

Elektrisch beheizbarer textilbewehrter Carbonbeton

Annette Dahlhoff¹ | Michael Raupach¹

Korrespondenz

Annette Dahlhoff, M.Sc.
Institut für Baustoffforschung der
RWTH Aachen University (ibac)
Schinkelstraße 3
52062 Aachen
E-Mail: dahlhoff@ibac.rwth-aachen.de

¹ Institut für Baustoffforschung
der RWTH Aachen University
(ibac), Aachen, Deutschland

Kurzfassung

Textilbewehrter Carbonbeton wird derzeit in vielen Bereichen der Bauindustrie als Hochleistungsverbundwerkstoff eingesetzt. Der Verbundwerkstoff besteht aus Beton und einer nicht-metallischen Bewehrung aus Carbonfasern in Stab- oder Gitterform. Der innovative Werkstoff hat neben vielversprechenden Materialeigenschaften wie Zugverhalten und der Dichte auch eine hohe elektrische Leitfähigkeit. Die letztgenannte Eigenschaft kann genutzt werden, um Wärme im Bauteil zu erzeugen und dadurch z.B. im Verbundwerkstoff den Hydratationsprozess des Betons zu beschleunigen. Zur Verwendung der elektrisch leitenden textilen Carbonbewehrung wurden baustellentaugliche Kontaktierungsverfahren für unterschiedliche Tränkungsmaterialien entwickelt und bewertet, sowie die elektrischen Eigenschaften wie Leistung und Carbonwiderstand der verwendeten Carbonbewehrungen bestimmt. Darauf aufbauend wurde die Temperaturverteilung der Bewehrungen in Abhängigkeit unterschiedlicher Stromflüsse untersucht. Die Untersuchungen ermöglichten die Quantifizierung und Charakterisierung des Einflusses des Tränkungsmaterials sowie der Geometrie des Faserstranges auf die Strom- und Temperaturverteilungen.

Schlüsselwörter

Carbonbewehrung, Multifunktionalität, Temperaturverhalten, Kontaktierung, Wärmeverteilung, Zugfestigkeit

1 Einführung

Der Verbundwerkstoff Carbonbeton wird derzeit in vielen Bereichen der Bauindustrie untersucht, um ressourceneffiziente Bauprojekte mit herausragenden Materialeigenschaften zu realisieren. Durch die geringe Dichte und die Korrosionsbeständigkeit des Carbons können dünne, dauerhafte, materialminimierte Bauteile hergestellt werden. Darüber hinaus weist dieser innovative, nicht-metallische Baustoff Zugfestigkeiten von bis zu 4200 N/mm² auf [1; 2]. Neben diesen Eigenschaften ist die elektrische Leitfähigkeit der Carbonfaser wie auch die gute bis sehr gute thermische Leitfähigkeit in Faserrichtung hervorzuheben, sodass der Carbonbeton multifunktional genutzt werden kann [3; 4].

Die Funktionalisierung von Carbonbeton hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen und wurde bereits in verschiedenen Anwendungsbereichen untersucht [1;3;5-7]. Verwendung findet die Funktionalisierung z.B. im kathodischen Korrosionsschutz, durch den Einsatz als Anodenmaterial mit elektrischer Kontaktierung der textilen Bewehrung [1]. Ein weiteres Anwendungsgebiet stellt die Verwendung von Carbonbeton als multifunktionaler Brückenbelag durch eine Kombination aus vollflächigem Feuchtemonitoring des Bauwerks, ggf. Schutz des Bauwerks mittels präventivem kathodischen Korrosionsschutz

und Verstärken der Tragfähigkeit dar [5]. Neben den genannten Funktionalisierungen haben Bosowski-Schönberg et al. die Erweiterung von Textilien durch SMD-Bauteile (surface mounted device) zur Integration von LED-Lampen untersucht [8].

Die Sensorik bietet ein weiteres Anwendungsfeld. Beispielsweise wurde von Goldfeld und Perry [9] textile Bewehrung als direkte Messung von Wasserinfiltration durch Rissbildungen untersucht sowie von Saidi und Gabor als faseroptische Sensoren für die Analyse der mechanischen Dehnungseigenschaften eingesetzt [10; 11]. Zudem wurde die Einbettung mikroverkapselter Phasenübergangsmaterialien in textilbewehrte Fassadenelemente als latenter Wärmespeicher von Bahrar et al. untersucht [12]. In Teilvorhaben des C³-Projektes wurden zudem weitere Untersuchungen zur Integration von bauklimatischen Funktionen, sowie eines direktelektrischen Speichers durch Folienkondensatoren im Carbonbeton durchgeführt [13; 14]. Multifunktionale Bauteile aus Carbonbeton wurden durch die Aktivierung der Gebäudehülle mittels Integration von Wärmedämmung durch Infrareichtbeton oder Sandwichelementen, LED-Lichtleitern und Sensorik auf Basis faseroptischer und resistiver Garnmaterialien untersucht [3]. Neben den vorgestellten Anwendungsbereichen kann die Leitfähigkeit des Carbons verwendet werden, um das Textil nach dem Joule'schen Prinzip zu erwärmen. Die Temperaturerhöhung erfolgt dabei als Erwärmung eines

Leiters, an welchen die elektrische Spannung angelegt wird. Hasan et al. untersuchten in ersten Ansätzen diese Heizfunktion an Carbongarnen auf Verbundkörpern mit Beton [15]. Die gezielte Erwärmung der Carbongelege wurde von Schladitz et al. weiterführend analysiert und im Hinblick auf thermische Vorspannung untersucht [16].

In den vorgestellten Anwendungsbereichen stellt die elektrische Kontaktierung der Carbonbewehrung (CB) jedoch eine Herausforderung dar [17]. Die Kontaktierung beeinflusst maßgeblich die Funktionalisierung der CB. Um den Energieverlust im System zu minimieren, ist die Temperatur des Anschlusses dabei auf ein Minimum zu reduzieren [17]. Hohe Kontaktwiderstände führen zu hohen Energieverlusten und eine zusätzliche Erwärmung an den Stromeinleitungspunkten entsteht [14;17]. Untersuchungen von Hemmen [14] zeigten einen hohen Leistungsverlust und Wärmehotspots an den Stromeinleitungspunkten.

Weitere experimentellen Untersuchungen zum Kontaktwiderstand mit Krokodilklemmen, Crimpverbindungen, Entfernung der Schlichte und Leitruß führte Krois [3] mittels potentiostatischer Impedanzspektroskopie an polyacrylat getränkter CB durch. Zur Weiterentwicklung der Stromleitung in multifunktionalen Carbonfaser-Strukturen untersuchte Träger et al. ein Verfahren zur automatisierten Kontaktierung im Einsatzgebiet von Fertigteilen [17]. Dazu wurden Varianten der Kontaktierung wie Bedrucken der Faser mit einem elektrisch leitfähigen Filament oder die Verwendung eines Clips entwickelt. Durch die auftretenden Übergangswiderstände stieg die Temperatur an den Kontaktstellen an, wodurch Einbrenneffekte innerhalb der CB auftraten [17].

