

Materialverhalten von AR-Glas- und Carbonfilamentgarnen unter Dauerlast- sowie unter Hochtemperatureinwirkung*

Ayham Younes¹, André Seidel², Thomas Engler³, Chokri Cherif⁴

Zusammenfassung: In vielen technischen Anwendungen werden Faserverbundwerkstoffe mit Hochleistungsfasern aus Carbon und AR-Glas eingesetzt, die aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften ein hohes Festigkeitspotential aufweisen. Damit eröffnen sich neue Anwendungsgebiete, z. B. als textile Bewehrungen für Betonbauteile. Die Garnmaterialien müssen hohe sicherheitstechnische Anforderungen erfüllen. Dazu gehören u. a. eine ausreichende Tragfähigkeit unter Dauerlastbeanspruchung und eine hohe Temperaturbeständigkeit im Brandfall. Zur Spezifizierung dieser Eigenschaften wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse nachfolgend vorgestellt werden.

Abstract: Due to their strong mechanical and chemical properties, fiber composite materials composed of high performance carbon and AR-glass fibers lend themselves to many technical applications. Potentially new and innovative application fields should be considered, such as textile reinforcements for concrete components. The yarn materials must meet high technical and safety standards, specifically sufficient load-bearing capabilities under long-term conditions and acceptable strength at high temperatures should fire occur. Research was conducted to document these characteristics. The results are presented in this paper.

* Dies ist eine begutachtete Veröffentlichung./This is a peer-reviewed paper.

Online verfügbar/Online available: [urn:nbn:de:bsz:14-ds-1242131966147-30706](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-ds-1242131966147-30706)

¹ Dipl.-Ing., Institut für Textil- und Bekleidungstechnik, TU Dresden

² Dipl.-Ing., Institut für Textil- und Bekleidungstechnik, TU Dresden

³ Dipl.-Ing. FH, Institut für Textil- und Bekleidungstechnik, TU Dresden

⁴ Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing., Institut für Textil- und Bekleidungstechnik, TU Dresden

1 Einführung

Hochleistungsfilamentgarne aus AR-Glas und Carbon haben sich aufgrund ihrer vorteilhaften physikalisch-chemischen Eigenschaften für den Einsatz in Faserverbundwerkstoffen etabliert. Für einige spezielle Einsatzgebiete, z. B. im Massivbau, müssen die Garnmaterialien hohe sicherheitstechnische Anforderungen erfüllen. Für eine bauaufsichtliche Zulassung von Textilbetonbauteilen sind u. a. eine ausreichende Tragfähigkeit unter Dauerlastbeanspruchung sowie eine hohe Temperaturbeständigkeit im Brandfall unerlässlich.

Die Spezifizierung dieser Eigenschaften erfordert die experimentelle Ermittlung von baumechanischen Kennwerten unter Dauerlast- sowie unter Hochtemperaturbeanspruchung für die eingesetzten Garnmaterialien. Gegenwärtig existieren diesbezüglich noch keine hinreichend aussagekräftigen Daten. Auch liegen bisher kaum Erkenntnisse über die thermische Barriere Wirkung der polymeren Garnbeschichtung und deren Einfluss auf die Zugfestigkeit von AR-Glas- und Carbonfilamentgarnen vor.

Mit einem besseren Verständnis über das Kriechverhalten der Hochleistungsfilamentgarne unter quasi-statischer Dauerbeanspruchung sowie unter zyklischen Beanspruchungen wird eine wesentliche Voraussetzung geschaffen, um das Langzeitverhalten des Verbundbaustoffs Textilbeton über die zu erwartende Lebensdauer eines Bauwerks prognostizieren zu können.

Dergleichen ermöglichen fundierte Kenntnisse des temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens der eingesetzten Faserstoffe auch erste Aussagen zu kritischen Brandlasten. Diese bilden den Ausgangspunkt für den Aufbau einer experimentellen Kennwertdatenbasis zur Gewinnung von Sicherheitskriterien für hochtemperaturbeanspruchten textilbewehrten Beton.

Für beide Untersuchungsgebiete wurden in den Teilprojekten A1 und D6 des SFB 528 Versuchsmethoden entwickelt, die eine Qualifizierung und Quantifizierung der beanspruchungsabhängigen mechanischen Garneigenschaften gestatten. Neben den Prüfständen und Versuchsdurchführungen werden in dem vorliegenden Beitrag aktuelle Ergebnisse zum Kriech- sowie zum Hochtemperaturverhalten von AR-Glas- und Carbonfilamentgarnen mit dem Ziel vorgestellt, die Werkstoffparameter der eingesetzten Hochleistungsfaserstoffe in Abhängigkeit von beiden genannten Beanspruchungsarten näher zu spezifizieren.

2 Dauerlastverhalten von Carbon- und AR-Glasfilamentgarnen

2.1 Ausgangssituation

Wie bei allen Werkstoffen und Baumaterialien stellt auch das Langzeitverhalten von Textilbeton einen wichtigen Aspekt für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit der daraus hergestellten bzw. damit verstärkten Konstruktionen dar. Zuverlässige Aussagen zum Dauerlast-

verhalten erfordern fundierte Kenntnisse über das Materialverhalten aller am Verbund beteiligten Einzelkomponenten. Daher sind Versuche zur Bestimmung von baumechanischen Kennwerten der als textile Bewehrung eingesetzten Hochleistungsfaserstoffe unerlässlich. Anhand experimenteller Untersuchungen an AR-Glasfilamenten und -garnen unter Dauerbelastung wurden erste Beobachtungen eines zeitlich veränderlichen Materialverhaltens festgehalten. In Versuchen von ABDKADER [1] an dauerbeanspruchten Filamentgarnen mit Betrachtungszeiträumen im Stunden- bis Tagebereich zeigten sich nachweisbare Relaxationserscheinungen unter konstant gehaltenen Dehnungen sowie Retardationserscheinungen unter konstant einwirkenden Zugkräften. Davon ausgehend wurden zwei Dauerversuchsstände entwickelt.

2.2 Entwicklung geeigneter Dauerversuchsstände

2.2.1 Dauerversuchsstand für Garnproben mit einer Länge von 0,75 m

Mit diesem Dauerversuchsstand lassen sich durch einen modularen Aufbau bis zu sechs Garnproben gleichzeitig und unabhängig voneinander untersuchen (Bild 1a). Um die erforderliche hohe Messgenauigkeit von 1 μm zu gewährleisten, ist der Aufstellraum des Versuchsstandes klimatisiert und weitgehend gegen Störungen gesichert.

