

Zustandsüberwachung der Altsandregeneration über die komplexe Permittivität von Formstoffen

*Luca Bifano, Gerhard Fischerauer
Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik
Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth*

Zusammenfassung

Bei der Altsandregeneration wird aus zum Abguss verwendetem Altsand ein Neusandersatz generiert, der zum Erzeugen neuer Formen verwendet wird. Da es im Moment kein inlinefähiges Messsystem zur Überwachung des Prozesses gibt, beschränkt man sich auf herkömmliche Labormethoden, die aufgrund ihrer Dauer und Kosten zu ersetzen sind. Eine Alternative dazu bietet die elektrische Impedanzspektroskopie. Da deren Ergebnisse allerdings von der Geometrie der Messsonde abhängen und damit eine Übertragung gewonnener Erkenntnisse von einer auf eine andere Sondengeometrie nicht ohne weiteres möglich ist, bietet sich an, die Materialcharakteristika in Form der komplexen Permittivität aus den Impedanzdaten zu extrahieren und die Empfindlichkeit der Methode zu bewerten. In dieser Arbeit wurden dazu zwei Formstoffgruppen untersucht: definierte Gemische aus Form-, Chromitsand und Regenerat sowie verschieden weit regenerierter Altsand. Nachdem die Randeffekte des elektrischen Feldes über eine Modellvorstellung eliminiert wurden, zeigte die komplexe Permittivität der Gemische eine deutliche Systematik mit der Zusammensetzung (steigende Permittivität mit steigendem Form- und Chromitsandanteil). Mit an die Daten angepassten Flächen konnte die reelle Permittivität des verwendeten Regenerats auf Werte zwischen 3,1 und 3,3 abgeschätzt werden. Bei niedrigen Frequenzen und hohem Chromit- bzw. Formsandanteil war dabei die Empfindlichkeit am höchsten. Aus den aus den Regeneraten erhaltenen Permittivitätswerten wurde ein deutlicher Zusammenhang zwischen Regenerationsdauer bzw. -intensität und der Permittivität sichtbar, wobei sich die Permittivität des Regenerats zunehmend dem Wert von Quarzsand (ideales Ziel der Regeneration) näherte.

Keywords: Elektrische Impedanzspektroskopie (EIS), komplexe Permittivität, Empfindlichkeit, Altsandregeneration, Formstoffe.

Einleitung

In Gießereien, die ihre Gussproduktion mit verlorenen Formen und Kernen aus Formstoffen mit dem Formgrundstoff Quarzsand durchführen, wird der Formstoff im Kreislauf gefahren [1]. Trotzdem muss während der Aufbereitung von frischem Formstoff kontinuierlich Quarzneusand zudosiert werden. Das wiederum führt dazu, dass an anderer Stelle Formstoff aus dem Kreislauf entnommen werden muss und deponiert wird. Sowohl die Beschaffung des Rohstoffes Quarzsand als auch die Altsandentsorgung auf Deponien ist u.a. auch wegen des dabei anfallenden Transports kostenintensiv. Zur Kostenreduktion und aus Umweltgründen existiert in Gießereien deswegen der Ansatz der Altsandregeneration [2]. Dabei wird ein gewisser Anteil des benutzten Altsandes nicht direkt den Mischern zur Formstoffaufbereitung zugeführt, sondern in Regeneratoren so aufbereitet, dass das bei Prozessende erhaltene Regenerat anstelle von Quarzneu-

sand der Formstoffaufbereitung zur Verfügung steht [2]. Freilich ist eine vollständige Substitution von Neusand durch Regenerat nicht möglich. Trotzdem gewinnt die Altsandregeneration zunehmend an Bedeutung.

Während der mechanischen Regeneration, die Gegenstand dieser Arbeit ist, werden die sich im Altsand befindenden Bindemittelreste sowie Staubpartikel durch eine reibende Belastung (z.B. durch einen Schleifstein) und eine Absaugung entfernt. Zurück bleiben im Idealfall die Quarzsandkörner [3]. Dauer und Intensität des Prozesses orientieren sich dabei an Erfahrungswerten der jeweiligen Gießerei, allgemeingültige Qualitätskriterien für qualitativ hochwertiges Regenerat variieren von Gießerei zu Gießerei, wobei auch die Komplexität der Gussprodukte die Qualitätsbeurteilung des Regenerats mitbestimmt. Diese Beurteilung erfolgt dabei auf Basis standardisierter Labormethoden, ein in-situ-fähiges Messverfahren existiert nicht, weshalb eine automatisierte Prozessregelung im Moment nicht möglich ist.