Ein weiterer Einflussfaktor, der die elektrische Leitfähigkeit der CB beeinflusst, ist deren Geometrie [15; 18]. Hasan et al. analysierten, dass der Widerstand bei steigender Filamentanzahl vergrößert wird [15]. Darauf aufbauend zeigte Gerlach et al. die Vergrößerung der Leitfähigkeit bei steigender Garnfeinheit [18]. Zudem beschreibt Gerlach et al., dass sich die große spezifische Oberfläche der filamentartigen Struktur auf die Leitfähigkeit positiv auswirkt und die Carbon-Flächenelektroden ein elektrochemisch inertes Verhalten aufweisen [18].

Die vorgestellten Einflussfaktoren der CB und der Kontaktierung werden in dieser Veröffentlichung weiterführend untersucht. Dabei werden Versuche an unterschiedlich getränkten CB durchgeführt und der elektrische Widerstand einhergehend mit der Temperaturentwicklung charakterisiert. Neben dem Einfluss des Tränkungsmaterials wird der Geometrieinfluss der CB untersucht. Für die ausgewählten CB werden Kontaktierungsvarianten experimentell untersucht und anhand des Widerstandes sowie des Leistungsverlusts die Anschlussqualität charakterisiert. Mit dem Ziel die Erwärmung zur Beschleunigung der Hydratation im Verbundwerkstoff mit Beton zu nutzen, werden experimentelle Versuche an der elektrisch beheizten CB bis 80 °C durchgeführt und der Einfluss des Stromflusses auf die Festigkeit bestimmt. Dies wird im Vergleich zu Erwärmungen der Materialien durch die Umgebungstemperatur analysiert. Zudem wird das Materialverhalten hinsichtlich seiner Reversibilität nach einer durchgeführten Temperierung untersucht.

2 Materialien und Methodik

2.1 Materialien

In dieser Untersuchung wurden vier CB verwendet, siehe Abbildung 1. Die Bewehrungen unterscheiden sich zum einen im Tränkungsmaterial und zum anderen in der Geometrie insbesondere der Faserquerschnittsfläche, Garnfeinheit und Bewehrungsquerschnittsfläche, siehe Tabelle 1 [19-21].

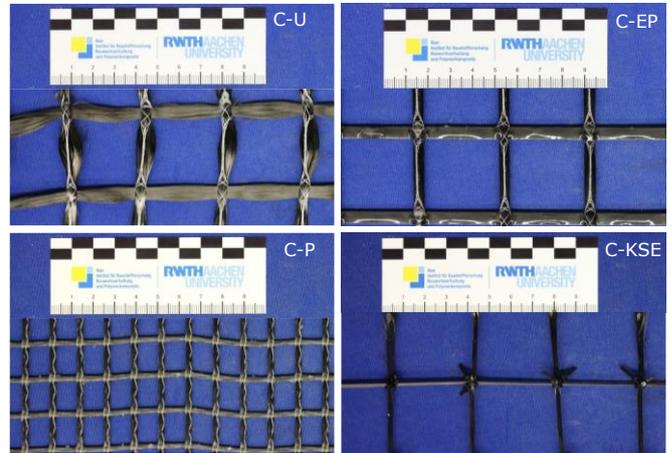


Abbildung 1 Zusammenstellung der untersuchten Carbongelege (CG)

Tabelle 1 Materialparameter der untersuchten CB basierend auf den Herstellerangaben [19-21]

Material		C-U	C-EP	C-P	C-KSE
Tränkungs-material	-	Unge-tränkt	Epoxyd-harz	Poly-styrol	Kisel-Säure-Ester
Achs-abstand Roving	mm	38/38	38/38	12/16	40/40 ²⁾
Faser-quer-schnitts-fläche	mm ²	3,62	3,62	1,81	1,92
Bewehrungs-quer-schnitts-fläche	mm ² /m	95/95	95/95	142/25	48/48 ²⁾
Garn-feinheit	tex	6400	6400 ¹⁾	3220	3450

¹⁾ Material besteht aus zwei kombinierten Fasersträngen.

²⁾ Gelege aus Fasersträngen am ibac hergestellt.

2.2 Methodik

Zur Untersuchung elektrisch beheizter CB wurden experimentelle Laborversuche durchgeführt. In den Versuchsreihen wurden die CB hinsichtlich der elektrischen Materialeigenschaften, Kontaktierungsvarianten und des Geometrieinflusses charakterisiert. Zudem wurden Zugversuche zur Bestimmung des Einflusses der Temperaturentwicklung auf die Zugfestigkeit, den E-Modul und die Reversibilität durchgeführt. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die experimentellen Laborversuche sowie die untersuchten Parameter.

Tabelle 2 Prüfparameter der Laborversuche

Versuche		Prüfkörperanzahl			
		C-EP	C-U	C-P	C-KSE
Elektrische Materialeigenschaften		1	1	1	1
Kontaktierungen	Krokodilklemme (K)	1	1	1	1
	Lüsterklemme (LK)	1	1	1	1
	Lüsterklemme & Aderendhülsen (LK+A)	1	1	1	1
	Löten (L)	1	1	1	1
Geometrie der CG	0,5 x 0,5 m ²	1	1	1	1
	1,0 x 0,5 m ²	1	1	1	1
Zugversuche	20 °C	5	-	5	-
	40 °C	5	-	5	-
	60 °C	5	-	5	-
	80 °C	5	-	5	-
Reversibilität	80 °C – 20 min	3	-	-	-

2.3 Prüfverfahren

Zur Charakterisierung der Materialeigenschaften der CB wurden Faserstränge (FS) in Kettrichtung (K) aus den Gelegen präpariert, Aderendhülsen vercrimpt und mittels Lüsterklemmen kontaktiert. Der spezifische Widerstand konnte anhand einer 4-Punkt-Messung mit einem Multimeter als Spannungsabfall am Carbon als Kennwert auf die Länge bezogen berechnet werden, siehe Abbildung 2. Die Klemmspannung wurde dabei schrittweise am Netzgerät erhöht und die Stromstärke für das Gesamtsystem am Netzteil abgelesen.

