

Elektrisch beheizbarer textilbewehrter Carbonbeton

Annette Dahlhoff, Michael Raupach

*Institut für Baustoffforschung (ibac),
RWTH Aachen University,
Schinkelstraße 3, 52062 Aachen, Germany*

dahlhoff@ibac.rwth-aachen.de

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 dem erhöhten Zugtragverhalten und der geringeren Dichte auch eine hohe elektrische Leitfähigkeit. Letztere kann mit angelegtem Strom 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 spezifischer elektrischer Widerstand der verwendeten Carbonbewehrungen bestimmt. Darauf aufbauend wurde die Temperaturverteilung der Bewehrungen in Abhängigkeit unterschiedlicher Stromflüsse untersucht. Die Untersuchungen ermöglichen die Quantifizierung des Einflusses des Matrixmaterials und der Matrixmenge der Trängung sowie der Geometrie des Faserstranges auf die Strom- und Temperaturverteilungen.

Keywords: Carbonbewehrung, Multifunktionalität, Temperaturverhalten, Wärmeverteilung, Zugfestigkeit, Heizung

Abstract

Textile reinforced concrete is currently used in many areas of the construction industry as a high-performance composite material. The composite material consists of concrete and a non-metallic reinforcement made of carbon fibers. In addition to promising material properties such as tensile behavior and density, this innovative material also exhibits high electrical conductivity. This can be used to create a thermal effect in the component when a voltage is applied, for instance, to expedite the concrete's hydration process. To utilize the electrically conductive carbon reinforcement effectively, construction site-appropriate contacting procedures were developed and evaluated for various impregnation materials. Additionally, the electrical properties, including capacity and specific resistance, of the carbon reinforcements were determined. Based on these findings, the temperature distribution of the reinforcements concerning different current flows was investigated. Based on these findings, the research explores the impact of matrix material, impregnation quantity, and fiber strand geometry on current and temperature distributions.

Keywords: Carbon reinforcement, multifunctionality, temperature behaviour, heat distribution, tensile strength, heating

1 Einführung

Derzeit wird der Verbundwerkstoff Carbonbeton in verschiedenen Bereichen der Bauindustrie intensiv untersucht, um ressourceneffiziente Bauprojekte mit besonderen Materialeigenschaften umzusetzen. Durch die geringe Dichte und die Korrosionsbeständigkeit der Carbonbewehrung können dünne, langlebige und materialminimierte Bauteile hergestellt werden. Zusätzlich weist dieser innovative, nicht-metallische Baustoff Zugfestigkeiten von bis zu 4200 N/mm² auf [1; 2]. Neben diesen Eigenschaften eröffnet die elektrische Leitfähigkeit der Carbonfasern sowie deren gute bis sehr gute Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung vielfältige Möglichkeiten für eine multifunktionale Nutzung [3; 4].

Diese multifunktionale Nutzung wurde in den letzten Jahren bereits für verschiedenen Anwendungsbereiche untersucht [1; 3; 5-7]. Ein Beispiel für die Funktionalisierung ist der Einsatz im kathodischen

Korrosionsschutz, bei dem durch die elektrische Kontaktierung die textile Bewehrung als Anodenmaterial verwendet wird [1]. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit besteht in der Nutzung von Carbonbeton als multifunktionaler Brückenbelag, der durch die Kombination aus umfassendem Feuchtemonitoring des Bauwerks dem Schutz mittels präventiven kathodischen Korrosionsschutzes dient und als Verstärkung der Tragfähigkeit wirkt [5]. Zudem haben Bosowski-Schönberg et al. die Integration von SMD-Bauteilen (surface mounted device) an Textilien untersucht, sodass LED-Lampen mittels 3D-gedruckten Halterungen auf leitfähigen Drähten im Gewebe kontaktiert werden konnten [8].

Im Bereich der Sensorik wurden durch die Integration von faseroptischen Sensoren von Saidi und Gabor [9; 10] mechanische Dehnungseigenschaften analysiert und Wasserinfiltration durch Rissbildungen als direkte Messung untersucht [11]. Zudem wurden Grundlagenuntersuchungen zur Einsatzmöglichkeit als latenter Wärmespeicher, Aktivierung der Gebäudehülle mit Wärmedämmung, LED-Lichtleitern und Sensorik auf Basis faseroptischer und resistiver Garmaterialien wie auch als dielektrischer Speicher durch Folienkondensatoren durchgeführt [3; 12-14].

