

Impedanzmessungen zum Monitoring von Feuchte und Salz an Bauwerken

Frank LEHMANN, Markus KRÜGER *
* MPA Universität Stuttgart, Stuttgart

Kurzfassung. Die poröse Struktur vieler Baumaterialien hat die Aufnahme von Wasser aus der Luft, dem Boden oder direkt aus Niederschlag zur Folge. Insbesondere in Verbindung mit Salzen kann dies im Material zu Schädigungen führen. Mit Hilfe von instrumentierten, kontinuierlichen elektrischen Impedanzmessungen können Feuchteänderungen im Material festgestellt werden. Die Installation mehrerer räumlich verteilter Sensoren ermöglicht das Nachvollziehen von Transportwegen und damit Rückschlüsse auf die Quellen. Ein drahtloses Messsystem zum Monitoring der Impedanz wird vorgestellt und die praktische Anwendung an einem Bauwerk präsentiert.

Einführung

Der Großteil tragender Baumaterialien, also Beton, Ziegel und Naturstein, kann durch dessen poröse Struktur Wasser aufnehmen. Als Feuchtequelle agieren dazu nicht nur direkter Schlagregen und die kapillare Wasseraufnahme aus dem Boden, sondern auch die Luftfeuchte. Die Menge des aufgenommenen Wassers hängt neben dem Wasserangebot von den Eigenschaften des Porensystems ab, d.h. der absoluten Porosität, der Porenvernetzung, den Porengrößen, der Benetzbarkeit, etc.



Abb. 1. Erodierter Sandstein.

Das Porenwasser kann in Verbindung mit weiteren Einflüssen zu Schädigungen des umgebenden Materials führen (Abb. 1), beispielsweise zu Materialverlust durch Auswaschung oder Abplatzungen beim Gefrieren. Eine Vielzahl an Schäden ist jedoch auf die Kristallisation von Salzen zurückzuführen, die zunächst in gelöster Form im Porenraum vorhanden sind bzw. transportiert werden können. Dabei kann zwischen drei Phasen unterschieden werden, die mit zunehmendem Wasserangebot durchschritten werden. Vom trockenen Zustand bis zu einer charakteristischen Feuchte liegen die Salze ausschließlich in kristalliner Form vor. Die sogenannte Deliqueszenzfeuchte, ab der Salze beginnen Feuchtigkeit aufzunehmen, ist z.B. für Natriumchlorid bei ca. 75 % relativer Luftfeuchte erreicht. Andere Salze und vor allem Salzgemische können deutlich geringere Deliqueszenzfeuchten aufweisen, oberhalb derer sie komplett in Lösung übergehen. Phase 2 beschreibt den Bereich, in dem die Salze zwar gelöst sind, jedoch noch kein ausreichender Flüssigkeitstransport aufgrund nicht hinreichend hohem und durchgängig vorhandenem Gehalt an freiem Wasser in den Poren besteht, um die Salze transportieren zu können. In Phase 3 schlussendlich ist so viel Wasser im Porensystem vorhanden, dass sich die Salzionen innerhalb des Porensystems bewegen können. Die Grenze ist abhängig von den Porengrößen, aber definitiv überschritten bei kapillarem Saugen von Wasser aus dem Boden.

In Phase 1 liegen die Salze in ihrer auskristallisierten Form vor und stellen an sich keine Gefährdung dar, solange kein Übergang zu Stufe 2 oder 3 stattfindet. In Phase 2 besteht ein gewisses Gefährdungspotential, da durch den Zyklus von Kristallisation und Auflösung Schäden am Material und geringfügige lokal begrenzte Salztransportvorgänge auftreten können. Jedoch kommt hier kein zusätzliches Salz in die Kristallisationszone nach, wodurch die Schadensakkumulation begrenzt ist. In Phase 3 kann sich zusätzliches Salz im Verdunstungsbereich ablagern, was zu höheren Sättigungen oder gar Übersättigungen der Lösung führt und dadurch sukzessiv über die Zeit deutlich mehr Schaden verursachen kann. Für die Bewertung eines Bauteils oder Materials ist es daher wichtig diese Feuchteübergänge zu erkennen.

