

Applikation textiler Flächenelektroden zur Zustandsüberwachung und Sanierung von Baukörpern

Frank Gerlach¹, Kristina Ahlborn¹, Birgit Wolf², Kirstin Hoffmann², Winfried Vonau¹

¹ Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e.V. Meinsberg (KSI)

Kurt-Schwabe-Straße 4, 04736 Waldheim, Deutschland

² Institut für Textil- und Ledertechnik (ITL),

Klinkhardtstraße 30, 08468 Reichenbach, Deutschland

gerlach@ksi-meinsberg.de

Zusammenfassung

Textile Carbon-Flächenelektroden ermöglichen ein Online-Monitoring von Baukörpern und eine aktive Nutzung im Rahmen von elektrochemisch gestützten Sanierungskonzepten. Dieser Beitrag stellt die Entwicklung und die Herstellung von neuartigen, textilen Carbon-Flächenelektroden sowie deren elektrochemische Charakterisierungsmöglichkeiten auf der Basis elektrochemischer Impedanzspektroskopie und anderer potenziodynamischer Methoden vor. Darüber hinaus wird die Praktikabilität der Methodik in Modellversuchen nachgewiesen. Ziel des Einsatzes von textilen Carbon-Flächenelektroden ist es, neben einer umfangreichen elektrochemischen Zustandsanalyse von Baukörpern, potenziellen technischen Textilien, wie Putzarmierungsgeweben, zusätzliche sensorische Funktionalitäten zu verleihen und diese in verschiedenen Einsatzkonzepten für das Langzeitmonitoring und die Baukörpersanierung zu nutzen.

Keywords: Carbon-Flächenelektroden, Textile Elektroden, potenziodynamische Methoden, elektrochemische Impedanzspektroskopie, Bauwerksmonitoring

Einleitung

Flächenelektroden werden in der Bauwirtschaft zur Sanierung von Baukörpern in Form von Edelstahlgittern eingesetzt [1]. Diese weisen auf Grund ihrer materialtechnischen Eigenschaften unter prozessbedingten, hohen elektrochemischen Belastungen eine frühzeitig einsetzende Korrosion auf, welche zu einer eingeschränkten Lebensdauer der verwendeten Bauteile führt [2]. Darüber hinaus können die Elektroden wegen ihrer nicht vollständig inerten Eigenschaften ungewollt an Reaktionen teilnehmen und Sanierungsprozesse negativ beeinflussen. Deshalb können sie nicht für das Monitoring von Baukörpern eingesetzt werden.

Ebenfalls in der Praxis verwendete zylindrische Elektroden aus unterschiedlichen Werkstoffen z.B. Edelstahl, Titan oder beschichteten Materialien führen wiederum zu inhomogenen elektrischen Feldlinienverläufen im Baukörper, die unerwünschte Effekte, wie z.B. Salzausblühungen zur Folge haben bzw. die Verfahrenseffektivität nach einer gewissen Zeit reduzieren. Damit sind kommerziell verfügbare Elektroden für die Bauzustandskontrolle i.d.R. nicht vorteilhaft.

Um o.g. Nachteile in der Praxis zu vermeiden, wurden geeignete Fertigungstechnologien zur Herstellung neuartiger, textiler Flächenelektroden auf der Basis von Carbonfasern für elektrochemische Applikationen zur Zustandskontrolle von Baukörpern und deren Sanierung entwickelt.

Textile Carbonfasern werden gegenwärtig immer häufiger als Hochleistungsverbundwerkstoffe genutzt und finden in vielen Industriezweigen Anwendung, wie z.B. der Luftfahrtindustrie, dem Maschinenbau, der Automobilindustrie, dem Schiffbau, der Medizintechnik und der Sportartikelindustrie [3]. Dabei können sie einzeln oder auch im Verbund mit Begleitmaterialien, wie z.B. Glas-, Polyamid- oder Aramidfasern eingebracht werden.

Für die Bauindustrie werden beispielsweise auf Carbonfasern basierende Fassaden-dämmsysteme angeboten. Kommerzielle Armierungsgewebe dienen vorwiegend dem Ziel, eine effektive Erhöhung des Risswiderstandes im Putz zu erzielen und die mechanische Festigkeit der Bauwerksoberfläche zu verbessern. Darüber hinaus haben sich Carbonfasern bereits als textiles Flächenelement in Form von Bewehrungsstrukturen für den Carbonbetonbau zur signifikanten Er-

höhung der Tragfähigkeit von Textilbeton bewährt.