Die Leitfähigkeit als Materialeigenschaft des Carbons kann zur gezielten Erwärmung der Bewehrung nach dem Joule'schen Prinzip genutzt werden. Diese gezielte Erwärmung der Carbonbewehrung wurde bereits in ersten Ansätzen von Hasan et al. in Hinblick auf die Heizfunktion an Carbongarnen im Verbundkörper mit Beton untersucht [15]. Weiterführend analysierten Schladitz et al. das Potential einer thermischen Vorspannung durch die gezielte Temperaturerhöhung [16].

Die elektrische Kontaktierung der Carbonbewehrung wurde von Tröger als Herausforderung identifiziert, da sie maßgeblich die Energie im System beeinflusst [17]. Hohe Energieverluste einhergehend mit hohen Kontaktwiderständen und Wärmehotspots an den Stromeinleitungspunkten sind daher zu minimieren [3; 14; 17]. Untersuchungen zum Kontaktwiderstand mit verschiedenen Stromeinleitungsvarianten zeigten, dass der Crimpmechanismus in Verbindung mit Lüsterklemmen den Wirkungsgrad des Anschlusses bei niedriger Wärmeentwicklung erhöht [18]. Zur Umsetzung von automatisierter Kontaktierung im Einsatzgebiet von Fertigteilen untersuchte Tröger et al. Varianten der Kontaktierung wie Bedrucken der Faser mit einem elektrisch leitfähigen Filament oder die Verwendung eines Clips [17].

Untersuchungen weiterer Einflussfaktoren der Bewehrung auf das elektrische Materialverhalten wie die Filamentanzahl zeigen bei steigender Filamentanzahl einen größeren Widerstand und einer Vergrößerung der Leitfähigkeit bei steigender Garnfeinheit [15; 19]. Gerlach et al. beschreibt, dass sich die große spezifische Oberfläche der filamentartigen Struktur positiv auf die Leitfähigkeit auswirkt und die Carbon-Flächenelektroden ein elektro-chemisch inertes Verhalten aufweisen. [19].

Zudem wurde von Dahlhoff et al. experimentelle Zugversuche an elektrisch beheizten epoxydharz- und polystyrolgetränkten Carbonbewehrungen durchgeführt. Es konnten keine signifikanten Festigkeitsreduktionen ermittelt werden. Bei einer 20-minütigen elektrischen Temperierung bei 80 °C zeigte die epoxydharzgetränkte Bewehrung ein irreversibles Materialverhalten auf [18].

In dieser Veröffentlichung wird für elektrisch beheizbare Carbonbewehrung zum Einsatz in Carbonbeton der elektrische Widerstand einhergehend mit der Temperaturentwicklung an unterschiedlich getränkten Bewehrungsmaterialien charakterisiert. Neben dem Einfluss des Tränkungsmaterials wird der Geometrieinfluss der Carbongelege untersucht. Dabei wird in Hinblick auf den Rovingachsabstand, die Knotenpunkte, die Gelegegröße, wie auch die Kett- und Schussrichtung die Flächenleistung und Carbontemperatur für verschiedene Schaltungen der Faserstränge analysiert.

2 Materialien und Methodik

2.1 Materialien

In der Untersuchung wurden fünf Carbonbewehrungen (CB) mit unterschiedlichem Tränkungsmaterial und varrierender Geometrie insbesondere der Faserquerschnittsfläche, Garnfeinheit und Bewehrungsquerschnittsfläche verwendet, siehe Bild 1 und Tabelle 1 [20-22].

