	N/mm <sup>2</sup>	mm	Vol.-%	mm	mm	-	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	-	N/mm <sup>2</sup>	cm	cm	cm	%	%	N/mm <sup>2</sup>	-	-		kN	kN	kN	kN	kN	kN
3	NS16	146,7	Cube100	0,94	137,9	2	1,6	13	0,2	65	9,1 <sup>7)</sup>	-	-	-	1,0	7,7 <sup>a)</sup>	35,0	40,0	5,0	5,61	-	-	-	2,9	3-P	531,0	42,3	-	-	154,7	197,0
Schramm & Fischer 2019, [24]																															
1	VT100_V1	178,4	Cube100	0,94	167,7	0,5	2,1	14	0,2	70	7,2 <sup>8)</sup>	-	-	-	1,0	6,1 <sup>a)</sup>	91,3	100,0	4,0	4,58	-	-	0,053 <sup>c)</sup>	3,1	Sub	794,2	73,7	39,0	-	244,8	357,5
2	VT100_V2	173,7	Cube100	0,94	163,3	0,5	2,1	14	0,2	70	7,6 <sup>8)</sup>	-	-	-	1,0	6,5 <sup>a)</sup>	91,3	100,0	4,0	4,58	-	-	0,109 <sup>c)</sup>	3,0	Sub	982,6	73,0	78,0	-	258,4	409,4
3	VT100_V3	167,0	Cube100	0,94	157,0	0,5	1,1	14	0,2	70	6,5 <sup>8)</sup>	-	-	-	1,0	5,5 <sup>a)</sup>	91,3	100,0	4,0	4,58	-	-	0,113 <sup>c)</sup>	3,0	Sub	638,4	72,1	78,0	-	221,0	371,1
4	VT100_V4	149,0	Cube100	0,94	140,1	0,5	1,1	14	0,2	70	7,8 <sup>8)</sup>	-	-	-	1,0	6,6 <sup>a)</sup>	91,3	100,0	4,0	4,58	-	-	0,127 <sup>c)</sup>	3,0	Sub	713,8	69,4	78,0	-	265,2	412,6
5	VT100_V5	171,7	Cube100	0,94	161,4	0,5	2,1	14	0,2	70	7,6 <sup>8)</sup>	-	-	-	1,0	6,5 <sup>a)</sup>	91,3	100,0	4,0	4,58	0,55	524	0,110 <sup>c)</sup>	2,8	Sub	1083,0	72,7	78,0	142,0	258,4	551,2
6	VT60_V1	152,3	Cyl100	1,00	152,3	8	2,5	9	0,15	60	6,3 <sup>8)</sup>	-	-	-	1,0	5,4 <sup>a)</sup>	51,3	60,0	4,0	5,44	-	-	0,147 <sup>c)</sup>	3,5	Sub	463,8	47,0	55,2	-	128,5	230,7
7	VT60_V3	176,3	Cube100	0,94	165,7	0,5	2,1	14	0,2	70	6,3 <sup>8)</sup>	-	-	-	1,0	5,4 <sup>a)</sup>	51,3	60,0	4,0	5,44	-	-	0,068 <sup>c)</sup>	3,5	Sub	485,9	48,3	27,6	-	128,5	204,4
8	VT60_V5	160,3	Cube100	0,94	150,7	0,5	1,1	14	0,2	70	5,9 <sup>8)</sup>	-	-	-	1,0	5,0 <sup>a)</sup>	51,3	60,0	4,0	5,44	-	-	0,149 <sup>c)</sup>	3,5	Sub	467,4	46,8	55,2	-	120,4	222,3
9	VG60_V1	184,9	Cube100	0,94	173,8	0,5	2,1	14	0,2	70	8,1 <sup>8)</sup>	-	-	-	1,0	6,9 <sup>a)</sup>	51,3	60,0	4,0	5,44	-	-	0,064 <sup>c)</sup>	3,5	3-P	526,2	49,1	27,6	-	165,2	241,9
10	VG60_V2	167,6	Cube100	0,94	157,5	0,5	2,1	14	0,2	70	7,5 <sup>8)</sup>	-	-	-	1,0	6,4 <sup>a)</sup>	51,3	60,0	4,0	5,44	-	-	0,142 <sup>c)</sup>	3,5	3-P	595,0	47,5	55,2	-	153,0	255,7
11	VG60_V3	188,5	Cube100	0,94	177,2	0,5	1,1	14	0,2	70	6,6 <sup>8)</sup>	-	-	-	1,0	5,6 <sup>a)</sup>	51,3	60,0	4,0	5,44	-	-	0,126 <sup>c)</sup>	3,5	3-P	572,8	49,4	55,2	-	134,6	239,2
12	VG60_V4	179,7	Cube100	0,94	168,9	0,5	2,1	14	0,2	70	6,7 <sup>8)</sup>	-	-	-	1,0	5,7 <sup>a)</sup>	51,3	60,0	4,0	5,44	0,98	524	0,133 <sup>c)</sup>	3,5	3-P	379,6	48,6	55,2	84,2	136,7	324,6
Telleen et al. 2010, [37]																															
1	UHPFRC wTBR	150,0	Cyl150	1,00	150,0	0,5	3,0	13,0	0,2	81,3	10,0-16,0 <sup>9)</sup>	-	-	-	1,0	16,0	18,1	20,0	2,0	21,70	5,21	625	-	2,8	3-P	115,0	10,5	-	23,0	64,0	97,5
2	UHPFRC w/oTBR	150,0	Cyl150	1,00	150,0	0,5	3,0	13,0	0,2	81,3	10,0-16,0 <sup>9)</sup>	-	-	-	1,0	16,0	18,1	20,0	2,0	21,70	-	-	-	2,8	3-P	92,0	10,5	-	-	64,0	74,5
Thiemicke 2015, [38]																															
1	Q1-1	213,0	Cyl100	1,00	213,0	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30,0	33,0	3,0	21,78	-	-	-	4,0	3-P	41,0	26,6	-	-	-	26,6
2	Q1-B1-1	224,0	Cyl100	1,00	224,0	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30,0	33,0	3,0	21,78	2,42	731	-	4,0	3-P	92,0	27,1	-	51,6	-	78,7
3	Q1-B1-2	195,0	Cyl100	1,00	195,0	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30,0	33,0	3,0	21,78	-	-	-	4,0	3-P	98,0	25,8	-	-	-	25,8
4	Q1-F1-2	201,0	Cyl100	1,00	201,0	0,5	1,0	13	0,175	74	10,8 <sup>10)</sup>	-	-	-	1,0	9,2 <sup>a)</sup>	30,0	33,0	3,0	21,78	-	-	-	4,0	3-P	109,0	26,1	-	-	90,9	117,0
5	Q1-F1-3	208,0	Cyl100	1,00	208,0	0,5	1,0	13	0,175	74	9,7 <sup>10)</sup>	-	-	-	1,0	8,2 <sup>a)</sup>	30,0	33,0	3,0	21,78	-	-	-	4,0	3-P	100,0	26,4	-	-	81,6	108,0
6	Q2-F1-1	186,0	Cyl100	1,00	186,0	0,5	1,0	13	0,175	74	4,9 <sup>10)</sup>	-	-	-	1,0	4,2 <sup>a)</sup>	30,0	33,0	3,0	21,78	-	-	-	4,0	3-P	109,0	25,4	-	-	41,2	66,7
7	Q1-F1-B1-1	198,0	Cyl100	1,00	198,0	0,5	1,0	13	0,175	74	7,9 <sup>10)</sup>	-	-	-	1,0	6,7 <sup>a)</sup>	30,0	33,0	3,0	21,78	2,42	731	-	4,0	3-P	147,0	26,0	-	51,6	66,5	144,1
8	Q1-F1-B1-2	197,0	Cyl100	1,00	197,0	0,5	1,0	13	0,175	74	5,5 <sup>10)</sup>	-	-	-	1,0	4,7 <sup>a)</sup>	30,0	33,0	3,0	21,78	2,42	731	-	4,0	3-P	170,0	25,9	-	51,6	46,5	124,1
9	Q1-F2-1	213,0	Cyl100	1,00	213,0	0,5	0,5	13	0,175	74	5,2 <sup>10)</sup>	-	-	-	1,0	4,4 <sup>a)</sup>	30,0	33,0	3,0	21,78	-	-	-	4,0	3-P	78,0	26,6	-	-	43,8	70,4
10	Q1-F2-B1-1	211,0	Cyl100	1,00	211,0	0,5	0,5	13	0,175	74	4,0 <sup>10)</sup>	-	-	-	1,0	3,4 <sup>a)</sup>	30,0	33,0	3,0	21,78	2,42	731	-	4,0	3-P	140,0	26,5	-	51,6	33,7	111,8
Voo et al. 2006, [25]																															
1	SB1	161,0	Cyl100	1,00	161,0	0,5	2,5	13	0,2	65	-	-	29,8 <sup>11)</sup>	-	0,37	11,0	60,0	65,0	5,0	5,72	-	-	-	3,3	3-P	430,0	69,1	-	-	358,3	427,4
2	SB2	160,0	Cyl100	1,00	160,0	0,5	2,5	13	0,2	65	-	-	26,4 <sup>11)</sup>	-	0,37	9,8	60,0	65,0	5,0	5,72	-	-	0,072 <sup>d)</sup>	3,3	3-P	497,0	68,9	41,2	-	317,5	427,6
3	SB3	149,0	Cyl100	1,00	149,0	0,5	2,5	13	0,2	65	-	-	23,2 <sup>11)</sup>	-	0,37	8,6	60,0	65,0	5,0	5,72	-	-	0,038 <sup>d)</sup>	3,3	3-P	428,0	67,3	20,6	-	279,0	366,9
4	SB4	164,0	Cyl100	1,00	164,0	0,5	1,3	13	0,2	65	-	-	14,8 <sup>11)</sup>	-	0,37	5,5	60,0	65,0	5,0	5,72	-	-	0,035 <sup>d)</sup>	3,3	3-P	336,5	69,5	20,6	-	178,0	268,1
Voo et al. 2010, [26]																															
1	X-B1	125,0	Cyl100	1,00	125,0	0,5	1,0	15	0,2	75	-	-	13,0 <sup>12)</sup>	-	0,37	4,8	62,0	65,0	5,0	2,77	-	-	0,154 <sup>d)</sup>	3,2	3-P	330,0	51,2	71,4	-	156,3	278,9
2	X-B2	126,0	Cyl100	1,00	126,0	0,5	1,0	15	0,2	75	-	-	15,6 <sup>12)</sup>	-	0,37	5,8	62,0	65,0	5,0	2,77	-	-	0,152 <sup>d)</sup>	3,2	3-P	355,0	51,3	71,4	-	187,6	310,3
3	X-B3	135,0	Cyl100	1,00	135,0	0,5	1,0	15	0,2	75	-	-	13,6 <sup>12)</sup>	-	0,37	5,0	62,0	65,0	5,0	2,77	-	-	0,142 <sup>d)</sup>	3,2	3-P	362,3	52,5	71,4	-	163,5	287,5
4																															