Eine mögliche Alternative zu den herkömmlichen Laborverfahren ist die elektrische Impedanzspektroskopie (EIS), wobei die Messung in die Regeneration integriert werden kann. Die EIS bietet als Vorteile u.a. eine hohe Informationsdichte, eine im Vergleich zur Altsandverweildauer im Regenerator kurze Messzeit und die Unbedenklichkeit für die Gesundheit der Anlagenmitarbeiter. EIS-Untersuchungen zur prinzipiellen Eignung der Methode in diesem Anwendungsgebiet zeigten grundsätzlich bereits positive Ergebnisse: Aus den Impedanzen extrahierte Merkmale wiesen ein systematisches Verhalten mit voranschreitender Regeneration auf, wobei auch Unterschiede hinsichtlich der Regenerationsintensität deutlich wurden. Validiert wurden die Ergebnisse mit Labormethoden [4].

Da die Impedanz aber sowohl von der Messsondenfüllung als auch von der -geometrie abhängt, können die erhaltenen Ergebnisse nicht auf Messsonden anderer Geometrie übertragen werden. Gerade das ist ein großer Nachteil der Methode, da die Regeneratorge-stalt je nach Typ und Hersteller variiert und somit nicht ein einziger Messsondenentwurf für alle am Markt verfügbaren Regeneratoren verwendet werden kann. Um den Aufwand (Aufnehmen der Impedanzen für jede Geometrie, Auswerten der Daten und Interpretation der Ergebnisse) zu reduzieren und gleichzeitig die Lernrate (Interpretation der Ergebnisse sollte immer gleich sein) zu erhöhen, bietet es sich deshalb an, während der Regeneration die komplexe Permittivität anstatt der Impedanz zu beobachten. Sie ist als Materialkenngröße unabhängig von der Messsondengeometrie. Hier gilt es nun u.a. festzustellen, in wieweit die Empfindlichkeit der Permittivität von der Betriebsfrequenz sowie der Formstoffzusammensetzung abhängt und ob bzw. wie sehr sich der Regenerationsfortschritt in der Permittivität niederschlägt.

Experimentelles

Zur Aufnahme der Impedanzen bei den Frequenzen 10 kHz, 100 kHz und 1 MHz wurde das LCR-Meter E4980A von Agilent verwendet. Bei den untersuchten Formstoffen handelte es sich zum einen um definierte Mischungen aus Formsand, Chromitsand und Regenerat (FCR-Gemische, vgl. [5]) und zum anderen um verschieden weit prozessiertes Regenerat, wobei die Regeneration bei zwei verschiedenen Intensitätsstufen durchgeführt wurde (vgl. [4]). Zur Untersuchung der FCR-Gemische wurde eine Messsonde der Plattenkondensatorgeometrie (quadratische Kupferelektroden mit Kantenlänge 4 cm und Abstand 1,7 cm)

eingesetzt. Die Regenerate wurden in einem Zylinderkondensator vermessen (Aluminiumelektroden der Höhe 10 cm, wobei die innere Elektrode einen Durchmesser von 2 cm aufwies und der Abstand zur äußeren Elektrode 1 cm war). Die Sonden sind in [5] und [4] beschrieben.

Verkleinerung des Randeinflusses

Zur Extraktion der frequenzabhängigen relativen Permittivitäten $\epsilon_r(\omega)$ aus den gemessenen Impedanzen $Z(\omega)$ der gefüllten Messzelle gilt nach [6], wenn elektrische Streufelder vernachlässigbar sind:

$$\epsilon_r(\omega) = \frac{1}{j\omega C_0 \cdot Z(\omega)} \quad (1)$$

Dabei ist C_0 die Leerkapazität der Messsonde, bei einem Plattenkondensator also $C_0 = \epsilon_0 A/d$ mit der Elektrodenfläche A , dem Elektrodenabstand d und der elektrischen Feldkonstante $\epsilon_0 = 8,854 \text{ pF/m}$. In der Realität wird das mit Gl. (1) ermittelte $\epsilon_r(\omega)$ von Messsonde zu Messsonde unterschiedlich ausfallen, weil die auftretenden Randeinflüsse (Streufelder) geometrieabhängig sind. Um den Einfluss dieser Fehlerquelle zu minimieren, müssen die sondenspezifischen Randeinflüsse berücksichtigt werden (Abb. 1).