Hierbei zeichnet es sich durch seine überragenden mechanischen Eigenschaften und auf Grund des inerten Materialverhaltens durch seine Korrosionsstabilität gegenüber bautechnischen Einflüssen aus. Letztere bilden die Grundlage für den Einsatz als aktive Elektroden im Rahmen unterschiedlicher elektrochemischer Applikationen. Es wurden verschiedene textiltechnische Herstellungsverfahren wie z.B. Weben, Stricken und Legetechnik geprüft, um ein Optimum zwischen elektrochemischen Elektroden Eigenschaften und marktüblichen Kostenstrukturen zu erreichen. Erste Untersuchungen mit kommerziell verfügbaren Carbonrovings unterschiedlicher Hersteller und Qualitäten konnten die prinzipielle funktionelle und technische Eignung nachweisen.

Experimentelles

Materialien

Textile Carbon-Flächenelektroden basieren auf kommerziell verfügbaren Carbonrovings, welche gemeinsam mit Begleitmaterialien in die Gewebestrukturen eingebracht werden. Die zu untersuchenden Carbonrovings (Tab.1) wurden nach Verfügbarkeit, technischen Anforderungen und technologisch begründeten Verarbeitungspunkten ausgewählt.

Tab. 1: untersuchte Carbonrovings

Handelsname	Filamentzahl	Garnfeinheit [tex]
NF-24	24.000	1.600
UMS-12000	12.000	385
IMS-12000	12.000	385
NF-6	6.000	400
NF-12	12.000	800
Tenax-J UMS40 F23 24K 800tex	24.000	800
Tenax-E HTS40 F13 12K 800tex	12.000	800
Tenax-E HTA40 E13 6K 400tex	6.000	400
Tenax HTA40 E13 3K 200 tex 15Z	3.000	200
Tenax-J HTA40 F15 1K 67tex	1.000	67
Torayca® T300	1.000	66
Pyrofil™ TR30S	3.000	200
Pyrofil™ TR50S	6.000	400

Für eine gute Verarbeitbarkeit sollten die einzusetzenden Kohlenstofffasern bestimmte zusätzliche Anforderungen wie gleichmäßige Oberfläche, keine Filamentbrüche und keine

großen Schwankungen in der jeweiligen Fadenfeinheit besitzen.

Herstellung von Carbon-Flächenelektroden

Neben der Umsetzung der klassischen Leinwandbindung mit Fadendreher der Kettfäden für Armierungsgewebe wurde die Realisierbarkeit von Applikationen mittels Strickverfahren und der Legetechnik mit dem Stickverfahren geprüft.

Dabei müssen praxistaugliche Mindestanforderungen an die Parameter der Flächenstabilität, der Flächenporosität und der Textilveredlung erfüllt werden. Zu diesen Parametern gehören:

- Reißfestigkeit mind. 1750N / 5cm,
- Reißfestigkeit nach 28-tägiger Lagerung in 5 %iger NaOH mind. 850 N / 5 cm,
- Reißfestigkeit nach 6-stündiger Lagerung in alkalischer Lösung mind. 750 N / 5 cm,
- Garnfeinheit 68 tex bis 272 tex für Kettfaden, 68 bis 2400tex für Schussfaden,
- Porenfläche zwischen 16 mm² und 400 mm²
- Alkaliresistent
- Schlichteanteil max. 60 % Masseanteil

Die Auswahl der Schlichte erfolgt mit dem Ziel, ein Herabsetzen des elektrischen Flächenwiderstands zu verhindern und dabei ein optimales Verhältnis der auf die Flächenstabilität wirkenden Anteile in der Schlichte zu den, die elektrischen Leitfähigkeit beeinflussenden Anteilen, einzustellen. Des Weiteren muss die Textilveredlung mit der herstellungsbedingten Schlichte des Carbons eine sichere Verbindung aufweisen, ohne eine Ablösung oder Beeinflussung der Funktionen durch chemische Wechselwirkungen hervorzurufen. Die hierzu verwendeten kommerziellen Glasfaserarmierungsgewebe besitzen einen unterschiedlichen Carbonfaseranteil und wurden am ITL mit graphithaltigen herkömmlichen Latexdispersionen mittels Laborfoulard beschichtet.