Nr.	Versuchsbezeichnung	$f_{c,i}$	Form	$k_{c,i}$	$f_{cm}$	$d_g$	$\rho_f$	$l_f$	$\phi_f$	$l_f/\phi_f$	$f_{ctm,dt}$	$f_{ctm,IA}$	$f_{ctm,fl}$	$f_{ctm,sp}$	$\beta$	$f_{ct0}$	$d$	$h$	$b_w$	$\rho_l$	$\rho_w$	$f_{ywm}$	$\sigma_{c,exp}/f_{cm}$	$a/d$	Setup	$V_{exp}$	$V_c$	$V_p$	$V_s$	$V_l$	$V_{cal}$
		N/mm <sup>2</sup>		-	N/mm <sup>2</sup>	mm	Vol.-%	mm	mm	-	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	-	N/mm <sup>2</sup>	cm	cm	cm	%	%	N/mm <sup>2</sup>	-	-		kN	kN	kN	kN	kN	kN
Yang et al. 2012, [40]																															
1	S25-F10-P0	174,5	Cyl100	1,00	174,5	2	1,0	13	0,2	65	-	10,1 <sup>14)</sup>	-	-	-	4,6 <sup>0)</sup>	63,0	70,0	5,0	5,45	-	-	-	2,5	3-P	488,0	72,6	-	-	159,3	231,9
2	S25-F10-PS	181,3	Cyl100	1,00	181,3	2	1,0	13	0,2	65	-	9,4 <sup>14)</sup>	-	-	-	4,6 <sup>0)</sup>	63,0	70,0	5,0	5,45	-	-	0,054	2,5	3-P	590,0	73,6	36,7	-	159,3	269,5
3	S25-F15-P0	188,2	Cyl100	1,00	188,2	2	1,5	13	0,2	65	-	14,4 <sup>14)</sup>	-	-	-	6,9 <sup>0)</sup>	63,0	70,0	5,0	5,45	-	-	-	2,5	3-P	614,0	74,5	-	-	238,9	313,4
4	S25-F15-PS	183,6	Cyl100	1,00	183,6	2	1,5	13	0,2	65	-	14,2 <sup>14)</sup>	-	-	-	6,9 <sup>0)</sup>	63,0	70,0	5,0	5,45	-	-	0,053	2,5	3-P	712,0	73,9	36,7	-	238,9	349,5
5	S25-F20-P0	185,5	Cyl100	1,00	185,5	2	2,0	13	0,2	65	-	16,5 <sup>14)</sup>	-	-	-	9,2 <sup>0)</sup>	63,0	70,0	5,0	5,45	-	-	-	2,5	3-P	527,0	74,1	-	-	318,5	392,6
6	S25-F20-PS	189,8	Cyl100	1,00	189,8	2	2,0	13	0,2	65	-	17,2 <sup>14)</sup>	-	-	-	9,2 <sup>0)</sup>	63,0	70,0	5,0	5,45	-	-	0,051	2,5	3-P	717,0	74,7	36,7	-	318,5	429,9
7	S34-F10-P0	168,9	Cyl100	1,00	168,9	2	1,0	13	0,2	65	-	10,1 <sup>14)</sup>	-	-	-	4,6 <sup>0)</sup>	63,0	70,0	5,0	5,45	-	-	-	3,4	3-P	279,0	71,9	-	-	159,3	231,1
8	S34-F10-PS	167,2	Cyl100	1,00	167,2	2	1,0	13	0,2	65	-	9,2 <sup>14)</sup>	-	-	-	4,6 <sup>0)</sup>	63,0	70,0	5,0	5,45	-	-	0,065	3,4	3-P	374,0	71,6	40,9	-	159,3	271,7
9	S34-F15-P0	193,0	Cyl100	1,00	193,0	2	1,5	13	0,2	65	-	13,9 <sup>14)</sup>	-	-	-	6,9 <sup>0)</sup>	63,0	70,0	5,0	5,45	-	-	-	3,4	3-P	308,0	75,1	-	-	238,9	314,0
10	S34-F15-PS	189,2	Cyl100	1,00	189,2	2	1,5	13	0,2	65	-	14,4 <sup>14)</sup>	-	-	-	6,9 <sup>0)</sup>	63,0	70,0	5,0	5,45	-	-	0,057	3,4	3-P	437,0	74,6	40,9	-	238,9	354,4
11	S34-F20-P0	188,5	Cyl100	1,00	188,5	2	2,0	13	0,2	65	-	17,3 <sup>14)</sup>	-	-	-	9,2 <sup>0)</sup>	63,0	70,0	5,0	5,45	-	-	-	3,4	3-P	404,0	74,5	-	-	318,5	393,0
12	S34-F20-PS	182,3	Cyl100	1,00	182,3	2	2,0	13	0,2	65	-	16,8 <sup>14)</sup>	-	-	-	9,2 <sup>0)</sup>	63,0	70,0	5,0	5,45	-	-	0,059	3,4	3-P	477,0	73,7	40,9	-	318,5	433,1
13	S17-F20-P0	186,5	Cyl100	1,00	186,5	2	2,0	13	0,2	65	-	13,1 <sup>14)</sup>	-	-	-	9,2 <sup>0)</sup>	93,0	100,0	4,0	4,61	-	-	-	1,7	3-P	869,0	- <sup>e)</sup>	-	-	428,2	428,2
14	S17-F20-PS	186,5	Cyl100	1,00	186,5	2	2,0	13	0,2	65	-	13,1 <sup>14)</sup>	-	-	-	9,2 <sup>0)</sup>	93,0	100,0	4,0	4,61	-	-	0,055	1,7	3-P	968,5	- <sup>e)</sup>	- <sup>e)</sup>	-	428,2	428,2
15	S22-F20-P0	186,5	Cyl100	1,00	186,5	2	2,0	13	0,2	65	-	13,1 <sup>14)</sup>	-	-	-	9,2 <sup>0)</sup>	93,0	100,0	4,0	4,61	-	-	-	2,2	3-P	598,0	77,7	-	-	364,0	441,7
16	S22-F20-PS	186,5	Cyl100	1,00	186,5	2	2,0	13	0,2	65	-	13,1 <sup>14)</sup>	-	-	-	9,2 <sup>0)</sup>	93,0	100,0	4,0	4,61	-	-	0,055	2,2	3-P	764,5	77,7	46,0	-	364,0	487,7
Yavaş & Goker 2020, [41]																															
1	P-0.8	121,0	Cube100	1,00	121,0	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22,5	25,0	5,0	1,40	-	-	-	3,1	4-P	22,9	18,1	-	-	-	18,1
2	P-1.2	121,0	Cube100	1,00	121,0	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22,4	25,0	5,0	2,02	-	-	-	3,1	4-P	21,6	20,4	-	-	-	20,4
3	P-1.7	121,0	Cube100	1,00	121,0	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22,3	25,0	5,0	2,76	-	-	-	3,1	4-P	25,3	22,6	-	-	-	22,6
4	P-2.2	121,0	Cube100	1,00	121,0	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22,2	25,0	5,0	3,62	-	-	-	3,1	4-P	33,4	24,7	-	-	-	24,7
Zheng et al. 2019, [42]																															
1	B2-60-90	125,0	Cube100	0,94	117,5	0,45	1,6	12	0,16	75	-	-	-	15,8 <sup>15)</sup>	-	8,4 <sup>0)</sup>	25,9	30,0	5,0	8,20	2,43	586	0,145	2,0	4-P	318,5	32,5	26,6	76,5	126,0	261,6
2	B2-60-180	126,0	Cube100	0,94	118,4	0,45	1,6	12	0,16	75	-	-	-	15,8 <sup>15)</sup>	-	8,4 <sup>0)</sup>	25,9	30,0	5,3	7,74	1,15	586	0,148	2,0	4-P	282,0	34,5	28,9	38,5	133,6	235,4
3	B2-30-90	127,0	Cube100	0,94	119,4	0,45	1,6	12	0,16	75	-	-	-	15,7 <sup>15)</sup>	-	8,4 <sup>0)</sup>	25,9	30,0	5,0	8,20	2,43	586	0,075	2,0	4-P	314,0	32,7	14,0	64,5	126,0	237,1
4	B2-30-180	127,0	Cube100	0,94	119,4	0,45	1,6	12	0,16	75	-	-	-	15,7 <sup>15)</sup>	-	8,4 <sup>0)</sup>	25,9	30,0	5,0	8,20	1,21	586	0,079	2,0	4-P	249,0	32,7	14,7	32,6	126,0	205,9
5	B2-0-90	140,0	Cube100	0,94	131,6	0,45	1,6	12	0,16	75	-	-	-	16,7 <sup>15)</sup>	-	8,4 <sup>0)</sup>	25,9	30,0	5,2	7,89	2,33	586	0,004	2,0	4-P	291,5	35,1	0,9	52,3	131,0	219,3
6	B2-0-180	140,0	Cube100	0,94	131,6	0,45	1,6	12	0,16	75	-	-	-	16,7 <sup>15)</sup>	-	8,4 <sup>0)</sup>	25,9	30,0	5,1	8,04	1,19	586	0,004	2,0	4-P	250,0	34,4	0,9	26,1	128,5	189,9
7	B3-60-90	127,0	Cube100	0,94	119,4	0,45	1,6	12	0,16	75	-	-	-	15,1 <sup>15)</sup>	-	8,4 <sup>0)</sup>	25,9	30,0	4,9	8,37	2,48	586	0,155	3,0	4-P	285,5	32,0	28,1	78,1	123,5	261,8