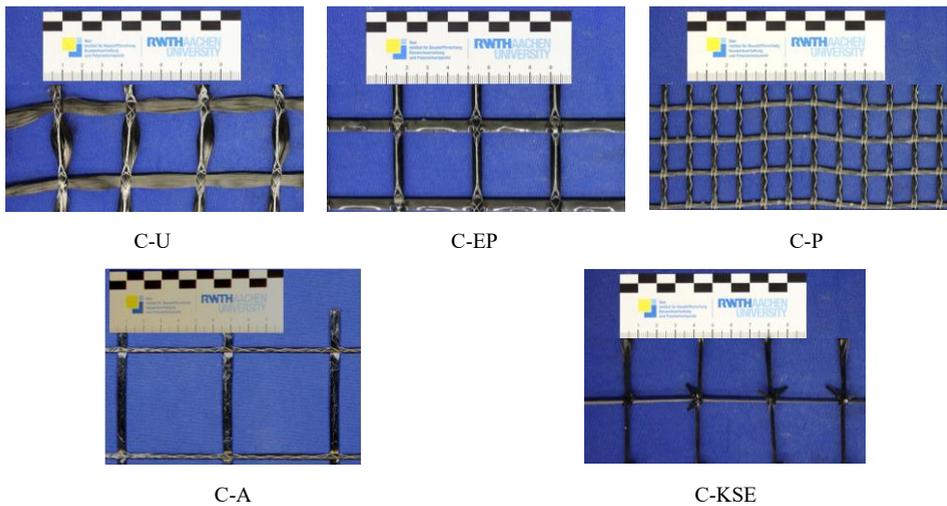


Bild 1 Zusammenstellung der untersuchten Carbongelege (CG)

Tabelle 1 Materialparameter der untersuchten CB basierend auf den Herstellerangaben [20-22]

Material		C-U	C-EP	C-P	C-A	C-KSE
Tränkungsmaterial	-	Ungetränkt	Epoxidharz	Polystyrol	Acrylate	Kiesel-Säure-Ester
Achsabstand Roving	mm	38/38	38/38	12/16	50/50	40/40 ²⁾
Faserquerschnittsfläche	mm ²	3,62	3,62	1,81	1,81	1,92
Bewehrungsquerschnittsfläche	mm ² /m	95/95	95/95	142/25	36/36	48/48 ²⁾
Garnfeinheit	tex	6400	6400 ¹⁾	3220	3220	3450

¹⁾ Material besteht aus zwei kombinierten Fasersträngen.

²⁾ Gelege aus Fasersträngen am ibac hergestellt.

2.2 Methodik

Zur Untersuchung elektrisch beheizter Carbonbewehrungen wurden experimentelle Laborversuche durchgeführt. In den Versuchsserien wurden die CB hinsichtlich der elektrischen Materialeigenschaften und dem Geometrieinfluss charakterisiert. In Tabelle 2 sind die experimentellen Laborversuche sowie die untersuchten Parameter zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 2 Experimentelle Laborversuche

Versuche		Prüfkörperanzahl				
		C-EP	C-U	C-P	C-A	C-KSE
Elektrische Materialeigenschaften		1	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

2.3 Prüfverfahren

Um die Materialeigenschaften der Carbonbewehrungen zu charakterisieren, wurden Faserstränge (FS) in Kettrichtung (K) aus den Gelegen vorbereitet. Die Fasersträngenden wurden basierend auf den Ergebnissen in [18] mit Aderendhülsen vercrimpt und mittels Lüsterklemmen angeschlossen, siehe Bild 2 (links). Zur Bestimmung des spezifischen Carbonwiderstands wurde eine 4-Punkt-Messung durchgeführt, in welcher der Spannungsabfall am Faserstrang als Kennwert in Bezug auf die Länge mit einem Multimeter gemessen wurde. Im Versuch wurde die Klemmspannung schrittweise am Netzgerät erhöht und die Stromstärke des Gesamtsystems am Netzgerät abgelesen. Die Untersuchung wurde mit thermografischen Aufnahmen begleitet und so die Temperatur am Carbon erfasst. In einer weiteren Versuchsserie wurde die Wärmeverteilung und Flächenleistung mittels einer 2-Punkt-Messung an den untersuchten Gelegen mit variierender Größe analysiert, siehe Bild 2 (rechts). Die Carbongelege wurden

dazu an allen Faserstrangenden über Aderendhülsen und Lüsterklemmen angeschlossen. Die gewünschte Klemmspannung wurde am Netzgerät eingestellt und mithilfe eines Schaltkastens die einzelnen Faserstränge zugeschaltet. Die Wärmeverteilung wurde mittels thermografischer Aufnahmen erfasst und ausgewertet.