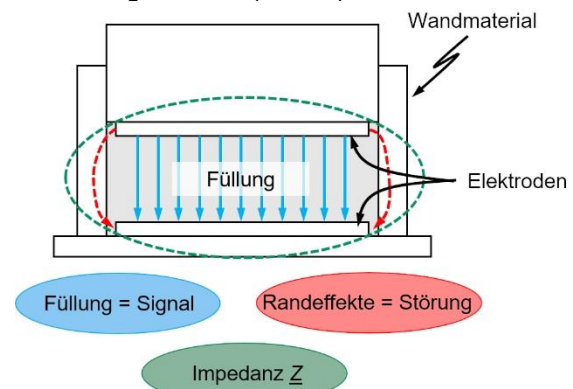


Abb. 1: Schematische Messanordnung einer gefüllten Messsonde.

Das elektrische Feld durchsetzt schematisch sowohl die Füllung (Signal, in Blau) als auch Randbereiche der Sondengeometrie (Störeinfluss, in Rot), z.B. die Sondenwand. In die Impedanz fließen beide Anteile ein (in Grün). Zur Beschreibung der gemessenen Impedanz wurde ein Ersatzschaltbild nach [7] verwendet, das das Signal und die Störung jeweils als Parallelschaltung aus einer Kapazität C_i und einem Leitwert G_i (i für Signal bzw. Störung) modelliert, die wiederum elektrisch parallel liegen (vgl. Abb. 2).

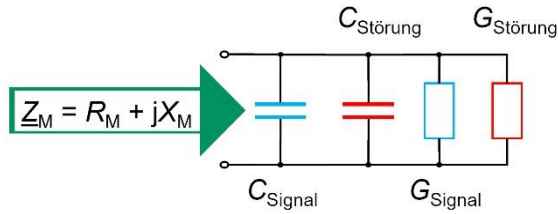


Abb. 2: Ersatzschaltbild zur Bestimmung von $\varepsilon_r(\omega)$ der Messsondenfüllung aus der gemessenen Impedanz $\underline{Z}(\omega)$ nach [7].

Aus dem gemessenen Impedanzspektrum $\underline{Z}_M(\omega) = R_M + jX_M$ ergibt sich die Admittanz $\underline{Y}_M(\omega)$ eines parallelen GC-Gliedes zu

$$\underline{Y}_M(\omega) = 1/\underline{Z}_M(\omega) = j\omega C_M + G_M. \quad (2)$$

G_M und C_M lassen sich also aus der Resistanz R_M und Reaktanz X_M mittels

$$G_M = \frac{R_M}{R_M^2 + X_M^2}, \quad (3)$$

$$C_M = -\frac{X_M}{\omega \cdot (R_M^2 + X_M^2)} \quad (4)$$

bestimmen. Um $\varepsilon_r(\omega)$ zu extrahieren, wurde nun die vereinfachende Annahme getroffen, dass unabhängig von der Messsondenfüllung $C_{\text{Störung}}$ und $G_{\text{Störung}}$ für eine Messsondengeometrie konstant sind. Über Leermessungen der Messsonden wurden dann $G_{\text{Störung}}$ und $C_{\text{Störung}}$ generiert, da bei der Leermessung gelten muss:

$$G_{\text{Signal}} = 0 \rightarrow G_{\text{Störung}} = G_M^L, \quad (5)$$

$$C_{\text{Signal}} = C_0 \rightarrow C_{\text{Störung}} = C_M^L - C_0 \quad (6)$$

mit der theoretischen Leerkapazität C_0 der Messsonde. Damit und mit dem obigen Ersatzschaltbild wurden die rein auf die Füllung zurückzuführenden Werte G_{Signal} und C_{Signal} über

$$G_{\text{Signal}} = G_M^F - G_M^L, \quad (7)$$

$$C_{\text{Signal}} = C_M^F - (C_M^L - C_0) \quad (8)$$

berechnet. $\varepsilon_r(\omega)$ ergibt sich dann zu

$$\varepsilon_r(\omega) = \frac{d}{\varepsilon_0 A} \cdot \left(C_{\text{Signal}} + j \frac{G_{\text{Signal}}}{\omega} \right). \quad (9)$$