1) [30]: 4-Punkt Biegeversuche an ungekerbten Prismen Höhe/Breite/Stützweite = 70/70/280 mm  
2) [23]: 3-Punkt Biegeversuche an gekerbten Prismen Höhe/Breite/Stützweite = 150/150/500 mm, Kerbtiefe = 25 mm nach RILEMTC 162-TDF/EN 14651  
3) [31]: 4-Punkt Biegeversuche an ungekerbten Prismen Höhe/Breite/Stützweite = 51/51/406 mm. Höchstwert aus Diagramm abgelesen  
4) [33]: 4-Punkt Biegeversuche an ungekerbten Prismen ohne Angabe der Geometrie, vermutlich  $h < 51$  mm (2 in)  
5) [34]: 4-Punkt Biegeversuche an ungekerbten Prismen Höhe/Breite/Stützweite = 150/150/600 mm. Angegebener Wert aus Inverse-Analysis nach AFGC Recommendations  
6) [35]: 3-Punkt Biegeversuche an gekerbten Prismen Höhe/Breite/Stützweite = 100/100/300 mm, Kerbtiefe = 30 mm. Angegebener Wert aus Inverse-Analysis nach AFGC Recommendations  
7) [36]: Zentrische Zugversuche an Zugknochen Spannungsquerschnitt = 50/70 mm  
8) [24]: Zentrische Zugversuche an Zugknochen Spannungsquerschnitt = 50/50 mm  
9) [37]: Zentrische Zugversuche an aus Begleitproben gesägten, ungekerbten Prismen Spannungsquerschnitt = 42/100 mm. Für die Auswertung wird der Wert  $f_{ctm,dt} = 16,0$  N/mm<sup>2</sup> verwendet  
10) [38]: Zentrische Zugversuche an gekerbten Prismen Spannungsquerschnitt = 30/40 mm  
11) [25]: 3-Punkt Biegeversuche an gekerbten Prismen Höhe/Breite/Stützweite = 100/100/400 mm, Kerbtiefe = 25 mm  
12) [26]: 4-Punkt Biegeversuche an ungekerbten Prismen Höhe/Breite/Stützweite = 100/100/300 mm nach ASTM C1018  
13) [39]: 4-Punkt Biegeversuche an ungekerbten Prismen Höhe/Breite/Stützweite = 40/40/114 mm nach ASTM C78. Höchstwert aus Diagramm abgelesen  
14) [40]: 3-Punkt Biegeversuche an gekerbten Prismen Höhe/Breite/Stützweite = 100/100/300 mm, Kerbtiefe = 10 mm. Angegebener Wert aus Inverse-Analysis nach Kitsutaka [62]  
15) [42]: Spaltzugversuch an Würfeln Kantenlänge = 100 mm  
a) Wegen  $h < 51$  mm (2 in) zusätzlich mit 0,85 abgemindert (Abschnitt 3.3)  
b) Fasermischung: 33 % 16/0,20 mm + 67 % 20/0,20 mm  
c) 12 % Vorspannkraftverlust gemäß Autorenangabe  
d) 20 % Vorspannkraftverlust gemäß Autorenangabe  
e) Entfällt, da  $a/d < 2,0$ . Auswertung erfolgt nach Gl. (18) (Abschnitt 2.2)  
f) Auswertung erfolgt nach Gl. (20) (Abschnitt 3.3)