Zwar ist es möglich bei wiederkehrenden Prüfungen die Materialfeuchte zu bestimmen, es existiert aber kein standardmäßig eingesetztes Verfahren, mit dem kontinuierlich die Feuchteänderungen innerhalb eines Bauteils überwacht werden können. Ebenso kann die absolute Salzbelastung des Materials, sowie die darin vorhandenen Ionenarten im Labor eindeutig bestimmt werden. Aussagen zum Kristallisationszustand und zu Kristallisationszyklen vor Ort sind damit aber nicht möglich, da die Information der Salzkonzentration im Material von dessen Feuchtegehalt entkoppelt ist. Zudem ist für jede dieser Messungen ein zerstörender Eingriff in die Bausubstanz notwendig, was nicht nur personellen Aufwand bedeutet, sondern insbesondere im Fall von denkmalgeschützten Gebäuden auch eine besondere Problematik darstellt.

Die elektrische Impedanz kann als Indikator für Feuchteänderungen poröser Materialien dienen. Sie beschreibt den Kehrwert der Wechselstromleitfähigkeit der untersuchten Materialien. Da die hier betrachteten porösen Baumaterialien an sich Nichtleiter sind, wird deren Leitfähigkeit hauptsächlich durch das Porensystem und den darin enthaltenen Elektrolyten bestimmt. Sie steigt mit zunehmender Materialfeuchte und Salzkonzentration, was einem Absinken der Impedanz entspricht. Obwohl es derzeit mit Hilfe von Impedanzmessungen aufgrund dieser Doppelabhängigkeit nicht ohne umfangreiche Kalibrierungsmessungen möglich ist Aussagen zum Absolutwert der Materialfeuchte (z.B. in m-% Wasseranteil) zu treffen, kann eine instrumentierte, kontinuierliche Überwachung für die Erkennung und Analyse von Feuchte- und damit auch Salzbewegungen hilfreich sein. Es gilt dabei zu beachten, dass die vorherrschende Temperatur einen großen Einfluss auf die Messungen hat. Bei Messungen außerhalb einer geregelten Laborumgebung ist die Temperatur nahezu immer ein Störfaktor und muss in unmittelbarer Umgebung der Impedanzmessungen erfasst und die Impedanzen damit kompensiert werden.

Messaufbau und Sensorik für das Feuchtemonitoring

Die Messung des elektrischen Widerstands ist beispielsweise in der Geotechnik zur Grundwassererkundung weit verbreitet. Hier wird in der Regel eine Vier-Elektroden-Anordnung für die Messungen gewählt (Abb. 2). Über zwei äußere Elektroden wird dabei ein Strom in den Boden eingespeist. An diesen sogenannten Spannungselektroden bildet sich eine elektrische Doppelschicht aus, mit der die kapazitiven und resistiven Verluste am Übergang zwischen Elektrode und umgebenden Material beschrieben werden. An zwei Potentialelektroden im Bereich zwischen den äußeren Elektroden wird der Spannungsabfall im Material erfasst ($U_4(t)$ in Abb. 2). Die Impedanz ergibt sich aus dem Verhältnis von gemessener Spannung zum Strom.

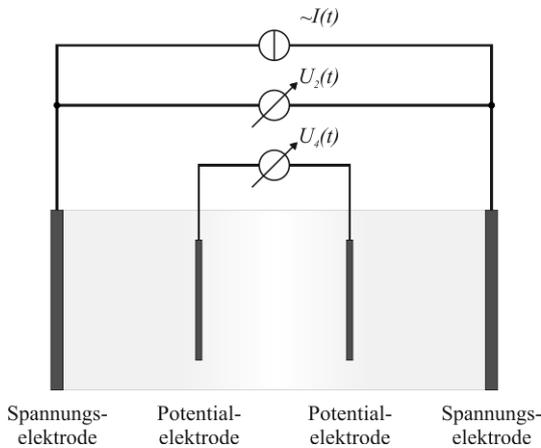


Abb. 2. Vier- und Zwei-Elektroden-Anordnung.

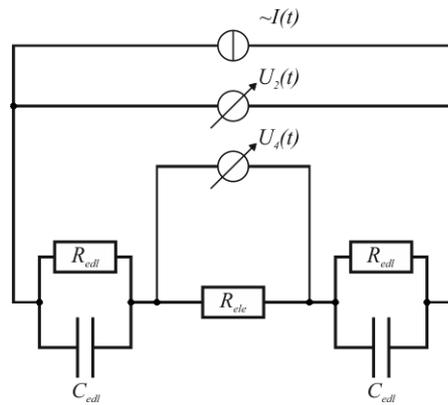


Abb. 3. Einfaches Ersatzschaltbild.