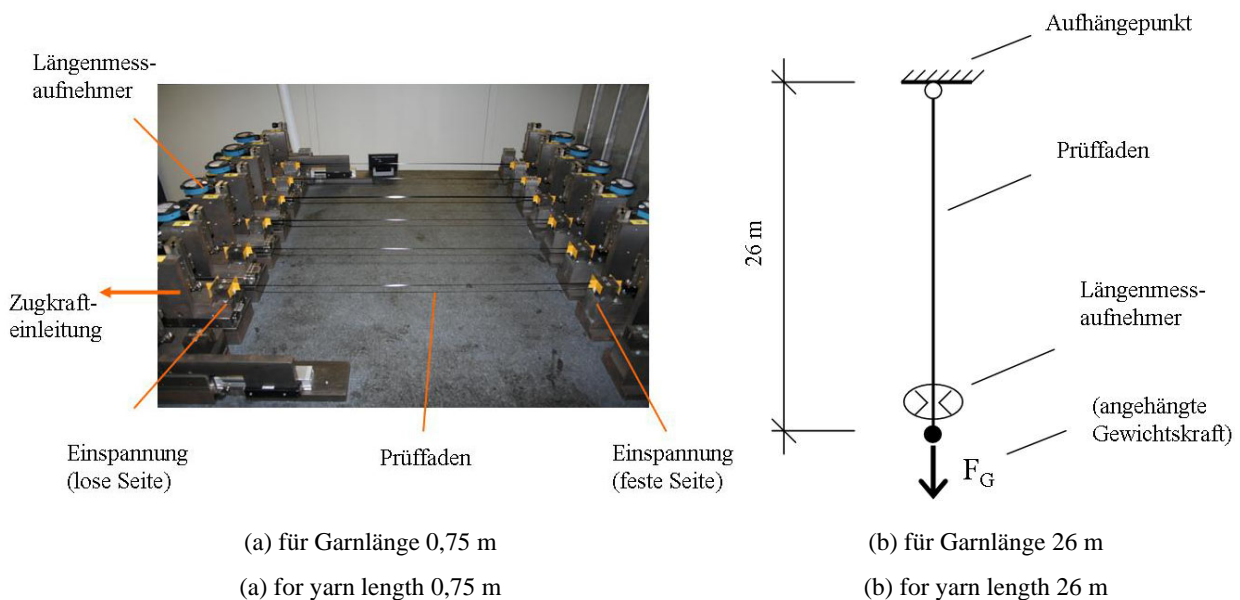


Bild 1: Darstellung der beiden Dauerversuchsstände

Fig. 1: Construction of the long-term test stations

Eine umschlingungsfreie und gerade Einspannung der Garnproben ist durch einen direkten Kunstharzverguss in der Klemmvorrichtung sichergestellt. Ggf. auftretende Schlupfeffekte an der Einspannstelle können über eine eigens entwickelte Rutschüberwachung festgestellt werden, so dass die Längung des Garns mit Hilfe mechanischer Messuhren über die Verschiebung der gleitgelagerten Klemmen präzise ermittelt werden kann. Der Belastungsauftrag erfolgt kontinuierlich über eine motorische Steuerung bis zum Zielwert der Last. Die aufgetragene Last wird mit Hilfe von Kraftmessdosen direkt erfasst.

Neben den vorgenannten Dauerlastplätzen wurden zwei weitere Messplätze für geplante Untersuchungen zur Wechsellastbeanspruchung in den Versuchsstand integriert, bei denen der Lastauftrag über Servoantriebe erfolgt. Die Lastzyklen werden hierfür als Kraft-Zeit-Wertpaare vorgegeben, wobei der Kraftanstieg und die Belastungsdauer frei wählbar sind.

2.2.2 Dauerversuchsstand für Garnproben mit einer Länge von 26 m

Um den Einfluss der Garnlänge auf das Dauerlastverhalten der Garnproben zu untersuchen wurde ein zweiter Versuchsstand entwickelt. Im Bild 1b ist eine Prinzipskizze dargestellt. Im Gegensatz zu dem ersten Versuchsstand wird das Garn hier zwischen zwei mechanischen Klemmen senkrecht eingespannt. Die freie Einspannlänge der Garnproben zwischen den Klemmen beträgt ca. 26 m. Die Belastung des Garns erfolgt durch Anhängen von konstanten Gewichten. Die Messung des Längenzuwachses erfolgt über einen am unteren Ende angeordneten Wegstreckenaufnehmer. Die aufgenommenen Daten werden kontinuierlich durch einen Rechner ausgelesen und gespeichert. Um mögliche Einflüsse von Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf die Messung ausschließen zu können, werden die Klimadaten ständig miterfasst und in die Auswertung einbezogen. Außerdem wird die Höhe des Versuchstandes mit einem Lasermessgerät regelmäßig gemessen, um Rückschlüsse auf temperaturbedingte Längenänderungen des Versuchsgebäudes (massive Bauart) ziehen zu können.

2.3 Versuchsauswertung und Entwicklung eines Materialmodells

Das beobachtete Kriechverhalten entspricht in den Grundzügen einem viskoelastischen Festkörper, bei dem nach Änderung (bzw. Aufbringung) des Belastungsniveaus $\sigma(t)$ eine zeitverzögerte Verformung $\varepsilon(t)$ eintritt, die allmählich abklingt und sich nach einem gewissen Zeitraum einem Endwert annähert. Somit lässt sich dieses Verhalten mit den mechanischen Grundelementen der HOOKE'schen Feder und des NEWTON'schen Dämpfers abbilden. Durch entsprechende Kombination der Grundelemente Feder und Dämpfer lässt sich prinzipiell jeder mögliche Kriechverlauf darstellen. Für den Ansatz des Materialmodells ist zunächst das Kriechverhalten näher zu qualifizieren, und es sind die nachfolgend aufgeführten Anteile gesondert zu betrachten.

Elastische Kurzzeitverformung $\varepsilon_{el}(t)$

Der erste Anteil bildet das Kurzzeit-Verhalten des Materials ab. Dieser wird über das HOOKE'sche Gesetz als linear-elastisch durch den E-Modul der jeweiligen Fasern beschrieben. Im Materialmodell wird dafür die Feder c_{el} verwendet.