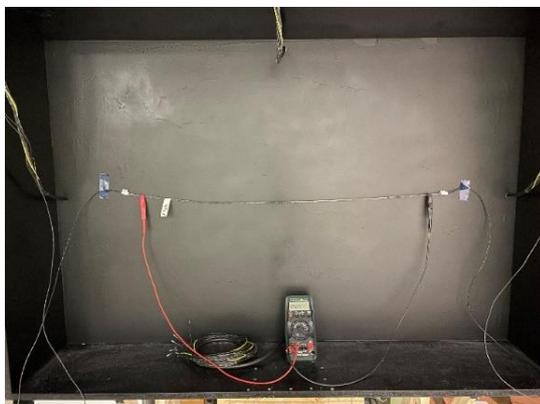


Abbildung 2 4-Punkt-Messung zur Bestimmung des spez. CW

Im Anschluss daran wurde für die in Abbildung 3 dargestellten Kontaktierungsmöglichkeiten der Wirkungsgrad untersucht. Ziel der Untersuchung ist die Charakterisierung der Anschlussarten in Hinblick auf den Kontaktwiderstand, die Wärmeentwicklung und die Umsetzbarkeit in Verbundwerkstoffen. Der Kontaktwiderstand wurde auf die gleiche Weise wie die Bestimmung des spez. Carbonwiderstands (CW) als Spannungsabfall am Faserstrang (FS) in K bestimmt. Die Berechnung des Wirkungsgrads und des Verlusts ist in Gleichungen (1) und (2) dargestellt.

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{Leistung Spannungsabfall}}{\text{Gesamtleistung System}} \text{ in } [\%] \quad (1)$$

$$\text{Verlust } V = 100 - \text{Wirkungsgrad in } [\%] \quad (2)$$

Zudem wurden die Untersuchungen mittels thermografischer Aufnahmen begleitet und die Temperatur an den Kontaktstellen, sowie am Carbon detektiert.

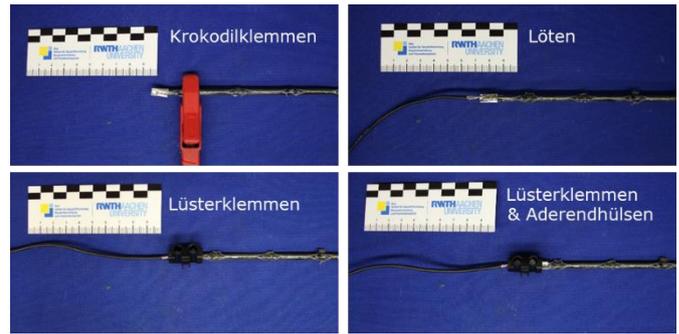


Abbildung 3 Untersuchte Kontaktierungsarten

Darauf aufbauend wurde die Wärmeverteilung und die Flächenleistung an variierend großen Gelegen anhand von 2-Punkt-Messungen untersucht. Die CB wurden dabei mittels Aderendhülsen und Lüsterkl. angeschlossen, am Netzteil die gewünschte Klemmspannung angelegt und mithilfe eines Schaltkastens Faserstränge zugeschaltet, siehe Abbildung 4. Die Wärmeverteilung wurde dabei mittels thermografischer Aufnahmen erfasst und ausgewertet.



Abbildung 4 a) Versuchsaufbau zur Wärmeverteilung der CG b) exemplarisch für C-EP

Zusätzlich wurde an den Bewehrungen C-EP und C-P der Einfluss der elektrischen Erwärmung von 20 bis 80 °C auf die Zugfestigkeit untersucht. Für die Untersuchung wurden die FS in K aus den Gelegen präpariert und zusätzlich mit einem zwei-komponentigen Konstruktionsklebstoff auf Epoxidharzbasis und Quarzsand besandet. Die FS wurden im Anschluss mit einem Vergussmörtel in 150 mm lange Hülsen vergossen, sowie die Enden mit elektrischen Anschlüssen versehen und angeschlossen, siehe Abbildung 5. Die gewünschten Temperaturstufen wurden mittels variierender Klemmspannung eingestellt und mithilfe der Wärmebildkamera die Temperaturentwicklung überprüft. Bei Erreichen der gewünschten Temperaturstufe wurden mit

einer freien Prüflänge von 200 mm in einer 150 kN Universalprüfmaschine mit einer lagegeregelten Prüfgeschwindigkeit von 2 mm/min einaxiale Zugversuche durchgeführt, siehe Abbildung 6. In der Versuchsreihe wurde mit zwei Extensometern (Messlänge 100 mm) die Verformung erfasst und daraus die Dehnung bzw. der E-Modul berechnet. Der E-Modul wurde im linearen Bereich zwischen 10 und 60 % der Bruchdehnung ausgewertet. Vergleichende Untersuchungen zur Bestimmung des Temperatureinflusses wurden in einer Klimakammer, dargestellt in Abbildung 7, nach 20-minütiger Temperierung durchgeführt.

Zur Untersuchung des Materialverhaltens hinsichtlich der Reversibilität nach einem Temperaturanstieg wurden Zugprüfungen am C-EP nach einer 20-minütigen Temperierung bei 80 °C durch eine mittlere Klemmspannung von 13 V mit einer mittleren Stromstärke von 2,1 A durchgeführt. Nach der Abkühlung wurden die Prüfkörper auf die gleiche Weise wie zuvor beschrieben im einaxialen Zugversuch geprüft.

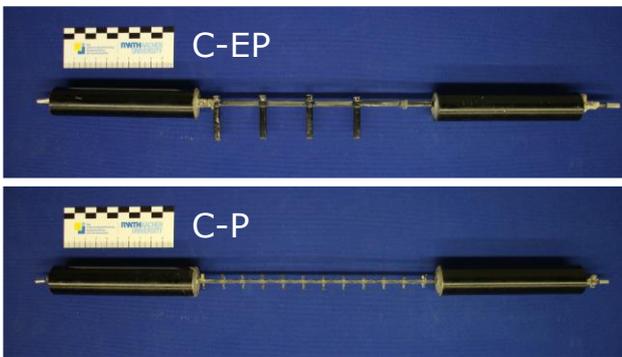


Abbildung 5 Faserstrangzugkörper

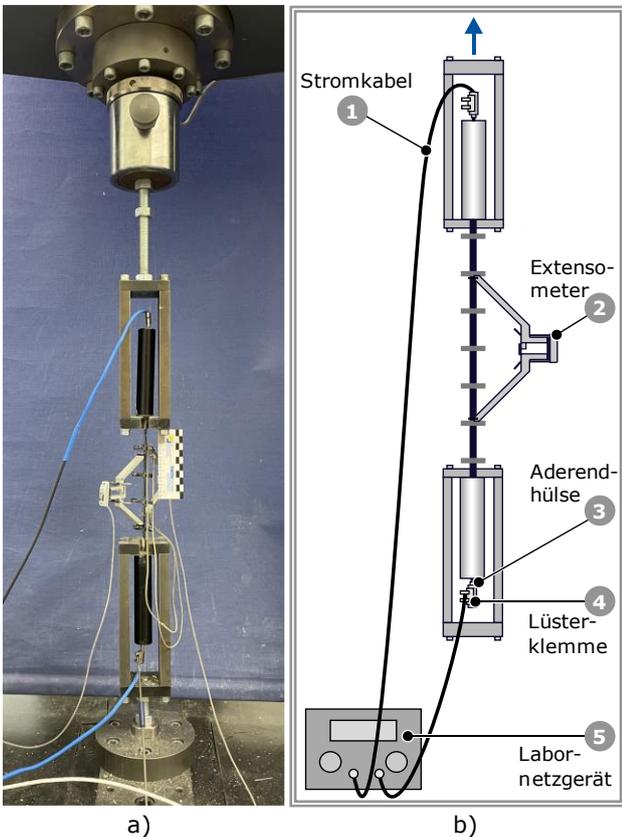


Abbildung 6 a) Versuchsaufbau zur Bestimmung der Zugfestigkeit im Labor, b) schematische Zeichnung