Tabelle 3. Querkraftversuche an Bauteilen mit Kompaktquerschnitt  
Table 3. Shear tests on beams with compact cross-section

Nr.	Versuchsbezeichnung	$f_{c,i}$	Form	$k_{c,i}$	$f_{cm}$	$d_g$	$\rho_f$	$l_f$	$\phi_f$	$h/\phi_f$	$f_{ctm,dt}$	$f_{ctm,IA}$	$f_{ctm,fl}$	$f_{ctm,sp}$	$\beta$	$f_{ct0}$	$d$	$h$	$b_w$	$\rho_l$	$\rho_w$	$f_{ywm}$	$\sigma_{c,exp}/f_{ctm}$	$a/d$	Setup	$V_{exp}$	$V_c$	$V_p$	$V_s$	$V_l$	$V_{cal}$
		N/mm <sup>2</sup>		-	N/mm <sup>2</sup>	mm	Vol.-%	mm	mm	-	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	-	N/mm <sup>2</sup>	cm	cm	cm	%	%	N/mm <sup>2</sup>	-	-		kN	kN	kN	kN	kN	kN
Ahmad et al. 2019, [27]																															
1	A1	140,0	Cyl76	1,00	140,0	0,5	1,0	13	0,22	59	-	-	30,0 <sup>1)</sup>	-	-	4,2 <sup>a)</sup>	18,3	22,5	15,0	1,94	2,87	420	-	1,8	4-P	172,5	„b)	-	73,3	54,3	127,6
2	A2	150,0	Cyl76	1,00	150,0	0,5	2,0	13	0,22	59	-	-	35,0 <sup>1)</sup>	-	-	8,4 <sup>a)</sup>	18,3	22,5	15,0	1,94	2,87	420	-	1,8	4-P	186,0	„b)	-	73,3	108,6	181,9
3	B1	140,0	Cyl76	1,00	140,0	0,5	1,0	13	0,22	59	-	-	30,0 <sup>1)</sup>	-	-	4,2 <sup>a)</sup>	18,3	22,5	15,0	1,94	1,53 <sup>c)</sup>	420	-	1,8	4-P	147,5	„b)	-	0,0 <sup>c)</sup>	54,3	54,3
4	B2	150,0	Cyl76	1,00	150,0	0,5	2,0	13	0,22	59	-	-	35,0 <sup>1)</sup>	-	-	8,4 <sup>a)</sup>	18,3	22,5	15,0	1,94	1,53 <sup>c)</sup>	420	-	1,8	4-P	176,0	„b)	-	0,0 <sup>c)</sup>	108,6	108,6
5	C1	140,0	Cyl76	1,00	140,0	0,5	1,0	13	0,22	59	-	-	30,0 <sup>1)</sup>	-	-	4,2 <sup>a)</sup>	17,1	22,5	15,0	3,45	1,64 <sup>c)</sup>	420	-	1,8	4-P	155,5	„b)	-	0,0 <sup>c)</sup>	54,3	54,3
6	C2	150,0	Cyl76	1,00	150,0	0,5	2,0	13	0,22	59	-	-	35,0 <sup>1)</sup>	-	-	8,4 <sup>a)</sup>	17,1	22,5	15,0	3,45	1,64 <sup>c)</sup>	420	-	1,8	4-P	182,8	„b)	-	0,0 <sup>c)</sup>	108,6	108,6
7	D1	140,0	Cyl76	1,00	140,0	0,5	1,0	13	0,22	59	-	-	30,0 <sup>1)</sup>	-	-	4,2 <sup>a)</sup>	18,3	22,5	15,0	1,94	1,53 <sup>c)</sup>	420	-	2,6	4-P	104,0	53,2	-	0,0 <sup>c)</sup>	48,9	102,0
8	D2	140,0	Cyl76	1,00	140,0	0,5	1,0	13	0,22	59	-	-	30,0 <sup>1)</sup>	-	-	4,2 <sup>a)</sup>	17,1	22,5	15,0	3,45	1,64 <sup>c)</sup>	420	-	2,6	4-P	114,5	60,2	-	0,0 <sup>c)</sup>	48,9	109,1
9	E1	150,0	Cyl76	1,00	150,0	0,5	2,0	13	0,22	59	-	-	35,0 <sup>1)</sup>	-	-	8,4 <sup>a)</sup>	18,3	22,5	15,0	1,94	1,53 <sup>c)</sup>	420	-	2,6	4-P	116,0	54,4	-	0,0 <sup>c)</sup>	97,7	152,1
10	E2	150,0	Cyl76	1,00	150,0	0,5	2,0	13	0,22	59	-	-	35,0 <sup>1)</sup>	-	-	8,4 <sup>a)</sup>	17,1	22,5	15,0	3,45	1,64 <sup>c)</sup>	420	-	2,6	4-P	125,0	61,6	-	0,0 <sup>c)</sup>	97,7	159,3
Aziz & Ali 2013, [43]																															
1	B182U	134,5	Cube100	0,94	126,43	9,5	0,4	40	0,5	80	-	-	-	7,5 <sup>2)</sup>	-	2,2 <sup>a)</sup>	15,0	18,0	12,0	3,92	-	-	-	2,0	4-P	104,0	42,7	-	-	16,9	59,7
2	B242U	134,5	Cube100	0,94	126,43	9,5	0,4	40	0,5	80	-	-	-	7,5 <sup>2)</sup>	-	2,2 <sup>a)</sup>	21,0	24,0	12,0	3,89	-	-	-	2,0	4-P	132,4	58,9	-	-	22,6	81,5
3	B302U	134,5	Cube100	0,94	126,43	9,5	0,4	40	0,5	80	-	-	-	7,5 <sup>2)</sup>	-	2,2 <sup>a)</sup>	27,0	30,0	12,0	3,99	-	-	-	2,0	4-P	328,1	72,0	-	-	28,2	100,2
Bae et al. 2021, [44]																															
1	U-0-0-3.4	198,2	Cyl100	1,00	198,2	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28,0	35,0	20,0	4,52	-	-	-	3,4	4-P	119,8	149,5	-	-	-	149,5
2	U-S-0-3.4	198,2	Cyl100	1,00	198,2	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28,0	35,0	20,0	4,52	0,84	495	-	3,4	4-P	259,4	149,5	-	70,8	-	220,2
3	U-0-0-2.0	198,2	Cyl100	1,00	198,2	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28,0	35,0	20,0	4,52	-	-	-	2,0	4-P	235,4	149,5	-	-	-	149,5