Für das Langzeitverhalten werden die beiden folgenden Anteile separat erfasst:

Fließverformung $\varepsilon_F(t)$

Hierbei handelt es sich um den irreversiblen Teil der Kriechverformung, der sich nach der Entlastung nicht zurückstellt. Fließverformungen können zeitlich konstant anwachsen oder allmählich abklingen und sich einem Endwert annähern. Im Materialmodell werden die Fließverformungen durch einen oder mehrere Dämpfer d_F erfasst, die ggf. mit einer zeitlichen Alterungsfunktion belegt werden können. Damit lauten für diesen Anteil die zugehörigen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen :

$$\sigma(t) = d_F \cdot \dot{\varepsilon}_F(t) \quad \Leftrightarrow \quad \varepsilon_F(t) = \int_{\tau=t_0}^t \frac{1}{d_F} \cdot \sigma(\tau) \, d\tau \quad (1)$$

Verzögert elastische Verformung $\varepsilon_{v,el}(t)$

Hiermit wird derjenige Teil des elastischen Materialverhaltens beschrieben, der nach Lastaufbringung nicht sofort, sondern zeitlich nachgeschaltet eine Verformung (Dehnung) erzeugt. Nach Entlastung bildet sich diese Verformung - ebenfalls zeitverzögert - vollständig zurück. Als Baustein im Materialmodell wird die verzögert elastische Verformung durch Parallelschaltung einer Feder c_i mit einem Dämpfer d_i erfasst. Über die „Härte“ des Dämpfers wird die Dauer der Zeitverzögerung bestimmt. Es gilt :

$$\sigma(t) = c_i \cdot \varepsilon_{v,el}(t) + d_i \cdot \dot{\varepsilon}_{v,el}(t) \quad \Leftrightarrow \quad \varepsilon_{v,el}(t) = \frac{1}{d_i} \cdot \int_{\tau=t_0}^t e^{-\frac{c_i}{d_i} \cdot (t-\tau)} \cdot \sigma(\tau) \, d\tau \quad (2)$$

Nach Erfassung und Aufsummierung aller einzelnen Dehnungsanteile ergibt sich die am Faden anliegende Gesamtdehnung $\varepsilon_{ges}(t)$ zu :

$$\varepsilon_{ges}(t) = \sum_n \varepsilon_n(t) = \varepsilon_{el}(t) + \varepsilon_F(t) + \varepsilon_{v,el}(t) \quad (3)$$

Die Zusammenwirkung der einzelnen Verformungsanteile in Form eines mechanischen Modells ist in Bild 2 dargestellt. Durch Anordnung von mehreren Federn d_F sowie mehreren

Feder-Dämpfer-Einheiten c_i und d_i in Form einer Reihenschaltung lässt sich das beobachtete Materialverhalten realitätsnah approximieren.

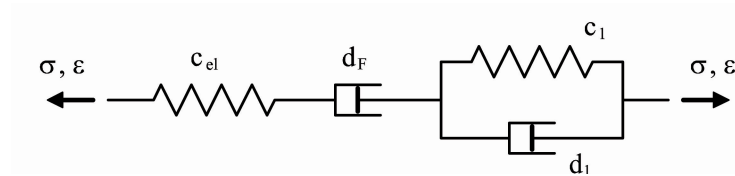


Bild 2: Mechanisches Modell zur Beschreibung zeitveränderlichen Materialverhaltens

Fig. 2: Mechanical model to describe time-varying material behaviour

Im Bild 3 ist der in einem Langzeitversuch über 100 Tage gemessene Dehnungszuwachs am Beispiel eines AR-Glasfasergarnes der Feinheit 640 tex auf dem Versuchstand mit 26 m Länge (vgl. Bild 1b) dargestellt. Unter der konstant einwirkenden Zugspannung von 400 N/mm² konnte nach Einstellung eines Ausgangs-Dehnungszustandes nach Lastaufbringung im folgenden Zeitverlauf ein Dehnungszuwachs von 6,14 ‰ auf 6,43 ‰ festgestellt werden. Dies ist eine relative Zunahme um etwa 5 % gegenüber dem Ausgangswert. Dieses Verhalten kann mit dem Materialmodell nach Bild 2 recht präzise nachgebildet werden.

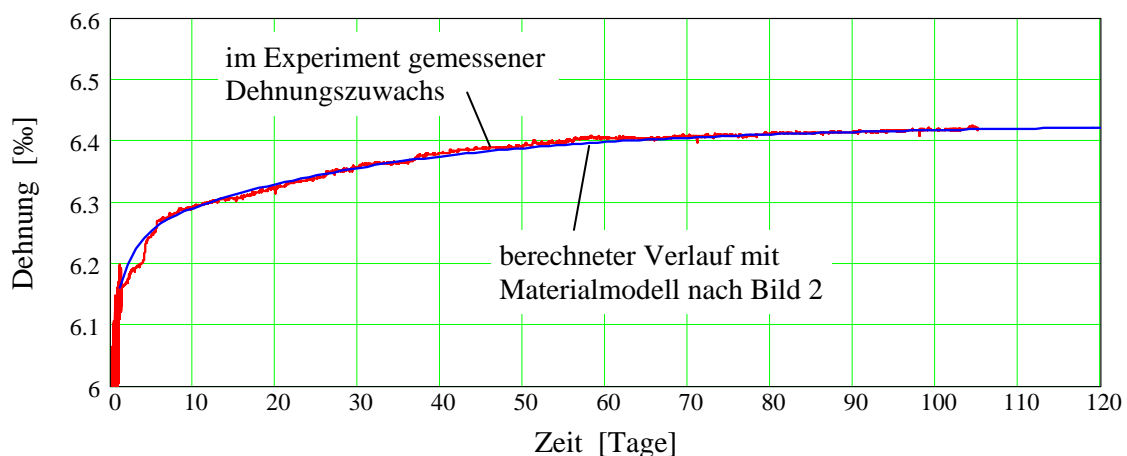


Bild 3: Dehnungszuwachs eines AR-Glasfasergarnes von 640 tex im Langzeitversuch und Abbildung mit Hilfe eines mechanischen Modells

Fig. 3: Increasing strain of a AR-glass filament yarn 640 tex in a long-term experiment and mapping by means of a mechanical model