Ergebnisse für FCR-Gemische

(a) Bewertung der Permittivitätsdaten

Auf die beschriebene Weise wurde $\varepsilon_r(\omega)$ aus den Impedanzen ermittelt und $\varepsilon_r'(\omega) = \text{Re}\{\varepsilon_r(\omega)\}$ bzw. $\varepsilon_r''(\omega) = \text{Im}\{\varepsilon_r(\omega)\}$ über dem Form- und Chromitsandanteil als Punktwolke aufgetragen (Abb. 3). Pro Zusammensetzung und Frequenz existieren 20 Einzelmesspunkte, die allerdings in der Darstellung nicht getrennt aufgelöst werden. An die bei derselben Messfrequenz gewonnenen Punkte wurde jeweils eine Fläche mittels Regression angepasst. Die so erhaltenen drei Flächen sind ebenfalls in Abb. 3 eingetragen. Die dazu verwendete Funktion gehörte dem Zusammenhang

$$\varepsilon_r'(x_1, x_2) = d + cx_1 + bx_2 + ax_1x_2, \quad (10)$$

und analog für ε_r'' . Dabei bezeichnet x_1 den Chromit- und x_2 den Formsandgehalt.

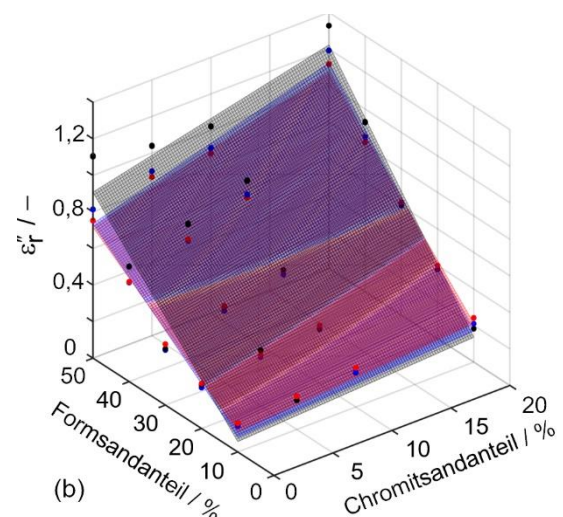
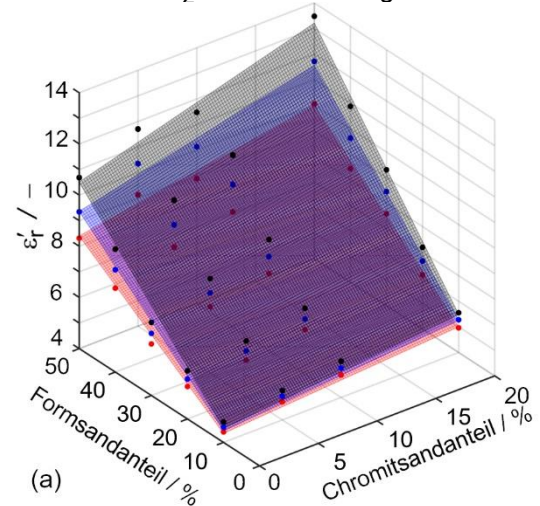


Abb. 3: ε_r' (a) und ε_r'' (b) über dem Form- und Chromitsandanteil bei 10 kHz (schwarz), 100 kHz (blau) und 1 MHz (rot). Punkte = Messwerte, Flächen = Regressionsflächen.

Die Qualität der Regression lässt sich anhand der Regressionsparameter, ihrer 95 %-Konfidenzintervalle und des Bestimmtheitsmaßes R^2 beurteilen. Beispielhaft ist dies für die Messungen bei 10 kHz in Tab. 1 dargestellt. Danach gilt für das reine Regenerat ($x_1 = 0$, $x_2 = 0$), das zur Herstellung der hier eingesetzten FCR-Mischungen verwendet wurde: $\varepsilon'_r(f = 10 \text{ kHz}) = d \approx 3,1$.