4	U-0-F-2.0	216,5	Cyl100	1,00	216,5	0,5	2,0	13	0,2	65	-	15,5 <sup>3)</sup>	-	-	-	9,2 <sup>a)</sup>	28,0	35,0	20,0	4,52	-	-	-	2,0	3-P	568,4	153,9	-	-	223,0	376,9
Bunje & Fehling 2004, [45]																															
1	S1	179,6	Cyl150	1,00	179,6	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,2	20,0	18,0	2,60	-	-	-	3,5	4-P	66,0	72,0	-	-	-	72,0
2	S2	186,6	Cyl150	1,00	186,6	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,0	20,0	17,7	4,17	-	-	-	3,5	4-P	87,5	83,1	-	-	-	83,1
3	S3	186,8	Cyl150	1,00	186,8	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,0	20,0	17,7	4,17	-	-	-	3,5	4-P	85,0	83,1	-	-	-	83,1
4	S4	185,6	Cyl150	1,00	185,6	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,7	20,0	18,0	2,52	-	-	-	3,4	4-P	82,5	74,2	-	-	-	74,2
Hussein & Amleh 2014, [28]																															
1	US1-0-3.5	141,0	Cyl100	1,00	141,0	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21,8	30,0	15,0	6,12	-	-	-	3,5	3-P	144,0	90,8	-	-	-	90,8
2	US2-0-3.0	133,6	Cyl100	1,00	133,6	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21,4	30,0	15,0	8,72	-	-	-	3,0	3-P	147,0	88,0	-	-	-	88,0
3	US2-1-3.0	152,8	Cyl100	1,00	152,8	0,5	1,0	13	0,2	65	-	-	-	9,3 <sup>4)</sup>	-	4,6 <sup>a)</sup>	21,4	30,0	15,0	8,72	-	-	-	3,0	3-P	384,8	92,0	-	-	71,7	163,6
4	US2-1.5-3.0	153,9	Cyl100	1,00	153,9	0,5	1,5	13	0,2	65	-	-	-	12,9 <sup>4)</sup>	-	6,8 <sup>a)</sup>	21,4	30,0	15,0	8,72	-	-	-	3,0	3-P	455,2	92,2	-	-	107,5	199,7
Lim & Hong 2016, [46]																															
1	SB1	166,9	Cyl100	1,00	166,9	0,5	1,5	16/19 <sup>d)</sup>	0,2	80/95 <sup>d)</sup>	11,5 <sup>5)</sup>	-	-	-	1,0	9,8	22,0	29,0	15,0	8,00	-	-	-	3,0	3-P	475,8	96,7	-	-	148,8	245,6
2	SB2	166,9	Cyl100	1,00	166,9	0,5	1,5	16/19 <sup>d)</sup>	0,2	80/95 <sup>d)</sup>	11,5 <sup>5)</sup>	-	-	-	1,0	9,8	22,0	29,0	15,0	8,00	1,44	538	-	3,0	3-P	537,3	96,7	-	60,8	148,8	306,4
Metje & Leutbecher 2021, [22]																															
1	V101-F0-P0_1	144,1	Cube100	1,00	144,1	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,9	26,7	11,2	2,38	-	-	-	3,5	3-P	57,2	48,6	-	-	-	48,6
2	V101-F0-P0_1	144,1	Cube100	1,00	144,1	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,9	26,7	11,2	2,38	-	-	-	3,5	3-P	54,9	48,6	-	-	-	48,6
3	V111-F0-P0_1	169,2	Cube100	1,00	169,2	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,7	26,6	11,4	2,36	-	-	-	3,5	3-P	62,5	51,7	-	-	-	51,7
4	V111-F0-P0_2	169,2	Cube100	1,00	169,2	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,7	26,6	11,4	2,36	-	-	-	4,0	3-P	63,7	51,7	-	-	-	51,7
5	V102-F0-P50_1	168,1	Cube100	1,00	168,1	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21,2	26,9	11,3	2,33	-	-	0,058	4,0	3-P	159,1 <sup>e)</sup>	51,8	28,1	-	-	79,9
6	V102-F0-P50_2	168,1	Cube100	1,00	168,1	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21,2	26,9	11,3	2,33	-	-	0,058	5,0	3-P	113,7 <sup>e)</sup>	51,8	28,1	-	-	79,9
7	V103-F0-P100_1	168,1	Cube100	1,00	168,1	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21,2	26,9	11,3	2,33	-	-	0,125	5,0	3-P	151,5 <sup>e)</sup>	51,8	60,4	-	-	112,3
8	V103-F0-P100_2	168,1	Cube100	1,00	168,1	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21,2	26,9	11,3	2,33	-	-	0,125	5,0	3-P	148,9 <sup>e)</sup>	51,8	60,4	-	-	112,3
9	V104-F1-P0_1	163,4	Cube100	0,94	153,6	8	1,0	20	0,4	50	-	-	10,2 <sup>6)</sup>	-	0,37	3,8	21,0	26,7	11,2	2,37	-	-	-	3,5	3-P	115,3	49,8	-	-	39,5	89,3
10	V104-F1-P0_1	163,4	Cube100	0,94	153,6	8	1,0	20	0,4	50	-	-	10,2 <sup>6)</sup>	-	0,37	3,8	21,0	26,7	11,2	2,37	-	-	-	3,5	3-P	146,3	49,8	-	-	39,5	89,3