Physikalische Charakterisierung

Die physikalische Charakterisierung beschränkte sich hinsichtlich der sensorischen Eigenschaften auf die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeiten der Carbonrovings und der daraus hergestellten textilen Flächenelektroden. Hierzu diente eine neu entwickelte Vierelektroden-Messanordnung zur Bestimmung des elektrischen Widerstandes mittels einer RCL-Messbrücke PM6306 der Fa. Fluke (Abb. 1). Diese Anordnung hat den Vorteil, dass stromführende und spannungsabgreifende Kontakte getrennt und keine störenden Spannungsabfälle an den potenzialbildenden Elektroden zu verzeichnen sind. Die Carbon-

rovings wurden gespannt und durch isolierende Platten fixiert und die Kontaktabnahme mittels Platinblechen realisiert.

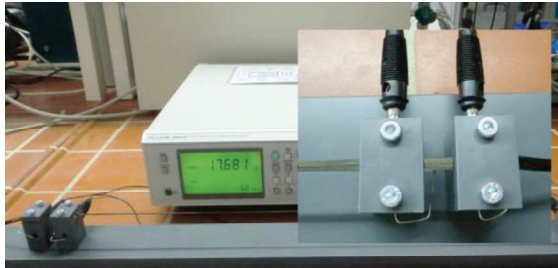


Abb. 1: Widerstandsbestimmung an Carbonrovings mittels RCL-Messbrücke PM6306 Fa. Fluke, ($U=50\text{ mV}$, $f=1\text{ kHz}$)

Adäquat erfolgte die Bestimmung der Leitfähigkeit der textilen Flächenelektroden, wobei die Messanordnung in Abb. 2 an die Größe der Versuchsmuster angepasst werden kann.

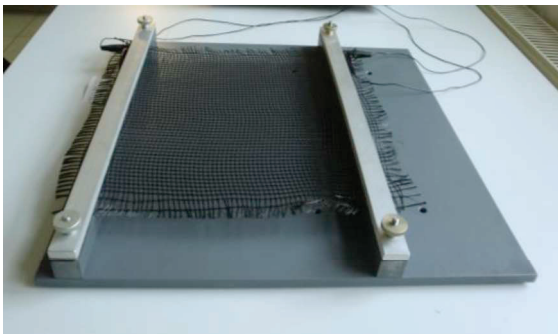


Abb. 2: Widerstandsbestimmung an Carbon-Flächenelektroden mittels RCL-Messbrücke PM6306 Fa. Fluke, ($U=50\text{ mV}$, 1 kHz)

Elektrochemische Charakterisierungsmethoden an Carbonrovings

Die Carbonrovings wurden gemäß Abb. 3 armiert, d.h. hermetisch dicht vergossen und mit Kontaktelementen versehen. Damit sind reproduzierbare Randbedingungen in den Modelllösungen gewährleistet. Die so präparierten Carbonfasern fungierten als Arbeitselektroden in einer Dreielektrodenanordnung. Als Referenzelektrode diente eine KCl-gesättigte Ag/AgCl-Referenzelektrode und als Gegenelektrode ein Platinblech. Die Aufzeichnung der Ruhepotenziale, der Impedanzspektren und der Cyclovoltammogramme erfolgte mit dem elektrochemischen Messsystem Reference 600™ (Gamry Instruments, Warminster, USA).

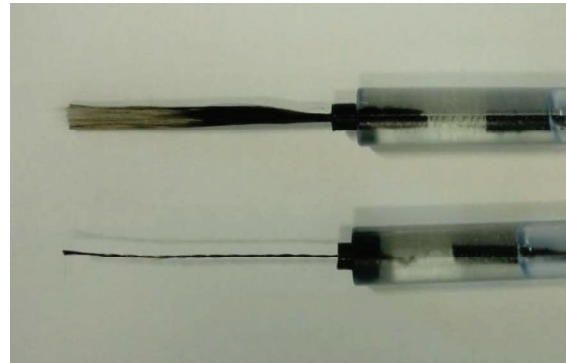


Abb. 3: armierte Carbonrovings als Probekörper für elektrochemische Untersuchungen

Um ein vergleichendes Screening der Ausgangsmaterialien zu ermöglichen, wurde in Abwandlung zu den späteren Einsatzbedingungen als Messmedium eine 0,1 M KCl-Lösung gewählt. Damit sind Beurteilungen künftiger Elektrodeneigenschaften wie Polarisierbarkeit und Langzeitstabilität sowie die Bestimmungen der Materialeitfähigkeiten und Medieneigenschaften möglich.