Bild 2 4-Punkt-Messung zur Bestimmung des spez. Carbonwiderstands (links), 2-Punkt-Messung zur Wärmeverteilung der Carbongelege exemplarisch für C-EP (rechts)

3 Ergebnisse

3.1 Elektrische Materialeigenschaften

Die Versuchsergebnisse zeigen eine Reduktion des spez. Widerstandes bei zunehmender Klemmspannung. Gleichzeitig steigt die Temperatur im Carbonmaterial mit einem annähernd linearen Verlauf (Korrelationskoeffizienten $R^2=0,965$ bis $0,990$) an. Die höchsten Temperaturen konnten im ungetränktem Material nachgewiesen werden. Ein nahezu identischer Temperaturanstieg ist für C-A zu erkennen, während die weiteren Tränkungsmaterialien einen Temperaturunterschied zu C-A und C-U von 7 K aufweisen.

Die Analyse des spezifischen Carbonwiderstandes zeigt für C-U den höchsten spez. Widerstand, während dieser für getränkte Materialien niedriger ist. Der spez. Widerstand C-EP weist dabei die geringsten Abweichungen zu C-U auf, welches auf die Herstellvariante der kombinierten Faserstränge zurückgeführt werden kann. Im Vergleich der Bewehrungen C-A und C-P führt die Verwendung von einem Tränkungsmaterial auf Acrylatbasis zu einem höheren spez. Widerstand, einhergehend mit niedrigerer elektrischer Leitfähigkeit.

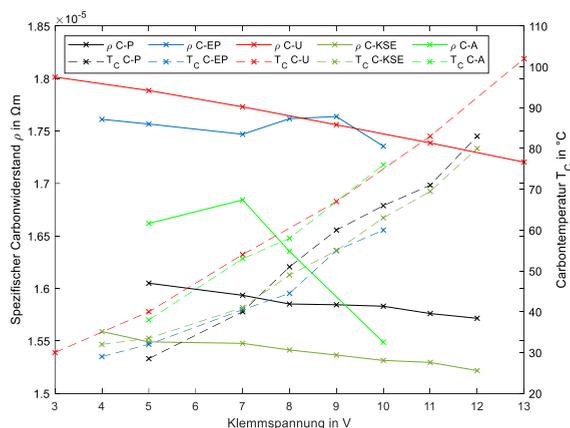


Bild 3 Spez. CW als Spannungsabfall im Vergleich zur Carbontemperatur bei steigender Klemmspannung

3.2 Geometrie

Zur Untersuchung des Einflusses der Geometrie hinsichtlich Rovingachsabstand, Gelegegröße, wie auch Kett- und Schussrichtung wurden verschiedene Schaltungen der Faserstränge an den Gelegen experimentell überprüft und mithilfe einer Wärmebildkamera die Temperaturverteilung detektiert. In einer ersten Versuchsreihe wurde der Strom durch ein Faserstrangende mit jeweils einem auf der anderen Seite variierenden Faserstrangende geschaltet. Wie in Bild 4 dargestellt, wird über die Knotenpunkte der Faserstränge in Kett- und Schussrichtung der Strom nicht ausreichend übertragen und die Wärme wird dadurch an jedem weiteren Knotenpunkt reduziert. Je weiter die kontaktierten Faserstrangende im Gelege auseinander liegen, desto größer ist die Hotspot-Wärmeentwicklung an den Anschlüssen. Auch für die Schussrichtung der Gelege und die weiteren untersuchten Bewehrungen ist ein gleiches Phänomen in den Wärmebildkameraaufnahmen zu erkennen. Darüber hinaus ließ eine Steigerung der angelegten Klemmspannungen > 3 V keine flächige Wärmeverteilung erkennen. Auch bei geringerem Rovingachsabstand und der ungetränkten Carbonbewehrung ist eine Hotspot-Wärmeentwicklung an den Anschlüssen zu erkennen, siehe Bild 5.