In allen bisher durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass insbesondere im Anfangsstadium ein signifikanter Dehnungszuwachs zu erkennen ist, der maßgeblich in den ersten

Stunden unmittelbar nach der Lastaufbringung stattfindet. Hierbei handelt es sich nicht um Kriecherscheinungen im eigentlichen Sinne, sondern es kommt in den unter Zugspannungen stehenden Garnen zu einem Ausrichten und Umorientieren der zunächst „ungeordneten“ Filamente längs der Zugkrafttrichtung und dadurch zu einer Längenzunahme. Gleichzeitig entstehen dadurch lokale Spannungsspitzen in einzelnen Filamenten, die bei Überschreiten der Bruchfestigkeit zum Einzelfilamentversagen führen können, vgl. auch PAUCHARD et al. [2]. Die Folge ist eine Schwächung der effektiven Querschnittsfläche und damit bei gleichbleibender Zugkraft eine weitere Erhöhung von Spannung und Dehnung. Diese Dehnungsentwicklung ist für die ersten 24 Stunden eines dauerbelasteten Garnes in Bild 4 dargestellt. Der sich nach dieser Zeit einstellende Endwert (hier 6,14 %) ist als Ausgangszustand für die nachfolgende Langzeituntersuchung anzusehen.

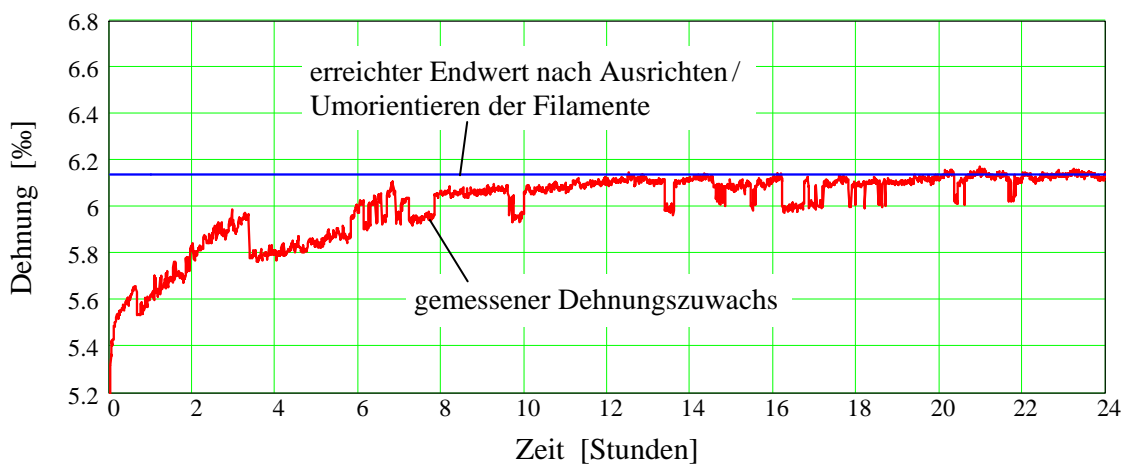


Bild 4: Entwicklung der Garndehnung im Anfangsstadium (erster Tag)

Fig. 4: Development of yarn deformation (strain) in the beginning stage (first day)

Im Zuge der weiteren Forschungen sind Versuche mit wechselnden Belastungsniveaus und insbesondere Versuche mit anschließender, weitestgehend kompletter Entlastung und anschließender Beobachtung des Rückkriechverhaltens über entsprechend lange Zeiträume (mehrere Monate) in Bearbeitung. Mit den daraus in hinreichend vielen Versuchsreihen gewonnenen Erkenntnissen können für die erforderlichen Parameter im Materialmodell zuverlässige Kennwerte bestimmt werden.

Ziel ist es, mit dem entwickelten Modell zum Langzeitverhalten von Hochleistungsfilamentgarnen Berechnungen unter beliebigen Last-Zeit-Verläufen durchführen zu können. Damit sollen einerseits Prognosen zum zeitlich veränderlichen Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Garnes selbst ermöglicht werden. Andererseits lässt sich damit auch die gegenseitige Wechselwirkung zwischen den Textilien mit der umgebenden Matrix (Beton) erfassen und mit

geeigneten Berechnungsmodellen für derartige Bauteile auswerten. Damit ist es möglich, das Trag- und Verformungsverhalten von Bauteilen mit textilbewehrtem Beton über den vorgesehenen Zeitraum ihrer Nutzung realitätsnah zu berechnen und daraus Aussagen zu Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit abzuleiten.

3 Hochtemperaturverhalten von Carbon- und Glasgarnen

3.1 Ausgangssituation

Besonders bei dem Einsatz als textile Bewehrungen in Betonbauteilen sind u. a. auch Kenntnisse über das Verhalten unter thermischer Beanspruchung (z. B. im Brandfall) erforderlich, siehe KRÜGER et al. [3], IAKIMOV [4] and BÜTTNER et al. [5]. Diese stellen eine wichtige Zulassungsvoraussetzung für eine Zertifizierung des textilbewehrten Betons dar.

Aus der einschlägigen Fachliteratur ist seit längerem bekannt, dass es bei Glasfasern ab Temperaturen von ca. 300 - 400°C zu Strukturveränderungen kommt, die mit einer deutlichen Abnahme der Tragfähigkeit einhergehen, vgl. z. B. BOBETH [6] und NOELLE [7]. In den Untersuchungen von PAPAKONSTATINOU et al. [8] wurde gezeigt, dass Carbonfasern unter Normklima bis zu Temperaturen von ca. 400°C eingesetzt werden können. SAUDER et al. [9] und SUMIDA et al. [10] zeigen, dass das Tragverhalten in inerter Atmosphäre sogar erst ab Temperaturen über 1000°C allmählich abnimmt.

Um diese vorliegenden Erkenntnisse weiter zu vertiefen, wurden an Glas- und Carbonfilamentgarnen Dehnversuche unter verschiedenen Temperaturniveaus durchgeführt. Aus den Ergebnissen lassen sich detailliertere Aussagen zur Temperaturabhängigkeit von Festigkeit und Elastizität der untersuchten Materialien ableiten. Es ist zu beachten, dass die nachfolgenden Ausführungen zunächst nur für das Einzelgarn und unter den zugrundeliegenden Versuchsbedingungen gelten. Untersuchungen an eingebetteten textilen Strukturen in einer Verbundmatrix sind Gegenstand weiterer Forschungen.