Nr.	Versuchsbezeichnung	$f_{c,i}$	Form	$k_{c,i}$	$f_{cm}$	$d_g$	$\rho_t$	$l_t$	$\phi_t$	$l/\phi_t$	$f_{ctm,dt}$	$f_{ctm,IA}$	$f_{ctm,fl}$	$f_{ctm,sp}$	$\beta$	$f_{ctf0}$	$d$	$h$	$b_w$	$\rho_l$	$\rho_w$	$f_{ywm}$	$\sigma_{c,exp}/f_{cm}$	$a/d$	Setup	$V_{exp}$	$V_c$	$V_p$	$V_s$	$V_l$	$V_{cal}$
		N/mm²		-	N/mm²	mm	Vol.-%	mm	mm	-	N/mm²	N/mm²	N/mm²	N/mm²	-	N/mm²	cm	cm	cm	%	%	N/mm²	-	-		kN	kN	kN	kN	kN	kN
11	V114-F1-P0_1	178,1	Cube100	0,94	167,4	8	1,0	20	0,4	50	-	-	10,2 <sup>6)</sup>	-	0,37	3,8	20,9	26,7	11,4	2,34	-	-	-	3,5	3-P	103,8	51,7	-	-	40,2	92,0
12	V114-F1-P0_2	178,1	Cube100	0,94	167,4	8	1,0	20	0,4	50	-	-	10,2 <sup>6)</sup>	-	0,37	3,8	20,9	26,7	11,4	2,34	-	-	-	4,0	3-P	109,6	51,7	-	-	40,2	92,0
13	V105-F1-P50_1	175,1	Cube100	0,94	164,6	8	1,0	20	0,4	50	-	-	10,2 <sup>6)</sup>	-	0,37	3,8	21,2	27,0	11,3	2,33	-	-	0,059	5,0	3-P	145,1	51,5	28,1	-	40,3	119,8
14	V105-F1-P50_2	175,1	Cube100	0,94	164,6	8	1,0	20	0,4	50	-	-	10,2 <sup>6)</sup>	-	0,37	3,8	21,2	27,0	11,3	2,33	-	-	0,059	5,0	3-P	146,3	51,5	28,1	-	40,3	119,8
15	V106-F1-P100_2	175,1	Cube100	0,94	164,6	8	1,0	20	0,4	50	-	-	10,2 <sup>6)</sup>	-	0,37	3,8	20,9	26,5	11,2	2,38	-	-	0,130	4,0	3-P	217,6	50,9	60,1	-	39,2	150,2
16	V107-F2-P0_1	192,0	Cube100	0,94	180,5	8	2,0	20	0,4	50	-	-	17,6 <sup>8)</sup>	-	0,37	6,5	21,5	27,2	11,2	2,32	-	-	-	3,5	3-P	183,1	53,1	-	-	69,4	122,5
17	V107-F2-P0_2	192,0	Cube100	0,94	180,5	8	2,0	20	0,4	50	-	-	17,6 <sup>8)</sup>	-	0,37	6,5	21,5	27,2	11,2	2,32	-	-	-	4,0	3-P	123,8	53,1	-	-	69,4	122,5
18	V108-F2-P50_1	184,3	Cube100	0,94	173,2	8	2,0	20	0,4	50	-	-	17,6 <sup>8)</sup>	-	0,37	6,5	21,1	26,8	11,3	2,34	-	-	0,057	4,5	3-P	159,6	52,2	28,1	-	69,0	149,4
19	V108-F2-P50_2	184,3	Cube100	0,94	173,2	8	2,0	20	0,4	50	-	-	17,6 <sup>8)</sup>	-	0,37	6,5	21,1	26,8	11,3	2,34	-	-	0,057	4,5	3-P	157,6	52,2	28,1	-	69,0	149,4
Pourbaba et al. 2018, [47]																															
1	B35	125,0	Cyl100	1,00	125,0	0,5	2,0	13	0,18	72	-	-	31,0 <sup>7)</sup>	-	0,37	11,5	5,4	7,6	15,2	5,63	-	-	-	2,8	4-P	106,0	21,9	-	-	46,4	68,3
2	B36	125,0	Cyl100	1,00	125,0	0,5	2,0	13	0,18	72	-	-	31,0 <sup>7)</sup>	-	0,37	11,5	5,5	7,6	15,2	4,06	-	-	-	2,8	4-P	85,0	20,0	-	-	46,4	66,4
3	B37	125,0	Cyl100	1,00	125,0	0,5	2,0	13	0,18	72	-	-	31,0 <sup>7)</sup>	-	0,37	11,5	5,6	7,6	15,2	2,77	-	-	-	2,8	4-P	71,0	17,9	-	-	46,4	64,3
Ridha et al. 2018, [48]																															
1	B16	125,0	Cyl100	1,00	125,0	0,3	2,0	13	0,2	65	-	-	19,8 <sup>8)</sup>	-	0,37	7,3	11,2	14,0	10,0	3,59	-	-	-	3,5	4-P	94,0	25,7	-	-	35,9	61,6
2	B17	142,0	Cyl100	1,00	142,0	0,3	2,0	13	0,2	65	-	-	20,5 <sup>8)</sup>	-	0,37	7,6	11,2	14,0	10,0	3,59	-	-	-	3,5	4-P	101,0	26,8	-	-	37,2	64,0
3	B18	151,0	Cyl100	1,00	151,0	0,3	2,0	13	0,2	65	-	-	21,0 <sup>8)</sup>	-	0,37	7,8	11,2	14,0	10,0	3,59	-	-	-	3,5	4-P	110,0	27,4	-	-	38,1	65,5
Yavaş et al. 2019, [29]																															
1	NF	126,0	Cube100	1,00	126,0	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,4	15,0	10,0	5,06	-	-	-	4,0	4-P	35,6	32,0	-	-	-	32,0
2	S6(0.5)	127,0	Cube100	0,94	119,4	3	0,5	6	0,16	38	-	-	-	-	-	1,3 <sup>a)</sup>	12,4	15,0	10,0	5,06	-	-	-	4,0	4-P	40,7	31,5	-	-	6,9	38,3
3	S6(1.0)	131,0	Cube100	0,94	123,1	3	1,0	6	0,16	38	-	-	-	-	-	2,6 <sup>a)</sup>	12,4	15,0	10,0	5,06	-	-	-	4,0	4-P	59,1	31,8	-	-	13,8	45,6
4	S6(1.5)	140,0	Cube100	0,94	131,6	3	1,5	6	0,16	38	-	-	-	-	-	3,9 <sup>a)</sup>	12,4	15,0	10,0	5,06	-	-	-	4,0	4-P	55,6	32,5	-	-	20,7	53,2
5	S13(0.5)	132,0	Cube100	0,94	124,1	3	0,5	13	0,16	81	-	-	-	-	-	2,8 <sup>a)</sup>	12,4	15,0	10,0	5,06	-	-	-	4,0	4-P	56,2	31,9	-	-	14,9	46,8
6	S13(1.0)	137,0	Cube100	0,94	128,8	3	1,0	13	0,16	81	5,6 <sup>9)</sup>	-	-	-	1,0	5,6	12,4	15,0	10,0	5,06	-	-	-	4,0	4-P	63,5	32,3	-	-	29,5	61,7