Es zeigt sich jedoch, dass trotz dieser Hotspot-Entwicklung die Flächenleistung in den Stromeinleitungsvarianten nicht variiert. Zudem bestätigen die zusammengefassten Werte der Flächenleistung und Carbontemperatur exemplarisch für C-EP, dass die Unterschiede zwischen Kett- und Schussrichtung kleiner als 15 % sind.

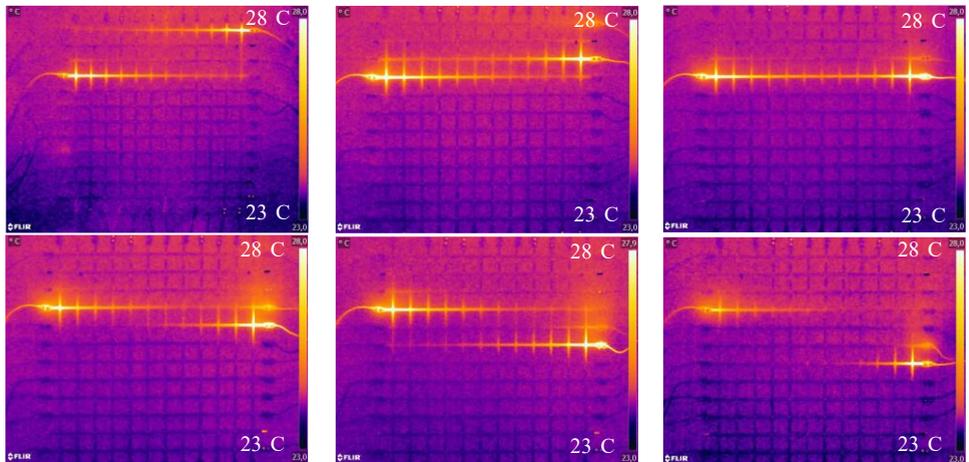


Bild 4 Exemplarische Schaltungen C-EP (0,25 m²) bei einer angelegten Klemmspannung von 2 V im Gesamtsystem

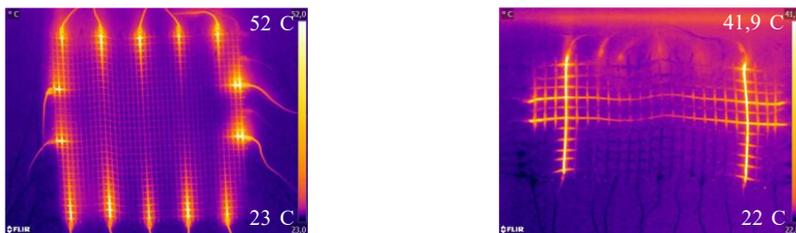


Bild 5 Exemplarische Wärmehotspotentwicklung: C-P (links), C-U (rechts)

Tabelle 3 Flächenleistung und Carbontemperatur C-EP (0,25 m²)

Kontaktierung		Klemmspannung	Flächenleistung			Carbontemperatur mittig		
			EW	MW	SD	EW	MW	SD
		V	W/m ²			°C		
L3 ¹⁾	R1	2	4	3,2	1,0	31	34,0	2,0
	R2		4			33		
	R3		4			37		
	R4		2,4			35		

	R5		3,2			34		
	R6		1,6			34		
O6²⁾	U1		2,4	3,73	0,83	37	35,3	1,9
	U2		3,2			34		
	U3		4			33		
	U4		4			34		
	U5		4			37		
	U6		4,8			37		

EW = Einzelwert; MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung

¹⁾ Kettrichtung

²⁾ Schussrichtung

Die Untersuchungen zeigen, dass sich bei der Einleitung des Stromflusses durch die beiden Enden eines Faserstrangs in diesem Faserstrang die Wärme konstant verteilt ist. Zur Nutzung der Carbongelege als flächiges Heizelement sollte daher jeder Faserstrang einer Richtung kontaktiert werden. Zur Umsetzung der Kontaktierung jedes Faserstranges in Kettrichtung wurde eine Stahlschiene mittels Schrauben auf den Aderendhülsen befestigt. Diese Anschlussvariante konnte, wie in Bild 6 gezeigt, in jeden FS den Strom einleiten und einhergehend eine flächige Wärmeverteilung mit $\Delta T_{\text{Anschluss-Mitte}} = 6 \text{ K}$ erzeugen.