3.2 Entwicklung eines Versuchsstandes für Hochtemperaturbeanspruchung

In Bild 5 ist der Versuchsaufbau für die Ermittlung des temperaturabhängigen Kraft-Dehnungs-Verhaltens dargestellt. Das zu testende Garn befindet sich in einer 200 mm langen Hitzekammer, die durch einen Infrarot-Strahler erwärmt wird. Die Einspannung des Prüfkörpers und die Anordnung der Messpunkte liegen technologisch bedingt außerhalb des beheizten Bereiches. Dadurch ergibt sich eine gesamte Prüflänge des Fadens von ca. 380 mm. Nach Einbringen des Fadens wird die Hitzekammer auf die jeweilige Prüftemperatur erwärmt. Erst dann beginnt die eigentliche Versuchsdurchführung. Somit ist gewährleistet, dass der Anteil der Temperaturdehnung nicht mit in die anschließende Messung einfließt. Die Zugversuche

erfolgten weggesteuert, wobei die Beanspruchung bis zum Versagen gesteigert wurde. Gemessen wurden die aufgebrachte Zugkraft und die zugehörige Längenänderung des Fadens über die Prüflänge.

Entsprechend dem Versuchsaufbau kann nur die gesamte Längenänderung zwischen den beiden Messaufnehmern erfasst werden. Um Rückschlüsse auf das Verhalten ausschließlich im beheizten Bereich ziehen zu können, ist die Verteilung des Temperaturprofils über die gesamte Prüflänge des Fadens näher zu untersuchen. Hierzu wurden exemplarische Versuche durchgeführt, bei denen unter definierten Solltemperaturen in der Hitzekammer die zugehörigen Fadentemperaturen gemessen wurden. Diese Temperaturmessungen erfolgten teils an der Fadenoberfläche und teils im Fadeninneren und liefern im gewichteten Mittel die mittlere Fadentemperatur. Gleichfalls dienen diese Versuche dazu, die jeweilige Solltemperatur in der Hitzekammer so zu kalibrieren, dass die gewünschten Prüftemperaturen von 100°C bis 500°C im Faden erreicht werden. Durch Extrapolation der Messwerte lässt sich der Temperaturprofilverlauf über die gesamte Fadenlänge approximieren.

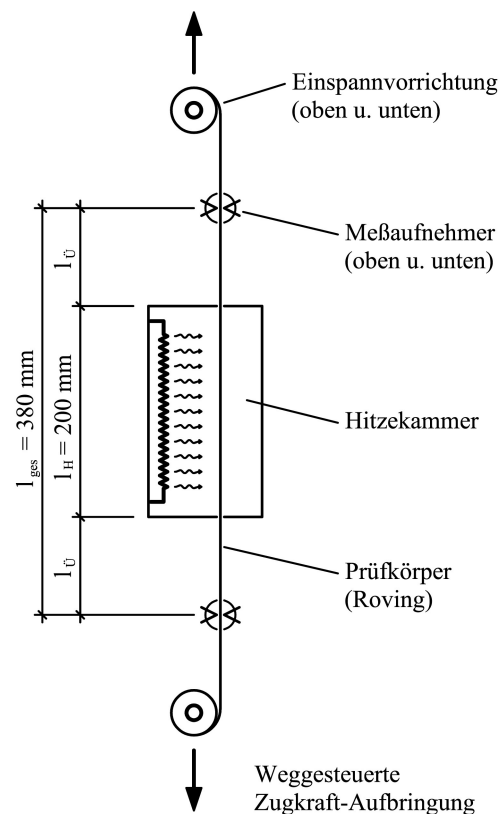


Bild 5: Versuchsaufbau zur Durchführung der Temperatur-Dehnversuche

Fig. 5: Test set-up of the temperature-tensile tests

3.3 Versuchsumfang

Für die Versuche zum thermischen Verhalten textiler Fasermaterialien kamen Glasfilament- und Carbongarne mit verschiedenen Feinheiten zur Anwendung. Um eine bessere Ausnutzung der textilen Verstärkungsstrukturen in der Betonmatrix zu erreichen, wurden die Textilstrukturen u. a. mit einem Polymer auf Basis von Styrolbutadien beschichtet. Die Beschichtung der einzelnen Filamentgarne erfolgte auf einer Multiaxialkettenwirkmaschine, auf der auch die Textilstrukturen für die Bewehrung von Betonplatten hergestellt wurden. Dadurch ist gewährleistet, dass die einzelnen Filamentgarne mit den gleichen Bedingungen sowie mit der gleichen Beschichtungsmenge wie bei den eingesetzten Bewehrungsstrukturen beschichtet sind. Ausgehend vom Verhalten unter einer Normtemperatur von 20°C wurden anschließend verschiedene Versuchsreihen bei Temperaturen von 100°C bis 500°C sowohl an unbeschichteten als auch an beschichteten Garnen durchgeführt. Alle Versuche erfolgten unter Raumlufumbedingungen, d. h. unter Anwesenheit von Sauerstoff. Somit ist speziell bei den getesteten Carbonfilamentgarnen davon auszugehen, dass es bei höheren Temperaturen (ab ca. 300 bis 400°C) zu Verbrennungseffekten kommt, die zu einem frühzeitigen Versagen der Prüfkörper führen.

3.4 Auswertung der Versuchsergebnisse

3.4.1 AR-Glasfilamentgarne

AR-Glasfilamentgarne werden vorzugsweise in den Feinheiten 640 tex und 2400 tex (Cem-FIL Vetrotex 5325) eingesetzt. Die Forschungen beschäftigen sich bislang überwiegend mit 640 tex Garnen, da diese in ihren Materialeigenschaften deutlich geringere Streuungen aufweisen. Daher sind diese auch Gegenstand der vorliegenden Betrachtungen unter Hitzeeinwirkung. Analog den Carbonfilamentgarnen wurde das gleiche Versuchsprogramm abgearbeitet, d. h. es wurden unbeschichtete und beschichtete Probekörper bei steigenden Temperaturen bis 500°C getestet. Als erstes Ergebnis zeigt sich auch hier, dass die Festigkeiten der beschichteten Garne etwa doppelt so groß sind wie die der unbeschichteten Garne (Bild 6a). Die E-Moduln sind nahezu gleich (Bild 6b).