Abbildung 7 Versuchsaufbau zur Bestimmung der Zugfestigkeit unter externem Temperatureinfluss

3 Ergebnisse

3.1 Elektrische Materialeigenschaften

Die Untersuchungen zeigen, dass mit zunehmender Klemmspannung eine Reduktion des spez. Widerstandes einhergeht, begleitet von einem Temperaturanstieg, siehe Abbildung 8. Die Erwärmung der textilen CB verläuft dabei annähernd linear (Korrelationskoeffizienten $R^2=0,965$ bis $0,990$). Im direkten Vergleich zu den getränkten Materialien ist die Temperatur des C-U um ca. 15 K höher. Die Tränkungsmaterialien weisen maximal einen Temperaturunterschied von 7 K auf.

Im Vergleich der untersuchten Bewehrungsmaterialien ist die Reduktion des spez. Widerstandes bei steigender Klemmspannung für C-U am ausgeprägtesten. Darüber hinaus weisen im Vergleich der Materialien C-U und C-EP einen im Mittel um ca. 10 % höheren spez. Widerstand auf als C-U und C-KSE. Dies kann auf die Kontaktflächenanzahl bei größerer Faserquerschnittsfläche von $3,62 \text{ mm}^2$ zurückgeführt werden. Zudem zeigt sich, dass der spez. CW von C-EP im Vergleich zwischen C-U und C-EP durch die epoxidharzbasierte Tränkung reduziert wird. Für die geringeren Faserquerschnittsflächen von C-P und C-KSE, ist der spez. CW für C-KSE im direkten Vergleich um ca. 3 % kleiner.

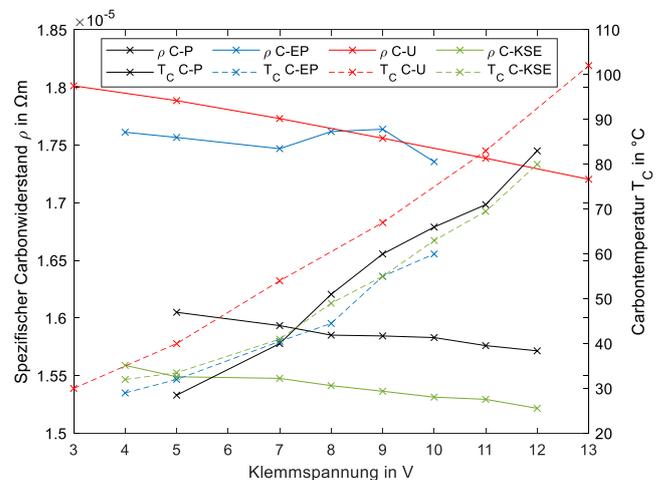


Abbildung 8 Spez. CW als Spannungsabfall im Vergleich zur Carbontemperatur bei steigender Klemmspannung

3.2 Kontaktierungen

Für die untersuchten Bewehrungsmaterialien sind die Kontaktierungsvarianten Lüsterklemme & Aderendhülle (LK+A), Krokodilklemme (K), Löten (L) und Lüsterklemme (LK) hinsichtlich des Wirkungsgrades untersucht worden. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind materialspezifisch durch den angelegten Klemmspannungsgradient in V/m gegenüber dem Verlust durch den Anschluss und der einhergehenden mittleren Anschlussstemperatur in Abbildung 9 dargestellt.

Die Versuchsergebnisse zeigen für die untersuchten Materialien Verluste > 30 % durch den Anschluss mit Krokodilklemme, wobei für C-EP und C-P Verluste > 90 % auftreten. Im Vergleich dazu weisen die Anschlussvarianten LK+A, LK und L geringe Verluste auf. Die Herstellung der Varianten LK+A und LK erfolgt mittels Crimpens. Dabei wird durch den Anpressdruck die Anzahl an Kontaktstellen der Carbonfilamente in der Bewehrung erhöht und aktiviert. Eine Veränderung der Faserstrangoberfläche kann auch bei der Kontaktierung L durch den Lötvorgang und die einhergehende Wärmeerzeugung beobachtet werden. Die genannten Vorgänge können den niedrigeren prozentualen Verlust, dargestellt in Abbildung 9, erläutern. Des Weiteren kann der von Tröger et al. [17] ermittelte Einbrenneffekt der Kontaktierungen bei hoher angelegter Spannung einhergehend mit hoher Temperaturentwicklung ebenfalls festgestellt werden. Insbesondere für C-EP führen die hohen Temperaturen zu Veränderungen in der Bewehrungsmatrix infolge eines Aufweichens des Tränkungsmaterials, siehe Abbildung 10. Zusammenfassend zeigen die Anschlussvarianten LK+A, LK und L niedrige Anschlussstemperaturen bei einem geringeren Spannungsabfall. Im direkten Vergleich führt der Varianten LK+A, LK und L führt die Kontaktierung L zu höheren Wirkungsverlusten. In den weiteren experimentellen Laborversuchen wird die Kontaktierung LK+A verwendet.

Im Vergleich der Bewehrungsmaterialien zeigt sich deutlich, dass durch die Tränkung die Anschlussqualität geschwächt wird. Dabei hat die epoxidharzbasierte Tränkung im Vergleich zu Polystyrol oder KSE die größten Auswirkungen. C-KSE und C-P erreichen mit der Anschlussvariante LK+A die niedrigsten Verluste mit 6-8 %. Zudem ist die hohe Temperaturentwicklung an den Anschlüssen für C-EP zu nennen. Bereits bei einer angelegten Klemmspannung von 7 V erreichen die Anschlussvarianten L und LK im Mittel Temperaturen über 50 °C. Im Vergleich dazu weisen C-KSE und C-P bei einer Spannung von 7 V Temperaturen von rd. 30 °C auf. Für die Funktionalisierung von textilen Verbundwerkstoffen ist dabei das Bewehrungsmaterial im Einzelfall zu wählen.