Elektrochemische Charakterisierungsmethoden an Carbon-Flächenelektroden

In ähnlicher Art und Weise wurden die elektrochemischen Untersuchungen an den Carbon-Flächenelektroden durchgeführt. Dazu diente eine Versuchsanordnung gemäß Abb. 4.



Abb. 4: Versuchsanordnung zur elektrochemischen Charakterisierung von Carbonflächenelektroden

Im Gegensatz zu der Dreielektrodenanordnung zur Rovingcharakterisierung wurde anstelle einer Platin-Gegenelektrode eine Carbon-Flächenelektrode in Leinwandbindung mit einem Flächengewicht von 400 g/m^2 eingesetzt. Als Medium diente auf Grund der großen Flächen und dem relativ geringen Elektroden-

abstand eine 0,01 M KCl-Lösung und deionisiertes Wasser mit KCl-Spuren mit einer spezifischen Leitfähigkeit von ca. 2 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Modellversuche

Um applikationsnahe Bedingungen im Labor nachzustellen, erfolgten die Modellversuche an Vollziegelmauerwerken aus NF Mauerziegel Mz 20 in Mörtelgruppe IIa mit einer Wanddicke von 36,5 cm im Kreuzverband (Abb. 5).



Abb. 5: Modellmauerwerk für Labortests an symmetrisch angeordneten, segmentierten Carbon-Flächenelektroden

Eine durchgehende Kunststoffwanne unter der Mauer gestattet eine effektive Befeuchtung des Mauerwerks oder Teilen davon. Unterschiedliche Carbon-Flächenelektroden, welche symmetrisch zu einer Mittelelektrode aus Edelstahl auf der Maueroberseite angeordnet sind, ermöglichen die Elektrodencharakterisierung, die Charakterisierung des Baukörpers und die Beurteilung der Effizienz elektrochemischer Sanierungsverfahren. Um Fehlerquellen auszuschließen, wurde die Modellmauer mit Polymerfolie abgedeckt, das Areal um die angebrachten Carbon-Flächenelektroden blieb frei. Als elektrochemisches Messsystem diente ein Interface 1000™ (Gamry Instruments, Warminster, USA).

Ergebnisse und Diskussion

Elektrische Widerstände der Carbonrovings und der Carbon-Flächenelektroden

Nachfolgende Tabellen geben eine Übersicht der ermittelten Widerstände der Carbonrovings (Tab. 2) und der Carbon-Flächenelektroden (Tab. 3) bei einer Messfrequenz von 1 kHz. Es konnte nachgewiesen werden, dass die aus Gründen der besseren Verarbeitbarkeit vorhandene Apertur der Carbonrovings keine negativen Auswirkungen auf deren elektrische Eigenschaften hat.

Tab. 2: Widerstand der untersuchten Carbonrovings

Handelsname	Widerstand in Ω bei 1 kHz
NF-24	35,3
UMS-12000	44,3
IMS-12000	63,6
NF-6	69,9
NF-12	35,0
Tenax-J UMS40 F23 24K 800tex	23,3
Tenax-E HTS40 F13 12K 800tex	33,4
Tenax-E HTA40 E13 6K 400tex	70,9
Tenax HTA40 E13 3K 200 tex 15Z	142,9
Tenax-J HTA40 F15 1K 67tex	425,6
Torayca® T300	428,4
Pyrofil™ TR30S	129,6
Pyrofil™ TR50S	72,0

Des Weiteren sind die Leitfähigkeiten der Carbonrovings im Wesentlichen von den Gewebefinheiten, wie in Abb. 6 gezeigt, abhängig.