Die Vier-Elektroden-Anordnung wird auch für die Messung von Materialimpedanzen im Labor angewandt, z.B. für verschiedene Natur- und Kunststeine in [1]. Der Vorteil bei dieser Elektrodenanordnung ist, dass der Potentialabfall an der Elektrode nicht mit in die Messungen einfließt. Für die instrumentierte, kontinuierliche Impedanzmessung am Bauwerk müssen dazu noch weitere Punkte berücksichtigt werden, wodurch eine Anordnung mit nur zwei Elektroden sinnvoll wird. Da die Messungen häufig an denkmalgeschützten Gebäuden durchgeführt werden, ist eine geringere Anzahl von Bohrlöchern für die Elektroden vorteilhaft. Zudem verringert sich der Installationsaufwand. Aus ästhetischen Gründen ist des Weiteren häufig der Wunsch nach einem möglichst kleinen Messgerät gegeben. Bei einer Zwei-Elektroden-Anordnung fallen mit den Potentialelektroden auch deren separate Messleitungen weg, was eine kompaktere Bauform des Messgeräts ermöglicht. Die Spannung wird dann zwischen den äußeren Elektroden ermittelt ($U_2(t)$ in Abb. 2), wobei dann der Spannungsabfall an beiden Elektroden in den Impedanzmessungen enthalten ist.

Um den Einfluss der Doppelschicht möglichst gering zu halten, kann die Messfrequenz erhöht, die effektive Elektrodenfläche maximiert oder der Elektrodenabstand vergrößert werden. Diese drei Möglichkeiten ergeben sich aus dem einfachen Ersatzschaltbild für das Gesamtsystem (Abb. 3). Die Doppelschicht an den Spannungselektroden ist hier als Parallelschaltung von Widerstand (R_{edl}) und Kondensator (C_{edl}) idealisiert, der Elektrolyt als einfacher Widerstand (R_{ele}). Die Impedanz für eine Zwei-Elektroden-Anordnung ergibt sich damit zu

$$Z = 2 \cdot Z_{edl} + Z_{ele} = 2 \cdot \left[\frac{1}{R_{edl}} + i\omega C_{edl} \right]^{-1} + R_{ele}$$

Durch eine Vergrößerung des Elektrodenabstands steigt der Einfluss des Elektrolyten (Z_{ele}) auf die Gesamtimpedanz (Z). Der maximal mögliche Abstand ergibt sich aus den

Grenzen des Messgeräts. Eine Erhöhung der Messfrequenz ($\sim\omega$) reduziert direkt den anteiligen Term der Doppelschicht (Z_{edl}). In der Literatur finden sich Angaben für die Wahl eines unteren Grenzwerts der Messfrequenz zwischen 100 Hz und 10 kHz. Der Übergangswiderstand verringert sich mit Zunahme der Elektrodenoberfläche, was ebenso eine Verkleinerung der Doppelschichtimpedanz nach sich zieht. Wichtig ist bei diesem Punkt, dass hier die effektive, nicht die scheinbare Elektrodenoberfläche zu betrachten ist, d.h. die Fläche auf mikroskopischem Level (siehe z.B. [2]). Die Wahl eines rauen Materials für die Elektroden ist somit vorteilhaft.

Für die Wahl von geeigneten Elektroden ist aber nicht nur die effektive Oberfläche entscheidend, sondern auch die mechanische Stabilität der Installation, der Anpressdruck, die Dauerhaftigkeit der Elektroden und die Reproduzierbarkeit der Ankopplung. Speziell für Anwendungsgebiete an denkmalgeschützten Bauten und Strukturen ist auch die Möglichkeit der rückstandslosen Entfernung zu berücksichtigen. Es hat sich gezeigt [3], dass leitfähige Silikonschläuche mit vernickelten Graphitpartikeln (NiC) diese Anforderungen erfüllen (Abb. 4 und Abb. 5). Für die Installation der Elektroden werden in das zu untersuchende Material zwei Bohrlöcher eingebracht und gesäubert. Das dabei anfallende Bohrmehl kann idealerweise für eine Salzanalyse verwendet werden. In diese Bohrlöcher wird je ein NiC-Schlauch in beliebige Tiefe eingesteckt. Nachfolgend wird durch das Eindrehen einer Maschinenschraube sowohl eine stabile Anpressung des flexiblen Silikonmaterials an die Bohrlochwandung hergestellt, als auch der Schlauch elektrisch leitend kontaktiert (Abb. 6).