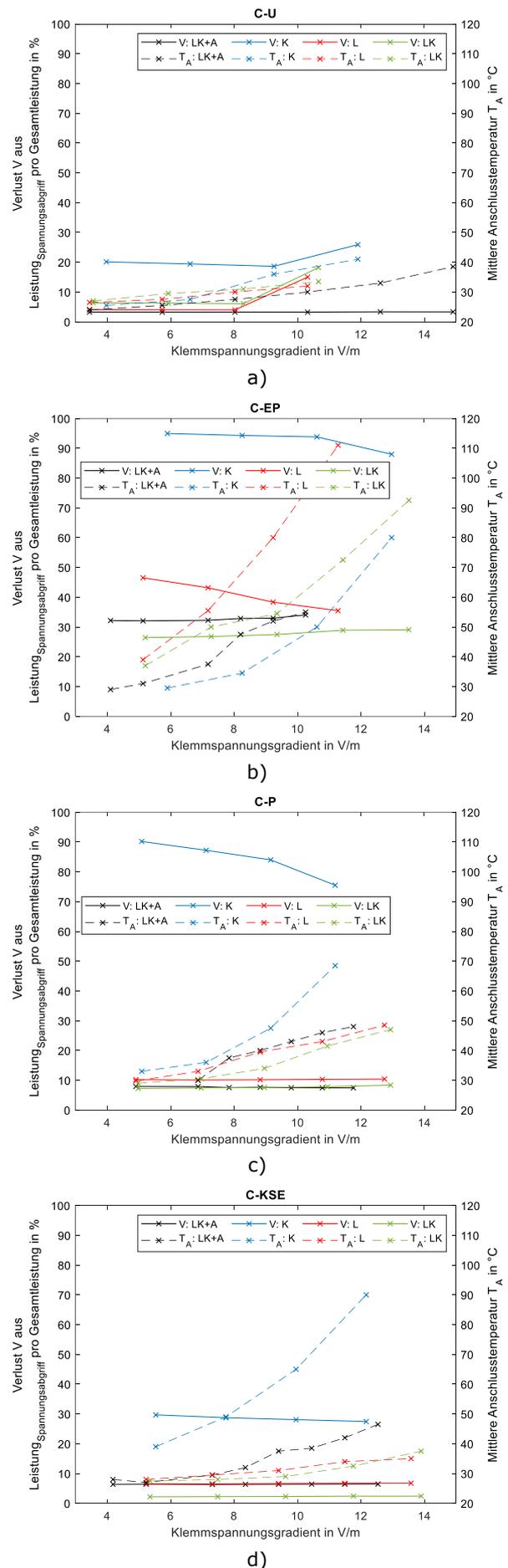


Abbildung 9 Verlust der Leistung aus dem Spannungsabfall bezogen auf die Gesamtleistung durch die Kontaktierung: a) C-U b) C-EP c) C-P d) C-KSE

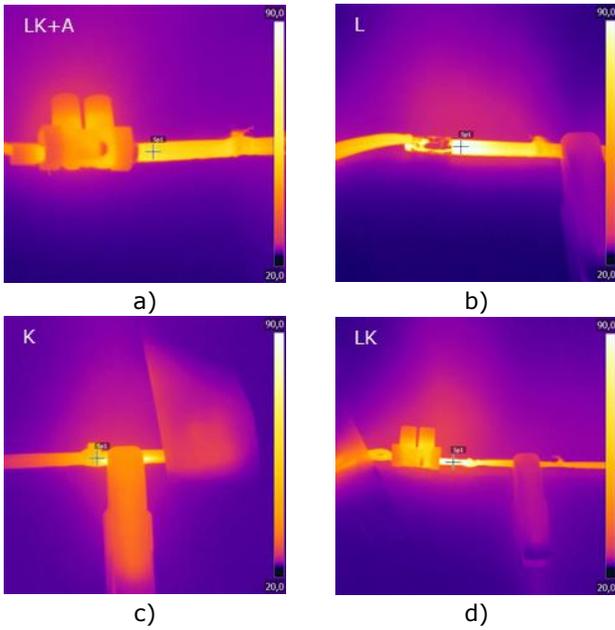


Abbildung 10 Exemplarische Wärmebildkameraaufnahmen bei einer Klemmspannung von 9 V des C-EP: a) LK+A b) L c) K d) LK

3.3 Geometrie

Mit dem Ziel die CB flächig zu erwärmen, sind verschiedene Schaltungen der FS im Gelege experimentell überprüft und mithilfe einer Wärmebildkamera die Temperaturverteilung detektiert worden. Die thermischen Aufnahmen zeigen, dass sich bei einem Stromfluss durch einzelne FS in Kett- wie auch Schussrichtung (K & S) keine flächige Wärmeverteilung einstellt. Wie in Abbildung 11 dargestellt, wird über die Knotenpunkte der K & S-FS der Strom nicht ausreichend übertragen und jeder weitere Knotenpunkt reduziert die Wärme am FS. Auch bei angelegten Klemmspannungen > 3 V ließ sich keine flächige Wärmeverteilung erkennen.

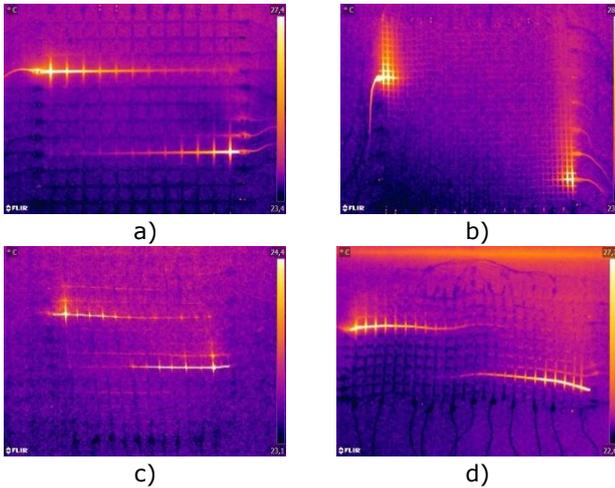


Abbildung 11 Exemplarische Schaltungen bei einer angelegten Klemmspannung von 2-3 V im Gesamtsystem: a) C-EP b) C-P c) C-KSE d) C-U

Zudem ist eine Hotspot-Wärmebildung an den Anschlüssen zu erkennen, beispielhaft dargestellt in Abbildung 12 b). Es kann jedoch gezeigt werden, dass sich bei der Einleitung des Stromflusses durch die beiden Enden eines Faserstrangs in diesem FS die Wärme konstant verteilt, siehe Abbildung 12 c-d). Dabei zeigte sich kein Unterschied zwischen der K- oder S-Richtung (S). Um eine flächige Wärmeverteilung erreichen zu können, sollte daher durch jeden FS Strom eingeleitet werden.

meverteilung erreichen zu können, sollte daher durch jeden FS Strom eingeleitet werden.

