

Manfred Curbach  
Frank Jesse

# Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton

Textilbeton ist ein neuer Verbundwerkstoff mit besonderen Eigenschaften. Dieser Beitrag soll dem Bedarf nach einer allgemeinverständlichen Einführung in das Konstruieren mit Textilbeton für Praktiker entgegenkommen. Da Textilbeton den vorhandenen Erfahrungsbereich in vielerlei Hinsicht verlässt, sollen seine besonderen Eigenschaften sowie Gemeinsamkeiten und Unterschiede zur Stahlbetonbauweise erläutert werden. Im Einzelnen werden Anforderungen an die Fasermaterialien, typische Materialien und Technologien für die Herstellung von textilen Bewehrungen und Textilbeton erläutert. Die Diskussion verschiedener Fallbeispiele existierender Anwendungen dient der Demonstration der Besonderheiten und der Leistungsfähigkeit dieses Verbundwerkstoffs und wichtiger Grundprinzipien für das Konstruieren mit Textilbeton. Die Zusammenstellung typischer Kennwerte soll dem Leser ermöglichen, eigene Überlegungen zum Einsatz dieses innovativen Verbundwerkstoffs anzustellen.

## Specifications and Application of Textile Reinforced Concrete (TRC)

*Textile reinforced concrete (TRC) is a new composite with specific properties. This paper should address the needs of a generally understandable introduction into TRC design for practitioners. Because TRC leaves the existing range of application specific properties as well as similarities and differences to steel reinforced concrete will be illustrated. In detail requirements for fibre materials, typical materials and technologies for production of textile reinforcement and TRC are elucidated. The discussion of various case studies of existing applications serve for demonstrating specifics and capabilities of this composite. It also shows important first principles for designing with TRC. A set of typical material data should enable readers to think about applications of this innovative composite.*

## 1 Einleitung

An dieser Stelle zu erläutern, warum Stahlbeton der mengenmäßig erfolgreichste und bedeutendste Baustoff des letzten Jahrhunderts war und aller Voraussicht nach auch in diesem Jahrhundert sein wird, ist nicht notwendig. Der Erfolg des Stahlbetons ist in der fast perfekten Kombination zweier Baustoffe begründet, die jeder auf seinem Gebiet die wirtschaftlichste Lösung darstellen – der Beton zur Abtragung von Druckkräften und der Bewehrungsstahl zur Aufnahme der Zugkräfte. Ideal ist die Kombination auch deshalb, weil der Beton infolge des Portlandklinkeranteils im Zement einen pH-Wert im stark basischen Bereich hat, der den Stahl bei fachgerechter Planung und

Ausführung dauerhaft vor Korrosion schützt. Um diese Schutzfunktion über die Lebensdauer eines Bauwerks zuverlässig aufrecht zu erhalten, ist eine Mindestbetonüberdeckung zwischen 15 und 50 mm erforderlich [1], woraus sich Mindestabmessungen für Stahlbetonbauteile von zwischen 50 und 100 mm ergeben. Immer dann, wenn soviel Beton zur Aufnahme der Druckkräfte nicht erforderlich oder aus Gewichtsgründen störend ist, stellt sich die Frage nach alternativen, leichteren und eleganteren Lösungen.

Was wäre, wenn die Bewehrung nicht durch eine dicke Betonschicht vor Korrosion geschützt werden müsste? Und angenommen, die Bewehrung wäre extrem filigran und das Kriterium der Mindestbetondeckung zur Sicherstellung des Verbunds nach DIN 1045-1, 6.3 (4) träfe auch bei Bewehrungsdurchmessern im Millimeterbereich zu. Wenn es eine solche Bewehrung gäbe, wären Bauteile aus bewehrtem Beton um ein Vielfaches schlanker, leichter, materialsparender und könnten als Nebeneffekt seinen Anwendungsbereich spürbar erweitern.

Die Verwendung von textilen Bewehrungen aus Hochleistungsfasern ist eine mögliche Antwort auf diese Frage. Weil die Abmessungen der hochfesten Fasern im Millimeterbereich liegen und damit mindestens eine Größenordnung unter der normalen Betonbewehrung und weil die Fasermaterialien nicht vor Korrosion geschützt werden müssen, lassen sich Bauteile und Bauwerke mit bisher unerreichter Leistungsfähigkeit und Schlankheit realisieren.

Über Grundlagen zum Tragverhalten, zur Berechnung und Simulation von Textilbeton sowie Fallbeispiele für den Praxiseinsatz existiert bereits geeignetes Schrifttum [2]–[6]. Inhalt dieses Beitrags sind spezielle Eigenschaften von Textilbeton und sich daraus ableitende Grundregeln für das Konstruieren mit Textilbeton. Der direkte Vergleich mit der traditionellen Stahlbetonbauweise erscheint den Autoren geeignet, Praktikern das Material und seine Anwendungsmöglichkeiten nahezubringen.

## 2 Was ist Textilbeton?

### 2.1 Textilbeton ist kein Faserbeton

Faserbeton – oder korrekt Kurzfaserbeton – enthält kurze Fasern aus unterschiedlichsten Materialien. Am weitesten verbreitet sind der Glasfaserbeton mit 5 bis 25 mm langen Fasern aus speziellem alkaliresistentem Glas sowie der Stahlfaserbeton mit Fasern aus meist hochfestem Stahl-

draht und Längen von 15 bis 60 mm. Die Kurzfasern werden dem Beton bei der Herstellung beigemischt und sind im fertigen Bauteil – im Gegensatz zum Stahlbeton und Textilbeton – quasi zufällig verteilt. Durch spezielle Herstellungsverfahren lässt sich die Ausrichtung der Fasern auch steuern. Aber abgesehen von den Schwierigkeiten, die Reproduzierbarkeit sicherzustellen, bleibt als wesentliches Charakteristikum die zufällige Anordnung der Fasern im Beton.

Die Verteilung der Fasern legt das wesentliche Potential wie auch die technischen Grenzen des Faserbetons gleichermaßen fest. Bei Faserbetonen erreicht die Bewehrung praktisch ohne Aufwand jeden Winkel eines Bauteils. Das ist optimal für Einwirkungen, deren Richtung unbestimmt ist. Für eine gerichtete Einwirkung, wie sie in lastabtragenden Strukturen typischerweise anzutreffen ist, ist eine zufällige Anordnung der Bewehrung relativ ineffizient. Interessant ist, dass es aufgrund des besonders einfachen Herstellungsverfahrens (Beton-mischen-und-in-die-Schalung-gießen) trotzdem wirtschaftlich interessant sein kann, Stahlfaserbeton für lastabtragende Strukturen des Hochbaus einzusetzen [7], [8]. Die zentrale Rolle eines wirtschaftlichen Herstellungsverfahrens sei bereits an dieser Stelle betont.