Abb. 4. Einzelne NiC-Elektrode mit eingedrehter Maschinenschraube aus Edelstahl.

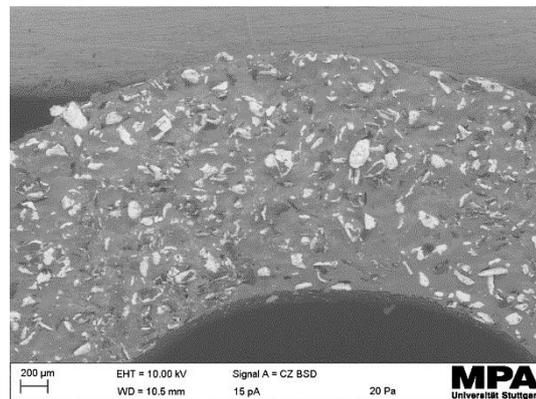


Abb. 5. REM-Aufnahme (BSD) einer angeschnittenen Elektrode. Deutlich zu erkennen sind die vernickelten Graphitpartikel in der Silikonmatrix.



Abb. 6. Installiertes Elektrodenpaar.



Abb. 7. Smartmote^{WS} Messsystem.

Für die hier vorgestellten Messungen wurde das Messsystem Smartmote^{WS} verwendet, mit dem die Materialimpedanz an 6 Messpunkten kontinuierlich autonom gemessen werden kann (Abb. 7). Der Messbereich umfasst Widerstände bis zu ca. 100 M Ω in einem

Frequenzbereich von 100 Hz bis 100 kHz, wobei in den hier abgebildeten Zeitreihen die Impedanz bei 10 kHz dargestellt ist. Als Elektroden wurden die beschriebenen NiC-Elektroden verwendet. Gleichzeitig kann mit dem Messsystem die Materialtemperatur an jeder der sechs Messstellen aufgezeichnet werden, was für eine Temperaturkompensation zwingend notwendig ist. Die Messdaten werden direkt auf einen Server übertragen und sind von dort aus nahezu ohne Zeitverzögerung der Analyse zugänglich.

Anwendungsbeispiel: Messung des Trocknungsverlaufs eines Molassesandsteins

Der Quelltopf der Donauquelle in Donaueschingen ist eingefasst mit 12 Reliefplatten aus Molassesandstein, auf denen ursprünglich je eines der Tierkreiszeichen abgebildet war (Abb. 8). Im Zuge der Restaurierung bzw. einer Neugestaltung des Areals sollen die noch erhaltenen Segmente der historischen Einfassung als konservatorische Maßnahme gefestigt werden. Da der Sandstein eine extrem hohe Durchnässung außerhalb des Anwendungsbereichs handelsüblicher Steinfestiger aufweist, muss der Feuchtegehalt zuvor behutsam auf ein geringeres Niveau abgesenkt werden. Eine schnelle Austrocknung könnte aufgrund der im Stein vorhandenen Salze zu weiteren Schäden führen, daher werden die einzelnen Elemente zunächst ausgebaut und dann lediglich witterungsgeschützt unter Umgebungsbedingungen ausgelagert.

Der Zerfallzustand zweier Elemente ist bereits so weit fortgeschritten, dass hier bereits im Vorfeld ein Komplettaustausch beschlossen wurde. Mit Hilfe von Impedanz- und ergänzenden hygrometrischen Messungen (Abb. 9) kann an diesen Segmenten daher der Trocknungsverlauf überwacht werden, ohne dass der Verlust zusätzlichen Originalmaterials zu beklagen wäre.



Abb. 8. Donauquelle in Donaueschingen mit der Einfassung aus Molassesandstein (1875).



Abb. 9. Installierte Impedanz-, Feuchte- und Temperatursensoren am Element „Schütze“.