Tab. 1: Regressionsergebnis für die mit FCR-Gemischen bei 10 kHz gewonnenen ε'_r -Messwerte. Es war $R^2 = 0,983$. Die Messunsicherheiten sind auf einem Konfidenzniveau von 95 % ermittelt.

Parameter	Wert	Erweiterte rel. Messunsicherheit
d	3,064	4 %
c	$0,024 (\%)^{-1}$	43 %
b	$0,149 (\%)^{-1}$	2 %
a	$0,002 (\%)^{-2}$	14 %

Die Messungen bei den anderen Frequenzen und für ε''_r führten zu qualitativ ähnlichem Verhalten (alle R^2 -Werte $> 0,94$). Für die weiteren Frequenzen wurde $\varepsilon'_r(f = 100 \text{ kHz}) \approx 3,2$ bzw. $\varepsilon'_r(f = 1 \text{ MHz}) \approx 3,3$ abgeschätzt. An diesen beiden Werten erkennt man, dass es sich bei dem aus der Regression ermittelten ε'_r -Wert von reinem Regenerat nur um eine Schätzung handeln kann: Bei niedrigen Form- und Chromitsandanteilen sollte sich ε'_r des Regenerats aufgrund seiner stofflichen Ähnlichkeit ähnlich wie bei Quarzsand verhalten, d. h., es sollte mit steigender Frequenz abnehmen [5]. Gerade das gegenteilige Verhalten zeigen aber die hier generierten Werte.

Dieser Widerspruch entsteht dadurch, dass bei der hier vorliegenden Mischung mit dem höchsten Regeneratanteil immer noch ein Formsandanteil von 10 % im Formstoffgemisch vorlag, sodass dieser Mischzustand noch zu verschieden von dem des reinen Regenerats ist. Eine Regression basierend auf diesen Gemischzusammensetzungen und den dazugehörigen Daten führt bei Extrapolation auf Punkte außerhalb des für die Regression zur Verfügung stehenden Bereichs – und das reine Regenerat liegt außerhalb – zu größerer Unsicherheit. Man vergleiche etwa mit dem Working-Hotelling-Konfidenzband einer Regressionsgeraden [8].

Darüber hinaus zeigt sich an Abb. 3, dass ε'_r systematisch sowohl vom Form- als auch vom Chromitsandanteil abhängt: Steigt einer der beiden Sandgehalte, steigt auch ε'_r . Umgekehrt verhält sich ε'_r mit der Frequenz: Bei

höherer Frequenz sinkt ε'_r . Eine ähnlich deutliche Systematik war bei ε''_r nicht zu erkennen: Zwar steigt ε''_r mit zunehmendem Form- und Chromitsandgehalt an, das Frequenzverhalten scheint aber abhängig von der Zusammensetzung zu sein.

(b) Bewertung der Empfindlichkeiten

Die mittlere Empfindlichkeit von ε'_r auf den Formsandanteil FS bzw. den Chromitsandanteil CS wurde abhängig von der Betriebsfrequenz und vom jeweils anderen Sandanteil wie folgt bestimmt:

$$\bar{S}_{CS}^{\varepsilon'_r}(f, FS) = \frac{\varepsilon'_r(CS = 20 \% ; f, FS) - \varepsilon'_r(CS = 0 ; f, FS)}{20 \% - 0 \%}, \quad (11)$$

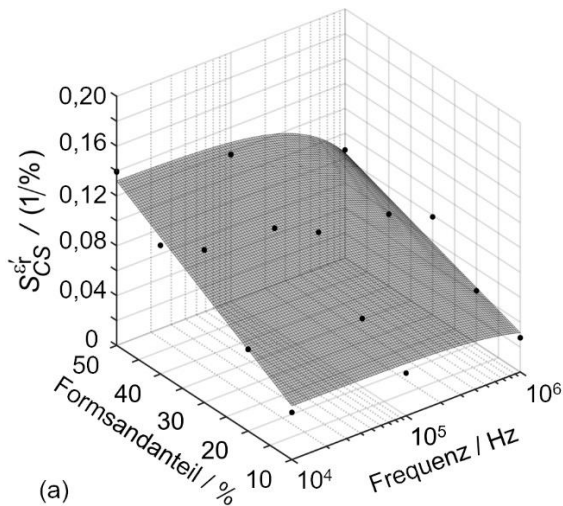
$$\bar{S}_{FS}^{\varepsilon'_r}(f, CS) = \frac{\varepsilon'_r(FS = 50 \% ; f, CS) - \varepsilon'_r(FS = 10 \% ; f, CS)}{50 \% - 10 \%}. \quad (12)$$