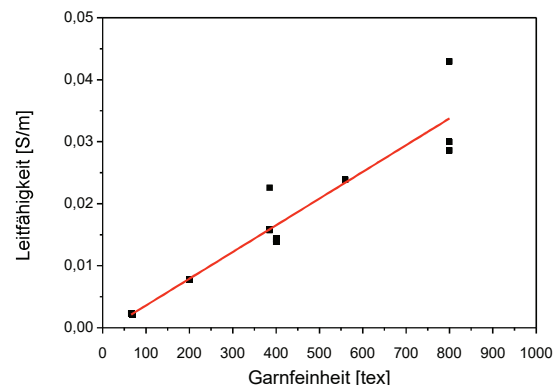


Abb. 6: Abhängigkeit der Leitfähigkeit von Carbonrovings von deren Garnfeinheit

Die mit Graphit beschichteten Mischgewebe aus Glasfaser- und Carbonrovings unterscheiden sich bei dem Carbonfaseranteil in der Summe der Kettfäden (G6 = 33 %, G7 = 17 % und G8 = 7 %). 50 % der Schussfäden wurden in Carbon ausgeführt. Bei der Variante V26 G6 hat sich mit großer Wahrscheinlichkeit die hochmöglichere Graphitbeschichtung bei dem geringeren Abquetschdruck zwischen die Carbonrovings gelegt und erzeugt so, selbst bei höherem Carbonanteil, einen größeren Gesamtwiderstand des Gewebes.

Tab. 3: Widerstände der untersuchten Carbon-Flächengewebe

Gewebe	Laborfoulard Bedingungen	Widerstand in Ω bei 1 kHz
V23 G6	P = 2 bar,	2,3
V24 G7	T = 140 °C,	2,7
V25 G8	t = 2 – 3 min	5,2
V26 G6	P = 0,75 bar,	23,7
V27 G7	T = 160/140 °C,	5,2
V28 G8	t = 2 – 3 min	5,2

Elektrochemische Charakterisierung der Carbonrovings

Die Ergebnisse von Untersuchungen mit elektrochemischer Impedanzspektroskopie einer Anzahl von Carbonrovings zeigt Abb. 7. Hervorzuheben sind die geringen Polarisationswiderstände, welche aus den erzielten Widerständen bei sehr kleinen Frequenzen ermittelt werden können. Diese sind auf die geringen Durchmesser der Einzelfilamente ($4,8 \mu\text{m} - 9 \mu\text{m}$) und die damit resultierenden großen spezifischen Elektrodenoberflächen zurückzuführen. Ein negativer Einfluss der Apertur der Carbonfasern ist auch hier nicht festzustellen.

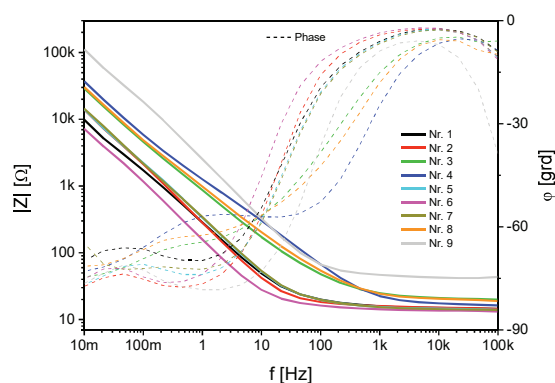


Abb. 7: Impedanzspektren in 0,1 M KCl-Lösung (Arbeitselektrode: Carbonroving, Gegenelektrode: Platinring, Bezugslektrode Ag/AgCl/Cl⁻ (ges.), Amplitude 10 mV)

Mit den ausgewählten Carbonrovings wurden weitere potenziodynamische Untersuchungen durchgeführt. Hierzu erfolgten zykl voltammetrische Messungen und chronoamperometrische Untersuchungen [4]. In Auswertung aller drei Methoden konnten modellhaft Polarisationswiderstände (Abb. 8) für die untersuchten Carbonrovings ermittelt werden. Eine Zuordnung der Tendenzen zu den einzelnen Carbonrovings mit allen angewendeten Messverfahren ist möglich und eignet sich für Screening- und Routineuntersuchungen.

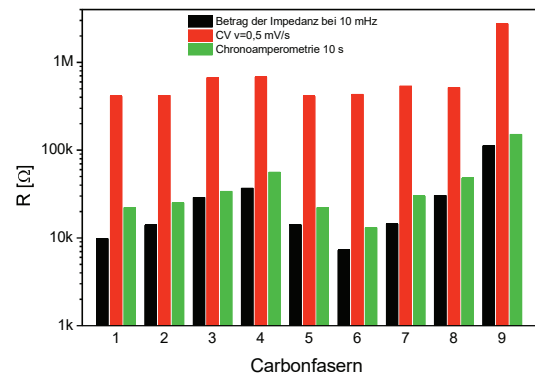


Abb. 8: Vergleich der ermittelten Polarisationswiderstände mittels Impedanzspektroskopie, Zyklischer Voltammetrie und Chronoamperometrie an den Carbonrovings

Die größten Abweichungen der Absolutwerte sind bei der zyklischen Voltammetrie zu verzeichnen, da dieses Verfahren ganz wesentlich von der Scangeschwindigkeit beeinflusst wird.