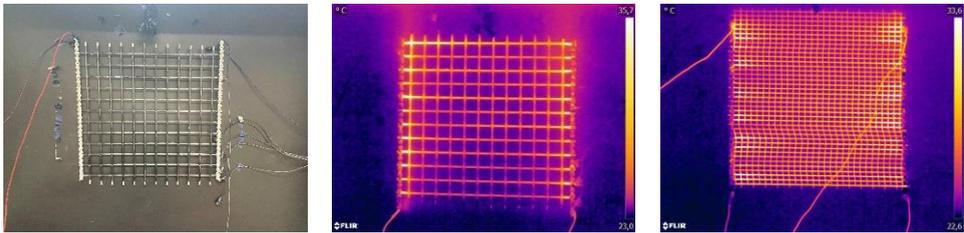


Bild 6 Anschlussvariante Stahlschiene (links), Wärmeverteilung C-EP (mitte), Wärmeverteilung C-P (rechts)

Zur Untersuchung des Einflusses der Gelegegröße auf die Flächenleistung und Carbontemperatur wurde eine Klemmspannung von 2 V auf die Carbongelege in Kett- und Schussrichtung aufgebracht. Durch den hohen spez. Carbonwiderstand des Materials C-EP wurde im Gelege $0,5 \text{ m}^2$ bei einer Klemmspannung von 2 V keine Wärmeentwicklung sichtbar, sodass die Klemmspannung bis auf 10 V erhöht wurde. In Bild 7 und Bild 8 sind zusammenfassend die Ergebnisse der Untersuchung ohne Betrachtung der Spannungsabfälle an den Anschlüssen und der zeitabhängigen Änderung der Stromverteilung dargestellt.

Die Flächenleistung wird dabei bei einer Vergrößerung der Geometrie, um den Faktor 2 in Kettrichtung für die untersuchten Bewehrungen um mindestens 50 % reduziert. Im Vergleich zur Kettrichtung ergibt sich für die Schussrichtung eine höhere Flächenleistung der Gelege. Werden alle Faserstränge in Schussrichtung angeschlossen, ist ein deutlicher Anstieg der Flächenleistung zu erkennen. Der Anstieg von einem angeschlossenen Faserstrang zu allen Fasersträngen in Schussrichtung ist im Verhältnis von einer Geometrie von $0,5 \text{ m}^2$ zu $0,25 \text{ m}^2$ geringer. Bei der Verwendung aller Faserstrangenden wird die Flächenleistung nochmals gesteigert. Neben der höheren Flächenleistung ist in Schussrichtung auch eine höhere Temperatur zu erkennen.

Im direkten Vergleich der Materialien ist bei gleicher Klemmspannung für C-P die höchste Flächenleistung und Carbontemperatur zu erkennen. Im direkten Vergleich zu C-KSE ergibt sich eine 3-fach höhere Flächenleistung bei rd. $15 \text{ }^\circ\text{C}$ erhöhter Temperatur.