Zur Gewinnung von Referenzdaten im ursprünglichen Zustand wurde rund vier Monate vor dem geplanten Abbau ein Messsystem mit je drei Impedanzsensoren auf zwei verschiedenen Höhen am Bauwerk installiert. Gleichzeitig wird damit die Feuchte und Temperatur in fünf Bohrlöchern mit unterschiedlicher Tiefe, sowie der Außenluft aufgezeichnet.

Abb. 10 zeigt den Verlauf der gemessenen Impedanzen über einen Zeitraum von fünf Monaten. Bis zum 21.10. wurden die Messungen im Originalzustand des Bauwerks durchgeführt, gefolgt von Ausbau und Auslagerung der Reliefplatten. Aus Vergleichsmessungen ist bekannt, dass mit dem hier verwendeten System bei wassergesättigtem Sandstein ohne Salzbelastung die Impedanzen im Bereich von ca. 10 k Ω liegen. Die deutlich niedrigeren Werte weisen damit auf eine Salzbelastung des Molassesandsteins hin, was mit den Analysen des Bohrmehls übereinstimmt. Die zwei oberflächennahen Sensoren in 10 mm Tiefe können nicht für diese Einschätzung verwendet werden, da das Material hier nicht wassergesättigt ist.

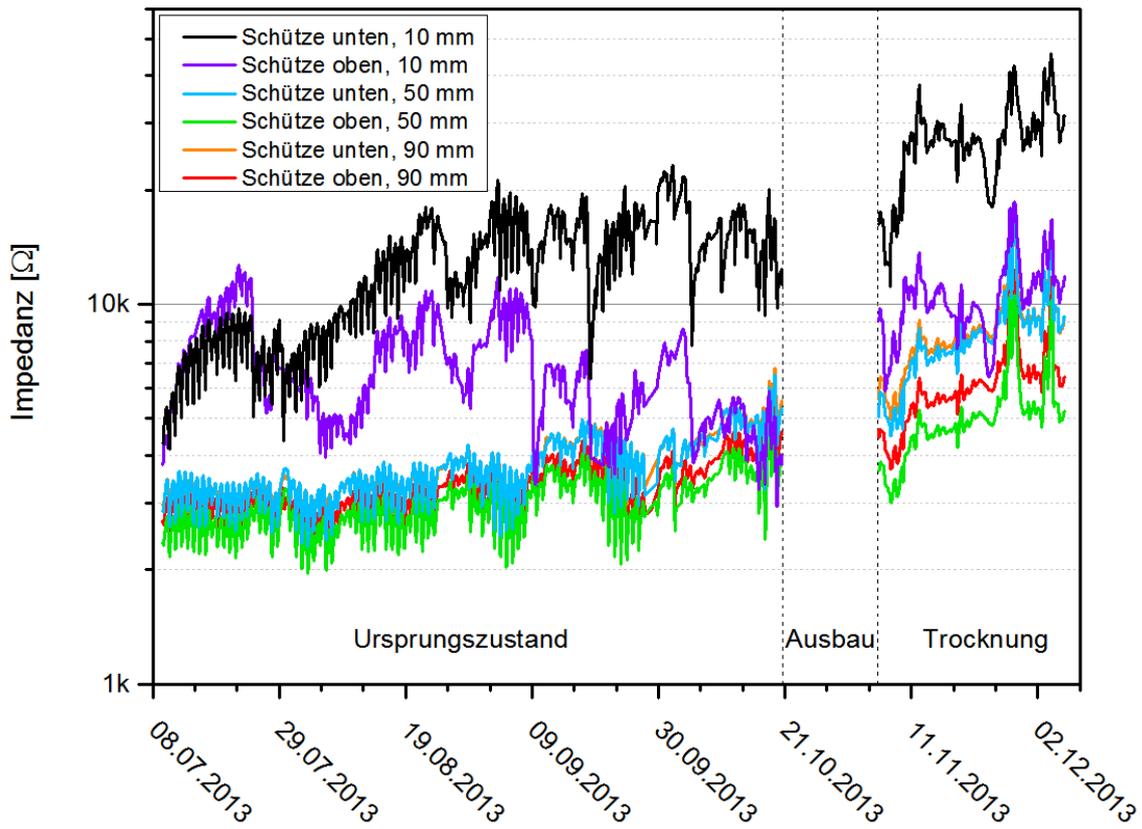


Abb. 10. Originaldaten der Impedanzmessung am Sandstein über einen Zeitraum von fünf Monaten.