(Wir verwenden die Notation S_X^Y für die Empfindlichkeit der Größe y auf die Größe x . Es gilt $S_X^Y = \partial y / \partial x$.) Die Ergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt. Die zur Generierung der Regressionsflächen verwendete Modellgleichung entsprach der Form von Gl. (10), wobei x_1 die Frequenz und x_2 die Zusammensetzung berücksichtigte. Die erhaltenen Werte für das Bestimmtheitsmaß R^2 betragen 0,820 (in Abb. 4(a)) bzw. 0,772 (in Abb. 4(b)) und lagen damit deutlich unterhalb der Werte, die sich bei der Regression der Permittivitätsmesspunkte ergeben hatten. Eine Modellverfeinerung sollte folglich angestrebt werden, wenn die Ergebnisse quantitativ ausgewertet werden sollen.

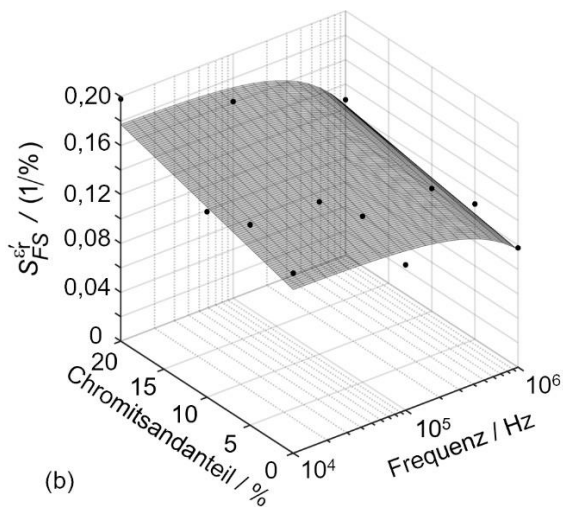
Dennoch zeigte sich, dass ε'_r umso empfindlicher auf den Form- oder Chromitsandanteil reagierte, je höher der jeweils andere Sandanteil war. Mit der Frequenz nahm die Empfindlichkeit in allen Fällen ab (z. B. Abnahme der Empfindlichkeit auf FS um 20 % pro Frequenzdekade bei $CS = 20$ %). Die Empfindlichkeit auf den Chromitsandanteil hing stärker vom Formsandanteil ab als umgekehrt.

Zusammenfassend ergab sich

$$\bar{S}_{FS}^{\varepsilon'_r} \approx 1,5 \cdot \bar{S}_{CS}^{\varepsilon'_r}. \quad (11)$$



(a)



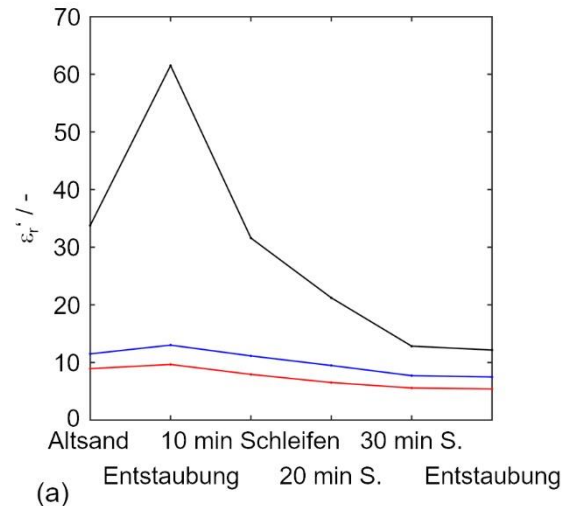
(b)

Abb. 4: Mittlere Empfindlichkeit von ϵ_r' auf (a) den Chromitsandanteil und (b) den Formsandanteil in Abhängigkeit von der Zusammensetzung und der Frequenz. Bei den Punkten handelt es sich um Messwerte, extrahiert aus ϵ_r' , die Fläche ist Ergebnis einer Regression.