1) [27]: 3-Punkt Biegeversuche an ungekerbten Prismen Höhe/Breite/Stützweite = 40/40/120 mm nach ASTM C1018  
2) [43]: Spaltzugversuche an Zylindern Durchmesser/Höhe = 150/300 mm nach ASTM 496  
3) [44]: 3-Punkt Biegeversuche an gekerbten Prismen Höhe/Breite/Stützweite nach JCI-S-001 (Geometrie nicht angegeben). Angegebener Wert aus Inverse-Analysis nach JCI-S-001  
4) [28]: Spaltzugversuche an Zylindern Durchmesser/Höhe = 100/200 mm  
5) [46]: Zentrische Zugversuche an Zugknochen Spannungsquerschnitt = 25/75 mm nach KCI-M-12-003  
6) [22]: 3-Punkt Biegeversuche an gekerbten Prismen Höhe/Breite/Stützweite = 150/150/500 mm, Kerbtiefe = 25 mm nach RILEM TC 162-TDF/EN 14651  
7) [47]: 3-Punkt Biegeversuche an gekerbten Prismen Höhe/Breite/Stützweite = 150/150/500 mm, Kerbtiefe = 25 mm nach RILEM TC 162-TDF/EN 14651  
8) [48]: 4-Punkt Biegeversuche an ungekerbten Prismen Höhe/Breite/Stützweite = 100/100/300 mm nach ASTM C78  
9) [29]: Zentrische Zugversuche an Zugknochen Spannungsquerschnitt = 30/68 mm  
a) Auswertung erfolgt nach Gl. (20) (Abschnitt 3.3)  
b) Entfällt, da  $a/d < 2,0$ . Auswertung erfolgt nach Gl. (18) (Abschnitt 2.2)  
c) Aufgrund des großen Abstands zueinander, werden die Bügel nicht berücksichtigt  
d) Fasermischung: 16/0,20 mm + 19/0,20 mm  
e) Die Bildung eines kritischen Schubrisses wurde beobachtet, bevor der Versuch bei angegebenem Höchstwert der Querkraft abgebrochen wurde

# EXKLUSIV-SUPPLEMENT

Wir bringen Ihr Thema in den Markt. Ihre Beilage auf [www.bauingenieur.de](http://www.bauingenieur.de)



**Einzigartige Reichweite!**  
**Qualifizierte Zielgruppe!**

Qualitativ hochwertige Fachinformationen, umfassend, gezielt und reichweitenstark an die Zielgruppe der technischen Fach- und Führungskräfte zu liefern, das erreichen Sie mit dem lesefreundlich blätterbaren PDF-Format auf [www.bauingenieur.de](http://www.bauingenieur.de). Verlinken Sie das Whitepaper auf Ihre Website und generieren Sie dort direkt Ihre Kontakte. Die Bewerbung erfolgt als Teaserbox auf unserem Portal.

Veröffentlichen Sie Ihre Unternehmensbeilage, Ihr Infomagazin, ein Themen-Supplement oder den aktuellen Messekatalog auf unserem Portal. Sie profitieren von einer aufmerksamkeitsstarken Platzierung nah an Ihren Zielgruppen.

- Ihre Beilage wird einen Monat exklusiv integriert.
- Weitere crossmediale Ansätze sind möglich.

Page Impressions  
[www.bauingenieur.de](http://www.bauingenieur.de)\*

\* IVW 1.2022. Reichweite steigend



**13.403**

Monatsdurchschnitt  
2021

Wir beraten Sie gerne. Informationen über:  
Sven Pachinger | Telefon: +49 521 977998-80  
[sven.pachinger@verlagsbuero-pachinger.de](mailto:sven.pachinger@verlagsbuero-pachinger.de)

TECHNIKWISSEN FÜR INGENIEUR\*INNEN.  
[www.vdi-fachmedien.de](http://www.vdi-fachmedien.de)

# VDI fachmedien

## STELLENANGEBOTE



Hochschule  
München  
University of  
Applied Sciences

An der Hochschule München ist an der Fakultät für Bauingenieurwesen ab dem Wintersemester 2022/2023 oder später folgende Stelle zu besetzen:

## W2-Forschungsprofessur für Bauinformatik im Bauprozessmanagement (m/w/d)

Kennziffer: BV 0254

Erfahren Sie mehr in der detaillierten  
Stellenausschreibung unter:  
<https://stellen.hm.edu/5vgnu>

Bewerben Sie sich über unser Online-Portal  
bis zum 31.03.2022.

Wir freuen uns darauf, Sie kennenzulernen!



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

**DRESDEN  
concept**



An der Fakultät Bauingenieurwesen ist im Institut für Baukonstruktion zum **01.04.2023** die  
**Professur (W3) für Nachhaltige Baukonstruktion**

zu besetzen.  
Sie werden in den wissenschaftlichen Gebieten der nachhaltigen Baukonstruktion sowie des Glasbaus engagiert in Forschung und Lehre vertreten. Das Konstruieren nachhaltiger Bauwerke soll dabei eine wesentliche Rolle einnehmen. Ihre Aufgaben in der Lehre erstrecken sich primär auf den Diplomstudiengang Bauingenieurwesen im Direkt- und Fernstudium sowie den englischsprachigen Masterstudiengang ACCESS (Advanced Computational and Civil Engineering Structural Studies) und umfassen die Inhalte der Professur gemäß den aktuellen Studienordnungen der Fakultät Bauingenieurwesen. Lehr- und Prüfungsformen sind sowohl in Präsenz als auch digital anzubieten. Wir erwarten, dass Sie Drittmittel aus Bundes- (DFG, BMBF, BMWI, u. ä.) sowie EU-Förderung einwerben und das zertifizierte Glasbaulabor der Professur weiterführen. Ihre Bereitschaft zur Kooperation mit anderen Professuren der Fakultät Bauingenieurwesen sowie anderen Fakultäten der TU Dresden ist unerlässlich. Die Zusammenarbeit mit den außeruniversitären Forschungseinrichtungen im Umfeld der TU Dresden wird gewünscht. Ihre aktive Mitwirkung in der akademischen Selbstverwaltung setzen wir ebenso voraus, wie Ihre Bereitschaft zur englischsprachigen Lehre.