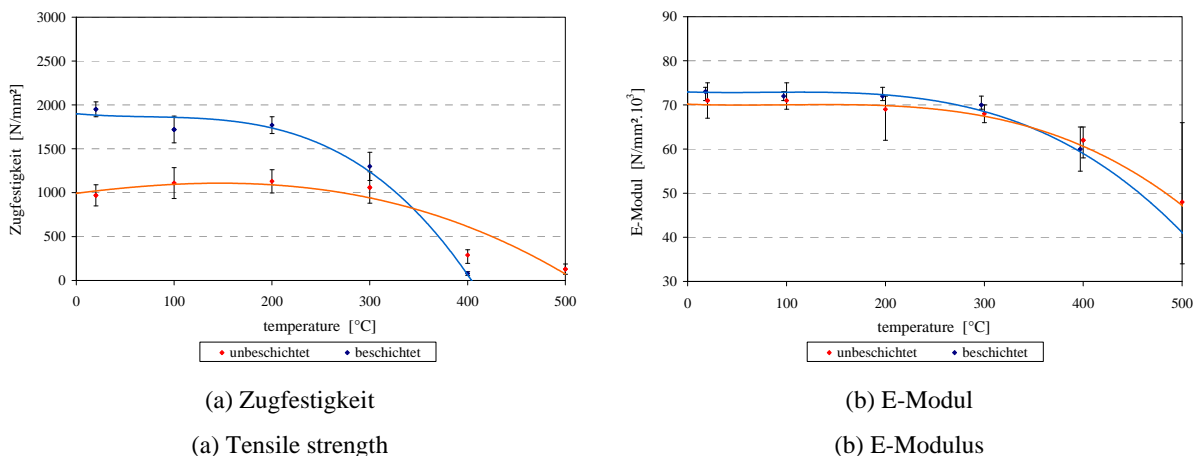


Bild 6: Zugfestigkeit und E-Modul von beschichteten und unbeschichteten AR- Glasfilamentgarnen mit 640 tex in Abhängigkeit von der Temperatur

Fig. 6: Tensile strength and E-Modulus depending on the temperature of coated and uncoated AR-glass filament yarn with 640 tex

In allen Versuchsreihen an den unbeschichteten Garnen war festzustellen, dass bei Prüftemperaturen von 100 bis 300°C die aufnehmbaren Zugfestigkeiten der Probekörper gegenüber der Normtemperatur um ca. 10 bis 15 % höher lagen. Eine Erklärung hierfür liegt in der mit steigender Temperatur abnehmenden Luftfeuchte, was zu einem Austrocknen des Garnes und damit zur Verhärtung der Schlichte führt. Das wiederum hat einen erhöhten Reibungswiderstand zwischen den einzelnen Filamenten zur Folge. Durch die so verfestigte Filamentstruktur erhöht sich die Zugfestigkeit des gesamten Garns. Durch die Anordnung der Versuchsdurchführung kommt es dabei nicht nur entlang der beheizten Fadenlänge innerhalb der Hitzekammer, sondern infolge deren Wärmeabstrahlung auch in den Überstandsbereichen unter- und oberhalb bis zu den Einspannstellen zur Austrocknung der Umgebungsluft, so dass der Verfestigungseffekt auf die gesamte Länge des Prüfkörpers wirkt.

Bei den beschichteten Garnen ist dieser Effekt nicht zu beobachten, da die austrocknende Umgebungsluft durch die Beschichtung das innen liegende Garn nicht erreichen kann. Die Zugfestigkeiten der Probekörper bei Temperaturen von 100 bis 200°C nehmen etwa in der Größenordnung von 10 % gegenüber der Normtemperatur ab. Bei Temperaturen oberhalb von 200°C löst sich die Beschichtung allmählich auf, bei 300°C ist sie nahezu vollständig zerstört. Dies ist durch die dabei entstehenden Dämpfe und durch die Verfärbung der Probekörper sehr gut zu erkennen (Bild 8).

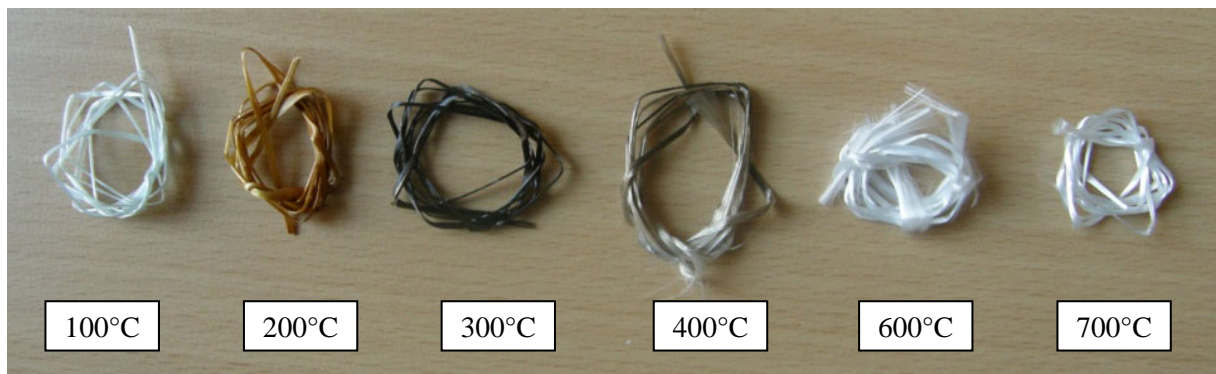


Bild 7: Verfärbung der beschichteten AR-Glasfilamentgarne infolge der steigenden Temperatur

Fig. 7: Discoloration of coated AR-glass filament yarns due to increased temperature

Bei Temperaturen oberhalb 300°C kommt es sowohl bei den unbeschichteten als auch bei den beschichteten Garnen zu einer rapiden Abnahme der Festigkeiten. Hier führt die Erwärmung zu einer Veränderung der inneren Struktur der Glasfilamente, die allmählich aufzuweichen und in den Schmelzzustand überzugehen beginnen. Dieses Verhalten ist bereits seit langem bekannt und in der einschlägigen Literatur vielfach beschrieben, siehe z. B. FLEMMING et al. [11] und HÖRSTING et. al. [12]. Die unbeschichteten Probekörper weisen bei 400°C noch eine verbleibende Restfestigkeit von ca. 30 % und bei 500°C von ca. 15 % gegenüber der Normtemperatur auf. Die beschichteten Garne sind bei diesen Temperaturen zum größten Teil bereits zerstört, was auf die zusätzliche Wärmefreisetzung durch die Oxidation der Beschichtung zurückführbar ist.