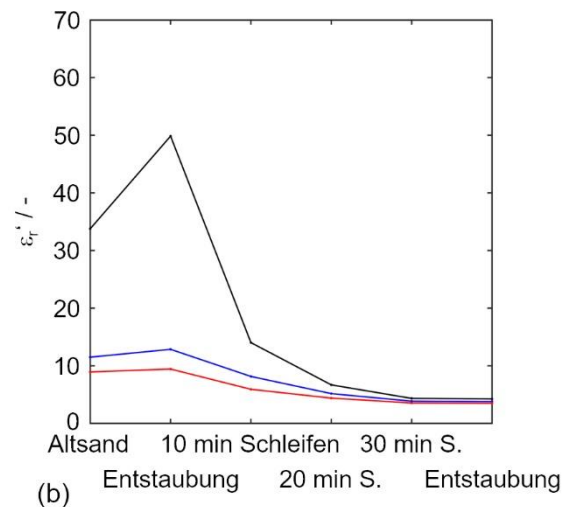
Ergebnisse für Regenerate

Mit den Gl. (2) bis (9) wurden auch die Impedanzen der verschieden weit regenerierten Altsandproben ausgewertet und $\epsilon_r(\omega)$ extrahiert. Die aus Einzelmessungen erhaltenen Mittelwerte von ϵ_r' sind über den verschiedenen Zeitpunkten der Regeneration in Abb. 5 aufgetragen. Die relative Standardunsicherheit von zehn Wiederholmessungen lag bei jedem Messpunkt und jeder Frequenz unterhalb von 1,5 %.

Abb. 5(a) zeigt ϵ_r' bei einer Regeneration mit niedriger Intensität, 5(b) zeigt die Werte einer Regeneration mit hoher Intensität.



(a)



(b)

Abb. 5: ϵ_r' bei (a) niedriger und (b) hoher Regenerationsintensität. Messung bei 10 kHz (schwarz), 100 kHz (blau) und 1 MHz (rot) zu den Regenerationszeitpunkten „Entstaubung“, „10 min Schleifen“, „20 min Schleifen“, „30 min Schleifen“ und „weitere Entstaubung“.

Aus Abb. 5 wird deutlich, dass mit fortschreitender Regeneration ϵ_r' abnimmt. Dies gilt sowohl für die niedrige als auch die hohe Regenerationsintensität, wobei sich bei letzterer ϵ_r' schneller ändert und ein niedrigerer Wert erreicht wird. Der Endwert ist 5,4 bis 12 bei niedriger Intensität und 3,5 bis 4,3 bei hoher Intensität. Darüber hinaus zeigt sich, dass ϵ_r' bei hoher Regenerationsintensität am Ende bei allen drei untersuchten Frequenzen zum selben Wert konvergiert. Gerade dieses Verhalten deutet unter Hinzunahme der zuvor anhand der FCR-Gemische gewonnenen Erkenntnisse darauf hin, dass eine zunehmend einheitlichere Zusammensetzung am Ende der intensiven Regeneration vorlag. Dies ist konsistent mit Abb. 4(a), in der ebenfalls bei abnehmendem Form- und Chromitsandanteil eine Konvergenz

zum selben Wert für ε'_f erkennbar ist. Eine solche Konvergenz ist Ausdruck dafür, dass keine Änderung der stofflichen Zusammensetzung bei einer weiter fortschreitenden Regeneration zu erwarten ist, und signalisiert das Ende der Regeneration. Die ε'_f -Werte am Ende der intensiveren Regeneration ähneln denen von Quarzsand, $\varepsilon'_{f, \text{Quarz}}(f = 10 \text{ kHz}) \approx 2,5 \dots 3,0$ [5], [9]. Dies ist ein Indikator dafür, dass das Prozessziel der Altsandregeneration erreicht wurde. Die weniger intensiv durchgeführte Regeneration weist am Ende hingegen noch eine größere Abweichung zu diesem Wert auf, was darauf schließen lässt, dass hier das Prozessziel noch nicht erreicht wurde.

Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass sich die Materialfunktion $\varepsilon_f(\omega)$ von Formstoffproben in dem hier untersuchten Messbereich systematisch mit der Zusammensetzung und der Frequenz verhält. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass sich $\varepsilon_f(\omega)$ prinzipiell als Messgröße in Anlagen des Formstoffkreislaufs in Gießereien eignet. Die Untersuchung der Empfindlichkeit hat ergeben, dass die Zusammensetzung des Formstoffes einen Einfluss hat. Konkret reagierte die Messgröße $\varepsilon'_f(\omega)$ anderthalb Mal so empfindlich auf den Formsandanteil wie auf den Chromitsandanteil. Außerdem wurde eine deutliche Frequenzabhängigkeit beobachtet: Bei einem Chromitsandanteil von 20 % sank die Empfindlichkeit auf den Formsandanteil mit ca. 20 % pro Frequenzdekade.

Für eine möglichst hohe Empfindlichkeit ist es also empfehlenswert, möglichst niedrige Messfrequenzen zu wählen. Dies steht allerdings im Widerspruch zu den prozessbedingten Restriktionen der Messzeit. Die meist kurzen Prozessdauern (Mischzeiten < 10 Minuten, Regenerationszeiten < 45 Minuten) erlauben jedenfalls keine Aufnahme von Impedanzspektren im mHz-Bereich, wie es etwa bei elektrochemischen Systemen häufig praktiziert wird. Es muss zwischen einer hohen Empfindlichkeit und einer niedrigen Messzeit abgewogen werden.

Der Permittivitätsverlauf des Altsandes während der Regeneration lieferte ermutigende Ergebnisse: Mit fortschreitender Regeneration näherte sich ε'_f zunehmend dem Wert von Quarzsand an. Dieser Effekt beschleunigte sich bei hoher Regenerationsintensität, wobei auch der am Ende erreichte Wert deutlich näher an dem von Quarzsand lag. Eine bleibende Abweichung ($\Delta\varepsilon'_f = 1,5$) weist trotzdem darauf hin, dass eine ideale Regeneration hin zu reinem Quarzsand nicht erreicht wird.

Literaturnachweis

- [1] W. Tilch, H. Polzin und M. Franke, Praxis-handbuch bentonitgebundener Formstoff. Berlin: Schiele & Schön, 2. Aufl. 2019, S. 384.
- [2] R. Roller, K. Berndt, V. Buck, M. Dahlmann, L. Leineweber, J. Ludwig, C. Appelt, M. Pröm, H. Rödter, M. Schlotterbeck und R. Wintgens, Fachkunde Gießereitechnik. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel, 9. Aufl. 2021, S. 464.
- [3] D. Wijnker, „Erfahrungen beim Regenerieren von Grünsand-Kernsandgemisch im Grünsandformverfahren“, *Giesserei-Praxis*, Nr. 10, S. 447–458, 2014.
- [4] L. Bifano, M. Weider, A. Fischerauer, G. Wolf und G. Fischerauer, „In situ monitoring of used-sand regeneration in foundries by impedance spectroscopy“, *J. Sens. Syst.*, Bd. 11, S. 287–298, 2022. DOI: 10.5194/jsss-11-287-2022.
- [5] L. Bifano, A. Fischerauer und G. Fischerauer, „Investigation of complex permittivity spectra of foundry sands,“ *Technisches Messen*, Bd. 87, Nr. 5, S. 372–380, 2020. DOI: 10.1515/teme-2019-0121.
- [6] F. Kremer und A. Schönhals (Hrsg.), Broadband dielectric spectroscopy Berlin, Heidelberg: Springer, 2003, S. 729.
- [7] W. J. K. Raymond, C. K. Chakrabarty, G. C. Hock und A. B. Ghani, „Complex permittivity measurement using capacitance method from 300 kHz to 50 MHz“, *Measurement*, Bd. 46, Nr. 10, S. 3796–3801, 2013. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.06.039.
- [8] H. Working und H. Hotelling, „Applications of the theory of error to the interpretation of trends“, *J. American Statistical Association*, Bd. 24, Nr. 165, S. 73-85, 1929. DOI: 10.2307/2277011.
- [9] R. F. Harrington, Time-harmonic electromagnetic fields. New York: IEEE Press, Wiley-Interscience, 2001, S. 496.