Die zweite charakteristische Eigenschaft, die Faserbeton grundsätzlich von Stahlbeton und textilbewehrtem Beton unterscheidet, ist der Versagensmechanismus. Beim Faserbeton kommt es im Bruchzustand zum Auszug der Fasern. Aus der dabei verrichteten Arbeit gewinnen Faserbetone ihr anerkannt hohes Arbeitsvermögen (Duktilität). Allerdings muss auf Dauer sichergestellt sein, dass beim Faserauszug die Beanspruchung unterhalb der Faserfestigkeit verbleibt, sonst kommt es zur Versprödung. Damit der Faserauszug als charakteristischer Versagensmechanismus dauerhaft, d. h. bei fortschreitender Hydratation des Zements und mit dem Betonalter steigender Verbundfestigkeit sicher gewährleistet werden kann, ist die volle Ausnutzung der Faserfestigkeit bei Faserbeton prinzipbedingt nicht möglich.

Textilbeton wie auch Stahlbeton versagen hingegen durch Erreichen der Materialfestigkeit der Bewehrung. Die Duktilität rührt allein aus dem Verformungsvermögen der Bewehrung. Die Festigkeit der Bewehrung kann bei beiden Verbundwerkstoffen im Bruchzustand voll ausgenutzt werden. Das trägt erheblich zum wirtschaftlichen Einsatz bei.

## 2.2 Textilbeton ist miniaturisierter Stahlbeton

Textilbeton und Stahlbeton teilen wesentliche Konstruktionsmerkmale. In beiden Verbundwerkstoffen dient der Beton dem Abtrag von Druckkräften und die Bewehrung der Aufnahme der Zugkräfte, wenn beim Erreichen der Betonzugfestigkeit Risse entstehen. Zur Sicherstellung ausreichender Duktilität muss die Bewehrung in der Lage sein, die bei der Rissbildung freiwerdende Betonzugkraft aufzunehmen. Die Bewehrung wird i. A. oberflächennah und -parallel in der erforderlichen Lagenzahl eingebaut und entsprechend dem Kraftfluss im Bauteil orientiert.

Die wesentlichen Unterschiede zwischen Textilbeton und Stahlbeton liegen zum Einen im Maßstab und zum Anderen in der Detailausbildung. Beim Textilbeton sind

alle Dimensionen des Stahlbetons – vereinfacht ausgedrückt – eine Größenordnung kleiner. Das Größtkorn liegt nicht im Bereich von 8 mm bis 32 mm sondern zwischen 1 und 4 mm (je nach Anwendung auch darunter). Statt 6 bis 32 mm (0,28 bis 8,04 cm<sup>2</sup>) Durchmesser bei Stab- und Mattenstahl beträgt er bei textiler Bewehrung nur 0,6 bis 2,5 mm (0,0025 bis 0,02 cm<sup>2</sup>). Die Stababstände liegen beim Textilbeton im Bereich von 5 bis 25 mm statt der im Stahlbeton üblichen 5 bis 25 cm. Schließlich folgen auch die Dimensionen der Bauteile, vor allem die Bauteildicke, dieser Skalierung. Typische Bauteildicken für Textilbeton liegen im Bereich von 10 bis 30, maximal 50 Millimeter.

Die Dimensionen von Tragwerken aus Textilbeton sind dieser Skalierung nicht zwingend unterworfen. Offensichtlich ist jedoch, dass die Gebrauchstauglichkeit und speziell die Verformungsbeschränkung auch bei Textilbeton zu den schon vom Stahlbeton bekannten Schlankheiten führt. Die Vollplatte ist ein typisches Bauteil, wie praktisch zulässige Verformungen maßgebend für die Abmessungen werden. In vielen Fällen wird der Nachweis nach DIN 1045-1:2008-08, 11.3.2 indirekt über die Biegeschlankheit geführt. 10 bis 30 mm Bauteildicke führen damit zu typischen Abmessungen (Spannweiten) von 35 bis 100 cm. Kann man damit sinnvoll Tragwerke konstruieren? Das mehrfach preisgekrönte Beispiel der Fußgängerbrücke in Oschatz [4] zeigt, dass es möglich ist, aber auch, dass die Konstruktionsprinzipien des Stahlbetons nicht direkt auf textilbewehrten Beton übertragbar sind.

## 2.3 Textilbeton ist kein Ersatz für Stahlbeton

Oft wird gefragt, ob sich in Stahlbetonbauweise geplante Objekte besser und günstiger in Textilbeton realisieren lassen? Die kurze Antwort darauf lautet: Nein, meist wahrscheinlich nicht. Als Fallbeispiel soll eine Hochbaudecke mit 4 m Spannweite als Vollplatte dienen. Die Bauhöhe von etwa 15 cm ergibt sich hauptsächlich aus zulässiger Biegeschlankheit und erforderlicher Betondeckung. Durch den Einsatz von textiler Bewehrung könnte auf einen Großteil der Betondeckung verzichtet und die Deckenstärke um ca. 2 cm reduziert werden. Diesem Einsparungspotential stehen eine Umstellung der Herstellungstechnologie, eine teurere Bewehrung und andere kostenrelevante Punkte gegenüber. Zu einem ähnlichen Ergebnis wird man wahrscheinlich bei den meisten Anwendungen gelangen, in denen sich die Stahlbetonbauweise seit Jahrzehnten bewährt hat. Immer dann, wenn es sich um typische Bauteile oder Tragwerke aus Stahlbeton handelt, wird das mit hoher Wahrscheinlichkeit die wirtschaftlichere Lösung sein.

Ein positives Fallbeispiel sind hinterlüftete Fassadenplatten aus Stahlbeton. Bemessungsrelevant ist die Windbelastung. Die für die Dauerhaftigkeit notwendige Betonüberdeckung führt zu Mindestkonstruktionsstärken von 6 cm. Die gleiche Konstruktion aus Textilbeton ist mit nur 2 cm Dicke nicht nur wesentlich leichter, sondern auch einfacher zu montieren [9]. Die Unterkonstruktion kann für wesentlich geringere Lasten ausgelegt werden. Das erspart zusätzliches Material und reduziert Wärmebrücken.