Elektrochemische Charakterisierung der Carbon-Flächenelektroden

Die Glasfaser-Carbon-Mischgewebe wurden ebenfalls mittels Impedanzspektroskopie (Abb. 9, 10) untersucht.

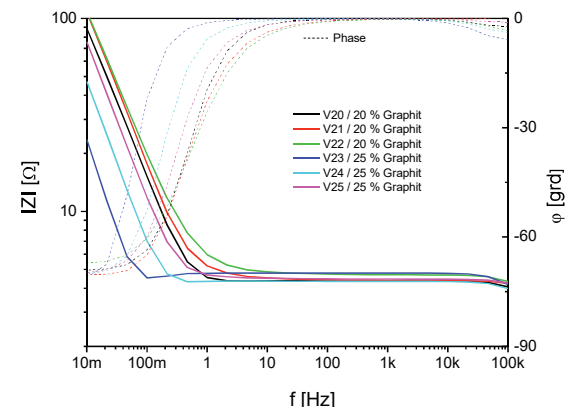


Abb. 9: Impedanzspektren in 0,01 M KCl-Lösung, Amplitude 50 mV (Arbeitselektrode: Carbon-Flächenelektrode, Gegenelektrode: Carbonelektrode in Leinwandbindung, Bezugslektrode Ag/AgCl/Cl⁻ (ges.))

Dabei erforderte die enormen spezifischen Oberflächen der Carbon-Flächenelektroden und der Carbon-Gegenelektrode sowie der geringe Abstand von 15 mm zwischen beiden Elektroden, die Verwendung von einer 0,01 M KCl-Lösung und entionisierten Wasser (spez. Leitfähigkeit $2 \mu\text{S/cm}$), um die Elektroden-eigenschaften umfassend zu charakterisieren. Aus den Impedanzspektren in 0,01 M KCl-Lösung lassen sich näherungsweise die Elek-

trodeneigenschaften der Carbon-Flächenelektroden ableiten. Deutlich sind die Unterschiede des Polarisationswiderstandes in Abhängigkeit vom Carbonanteil im Gewebe nachweisbar.

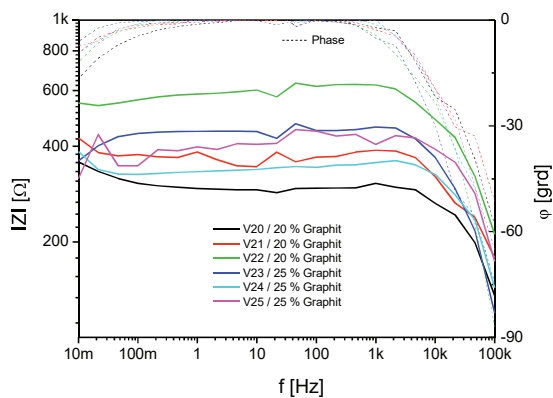


Abb. 10: Impedanzspektren in deionisiertem Wasser mit KCL-Spuren ($2 \mu\text{S/cm}$) (Arbeitselektrode: Carbon-Flächenelektrode, Gegenelektrode: Carbonelektrode in Leinwandbindung, Bezugselektrode Ag/AgCl/Cl⁻ (ges.), Amplitude 50 mV)

Bei der Messung im hochohmigen entionisierten Wasser kann, bei gleichzeitiger Kontrolle der Leitfähigkeit, aus den Impedanzspektren (Abb. 10) auf die effektiv wirksame Elektrodenoberfläche geschlossen werden. Auch hier ist die Anomalie des Versuchsgewebes 23 nachweisbar. Alle untersuchten Gewebearten mit unterschiedlichem Anteil an Carbonfasern und unterschiedlicher Graphitbeschichtung eignen sich von ihren elektrochemischen Eigenschaften für Applikationen in der Bauindustrie.