Der Elastizitätsmodul nimmt mit steigenden Temperaturen allmählich ab und liegt bei 300°C in allen Versuchsreihen noch bei ca. 95 % des Ausgangszustandes. Bei höheren Temperaturen fällt er überproportional stärker ab und liegt im Versagensbereich der Prüfkörper noch bei etwa 70 bis 80 % seines ursprünglichen Wertes bei Normtemperatur von 20°C. Im Bruchzustand zeigen alle Glasproben ähnliches Verhalten wie es auch bei Carbon beobachtet wurde.

3.4.2 Carbonfilamentgarne

Es wurden verschiedene Chargen an Carbonfilamentgarnen in der Feinheit 800 tex (Tenax®-E HTS 5631) getestet, da diese für technische Anwendungen vorzugsweise eingesetzt werden. Dabei kommt es unter den vorliegenden Versuchsbedingungen, bei denen die Prüfkörper der umgebenden Raumluft ausgesetzt sind, zu Verbrennungseffekten, die mit einer deutlichen Abnahme von Festigkeit und Elastizitätsmodul einhergehen (Bild 8).

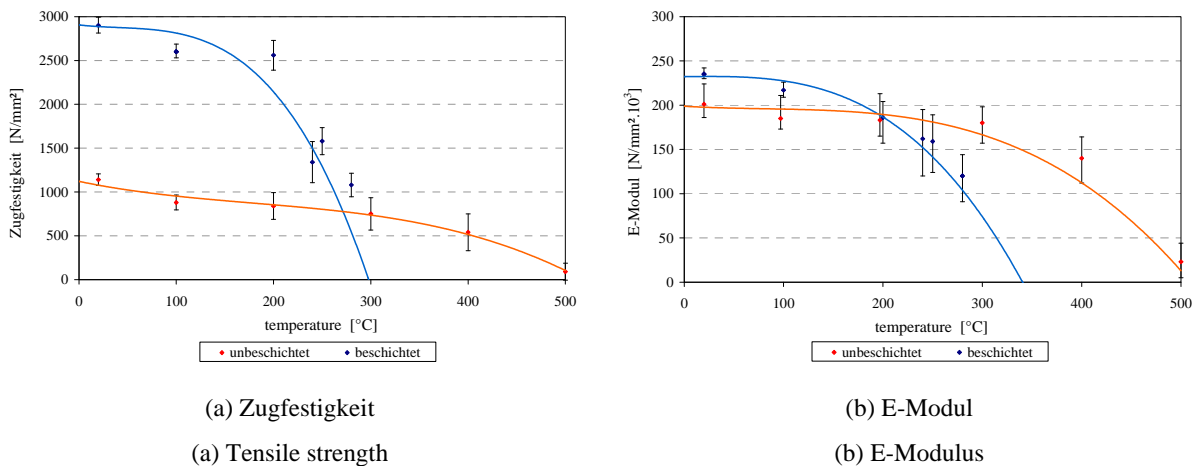


Bild 8: Zugfestigkeit und E-Modul von beschichteten und unbeschichteten Carbonfilament- garnen mit 800 tex in Abhängigkeit von der Temperatur

Fig. 8: Tensile strength and E-Modulus depending on the temperature of coated and uncoated carbon filament yarn with 800 tex

Die Oxidation der Prüfkörper ist über die entstehenden Verbrennungsgase gut zu erkennen (Geruch) und kann auch über deren Masse-Verlust belegt werden. Bei den unbeschichteten Garnen beginnt die Oxidation im Wesentlichen ab Temperaturen von 300 bis 400°C. Ab 500°C wird die Filamentstruktur nahezu vollständig zerstört. Bei den beschichteten Garnen setzt der Oxidationsprozess bereits früher ein. Die Grenze der Beanspruchbarkeit wird im Temperaturbereich zwischen 200 bis 300°C erreicht. Als eine mögliche Erklärung hierfür ist die mit einsetzender Zerstörung der Beschichtung entstehende Oxidationswärme anzusehen, die zu einer zusätzlichen Schädigung des Prüfkörpers und somit zum frühzeitigen Versagen führt.

Die im Bild 8 zusammengefassten Versuchsergebnisse zeigen auch, dass die maximal aufnehmbaren Zugfestigkeiten der beschichteten gegenüber den unbeschichteten Garnen mehr als doppelt so hoch sind. Auch die E-Moduln der beschichteten Garne liegen unter Normtemperatur im Vergleich etwas höher. Bereits ab Temperaturen von 100°C werden die unbeschichteten Prüfkörper spürbar geschädigt. Die Zugfestigkeiten verringern sich um ca. 20 bis 25 %. Die beschichteten Prüfkörper zeigen sich bei 100°C etwas widerstandsfähiger. Die bei dieser Temperatur noch weitgehend intakte Beschichtung vermag das innen liegende Carbongarn vor Sauerstoffzufuhr und damit verbundener Oxidation zu schützen, so dass die Zugfestigkeiten hier nur um ca. 10 % abnehmen. Bei den unbeschichteten und den beschichteten Garnproben gleichermaßen nimmt der E-Modul bei 100°C um etwa 8 % ab.

Die weiteren Versuche an unbeschichteten Garnen zeigen bei 200°C und 300°C eine fortschreitende Verringerung der Zugfestigkeit, die leicht unterproportional zu den ansteigenden Temperaturen verläuft. Der E-Modul nimmt dabei nur geringfügig ab. Erst ab Temperaturen über 300°C kommt es zu einer deutlichen Beschleunigung des Oxidationsprozesses. In den

Versuchen bei 400°C beträgt die dann noch verbleibende Zugfestigkeit etwa die Hälfte gegenüber der Normtemperatur, der E-Modul hat sich dabei auf etwa zwei Drittel verringert. Bei 500°C sind die meisten Probekörper weitestgehend zerstört, die bei dieser Temperatur ermittelten Werte sind somit nur noch bedingt verwertbar.