Wir erwarten einschlägige theoretische und praktische Kenntnisse im Gebiet nachhaltiger Baukonstruktion sowie möglichst mehrerer der nachfolgenden Gebiete: konstruktiver Glasbau, Fassadenbau, strukturelles Kleben, energetische Optimierung von Fassaden und Gebäuden. Ihre Befähigung zur akademischen Forschung weisen Sie unter anderem durch entsprechende Publikationstätigkeit nach. Die Berufungsvoraussetzungen richten sich nach § 58 SächsHSG.

Für weitere Fragen zur Ausschreibung steht Ihnen der Vorsitzende der Berufungskommission, Herr Prof. Dr.-Ing. Stefan Löhnert, Tel. +49 351 463-43231; E-Mail [stefan.loehnert@tu-dresden.de](mailto:stefan.loehnert@tu-dresden.de) zur Verfügung.  
Die TU Dresden ist bestrebt, den Anteil der Professorinnen zu erhöhen und ermutigt Frauen ausdrücklich, sich zu bewerben. Auch die Bewerbungen schwerbehinderter Menschen sind besonders willkommen. Die Universität ist eine zertifizierte familiengerechte Hochschule und verfügt über einen Dual Career Service. Sollten Sie zu diesen oder verwandten Themen Fragen haben, stehen Ihnen die Gleichstellungsbeauftragte der Fakultät Bauingenieurwesen, Frau Dr.-Ing. Damme-Lugenheim (Tel.: +49 351 463-32023, E-Mail: [ggleichstellung.biw@mailbox.tu-dresden.de](mailto:ggleichstellung.biw@mailbox.tu-dresden.de)) sowie unsere Schwerbehindertenvertretung, Herr Roberto Lemmrich (Tel.: +49 351 463-33175, E-Mail: [schwerbehindertenvertretung@tu-dresden.de](mailto:schwerbehindertenvertretung@tu-dresden.de)) gern zum Gespräch zur Verfügung.

Ihre Bewerbung senden Sie bitte mit tabellarischem Lebenslauf, Darstellung des wissenschaftlichen Werdegangs, Verzeichnis der wissenschaftlichen Arbeiten (Publikationsliste), Lehr- und Forschungskonzept, Verzeichnis der bisher gehaltenen Lehrveranstaltungen einschließlich der Ergebnisse der Lehrevaluation (bevorzugt der letzten drei Jahre) sowie einer Übersicht über eingeworbene Drittmittelprojekte und der beglaubigten Urkunde über den höchsten akademischen Grad in einfacher Ausfertigung bis zum **09.05.2022** (es gilt der Poststempel der ZPS der TU Dresden) an: **TU Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Mechanik und Flächentragwerke, Professur für Baumechanik, Vorsitzender der Berufungskommission, Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Löhnert, Helmholtzstr. 10, 11069 Dresden** und in elektronischer Form über das SecureMail Portal der TU Dresden <https://securemail.tu-dresden.de>, an [dekanat.biw@tu-dresden.de](mailto:dekanat.biw@tu-dresden.de).

**Hinweis zum Datenschutz:** Welche Rechte Sie haben und zu welchem Zweck Ihre Daten verarbeitet werden sowie weitere Informationen zum Datenschutz haben wir auf der Webseite <https://tu-dresden.de/karriere/datenschutz/hinweis> für Sie zur Verfügung gestellt.

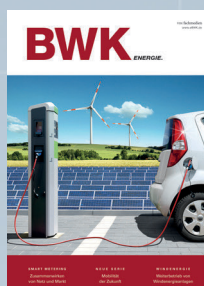


# Die erste Adresse für Technikwissen: VDI Fachmedien.

FACHZEITSCHRIFTEN AUCH ALS E-PAPER ERHÄLTlich



**BAUINGENIEUR**  
10 Ausgaben pro Jahr  
Jahresabopreis: 481,50 EUR  
E-Paper-Abo: 420,30 EUR



**BWK**  
6 Ausgaben pro Jahr  
Jahresabopreis: 330,00 EUR  
E-Paper-Abo: 285,30 EUR



**GEFAHRSTOFFE**  
6 Ausgaben pro Jahr  
Jahresabopreis: 435,00 EUR  
E-Paper-Abo: 379,80 EUR



**HLH**  
9 Ausgaben pro Jahr  
Jahresabopreis: 235,00 EUR  
E-Paper-Abo: 198,90 EUR



**KONSTRUKTION**  
9 Ausgaben pro Jahr  
Jahresabopreis: 513,00 EUR  
E-Paper-Abo: 449,10 EUR



**LÄRMBEKÄMPFUNG**  
6 Ausgaben pro Jahr  
Jahresabopreis: 255,00 EUR  
E-Paper-Abo: 219,60 EUR



**LOGISTIK  
FÜR UNTERNEHMEN**  
6 Ausgaben pro Jahr  
Jahresabopreis: 198,00 EUR  
E-Paper-Abo: 166,50 EUR



**TECHNISCHE SICHERHEIT**  
6 Ausgaben pro Jahr  
Jahresabopreis: 261,00 EUR  
E-Paper-Abo: 223,20 EUR



**UMWELTMAGAZIN**  
6 Ausgaben pro Jahr  
Jahresabopreis: 145,00 EUR  
E-Paper-Abo: 118,80 EUR



**VDI-Z**  
9 Ausgaben pro Jahr  
Jahresabopreis: 279,00 EUR  
E-Paper-Abo: 238,50 EUR



**WT  
Werkstattstechnik-online**  
9 Ausgaben pro Jahr  
Jahresabopreis: 275,00 EUR

**Jetzt Fachzeitschrift  
auswählen und bestellen!**

**Telefon:**  
+49 6123 9238-202  
**vdi-fachmedien@  
vuservice.de**

Inlandsbruttopreise –  
Ausland auf Anfrage.

**Wir wissen, was Technikwissen auszeichnet. Wir – das sind die hochkarätigen Fachzeitschriften des Fachverlags für Ingenieure und Ingenieurinnen, die VDI Fachmedien.**

In direkter Anbindung an den VDI, das größte Netzwerk für Ingenieur\*innen Deutschlands. Unsere Autoren und Autorinnen berichten über Innovationen und Hintergrundwissen in ihrem jeweiligen Fachgebiet. Und das jederzeit praxisorientiert, ohne den wissenschaftlichen Background aus dem Blick zu verlieren.

**TECHNIKWISSEN FÜR INGENIEUR\*INNEN.**  
**www.vdi-fachmedien.de**

**VDI fachmedien**