Modellversuche im Labormaßstab

Die Durchführung applikationsnaher Modellversuche im Labormaßstab erweist sich als anspruchsvoll, da nicht alle in der Praxis auftretenden möglichen Abhängigkeiten, z.B. Feuchtegehalt oder Salzgehalt im Mauerwerk, simuliert und mittels geeigneter Referenzverfahren kontrolliert werden können. Erschwerend kommt hinzu, dass in der Praxis der Altbauanierung vielfältige Formen von Mischmauerwerk existieren, die im Labor nicht nachgestellt werden können. Die Anordnung der Carbon-Flächenelektroden und des Messpunktes für die Bestimmung der Mauerfeuchte ist in Abb. 11 dargestellt. Die Modellmauer wurde 1 Woche intensiv mit Wasser benetzt und danach der aktive und passive Trocknungsprozess mittels Impedanzspektroskopie und der periodischen Bestimmung der Mauerfeuchte kontrolliert.

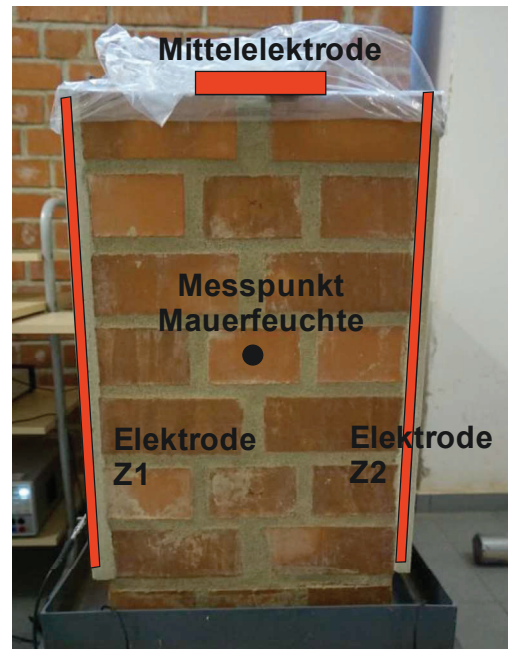


Abb. 11: Schnittdarstellung des Modellmauerwerkes mit Carbon-Flächenelektroden Z1, Z2 und der Anordnung der Mittelelektrode

In vorangegangenen Versuchen mit graphitbeschichteten Elektroden mit einer Länge von 22 cm konnte in einem praxisrelevanten Bereich der Mauerfeuchte eine Korrelation zwischen ausgewählten Werten aus den Impedanzspektren mit den Ergebnissen eines Feuchtemessverfahrens auf Mikrowellenbasis (Abb. 12) festgestellt werden.

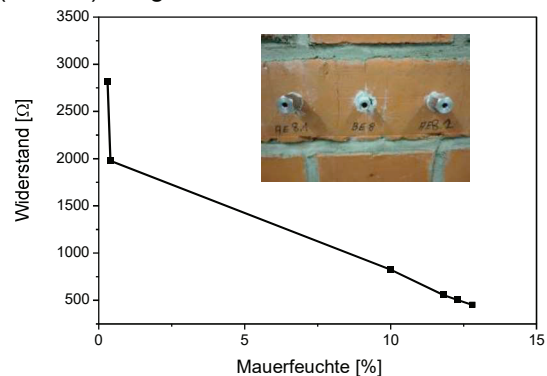


Abb. 12: Korrelation zwischen der Mauerfeuchte (MOIST 300, Messkopf P bis 30 cm Messtiefe, Fa. HF-Sensor GmbH) und der Bestimmung des Widerstandes bei $f=10\text{Hz}$ und $U=10\text{mV}$

Dieses Referenzverfahren wurde ausgewählt, da es das einzige verfügbare, zerstörungsfreie Messverfahren für die Bestimmung der Mauerwerksfeuchte darstellt. Mit der Elektrodenkonfiguration entsprechend Abb. 11 wurden sowohl Messungen des Widerstandes der Carbon-Flächenelektroden Z1 und Z2 zur

Mittelelektrode als auch die Messungen zur Bestimmung der Mauerfeuchte wiederholt (Abb.13).