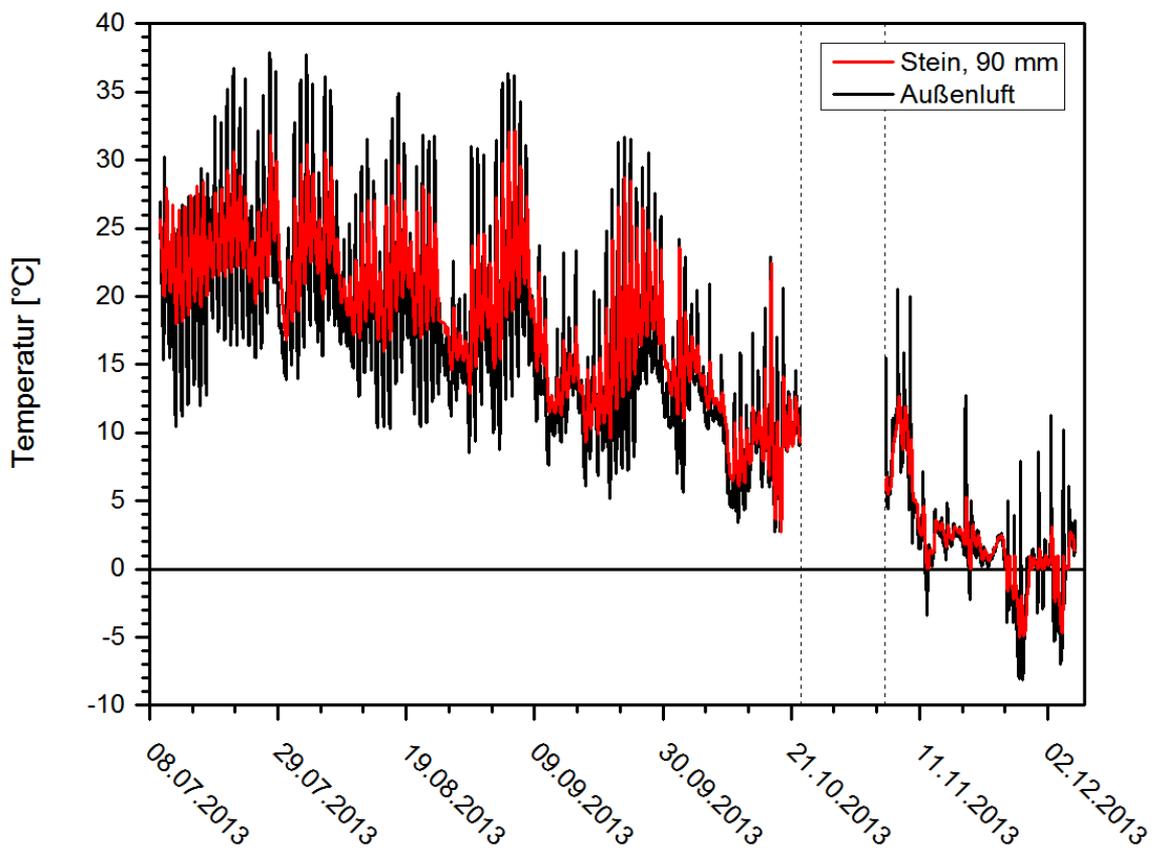


Abb. 11. Temperaturdaten der hygrischen Messungen für die Außenluft und in 90 mm Tiefe.

Klar zu erkennen sind über den gesamten Messzeitraum die Schwankungen, die auf die Temperatur zurückzuführen sind. In Abb. 11 sind die zeitgleich aufgenommenen Temperaturdaten für die Außenluft (direkte Sonneneinstrahlung) und ein Bohrloch mit 90 mm Tiefe dargestellt. Es wird deutlich, dass sich sowohl die täglichen Temperaturzyklen, als auch der jahreszeitliche Trend in den Impedanzdaten widerspiegelt. Dabei bedeutet ein Absinken der Temperatur einen Anstieg der Impedanz, ähnlich dem Einfluss von Wasser. Es ist jedoch beispielsweise mit Hilfe einer Arrhenius-Funktion möglich, die Temperatur aus den Impedanzmessungen herauszurechnen. Dafür wird die Impedanz über die jeweils zeitgleich ermittelte Temperatur aufgetragen und eine Ausgleichsfunktion in der Form