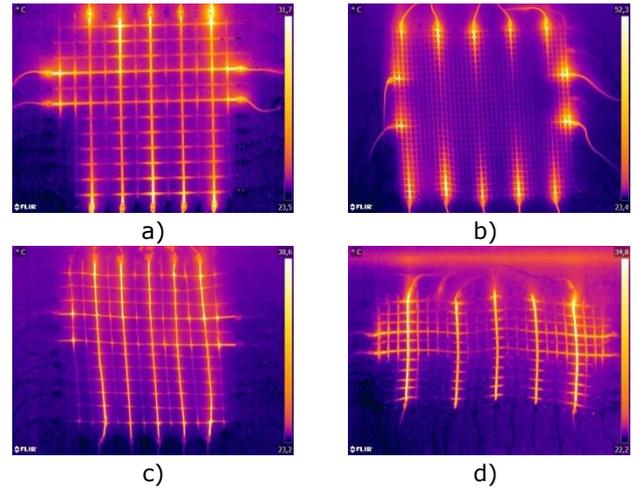


Abbildung 12 Exemplarische Wärmehotspotentwicklung bei einer angelegten Klemmspannung von 2-5 V im Gesamtsystem: a) C-EP b) C-P c) C-KSE d) C-U

Dieses Ergebnis führte zu einer Weiterentwicklung der Anschlüsse. Um jeden FS einer Richtung kontaktieren zu können, wurde eine Stahlschiene mittels Schrauben auf den Aderendhülsen befestigt. Diese Anschlussvariante konnte, wie in Abbildung 13 gezeigt, in jeden FS in K den Strom einleiten und einhergehend eine flächige Wärmeverteilung mit $\Delta T_{\text{Anschluss-Mitte}} = 6 \text{ K}$ erzeugen.

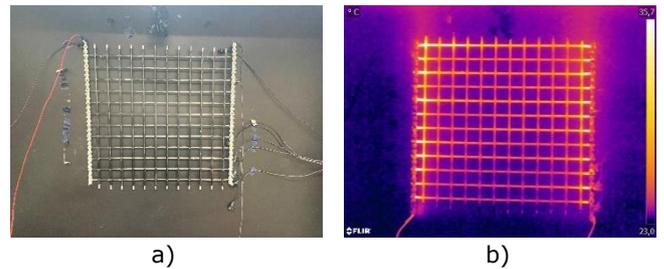


Abbildung 13 a) Anschlussvariante Stahlschiene b) Wärmeverteilung C-EP

Zur Untersuchung des Geometrieinflusses der CG auf die Flächenleistung im Gesamtsystem und die Temperaturverteilung an der CB sind in Tabelle 3 die Ergebnisse zusammengefasst. Die Spannungsabfälle durch die Anschlüsse und zeitabhängige Änderungen der Stromverteilung werden dabei nicht betrachtet. Es zeigt sich, dass bei einer Vergrößerung der Geometrie, um den Faktor 2 in K die Flächenleistung deutlich reduziert wird. Die Carbontemperatur verringert sich für die breiten CG von 1,0 x 0,5 m bei gleicher absoluter Klemmspannung. Zudem ist im Vergleich der K & S bei gleicher Gelegegröße die Flächenleistung ist eine höhere Temperatur in S zu erkennen. Werden alle FS in K & S zugeschaltet, kann eine deutliche Steigerung der Flächenleistung im Vergleich zum Einzel-FS ermittelt werden. Diese Steigerung ist für die quadratische Geometrie von 0,5 x 0,5 m² deutlich ausgeprägter.

Im Hinblick auf die untersuchten Materialien können für C-P bei einer Klemmspannung von 2 V im Vergleich zu C-KSE eine mindestens 3-fach höhere Flächenleistungen und rd. 15 bis 20 °C erhöhte Temperatur ermittelt werden. Da bei

einer Klemmspannung von 2 V am Material C-EP kein Temperaturanstieg sichtbar wurde, ist die Klemmspannung erhöht worden. Durch den höheren spez. CW ist erst ab einer Klemmspannung von >3 V in den Wärmebildkameraaufnahmen ein Temperaturanstieg sichtbar.

Tabelle 3 Geometrieinfluss auf die Flächenleistung im Gesamtsystem und die Carbontemperatur

Kontaktierung ¹⁾	Material	Klemmspannung V	Flächenleistung W/m ²		Carbon-temperatur mittig °C	
			0,25 m ²	0,5 m ²	0,25 m ²	0,5 m ²
1-1 K	C-EP	3	4,0	0,6	37	29
1-1 S	C-EP	4	4,8	2,0	36	57
K & S alle	C-EP	8	37,6	4,0	37	32
1-1 K	C-P	2	4,8	2,8	50	43
1-1 S	C-P	2	7,2	2,0	53	51
K & S alle	C-P	2	52,0	12,8	48	31
1-1 K	C-KSE	2	1,6	0,8	30	27
1-1 S	C-KSE	2	1,6	0,8	31	30
K & S alle	C-KSE	2	15,2	8,8	28	28

K = Kettrichtung

S = Schussrichtung

¹⁾ 1-1 = Jeweils ein FS in K bzw. S angeschlossen
K & S alle = alle Enden angeschlossen

3.4 Festigkeitsentwicklung elektrisch beheizter Carbonbewehrung

In dieser Versuchsreihe ist die Zugfestigkeit sowie der E-Modul von elektrisch beheizten CB in den Temperaturstufen 20 °C, 40 °C, 60 °C und 80 °C untersucht worden, siehe Abbildung 14 und 15. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die verwendeten elektrischen Parameter zur Einstellung der jeweiligen Temperaturen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zugfestigkeit des C-EP im Mittelwert bei steigenden Temperaturen abnimmt. Bei einer Temperatur von 80 °C ergibt sich im Vergleich zu 20 °C eine Abnahme von 5 %. Allerdings überschneiden sich die Streubereiche aller Temperaturstufen, sodass der Festigkeitsverlust nicht als signifikant angesehen werden kann. Analog dazu zeigt C-P bei der 80 °C-Temperaturstufe keine Festigkeitsreduktion. Im untersuchten Temperaturbereich zeigt sich, dass temperaturabhängige Tränkungsmaterialveränderungen durch den Stromfluss kein Einfluss auf die Zugfestigkeit haben. Elektrisch beheizte CB können somit als Wärmestrahler im Temperaturbereich von 20-80 °C ohne materialspez. Festigkeitsreduktion Anwendung finden.

Tabelle 4 Elektrische Parameter zur Erwärmung der FS-Zugkörper

Temperatur °C	C-EP		C-P	
	Klemmspannung V	Stromstärke A	Klemmspannung V	Stromstärke A
40	8,4	1,3	3,9	0,7
60	8,8	1,7	5,5	1,1
80	10,9	2,1	3,7	1,2

Zusätzlich wurden die Auswirkungen der Erwärmungsmethoden, der elektrischen und Umgebungstemperatur-Erwärmung durch eine Heizkammer, analysiert. Für C-EP zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Stromfluss und Heizkammer in der Zugfestigkeit. Im Vergleich dazu führt die Erwärmung der Umgebungstemperatur durch eine Heizkammer für C-P zu einer Zugfestigkeitsreduktion von bis zu 20 %. Eine homogene Temperaturverteilung kann jedoch für beide Methoden im FS nicht untersucht werden. Untersuchungen zum E-Modul zeigen bisher keine eindeutigen Ergebnisse, siehe Abbildung 15, und sollen in Verbundversuchen detaillierter betrachtet werden.