An den beschichteten Garnen beginnt ab Temperaturen um die 200°C die Zerstörung (Verdampfung) der Beschichtung. Als Folge nehmen die Festigkeit um etwa die Hälfte und der E-Modul um etwa ein Viertel gegenüber den Werten unter Normtemperatur ab. Zur detaillierten Untersuchung dieser Effekte wurden die weiteren Versuche mit geringeren Temperaturabstufungen durchgeführt. Im Ergebnis ist festzustellen, dass der Grenzbereich zum vollständigen Kollabieren bei ca. 250 bis 280°C liegt. Bei diesen Temperaturen versagte ein Großteil der Prüfkörper bereits bei Versuchsbeginn. Daher streuen die Einzelergebnisse sehr stark. Temperaturen von mehr als 300°C bestand keine der beschichteten Garnproben.

Weiterhin ist festzustellen, dass bei den unbeschichteten Probekörpern unter allen getesteten Temperaturen bereits deutlich vor Erreichen ihrer maximal aufnehmbaren Spannungen die Dehnungen stark überproportional zunehmen, d. h. der Bruch kündigt sich vorher allmählich an (duktiler Versagen). Demgegenüber verläuft die Spannungs-Dehnungs-Linie bei den beschichteten Garnen nahezu linear-elastisch bis zum Bruch, der dann schlagartig und ohne Vorankündigung erfolgt.

3.5 Verhalten bei Einbettung in eine Matrix

In vielen technischen Anwendungen werden textile Fasern nicht allein, sondern im Verbund mit einer umgebenden Matrix eingesetzt. Diese bietet in gewissem Maße eine Schutzfunktion für die eingebetteten Textilfasern. Dadurch wird zum einen die eindringende Hitze bis zu den Fasern abgeschwächt und zum anderen können mögliche Oxidationsprozesse verhindert oder zumindest verzögert werden. Am Beispiel von textilbewehrten Betonproben wurden in EHLIG et. al. [13] erste Tastversuche durchgeführt, um für Probekörper mit Carbon- und AR-Glasfaserbewehrung unter Brandbeanspruchung die Zugtragfähigkeit zu untersuchen. Die Versuchsergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass die Tragfähigkeiten der betreffenden Garne innerhalb eines Verbundwerkstoffes höher liegen, als dies bei den bisherigen Versuchen unter Raumluftbedingungen der Fall war.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit den entwickelten Versuchsdurchführungen konnten erste Erkenntnisse zum Dauerlast- und Hochtemperaturverhalten von textilen Hochleistungsgarnen gewonnen werden. Diese Ergebnisse sind sowohl für den Einsatz im Textilbeton als auch für viele weitere Anwendungen auf dem Gebiet der Faserverbundwerkstoffe von Bedeutung. Im Fokus aktueller For-

schungsaktivitäten an der TU Dresden stehen gegenwärtig Untersuchungen zu zyklischen Dauerlastprüfungen und zur berührungslosen Dehnungsermittlung im Hochtemperaturbereich sowie zur Widerstandserwärmung von Carbonfilamentgarnen. Ferner ist der Einfluss der umgebenden Atmosphäre auf das temperaturabhängige Kraft-Dehnungs-Verhalten der Filamentgarne näher zu spezifizieren. Zur Verbesserung der Temperaturbeständigkeit der eingesetzten Garnmaterialien sind außerdem neue hitzebeständige Beschichtungen zu entwickeln, um insbesondere für Carbon die negativen Auswirkungen des Luftsauerstoffes abzumildern.

5 Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die finanzielle Unterstützung der Forschung im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB 528 „Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“ an der Technischen Universität Dresden sowie den Kollegen für die Bereitstellung der experimentellen Daten.

6 Literaturverzeichnis

- [1] ABDKADER, A. (2004). *Charakterisierung und Modellierung der Eigenschaften von AR-Glasfilamentgarnen für die Betonbewehrung*. Dissertation 2004, Technische Universität Dresden, Institut für Textil- und Bekleidungstechnik
- [2] PAUCHARD, V.; BROCHADO, S.; CHATEAUMINOIS, A.; CAMPION, H.; GROSJEAN, F.: *Measurement of sub-critical crack-growth rates in glass fibers by means of acoustic emissions*. Journal of Material Science Letters, Vol. 20, S. 777-779, 2001
- [3] KRÜGER, M.; REINHARDT, H. W.; RAUPACH, M.; ORLOWSKY J.: *Textilbewehrter Beton unter Brandbeanspruchung*. Betonwerk und Fertigteil-Technik, S. 38-48, 2005
- [4] IAKIMOV, M.: *Untersuchungen zum Brandverhalten von textilbewehrten Betonelementen*. Diplomarbeit 2003, Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen
- [5] BÜTTNER, T.; ORLOWSKY, J.; RAUPACH, M.: *Fire Resistance tests of TRC under static loading results and future developments*. High Performance Fibre Reinforced Cement Composites. Proceedings of the 5th International RILEM Workshop, S. 361-370, 2007
- [6] BOBETH, W.: *Textile Faserstoffe, Beschaffenheit und Eigenschaften*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1993
- [7] NOELLE, G.: *Technik der Glasherstellung*. 3. Aufl. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1997
- [8] PAPAKONSTATINOU, C.; BALAGURU, P.; LYON, R.: *Comparative Study of high temperature composites*. Composites Part B 32, S. 637-649, 2001

- [9] SAUDER, C.; LAMON, J.; PAILLER, R.: *Thermomechanical properties of carbon fibres at high temperatures (up to 2000°C)*. Composites Science and Technology 62, pp. 499-504, 2002
- [10] SUMIDA, A.; FUJISAKI, T.; WATANABE, K.; KATO, T.: *Heat resistance of Continuous Fibre Reinforced Plastic Rods*. In: Burgone, C. (Hrsg): 5th Symposium on Fibre-reinforced-Plastic Reinforcement of Concrete Structures 5 London, pp. 557-565, 2001
- [11] FLEMMING, M.; ZIEGMANN, G.; ROTH, S.: *Faserverbundbauweisen: Fasern und Matrices*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1995
- [12] HÖRSTING, K.; KALDENHOFF, R.; WULFHORST, B.: *Einführung in die Werkstoff- und Verarbeitungseigenschaften von Glasfasern*. Shaker-Verlag, Aachen, 1993
- [13] EHLIG, D.; JESSE, F.; CURBACH, M.: *RC Slabs with Textile Reinforced Concrete (TRC) under Fire Loading*. Ferro-9 International Symposium, Bali, May 2009