$$Z = A \cdot e^{\frac{B}{T}}$$

durch die Punkte gelegt. Dabei sind Z die Impedanz, T die absolute Temperatur und A und B die Kurvenparameter. Der Ausdruck zur Ermittlung der Impedanz bei einer beliebigen Referenztemperatur ergibt sich aus obiger Formel zu

$$Z = Z_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

mit der Impedanz Z bei der Referenztemperatur T für die gemessene Impedanz Z_0 bei der gemessenen Temperatur T_0 und dem Parameter B wie in der Ausgleichsfunktion ermittelt.

Frühere Messungen haben gezeigt [4], dass die Temperatursgleichung stark abhängig vom Feuchtegehalt des Materials ist. Der hier gezeigte Ansatz beruht daher auf der - meist fälschlichen - Annahme, dass über den Messzeitraum die Materialfeuchte im Mittel konstant bleibt. Für die Erstellung der Ausgleichsfunktion und die Ermittlung der Funktionsparameter muss aus diesem Grund ein hinreichend langer zeitlicher Abschnitt mit annähernd konstanter Materialfeuchte gewählt werden. Eine Möglichkeit zur Überprüfung der Auswahl ergibt sich im Nachhinein aus den kompensierten Messdaten durch die weitestgehende Elimination der Tagesgänge im Impedanzverlauf (untere Kurven in Abb. 12).

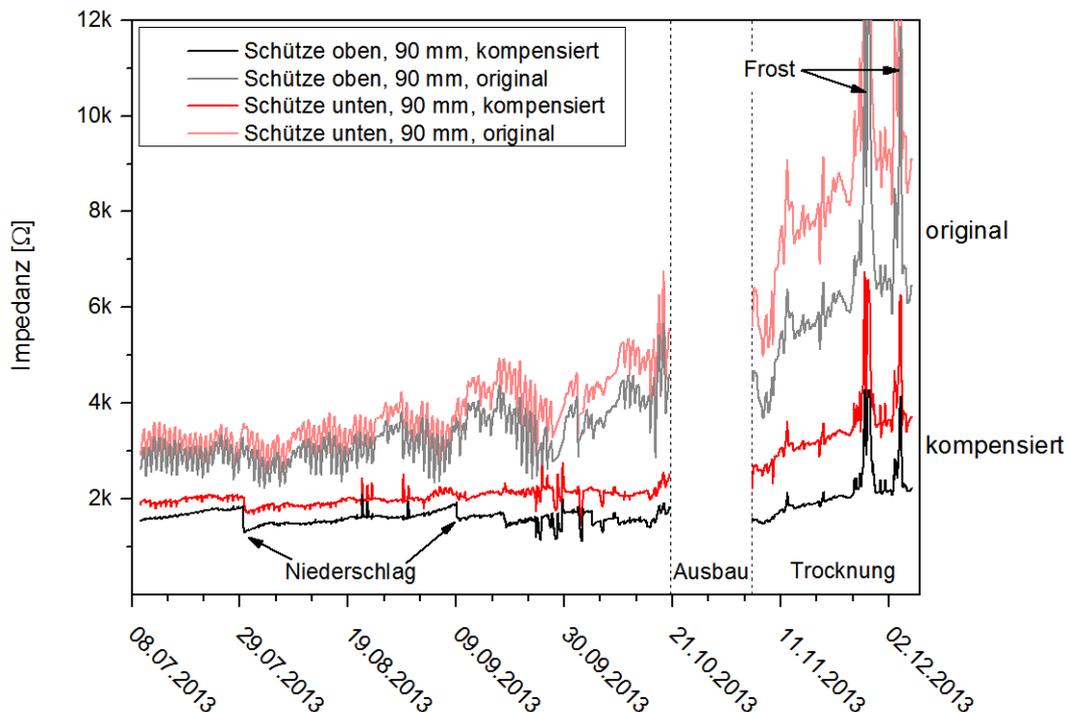


Abb. 12. Auswahl zweier temperaturkompensierter Impedanzmessungen im Vergleich zum Original.