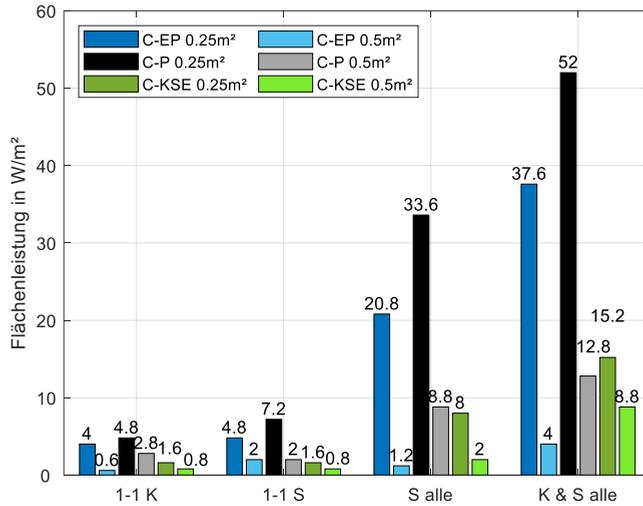


Bild 7 Geometrieinfluss auf die Flächenleistung im Gesamtsystem

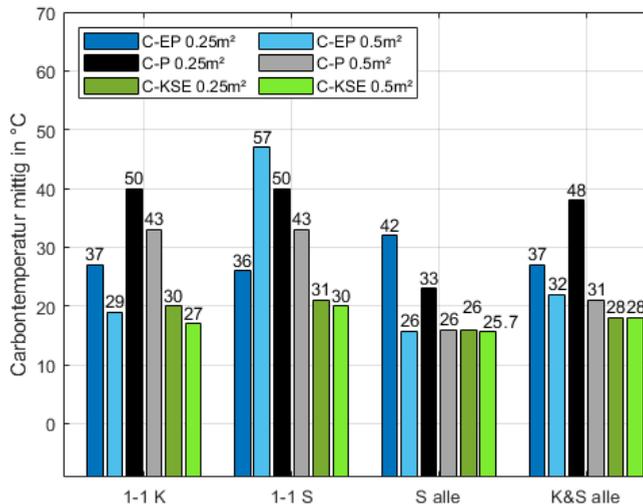


Bild 8 Geometrieinfluss auf die Carbontemperatur im Gesamtsystem

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Einflussfaktoren elektrisch beheizter Carbonbewehrung, wie die elektrischen Materialeigenschaften und der Geometrieinfluss hinsichtlich Rovingachsabstand, Knotenpunkte, Gelegegröße, wie auch die Wärmeverteilung in Kett- und Schussrichtung quantifiziert. Die zentralen Ergebnisse dieser Untersuchung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die spezifischen Carbonwiderstände konnten für die untersuchten Carbonbewehrungen C-EP, C-P, C-U, C-A und C-KSE ermittelt werden. Zwischen dem Spannungs- und Temperaturanstieg konnte ein lineares Verhältnis bestimmt werden. Die Untersuchung zeigt, dass als Haupteinflussfaktor für den spez. Widerstand das Tränkungsmedium wirkt.

- Die Untersuchung zeigt eine Hotspot-Wärmeentwicklung bei einer Kontaktierung einzelner Fasersträngen im Gelege und eine Reduzierung der Temperatur an den Knotenpunkten. Die Stromleitung durch beide Enden eines Faserstrangs ermöglichten eine konstante Wärmeverteilung, welches durch den Einsatz einer Kontaktierung mittels Stahlschne am gesamten Gelege umgesetzt werden konnte.
- Eine Vergrößerung der Gelegegeometrie in Kettrichtung führt zu einer Reduzierung der Flächenleistung und einhergehend auch der Carbontemperatur. Mit steigender Anzahl an Stromeinleitungspunkten an den Fasersträngen wird die Flächenleistung erhöht.

In zukünftigen Untersuchungen soll der Einfluss der elektrischen Erwärmung auf die Festigkeitsentwicklung im Verbundwerkstoff mit Beton in Hinblick auf die Hydratation und Rissbildung untersucht werden. Dabei werden der Einfluss unterschiedlicher Bewehrungsmaterialien, Temperaturentwicklungen, Stromflüsse, Stromversorgungszeit und Umgebungstemperaturen analysiert.

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 Cleven Bauunternehmung GmbH & Co. KG.