Allgemein ist Textilbeton immer dann eine erwägenswerte Alternative, wenn in traditioneller Stahlbetonbau-

weise der Beton hauptsächlich eingesetzt wird, um den Bewehrungsstahl vor Korrosion zu schützen. Wenn große Mengen Beton und große Hebelarme zur Abtragung großer Lasten bzw. Druckkräfte oder Momente erforderlich sind, oder große konzentrierte Zugkräfte wie in der Zugzone von Plattenbalken aufgenommen werden müssen, liegen die Vorteile offenbar beim Massenbaustoff Stahlbeton. Der Textilbeton wird den Stahlbeton nicht ersetzen. Er kann aber den Einsatzbereich von bewehrtem Beton hin zu extrem leichten und schlanken Bauteilen und Tragwerken aus Beton erweitern.

### 3 Materialien

#### 3.1 Fasern

Die Anwendung von Textilbeton ist mit einigen für Bauingenieure neuen Begriffen aus dem Bereich der Textiltechnik verbunden. Dort wird die „Dicke“ der Faser üblicherweise als Feinheit in der Maßeinheit tex gemessen. Ein tex ist als das Fasergewicht in Gramm pro 1.000 m Länge definiert. Die im Bauwesen für Bewehrung übliche Querschnittfläche ergibt sich, indem die Feinheit (in tex) durch die Dichte des Materials (z. B. in  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) dividiert wird. So hat eine 800 tex Carbonfaser eine Querschnittsfläche von  $800 \text{ tex}/1,80 \text{ g}/\text{cm}^3 \times 10^3 = 0,44 \text{ mm}^2$ .

Damit eine Faser als Bewehrung im Beton geeignet ist, muss sie ein bestimmtes Anforderungsprofil erfüllen. Die Materialien müssen sowohl im alkalischen Milieu als auch nach der Passivierung resistent gegen Korrosion sein. Sie sollten einen möglichst hohen E-Modul und eine hohe Festigkeit haben, und schließlich spielen für den wirtschaftlichen Einsatz auch die Kosten eine Rolle. Für den Einsatz von Textilbeton im Hoch- und im Ingenieurbau haben Fasern aus alkaliresistentem Glas (AR-Glas) und aus Carbon das größte Potential.

AR-Glas Fasern werden im Düsenziehverfahren hergestellt. Die Glasschmelze fließt nur durch ihr Eigengewicht durch wenige Millimeter dünne Düsen und wird unten abgezogen. Bei Abzugsgeschwindigkeiten im Bereich von 30 bis 50 m/s entsteht eine nahezu perfekte Faseroberfläche, die den Glasfilamenten (Elementarfasern) bei 12 bis 25  $\mu\text{m}$  Durchmesser Festigkeiten oberhalb von  $2.000 \text{ N}/\text{mm}^2$  verleiht. Ein typisches Faserbündel (Roving oder Garn) besteht aus 800, 1.600 oder 2.000 Filamenten. Man unterscheidet assemblierte Rovings und direkt gezogene Rovings. Nur bei letzteren ist garantiert, dass die einzelnen Filamente exakt parallel ausgerichtet sind. Abweichungen von der geradlinigen Ausrichtung und damit verbundene unterschiedliche Filamentlängen führen zu erheblich geringeren Festigkeiten bei mäßig erhöhter Bruchdehnung.

Von den verschiedenen verfügbaren Carbonfasern sind für Textilbeton anisotrope PAN-basierte HT-Typen mit einem E-Modul von ca.  $230.000 \text{ N}/\text{mm}^2$  interessant. HT steht für High Tenacity (hohe Zähigkeit). PAN steht für Polyacrylnitril, einer leistungsfähigen Kunststofffaser, die als Ausgangsmaterial für die Herstellung der Carbonfasern in einem mehrstufigen Prozess bei Temperaturen bis  $1.400 \text{ }^\circ\text{C}$  dient. Es gibt auch Carbonfasern mit Steifigkeiten bis  $650.000 \text{ N}/\text{mm}^2$ . Diese sind aber aus zwei Gründen weniger interessant. Einerseits sind sie sehr teuer, andererseits sinkt die Bruchdehnung mit zunehmender Stei-

figkeit auf Werte, die keine ausreichende Duktilität für Textilbetonbauteile mehr ermöglichen.

Bei Carbonfasern wird die „Dicke“ des Garns meist direkt über die Anzahl der Filamente angegeben, z. B. besteht eine 12k-Faser aus 12.000 Filamenten mit einem Durchmesser von 6  $\mu\text{m}$  und besitzt eine Feinheit von 800 tex, was einer Querschnittfläche von etwa  $1 \text{ mm}^2$  entspricht. Aus wirtschaftlicher Sicht sind auch so genannte Heavy Tows mit 50.000 Filamenten interessant. Sie sind deutlich preiswerter in der Herstellung und ermöglichen eine höhere Querschnittfläche pro Garn und damit eine höhere Tragfähigkeit der textilen Bewehrung.

Marktpreise für HT-Carbonfasern liegen etwa beim 4- bis 6fachen Preis von AR-Glasfasern. Verschiedene Eigenschaften führen interessanterweise dazu, dass die Carbonfasern in vielen Anwendungen trotzdem wirtschaftlich interessant ist. Der Dichteunterschied der Materialien reduziert den Preis (pro kg, Tabelle 1) für Carbon bereits um den Faktor 1,5. Zudem besitzen Carbonfasern etwa die doppelte Festigkeit. Die Dauerhaftigkeit der AR-Glasfasern ist auch in speziellen Betonrezepturen nicht absolut, die Festigkeit sinkt mit dem Alter. Nach heutigem Wissensstand muss dieser Effekt bei einer Lebensdauer von 50 bis 80 Jahren mit einem Abschlag von etwa 50% berücksichtigt werden. Tabelle 1 enthält in der letzten Zeile die Tragfähigkeit in kN pro investiertem Euro Materialkosten für einen 1 Meter langen Stab. Für viele Anwendungen im Massivbau scheint die Carbonfaser daher bereits die wirtschaftlichere Alternative zu sein.