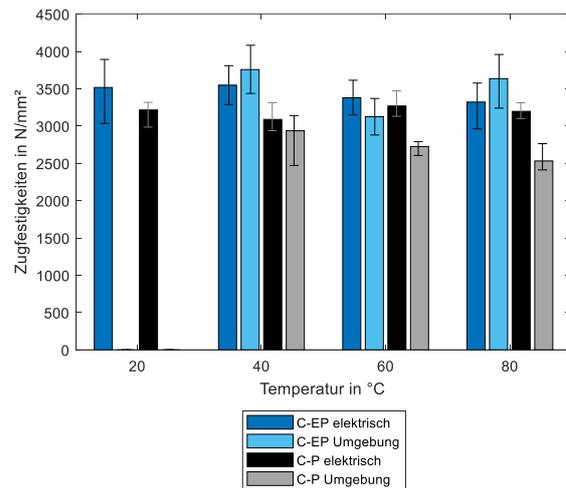


Abbildung 14 Zugfestigkeit

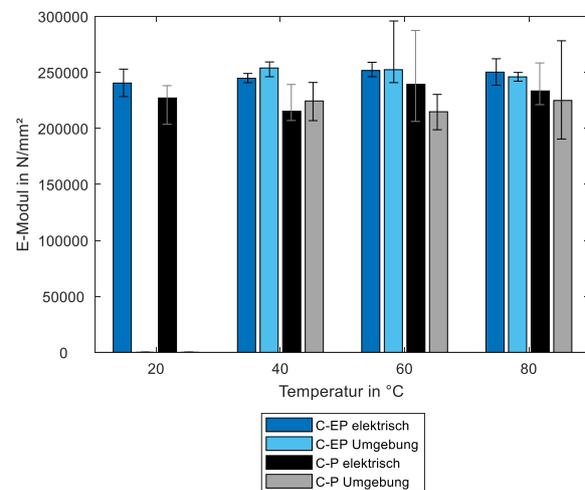


Abbildung 15 E-Modul

Zur Untersuchung der Reversibilität der C-EP ist in Abbildung 16 die Zugfestigkeit der temperierten FS im Vergleich zu 20 °C-Versuchen dargestellt. Es zeigt sich, dass durch eine 20-minütige elektrische Temperierung der Carbonfasern bei 2,1 A die Zugfestigkeit im Mittel um 13 % reduziert wird. Der E-Modul zeigt keine Abweichungen durch die Temperierung. Die Versuche zeigen für C-EP ein irreversibles Verhalten in der Zugfestigkeit durch den elektrischen Temperatureinfluss auf, welches jedoch keine Auswirkungen auf die Steifigkeit des Materials hat, siehe Abbildung 17.

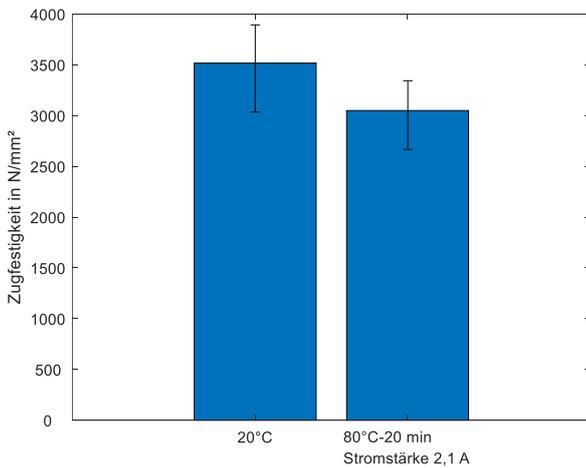


Abbildung 16 Reversibilität - Zugfestigkeit

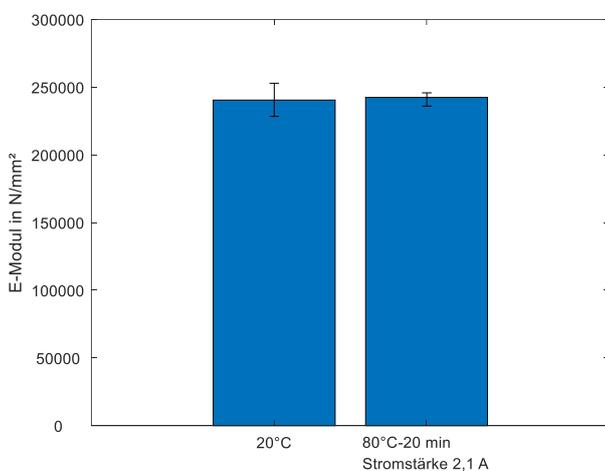


Abbildung 17 Reversibilität - E-Modul

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Einflussfaktoren elektrisch beheizter CB, wie die elektrischen Materialeigenschaften, die Kontaktierungsverfahren, die Wärmeverteilung wie auch die Festigkeitseigenschaften quantifiziert. Die zentralen Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Für die untersuchten Carbonbewehrungen C-EP, C-P, C-U und C-KSE konnte der spez. CW mit einhergehender Temperaturentwicklung für variierende Klemmspannungen ermittelt werden. Dabei konnte ein lineares Verhältnis zwischen Spannungs- und Temperaturanstieg bestimmt werden. Als Haupteinflussfaktoren auf den spez. CW konnte die Faserquerschnittgröße wie auch das Tränkungsmaterial identifiziert werden.
- Die Anschlussqualität konnte als maßgebender Einflussfaktor für die Umsetzung der funktionalisierten CB identifiziert werden. Dabei kann durch den Crimpmechanismus der Varianten LK+A, LK und L der Wirkungsgrad bei niedrigerer Anschluss temperatur erhöht werden. Durch die Tränkungs materialien verringert sich der Wirkungsgrad und Temperaturhotspots an den Kontaktstellen entstehen. Bei der Anwendung der funktionalisierter textiler Verbundwerkstoffe sollte das

Bewehrungsmaterial und die Kontaktierungsvariante im Einzelfall geprüft werden.

- Um eine flächige Wärmeverteilung in CG zu erhalten, ist die Kontaktierung aller Faserstrangenden in K & S zu wählen. Infolge einer Kontaktierung mit einer aufgedruckten Stahlschiene kann eine flächige Wärmeverteilung ohne Hotspot-Entwicklung erreicht werden. Die Vergrößerung der Gelege führt dabei bei gleichem Stromfluss zu einem Temperatur- und Flächenleistungsabfall. Die Flächenleistung wird mit steigender Anzahl von Stromeinleitungspunkten an den Fasersträngen erhöht.
- Durch die Wärmeentwicklung des angelegten Stroms wurden für C-EP und C-P keine signifikanten Abweichungen auf die Zugfestigkeit festgestellt. Allerdings zeigt C-EP ein irreversibles Materialverhalten hinsichtlich der Zugfestigkeit bei einer 20-minütigen elektrischen Temperierung bei 80 °C auf. Die Untersuchungen veranschaulichen die Einsatzmöglichkeit als Wärmestrahler im Temperaturbereich von 20 bis 80 °C.