Für die Erstellung der Ausgleichsfunktion im gezeigten Beispiel an der Donauquelle wurde die Zeit von Anfang der Messungen bis zum Plattenausbau verwendet. Die so temperaturkompensierten Impedanzdaten (zwei ausgewählte Sensoren sind in Abb. 12 darge-

stellt) lassen deutlich detailliertere Rückschlüsse auf einzelne Ereignisse, sowie die Entwicklung der Materialfeuchte im Ganzen zu. Im Ursprungszustand sind nach der Kompensation einzelne starke Niederschlagsereignisse sichtbar, die zu einer Zunahme der Materialfeuchte in 90 mm Tiefe führen. Der Sprung im Verlauf entspricht der Ankunft einer Wasserfront. Die relative Änderung der Impedanz ist dabei im oberen Messbereich der Platte stärker ausgeprägt. Das Wasser fließt demzufolge von oben auf die Platten und steigt nicht kapillar aus dem Grundwasser nach oben. Die Schlussfolgerung ist durchaus als realistisch anzusehen, da die Oberkante der Platte mit dem umgebenden Gelände abschließt. Zwar ist dieses nicht versiegelt, jedoch scheinbar ausreichend verdichtet um das Oberflächenwasser zum Quelltopf und damit zu den Reliefplatten hin abzuleiten.

Die durchschnittliche Feuchte bleibt, wie erwartet, bis zum Ausbau vergleichsweise konstant. Nach der Auslagerung fängt die Impedanz langsam an zu steigen, was auf das Einsetzen der Trocknung hinweist. Im Vergleich zu den hygri-schen Messungen in den Bohrlöchern, die im gesamten betrachteten Messzeitraum relative Bohrlochfeuchten von 100 % gemessen haben, zeigt sich hier die deutlich höhere Sensitivität der Impedanzmessungen bei hohen Feuchtegehalten im überhygroskopischen Bereich.

In den letzten zwei Wochen der dargestellten Messungen wurde eine Temperatur von 0 °C mehrfach unterschritten (Abb. 11). Im Impedanzverlauf ist zu diesen Zeiten ein starker Anstieg zu erkennen, der durch das Gefrieren des Porenwassers verursacht wird. Da die Leitfähigkeit des Sandsteins nur über den Elektrolyten, bzw. in der Beweglichkeit dessen Ionen begründet ist, nimmt der Widerstand abrupt zu. Durch die Gefrierpunktsverschiebung in kleinen Poren ist dennoch eine Menge freier Ionen vorhanden, wodurch die verbleibende Restleitfähigkeit begründet ist. Durch Korrelation von tatsächlich im Stein vorhandener Temperatur und Impedanzanstieg durch Gefrieren kann auch ansatzweise darauf geschlossen werden, welche Porenradien noch mit Wasser gefüllt sind. Dies bedingt allerdings, dass der Gefrierpunkt des salzhaltigen Elektrolyten (hier das Porenwasser) bekannt ist.

Auf Basis der gezeigten Daten werden die Reliefplatten jetzt vor Frost geschützt, um Schädigungen durch das Gefrieren des Porenwassers zu verhindern. Der Trocknungsverlauf wird bis zur Konservierung weiter beobachtet.

Referenzen

- [1] S. Kruschwitz. *Assessment of the complex resistivity behaviour of salt affected building materials*. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, 2008. ISBN 978-3-9811655-9-3. Dissertation.
- [2] D. Malleo, et al. Note: Characterization of electrode materials for dielectric spectroscopy. *Review of scientific instruments*, 81(1):016104-1 - 016104-3, 2010. doi: 10.1063/1.3284516.
- [3] F. Lehmann, M. Krüger. *Wireless impedance measurements to monitor moisture and salt migration in natural stone*. In: Markus Krüger (Ed.), Cultural Heritage Preservation, 1st European Workshop on Cultural Heritage Preservation, Berlin, 2011. Fraunhofer IRB Verlag, 224-231. ISBN 978-3-8167-8560-6.
- [4] F. Lehmann, M.I. Martínez Garrido, M. Krüger. *On the advance of impedance measurements for monitoring moisture in sandstone*. In: A. Troi, E. Lucci (Eds.), Cultural Heritage Preservation, 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation, Bozen, 2013. Felix Verlag, 259-264. ISBN 978-88-88307-26-8.