#### 3.2 Textilien

Von den zahlreichen textilen Herstellungsverfahren kommen für textile Bewehrungen für Beton nur solche in Frage,

- die eine Geometrie mit ausreichend großen Öffnungen zwischen den Garnen ermöglichen, so dass der Verbund zum Beton sicher funktioniert,
- bei denen eine gestreckte Anordnung der Garne gewährleistet werden kann und
- eine ausreichende Verschiebefestigkeit bzw. Stabilität der Strukturen erreicht werden kann.

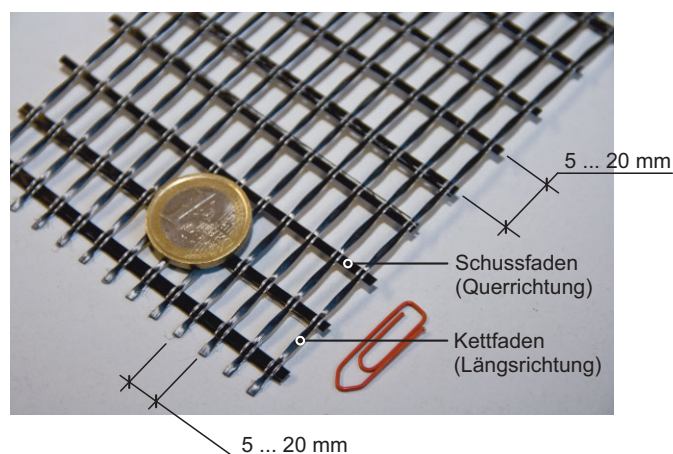
In bisherigen Anwendungen haben sich Gitterstrukturen mit etwa dem 3fachen Garndurchmesser bzw. 3fachen Größtkorndurchmesser als Mindestöffnungsweite bewährt. Je nach erforderlicher Fasermenge und Garndurchmesser ergeben sich 5 und 20 mm Achsabstand zwischen den Garnen.

Durchgesetzt haben sich bisher nähgewirkte Gelege. Bei dieser Technologie werden die Hochleistungsgarne zunächst ondulationsfrei auf einem Spannrahmen abgelegt. Dieser ist als Transportkette ausgelegt und führt bis zu vier, in nahezu beliebiger Richtung orientierte parallele Faserscharen der Nähstelle zu. Dort werden die bis dahin lose übereinander liegenden Garne miteinander verbunden. Die Garne parallel zur Transportrichtung heißen Kettfäden, die anderen Schussfäden (Bild 1). Da der Nähfaden die Geometrie von Kett- und Schussfäden unterschiedlich stark beeinflusst, zeigen die textilen Bewehrungen in Kett- und Schussrichtung meist etwas divergierende Eigenschaften. Enthält die Struktur nur Kettfäden

*Tabelle 1. Eigenschaften verschiedener Fasermaterialien für Textilbeton im Vergleich zum Baustahl*  
*Table 1. Properties of different fibre materials for textile reinforced concrete in comparison to reinforcing steel*

Eigenschaft	Einheit	BSt 500	AR-Glas	Carbon
Festigkeit	MPa	500/550	2.500	4.200
Elastizitätsmodul	GPa	200	74 ... 80	240
Fließdehnung	‰	2,17	–	–
Bruchdehnung	‰	50	35	18
Dichte bei 20 °C	g/cm <sup>3</sup>	7,85	2,74 ... 2,80	1,78
Wärmeausdehnung bei 20 °C	10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	12	9,1	-0,1*
Filamentdurchmesser	µm	–	12 ... 25	7
Filamente je Garn	Stück	–	800 ... 2.000	12.000 ... 50.000
Feinheit	tex	–	640 ... 2.400	800 ... 3.500
Bewehrungsdurchmesser	mm	6 ... 28	~1 ... 2	~1 ... 2,5
Querschnittsfläche je Stab/Garn	mm <sup>2</sup>	28 ... 615	0,23 ... 0,88	0,44 ... 1,9
Kosten	€/kg	~1 ... 1,5	~4 ... 5	~20 ... 30
Tragfähigkeit	kN/€m	42 ... 64	36 ... 46	37 ... 56

\* in Längsrichtung



*Bild 1. Beispiel einer textilen Bewehrung mit Bezeichnungen*

*Fig. 1. Example of textile reinforcement with terms*

(0°-Richtung) und dazu senkrecht angeordnete Schussfäden (90°-Richtung), spricht man von einer biaxialen Struktur, bei mehr als zwei Fadenlagen von multiaxialen Strukturen.

Für die meisten Anwendungen wird in einem anschließenden Prozessschritt eine spezielle Beschichtung auf der Basis einer wässrigen Polymersuspension aufgetragen und ausgehärtet. Wesentlich ist, dass die textile Struktur erst nach dem Aushärten von der Transportkette freigeschnitten wird. Nur so kann die im Lege- und Nähwirkprozess erzeugte Geometrie dauerhaft fixiert werden. Mit der Beschichtung wird der Verbund zwischen den Filamenten und zwischen Beton und Fasern eingestellt, womit unmittelbar die Festigkeit und das Tragverhalten beeinflusst werden. Die Beschichtung erhöht außerdem Ver-

schiebefestigkeit und Biegesteifigkeit der textilen Bewehrung. Mindestwerte dieser Kenngrößen sind für eine einfache Handhabung bei der Verarbeitung erforderlich. Für ebene Bauteile werden steifere Textilien hergestellt als für profilierte Querschnitte oder räumliche Geometrien, wo eine ausreichende Drapierfähigkeit zu gewährleisten ist.

### 3.3 Betone

Ein wichtiger Aspekt für die Eignung eines Betons in Kombination mit Textilien ist sein Größtkorn. Im Stahlbetonbau ist ein Größtkorn von 32 mm üblich, bei dichter Bewehrung wird es auf 16 oder 8 mm reduziert. Grundsätzlich muss das Größtkorn auf die Abstände der Bewehrung abgestimmt sein. Eine wichtige Regel besagt, dass die kleinste Bauteilabmessung mindestens dem 3fachen Größtkorndurchmesser entsprechen soll. Für die Realisierung von Bauteilabmessungen im Bereich mehrerer Millimeter bis weniger Zentimeter ergibt sich folglich ein zulässiges Größtkorn im Bereich von etwa 1 bis 4 Millimeter.

Aufgrund des geringen Größtkorns wäre die Bezeichnung als Mörtel denkbar, wird aber dem Potential und dem Anwendungsbereich des Baustoffs nicht gerecht. Von der stofflichen Zusammensetzung und den Festigkeiten ausgehend sind die Feinbetone den Hochleistungsbetonen zuzuordnen. Die Bezeichnung als Feinbeton entspricht den Rezepturen hinsichtlich Zusammensetzung und Anwendungsgebiet am ehesten und hat sich durchgesetzt.