In zukünftigen Untersuchungen soll der Einfluss der elektrischen Erwärmung auf die Hydratation des Betons im Verbundwerkstoff, insbesondere in Abhängigkeit der Stromstärke, Temperaturentwicklung und Stromversorgungszeit untersucht werden. Darüber hinaus werden in bildgebenden Untersuchungen der Einfluss des Stromflusses auf die Tränkung analysiert sowie weitere Faserquerschnitte und Tränkungs materialien hinsichtlich der elektrischen Materialeigenschaften quantifiziert.

Danksagung

Ein besonderer Dank geht an die solidian GmbH, CHT GmbH sowie Hitexbau GmbH für die Bereitstellung der Bewehrungsmaterialien. Die Untersuchungen wurden im Rahmen des ZIM Projektes „Entwicklung einer filigranen Carbonbetontreppe mit härtungsbeschleunigender textiler Bewehrung (TexStairs)“ durchgeführt. Die Autoren bedanken sich bei der ZIM für die Unterstützung des Forschungsprojektes und dem Projektpartner Rolf Clevn Bauunternehmung GmbH & Co. KG.

Referenzen

- [1] Asgharzadeh, A. (2019) *Durability of polymer impregnated carbon textiles as CP anode for reinforced concrete*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. <https://doi.org/10.18154/RWTH-2019-05559>
- [2] Dahlhoff, A.; Morales Cruz, C.; Raupach, M. (2022) *Influence of Selected Impregnation Materials on the Tensile Strength for Carbon Textile Reinforced Concrete at Elevated Temperatures*. Buildings 2022, 12, pp. 2177. <https://doi.org/10.3390/buildings12122177>
- [3] Krois, K. (2021) *Entwicklung eines elektrischen Energiespeichers zur Integration in Carbonbeton*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2021. <https://doi.org/10.26083/tuprints-00019790>
- [4] Lengsfeld, H.; Mainka, H.; Altstädt, V. (2019) *Carbonfasern: Herstellung, Anwendung, Verarbeitung*. München: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.

- [5] Driessen, C.; Raupach, M. (2016) *SMART DECK – Ein multifunktionaler Brückenbelag aus Textilbeton*. Bau-technik 2016, 2, pp. 102-104. <https://doi.org/10.1002/bate.201500110>
- [6] Driessen-Ohlenforst, C. (2020) *SMART-DECK: Multi-functional carbon-reinforced concrete interlayer for bridges*. Materials and Corrosion 2020, 5, pp. 786-796. <https://doi.org/10.1002/maco.202011540>
- [7] Hegler, S.; Seiler, P.; Dinkelaker, M.; Schladitz, F.; Plettemeier, D. (2020) *Electrical Material Properties of Carbon Reinforced Concrete*. Electronics 2020, 5. <https://doi.org/10.3390/electronics9050857>
- [8] Bosowski-Schönberg, P.; Callhoff, C.; Grimmelsmann, N.; Ehrmann, A. (2017) *Methoden zur Kontaktierung elektrischer SMD-Bauelementen in smarten technischen Textilien*. Proceedings of ThGOT, submitted 2017.
- [9] Goldfeld, Y.; Perry, G. (2018) *Electrical characterization of smart sensorysystem using carbon based textile reinforced concrete for leakagedetection*. Materials and Structures 2018, 6, pp. 170. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1296-7>
- [10] Saidi, M.; Gabor, A. (2020) *Experimental analysis of the tensile behaviour of textile reinforced cementitious matrix composites using distributed fibre optic sensing (DFOS) technology*. Construction and Building Materials 2020, pp. 117027. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117027>
- [11] Saidi, M.; Gabor, A. (2019) *Use of distributed optical fibre as a strain sensor in textile reinforced cementitious matrix composites*. Measurement 2019, pp. 323-333. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.03.047>
- [12] Bahrar, M.; Djamaï, Z. I.; El Mankibi, M.; Si Larbi A.; Salvia, M. (2018) *Numerical and experimental study on the use of microencapsulated phase change materials (PCMs) in textile reinforced concrete panels for energy storage*. Sustainable Cities and Society 2018, pp. 455-468. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.014>
- [13] Söhnchen, A. (2019) *Wand- und Bodenelemente aus Carbonbeton mit integrierter Heizfunktion*. 11. Carbon- und Textilbetontage. Schön, K.; Lieboldt, M., C³ - Carbon Concrete Composite e.V., Dresden, 2019, pp. 112-113.
- [14] Hemmen, A. (2016) *Direktbestromung von Kohlenstofffasern zur Minimierung von Zykluszeit und Energieaufwand bei der Herstellung von Karbonbauteilen*. Dissertation, Universität Augsburg.
- [15] Hasan, M.; Offermann, M.; Haupt, M.; Nocke, A.; Cherif, C. (2014) *Carbon filament yarn-based hybrid yarn for the heating of textile-reinforced concrete*. Journal of Industrial Textiles 2014, 2, pp. 183-197. <https://doi.org/10.1177/1528083713480380>
- [16] Schladitz, F.; Lägel, E.; Ehlig, D.; Nietner, L.; Tietze, M. (2019) *Carbon reinforced concrete and temperature*. IABSE Congress – The Evolving Metropolis. International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), New York City, USA, 4-6 September 2019, pp. 486-492. <https://doi.org/10.2749/newyork.2019.0486>
- [17] Tröger, F.; Große, S.; Rudolff, T.; Heimbald, T. (2023) *Entwicklung einer elektrischen Kontaktierung für multifunktionale Carbonfaser-Strukturen in Beton*. 19. AALE-Konferenz. Luxemburg, 08.03.-10.03.2023. Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, 2023. <https://doi.org/10.33968/2023.05>
- [18] Gerlach, F.; Ahlborn, K.; Wolf, B.; Hoffmann, K.; Vonau, W. (2016) *Applikation textiler Flächenelektroden zur Zustandsüberwachung und Sanierung von Baukörpern*. 18. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2016. Nürnberg, 2016, pp. 493-499. <https://doi.org/10.5162/sensoren2016/6.4.1>
- [19] Lenting, M.; J. Orlowsky (2020) *Einaxiale Zugversuche an textilbewehrten Betonen mit anorganisch getränkten Carbonfasern*. Beton- und Stahlbetonbau 2020, 7, pp. 495-503. <https://doi.org/10.1002/best.201900062>
- [20] Technisches Produktdatenblatt - solidian Place: <https://solidian.com/de/downloads-de/> [accessed on: 17.04.2023]
- [21] Technisches Produktdatenblatt - Hitexbau Place: <https://www.hitexbau.com/menu/products/> [accessed on: 17. Apr 2023]