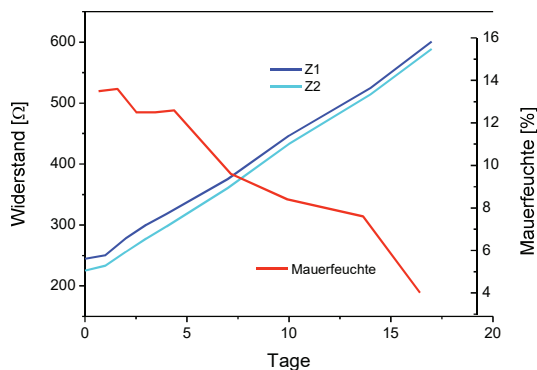


Abb. 13: Messung der Mauerfeuchte (MOIST 210B, Messkopf P bis 30 cm Mess-tiefe, Fa. HF-Sensor GmbH) und Bestimmung des Widerstandes der Carbon-Flächenelektroden Z1 und Z2 zur Mittelelektrode bei $f=10$ Hz und $U=10$ mV

Dabei betragen die Differenzen der Widerstände ca. $10 - 20 \Omega$, dies entspricht 10 % des Gesamtwiderstandes. Damit kann ein gerichteter Trocknungsprozess mit Carbon-Flächenelektroden nachgewiesen werden, welcher durch Differenzen der Oberflächentemperatur der Putzkörper der Elektroden Z1 und Z2 von ca. 1 K, die durch die zusätzliche Verdunstungskälte feuchter Flächen verursacht wird, gestützt werden. Die Unregelmäßigkeiten in der Messkurve zur Bestimmung der Mauerfeuchte sind auf Messunsicherheiten z.B. unterschiedliche Ankopplung des Messkopfes und punktuell Messen bei der Feuchtebestimmung mittels Mikrowellenverfahren zurückzuführen.

Schlussfolgerungen

Die beteiligten Projektpartner und involvierten Unternehmen entwickeln in unterschiedlichen Herstellungstechnologien Carbon-Flächenelektroden, die für Applikationen im Rahmen des Gebäudeneubaus und der Altbausanierung geeignet sind, zusätzliche sensorische Funktionen in den Baukörper zu implementieren. Dabei sind Langzeitüberwachungen, elektrochemisch unterstützte Entfeuchtungen und Entsalzungen möglich. Hierbei zeichnen sich die entwickelten Carbon-Flächenelektroden durch ihr elektrochemisch inertes Verhalten und ihre, durch die Filamentstruktur resultierende, sehr große spezifische Oberfläche aus. Die Ausbildung als Flächenelektrode reduziert die Stromdichten wesentlich und vermeidet damit Polarisierungseffekte an den Elektroden. Durch die sehr großen Elek-

trodenflächen resultiert eine homogene Ausbreitung von elektrischen Feldern, die das lokale Aufkonzentrieren von Mauersalzen im Prozess verhindert. In Zusammenhang mit etablierten, elektrochemisch unterstützten Entsalzungs- und Entfeuchtungsverfahren sind eine höhere Effizienz der Prozesse und längere Standzeiten der Elektroden zu erwarten. Auf Grund der geringen Wechselwirkung mit dem Baukörper eignen sich die Elektrodenkonfigurationen auch für das Langzeitmonitoring wassergefährdeter Einrichtungen.

Danksagung

Das Kooperationsvorhaben „Textile Carbon-Flächenelektroden für elektrochemische Applikationen in der Bauindustrie“ wurde im Rahmen der ZIM-Förderung aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. unter dem Förderkennzeichen KF2218316AG4 gefördert. Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung.

Literaturnachweis

- [1] U.Schneck, H. Grünzig (CITec GmbH), Modellhafte elektrochemische Salzmineralien von Objekten aus Elbsandstein am Dresdner Zwin-ger, *Forschungsprojekt Aktenzeichen 23783-45*, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, (2008).
- [2] W. Vonau, F. Berthold, K. Ahlborn, F. Gerlach, *IMCS 2014, 15th International Meeting on Chemical Sensors*, Buenos Aires, Argentinien, 16.-19.03.2014.
- [3] B. Wohlmann, in „*Handbuch Faserverbund - Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*“, Vieweg+Teubner / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, (2010), Kap. Kohlenstoff-Fasern.
- [4] K. Ahlborn, F. Gerlach, B. Wolf, K. Hoffmann, W. Vonau, *Proceedings 12. Dresdner Sensor-Symposium*, 216-221 (2015); doi: 10.5162/12dss2015/P7.1.