Für eine hohe Festigkeit des Verbundwerkstoffs müssen die Verbundeigenschaften des Betons und damit seine mikroskopische Struktur in der Größenordnung der Filamentdurchmesser (6 bis 25 µm) gezielt eingestellt werden. Bewährt haben sich Kombinationen von Zementen des Typs II und III mit Puzzolanen wie Flugasche und Mikrosilikia. Diese Zemente und Zusatzstoffe bilden in der rich-

Tabelle 2. Rezepturen und Eigenschaften von Feinkornbeton [2]

Table 2. Mixtures and properties of fine grained concrete [2]

	Einheit	Rezepturbeispiel 1 Schweinfurth [5]	Rezepturbeispiel 2 Brücke Oschatz [4]
<b>Zuschlag</b>			
Sand 0..1	kg/m <sup>3</sup>	942,0	–
Sand 0..2	kg/m <sup>3</sup>	–	1.399,0
<b>Bindemittel</b>			
Zement CEM I	kg/m <sup>3</sup>	–	535,0
Zement CEM III	kg/m <sup>3</sup>	628,0	–
Flugasche	kg/m <sup>3</sup>	265,6	241,0
Mikrosilika	kg/m <sup>3</sup>	100,5	53,0
Wasser	kg/m <sup>3</sup>	214,6	172,0
Fließmittel	kg/m <sup>3</sup>	10,5	70,0
<b>Festbetoneigenschaften nach 28 Tagen</b>			
Dichte	g/cm <sup>3</sup>	2,17	2,15
E-Modul	N/mm <sup>2</sup>	28.500	27.350
Druckfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	76,3	68,9
Biegezugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	7,1	8,7

tigen Kombination CSH-Phasen, die für den Verbund mit der filigranen Bewehrung besonders gut geeignet sind, sie sorgen bei der Verarbeitung für das notwendige homogene Frischbetongefüge mit geringer Entmischungsneigung.

Der hohe Bindemittelanteil der Feinbetone von etwa 50% führt zu einer höheren Schwindneigung sowohl beim chemischen (autogenen) Schwinden als auch beim Trocknungsschwinden. Durch geeignete Betonrezepturen lässt sich dieser Effekt reduzieren, so dass er bei der Anwendung nicht störend in Erscheinung tritt.

Zwei typische Feinbetonmischungen und die Festbetoneigenschaften sind in Tabelle 2 aufgeführt. Trotz der vergleichsweise hohen Festigkeiten liegt der Elastizitätsmodul unter den von Normalbeton bekannten Werten. Die Ursache dafür ist der hohe Bindemittelgehalt. Für die Bemessung lässt sich die Arbeitslinie der Feinbetone analog DIN 1045-1 mit einer Parabelfunktion beschreiben [10].

#### 4 Eigenschaften von Textilbeton

Die mechanischen Eigenschaften von Textilbeton ähneln aufgrund gleicher Trag- und Versagensmechanismen weitgehend denen von Stahlbeton. Das Werkstoffverhalten unter Last wird in mehrere Zustände unterteilt (Bild 2):

- Zustand I: Der Beton ist ungerissen und Bauteile verhalten sich näherungsweise entsprechend der Steifigkeit des Betons.
- Zustand IIa: Mit dem Überschreiten der Betonzugfestigkeit setzt die Rissbildung im Beton ein und das Bauteil erreicht irreversibel den Zustand II. Die Rissbildung setzt sich fort, bis der Beton in so kurze Abschnitte unterteilt ist, dass über den Verbund zwischen Bewehrung

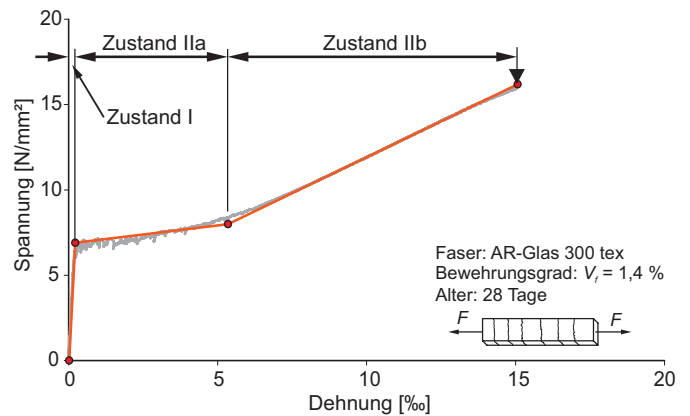


Bild 2. Spannungs-Dehnungsbeziehung des Verbundwerkstoffs Textilbeton

Fig. 2. Stress-strain-relation of the composite textile reinforced concrete

Tabelle 3. Mechanische Eigenschaften von Textilbeton

Table 3. Mechanical properties of textile reinforced concrete

Eigenschaft	Einheit	AR-Glas	Carbon
Bewehrungsgrad	%	1 ... 5 (10)	
Rissspannung	N/mm <sup>2</sup>	4 ... 6	
Rissabstand	mm	2 ... 20 mm	
Druckfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	50 ... 70	
Zugfestigkeit (Beton)	N/mm <sup>2</sup>	bis 40	bis 80
Zugfestigkeit (Textil)	N/mm <sup>2</sup>	1.000 (Kurzzeit)	2.000
Dauerfestigkeit	%	< 50	≈ 100
Bruchdehnung	%	15 ... 20	10 ... 15

und Beton die Risslast der Matrix nicht mehr erreicht wird.

- Zustand IIb: Wenn keine Risse mehr entstehen können, ist der Übergang in den Zustand IIb vollzogen. Bei weiterer Belastung dehnt sich nur noch die Bewehrung – verbunden mit einer entsprechenden Vergrößerung der Rissbreiten.

Einen Zustand III wie beim Stahlbeton gibt es bei Textilbeton mit AR-Glas und Carbon nicht, da beide Materialien kein plastisches Arbeitsvermögen besitzen.