5 Quellen

- [1] *Asgharzadeh, A.*: Durability of polymer impregnated carbon textiles as CP anode for reinforced concrete. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. (2019). <https://doi.org/10.18154/RWTH-2019-05559>.
- [2] *Dahlhoff, A.; Morales Cruz, C.; Raupach, M.*: Influence of Selected Impregnation Materials on the Tensile Strength for Carbon Textile Reinforced Concrete at Elevated Temperatures. *Buildings* (2022), 12, S. 2177. <https://doi.org/10.3390/buildings12122177>.
- [3] *Krois, K.* 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.*: Carbonfasern: Herstellung, Anwendung, Verarbeitung. München, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG (2019).
- [5] *Driessen, C.; Raupach, M.*: SMART DECK – Ein multifunktionaler Brückenbelag aus Textiltbeton. *Bautechnik* (2016), 2, S. 102-104. <https://doi.org/10.1002/bate.201500110>.
- [6] *Driessen-Ohlenforst, C.*: SMART-DECK: Multifunctional carbon-reinforced concrete interlayer for bridges. In: *Materials and Corrosion* (2020), 5, S. 786-796. <https://doi.org/10.1002/maco.202011540>.
- [7] *Hegler, S.; Seiler, P.; Dinkelaker, M.; Schladitz, F.; Plettemeier, D.*: Electrical Material Properties of Carbon Reinforced Concrete. In: *Electronics* (2020), 5. <https://doi.org/10.3390/electronics9050857>.
- [8] *Bosowski-Schönberg, P.; Callhoff, C.; Grimmelsmann, N.; Ehrmann, A.*: Methoden zur Kontaktierung elektrischer SMD-Bauelementen in smarten technischen Textilien. In: *ThGOT*, submitted (2017).
- [9] *Saidi, M.; Gabor, A.*: Experimental analysis of the tensile behaviour of textile reinforced cementitious matrix composites using distributed fibre optic sensing (DFOS) technology. In: *Construction and Building Materials* (2020), S. 117027. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117027>.
- [10] *Saidi, M.; Gabor, A.*: Use of distributed optical fibre as a strain sensor in textile reinforced cementitious matrix composites. In: *Measurement* (2019), S. 323-333. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.03.047>.
- [11] *Goldfeld, Y.; Perry, G.*: Electrical characterization of smart sensorysystem using carbon based textile reinforced concrete for leakage detection. In: *Materials and Structures* (2018), 6, S. 170. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1296-7>.
- [12] *Bahrar, M.; Djamai, Z. I.; El Mankibi, M.; Si Larbi A.; Salvia, M.*: Numerical and experimental study on the use of microencapsulated phase change materials (PCMs) in textile reinforced

- concrete panels for energy storage. In: Sustainable Cities and Society (2018), S. 455-468. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.014>.
- [13] *Söhnchen, A.*: Wand- und Bodenelemente aus Carbonbeton mit integrierter Heizfunktion. 11. Carbon- und Textilbetontage. Schön, K.; Lieboldt, M., C³ - Carbon Concrete Composite e.V., Dresden, (2019), S. 112-113.
- [14] *Hemmen, A.*: Direktbestromung von Kohlenstofffasern zur Minimierung von Zykluszeit und Energieaufwand bei der Herstellung von Karbonbauteilen. Dissertation, Universität Augsburg (2016).
- [15] *Hasan, M.; Offermann, M.; Haupt, M.; Nocke, A.; Cherif, C.*: Carbon filament yarn-based hybrid yarn for the heating of textile-reinforced concrete. In: Journal of Industrial Textiles (2014), 2, S. 183-197. <https://doi.org/10.1177/1528083713480380>.
- [16] *Schladitz, F.; Lägél, E.; Ehlig, D.; Nietner, L.; Tietze, M.*: 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, (2019), S. 486-492. <https://doi.org/10.2749/newyork.2019.0486>.
- [17] *Tröger, F.; Große, S.; Rudloff, T.; Heibold, T.*: 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] *Dahlhoff, A.; Raupach, M.*: Elektrisch beheizbarer textilbewehrter Carbonbeton. 21. Ibausil – Internationale Baustofftagung. Weimar, 13.09.-15.09.2023. WBA Bauhaus Weiterbildungsakademie Weimar e.V., F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde (2023).
- [19] *Gerlach, F.; Ahlborn, K.; Wolf, B.; Hoffmann, K.; Vonau, W.*: Applikation textiler Flächenelektroden zur Zustandsüberwachung und Sanierung von Baukörpern. 18. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2016. Nürnberg, (2016), S. 493-499. <https://doi.org/10.5162/sensoren2016/6.4.1>.
- [20] *Lenting, M.; Orłowsky, J.*: Einaxiale Zugversuche an textilbewehrten Betonen mit anorganisch getränkten Carbonfasern. Beton-und Stahlbetonbau (2020), 7, S. 495-503. <https://doi.org/10.1002/best.201900062>.
- [21] *Technisches Produktdatenblatt* - solidian Place: <https://solidian.com/de/downloads-de/> [accessed on: 17.04.2023]
- [22] *Technisches Produktdatenblatt* - Hitexbau Place: <https://www.hitexbau.com/menu/products/> [accessed on: 17.04.2023]