Textilbeton besitzt aber nicht nur ähnliche Eigenschaften wie Stahlbeton, sondern auch eine bemerkenswerte Leistungsfähigkeit (Tabelle 3):

- Durch die filigrane Bewehrung werden sehr dünne Bauteile möglich, weil für die Sicherstellung des Verbunds nur wenige Millimeter Betondeckung notwendig sind.
- Es ist keine Betondeckung für den Korrosionsschutz erforderlich,
- Die erforderlichen Verankerungslängen sind kurz, die Risse sehr fein verteilt und die Rissbreiten extrem klein, da über die vielfach größere Oberfläche der textilen Bewehrung sehr hohe Verbundkräfte in den Beton eingeleitet werden können.
- Die hohe Zugfestigkeit des Textilbetons geht direkt auf die Fasern zurück. Im Labor übersteigt sie bereits die Betondruckfestigkeit und erreicht 100 N/mm<sup>2</sup>.

Der Brandwiderstand von Bauteilen aus Textilbeton liegt nach bisherigen Veröffentlichungen unter 30 Minuten [11]. Die Belastung mit der Einheitstemperaturkurve (ETK) hat wegen der typischen Bauteilabmessungen von wenigen Millimetern zu einer so schnellen Erwärmung geführt, dass der Feinbeton innerhalb weniger Minuten abgeplatzt ist. Wird Textilbeton als Verstärkung von Stahlbetontragwerken eingesetzt, ist das Brandverhalten deutlich besser.

## 5 Technologien für die Herstellung

Die technologischen Möglichkeiten der Herstellung sind eng mit den besonderen Eigenschaften der textilen Bewehrung und des Feinbetons verknüpft. Im Stahlbetonbau hat sich der Bau stabiler Bewehrungskörbe aus statisch erforderlicher und konstruktiver Bewehrung, Unterstützungskörben und Abstandhaltern durchgesetzt, die die hinreichende Lagegenauigkeit während des Betoniervorgangs und damit auch im Endzustand sichern. Das Verhältnis von Bauteildimensionen zu Toleranzen ist so groß, dass die Differenzen zwischen Soll- und Ist-Lage nur vernachlässigbar kleine Auswirkungen auf die Tragfähigkeit haben. Für Dauerhaftigkeit und Verbund der Bewehrung werden die Herstellungstoleranzen durch das Vorhaltemaß  $\Delta c$  berücksichtigt.

Einbau des Betons und Verdichtung mit Rüttlern sind über einen großen Konsistenzbereich praktisch etabliert. Für die Herstellung von Bauteilen aus Textilbeton eignen sich diese traditionellen Betontechnologien aber nur teilweise. Spezielle, ausgereifte Systeme sind noch nicht verfügbar. Das Herstellungsverfahren mit dem geringsten technischen Aufwand ist lagenweises Laminieren von Hand. Dabei werden dünne Lagen aus Feinbeton und textiler Bewehrung abwechselnd eingebaut. Der Feinbeton wird vorzugsweise durch Sprühen in Schichten von 1 bis 5 mm aufgebracht. Sprühen ist kein genormter Begriff und wurde gewählt, da bei Textilbeton mit wesentlich niedrigeren Spritzdrücken gearbeitet wird als beim Spritzbeton, wo das aufprallende Spritzgut stark verdichtet wird. Bei dieser Methode ergibt sich die fertige Mischung aus Spritzgut minus Rückprall. Für den gesprühten Feinbeton sind Zusammensetzung von Mischgut und Festbeton identisch. Die Vorteile des Sprühens liegen im geringeren Materialverbrauch und Abfallaufkommen, da kein Rückprall anfällt, und in besseren Arbeitsbedingungen, was nicht zuletzt der Ausführungsqualität zu gute kommt. Die Sicht an der Arbeitsstelle wird nicht durch Sprühnebel eingeschränkt.

Auch die filigranen Fasern aus AR-Glas oder Carbon setzen der Spritz- bzw. Aufprallenergie Grenzen. Einerseits besteht die Gefahr der Schädigung der querdruckempfindlichen Fasern, andererseits wird beim Laminierverfahren die Lage des Textils durch die Steifigkeit des frischen Betons und die auf ihn wirkenden Kräfte bestimmt. Textile Bewehrungen aus Faserbündeln haben eine wesentlich geringere Biegesteifigkeit als Stabstahlbewehrung. Der Unterschied beträgt einige Zehnerpotenzen. Begehbar Bewehrungskörbe wie im Stahlbetonbau sind aus heutiger Sicht mit textiler Bewehrung nicht vorstellbar. Verdichtungsenergie kann nur begrenzt eingebracht werden. Daher wurden für den Textilbeton spezielle Beton-

rezepturen entwickelt, die ohne Verdichtung ein homogenes und dichtes Betongefüge ermöglichen.

Die Herstellung von Textilbeton ist auch mit selbstverdichtenden Betonen (SVB) oder im Injektionsverfahren möglich. Beide Varianten bedingen aufwändigere Schalungen als beim Laminieren, da sie bei der Injektion für höhere Drücke dicht und formstabil ausgebildet sein müssen. In beiden Fällen ist zudem sicherzustellen, dass die Bewehrung in der Schalung sicher fixiert ist und bei mehrlagiger Bewehrungsführung auch ein einwandfreier Verbund mit dem Beton sichergestellt werden kann. Die Investitionen in entsprechend ausgebildete Schalungen und die benötigten Hilfsmittel rentieren sich im Vergleich zum Laminieren erst bei höheren Stückzahlen.

## 6 Konstruieren mit Textilbeton

Textile Bewehrungen und Stabstahlbewehrung unterscheiden sich hinsichtlich des geometrischen Erscheinungsbilds, der möglichen Formgebung, der Steifigkeit und Verformbarkeit. Diese Unterschiede haben zur Folge, dass die bekannten und bewährten Konstruktionsregeln aus dem Stahlbetonbau nicht direkt auf das Bauen mit Textilbeton übertragbar sind. Für den monolithischen Stahlbetonbau sind Plattenbalkenquerschnitte ebenso typisch wie sich gegenseitig durchdringende Bewehrungsnetze an Kreuzungspunkten von Platte, Unterzug und Stütze. Im Holzbau, Stahlbau und modernen Glasbau haben sich jeweils typische Konstruktionsformen und Detaillösungen herausgebildet, die die speziellen Eigenschaften der Werkstoffe berücksichtigen. Mit Textilbeton wurden bereits erste Projekte praktisch umgesetzt [4], [5], das materialgerechte Konstruieren steht aber noch am Anfang. Es wird sich sicher zeigen, dass für Textilbeton andere Lösungen praxis- und werkstoffgerecht sind, als sie von der Stahlbetonbauweise bekannt sind.

Bei Textilbeton sind flächige Bewehrungsstrukturen der Ausgangspunkt für das Konstruieren. Diese typische Dimension überträgt sich auch auf den Baustoff. Textilbeton empfiehlt sich aus technologischer Sicht für flächige Anwendungen. Ebene Fassadenplatten kommen diesem Ideal am nächsten [6]. Die Fuß- und Radwegbrücken in Oschatz [4] und Kempten sind komplexer. Sie besitzen als Tragwerks ein U-Profil, also einen dünnwandigen technischen Querschnitt mit minimalem Materialeinsatz, hoher Steifigkeit und praktischer Funktionalität. Die richtige und vor allem materialgerechte Formsprache für Textilbeton müssen wir Ingenieure dringend finden und lernen. Sicher ist, dass wir in naher Zukunft zahlreiche gestalterisch anspruchsvollere Lösungen aus Textilbeton erwarten können.

Zum Abschluss die wichtigste Frage: Wo kann Textilbeton eingesetzt werden? Dort, wo Stahlbeton wirtschaftlich ist, wo Beton zur Abtragung von Druckkräften benötigt wird, wo große Hebelarme für den Lastabtrag notwendig sind, wird Textilbeton den Stahlbeton vermutlich nicht ersetzen. Denkbar ist der Ersatz der Stahlbewehrung durch Carbontextilien in speziellen Anwendungsfällen. Aber da, wo der Beton nicht zur Abtragung von Kräften oder aus Verschleißgründen benötigt wird, dort, wo der Beton nur deshalb so dick ist, um Anforderungen der Dauerhaftigkeit durch eine ausreichend dicke Betondeckung

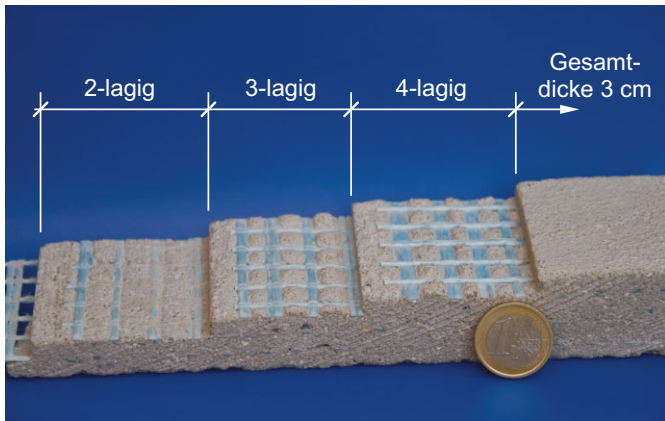


Bild 3. Typische Dimensionen von Textilbeton, hier am Modell des Querschnitts für die Fußgängerbrücke in Oschatz  
Fig. 3. Typical dimensions of textile reinforced concrete, section model for Oschatz pedestrian bridge



Bild 4. Fußgängerbrücke aus Textilbeton mit ca. 16 m Spannweite in Kempten während der Montage des Überbaus  
Fig. 4. TRC pedestrian bridge with app. 16 m span in Kempten during erection of superstructure

von 20 (XC0) bis 50 mm (XD3, XA3) zu erfüllen, dort lohnt es sich, über den Einsatz von Textilbeton nachzudenken. Aus der Geometrie der Bewehrung, den Herstellungstechnologien und der Dimension ergeben sich für Textilbeton als typisches Konstruktionselement ebene oder gekrümmte Scheiben und Platten mit Dicken von bis zu 4 cm (Bild 3). Zur Abtragung konzentrierter Zugkräfte ist es sinnvoll, auf stabförmige und bei zu geringer Betondeckung nicht rostende Bewehrungen zurückzugreifen. Eine solche Kombination von stabförmiger Stahlbewehrung und flächiger Textilbewehrung wurde übrigens auch schon bei den Aussteifungsrippen der ersten Textilbetonbrücken in Oschatz [4] und Kempten eingesetzt (Bild 4).

Auf das enorme Potential von Textilbeton zur Verstärkung vorhandener Bauwerke aus Stahlbeton sei an dieser Stelle hingewiesen. Die Verstärkungswirkung von Textilbeton ist mit anderen Methoden – z. B. geklebte Bewehrungen aus Carbonfaserkunststoffen (CFK) und Spritzbeton – vergleichbar. Vorteile ergeben sich durch die sanftere Lasteinleitung aufgrund des flächigen Charakters und dem geringen Eigengewicht aufgrund extrem dünner Schichtstärken. Die mineralische Basis von Textilbeton bietet optimale Kompatibilität zur Altkonstruktion



Bild 5. Die Tragfähigkeit dieses Schalentragswerks an der FH Schweinfurth wurde durch die Verstärkung mit Textilbeton dauerhaft gesichert

Fig. 5. Load bearing capacity of this shell structure at Schweinfurth University of Applied Science has been secured with TRC strengthening

und kann Aufgaben der Instandsetzung (Rekalisierung, Reprofilierung) mit übernehmen und sogar nachträglich die Rissbildung positiv beeinflussen. Über die praktische Anwendung an einem Schalentragswerk (Bild 5) wurde bereits berichtet [5].

## 7 Zusammenfassung

Textilbeton besteht aus Feinbeton und Hochleistungsfasern aus AR-Glas oder Carbon. Im Vergleich zum Stahlbetonbau sind die Dimensionen des Werkstoffs Textilbeton um wenigstens eine Größenordnung kleiner. Die Kombination von Feinbeton und textilen Bewehrungen ergibt einen hochfesten Verbundwerkstoff mit hervorragenden Gebrauchs- und Trageigenschaften. Auf diesen innovativen Werkstoff lassen sich etablierte Vorstellungen zum Konstruieren mit Stahlbeton nur zum Teil übertragen. Textilbeton und seine Komponenten haben spezielle Eigenschaften und machen es notwendig, nach einer materialgerechten Formsprache und speziellen Detaillösungen ebenso wie nach wirtschaftlichen Herstellungstechnologien und neuen Verwendungsformen zu suchen. Die gegebenen Informationen sollen Ingenieuren und Architekten helfen, sich mit diesem innovativen Verbundwerkstoff vertraut zu machen und sein Potential zu erschließen.

## Danksagung

Der besondere Dank der Autoren gilt den Mitgliedern des Sonderforschungsbereichs 528 und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für ihre Förderung der Grundlagenforschung zu textilbewehrtem Beton sowie den zahlreichen Praxispartnern der genannten Projekte.

## Literatur

- [1] Norm DIN 1045-1:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion.
- [2] Brameshuber, W.: Textile Reinforced Concrete – State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC. RILEM report rep036, Bagnoux: RILEM Publications, 2006.

- [3] *Hegger, J., Bramshuber, W. and Will, N.* (Hrsg.): Textile Reinforced Concrete. RILEM Proceedings pro050, Bagnoux: RILEM Publications, 2006, 418 S.
- [4] *Curbach, M., Graf, W., Jesse, D., Sickert, J. und Weiland, S.*: Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007) Heft 6, S. 342–352.
- [5] *Curbach, M., Hauptenbuchner, B., Ortlepp, R. und Weiland, S.*: Textilbewehrter Beton zur Verstärkung eines Hyparschalentragwerks in Schweinfurt. Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007) Heft 6, S. 353–361.
- [6] *Hegger, J., Will, N., Schneider, H. N. und Schätzke, C.* et al.: Fassaden aus textilbewehrtem Beton. Fertigteilindustrie (BDB) e.V., B. D. B. (Hrsg.): Beton und Fertigteil: Jahrbuch 2005, Bauverlag BV GmbH, 2005, S. 76–82.
- [7] *Grunert, J. P.*: Fertigteile aus selbstverdichtendem Stahlfaserbeton ohne Betonstahlbewehrung. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005) S2, S. 81–84.
- [8] *Gossla, U.*: Flachdecken aus Stahlfaserbeton. Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006) Heft 2, S. 94–102.
- [9] Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Z-33.1-577: Fassadenplatten aus Betonwerkstein mit rückseitig einbetonierten Befestigungselementen zur Verwendung bei hinterlüfteten Außenwandbekleidungen.
- [10] *Bramshuber, W., Brockmann, T. und Hinzen, M.*: Bemessungsrelevante Kennwerte von Feinbeton für einaxiale Druckbeanspruchung Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007) Heft 6, S. 371–379.
- [11] *Krüger, M., Reinhardt, H. W., Raupach, M. und Orłowsky, J.*: Textilbewehrter Beton unter Brandbeanspruchung: Untersuchungen zum Tragverhalten im Brandfall. Betonwerk und Fertigteil-Technik 71 (2005) 10, S. 38–48.



Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach  
manfred.curbach@tu-dresden.de



Dr.-Ing. Frank Jesse  
frank.jesse@tu-dresden.de

Institut für Massivbau  
Technische Universität Dresden  
01062 Dresden

## Aktuelles

### Instandsetzungs-Richtlinie

Die Bundesgütegemeinschaft Instandsetzung von Betonbauwerken e.V. (ib) setzt sich für den inhaltlichen Erhalt der Instandsetzungs-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) ein. Parallel zur Instandsetzungs-Richtlinie gelten seit 2005 im Zusammenhang mit deutschen Ergänzungsnormen Teile der europäischen Normenreihe 1504 „Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken“. Die Koexistenzphase der Regelwerke läuft jedoch zum 01.01.2009 aus. Die ib arbeitet in verschiedenen Arbeitskreisen des DAfStb an der Harmonisierung des Regelwerks mit dem Ziel, den heutigen Status der Instandsetzungs-Richtlinie als richtungweisende Norm für Betoninstandsetzungen zu erhalten.

Mit der Einführung der Normenreihe DIN EN 1504 sollen zukünftig in Europa Schutz- und Instandsetzungsprodukte für Betonbauteile nach einer einheitlichen Norm hergestellt und gehandelt werden. Ab Anfang 2009 wird es Pflicht, Instandsetzungsprodukte mit dem CE-Zeichen zu kennzeichnen. Problematisch sind die in Deutschland bislang fehlenden Konformitätsnachweise für den Einsatz CE-gekennzeichneter Produkte. „Das bedeutet, dass die Produkte mit dem CE-Zeichen zwar frei handelbar sind, für standsicherheitsrelevante Maßnahmen jedoch nicht eingesetzt werden dürfen“, erläutert Dr.-Ing. Martin Mangold, Vorstandsvorsitzender

der Bundesgütegemeinschaft. „Geht es um die Standsicherheit, müssen die eingesetzten Stoffe aufgrund deutscher Ergänzungsnormen zusätzlich zur DIN EN 1504 neben dem CE-Zeichen mit einem Ü-Zeichen versehen sein. Für Mörtel existiert jedoch eine solche Ergänzungsnorm bislang noch nicht.“

Die „allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisse“ (abP), die Architekten und Ingenieuren für die Verwendung vorgesehener Produkte zur Verfügung stehen, bleiben nach der Koexistenzphase von DIN EN 1504 und Instandsetzungs-Richtlinie gültig. Da die abPs auf fünf Jahre angelegt sind – und 2007

noch abPs ausgestellt wurden –, empfiehlt die ib, bis zur Vorlage weiterer Ergänzungsnormen auf die Prüfzeugnisse zurückzugreifen.

Ebenfalls als kritisch bewertet die Bundesgütegemeinschaft das Fehlen der Qualitätskriterien für die Ausführung in der Normenreihe 1504: „Solange es zu Qualitätsstandards in der Ausführung keine verbindliche Aussage gibt, müssen Architekten und Ingenieure darauf achten, dass der ausführende Betrieb die Instandsetzungs-Richtlinie einhält, was beispielsweise durch die Eigen- und Fremdüberwachung der Ausführung dokumentiert wird.“

Th.

Europäische Produktnorm	CE	Deutsche Restregelung (Systeme/besondere Eigenschaften)	Ü	Deutsche Ausführungsregelung
EN 1504-2 „Oberflächenschutzprodukte“		DIN V 18026 „Oberflächenschutzsysteme“		DAfStb Instandsetzungs-Richtlinie (RL SIB)
EN 1504-3 „Mörtelprodukte“		allgemeine bauaufsichtliche Zulassung <sup>1)</sup>		
EN 1504-5 „Rissfüllstoffe“		DIN V 18028 „Rissfüllstoffe mit besonderen Eigenschaften“		

<sup>1)</sup> Parallel wird die bisherige abP +Ü-Z-Regelung beibehalten



Europäische und deutsche Regelungen für Instandsetzungsprodukte im standsicherheitsrelevanten Bereich (Quelle: Deutsche Bauchemie e. V.)