

Ultraschall-Puls-Transmissionsverfahren: Automatisierte Drift-Erkennung in Signalreihen von Zementleimen im frühen Stadium der Hydratation

Jakob HARDEN¹

¹ Technische Universität Graz, Graz, Österreich

Kontakt E-Mail: jakob.harden@tugraz.at

Kurzfassung. In der Vergangenheit hat sich die Ermittlung mechanischer Materialparameter von Zementleimen unter Verwendung des Ultraschall-Puls-Transmissionsverfahrens basierend auf piezoelektrischen Sensoren als verbreitete Versuchstechnik etabliert.

Damit ist eine quasi-kontinuierliche Erfassung von Signaldaten möglich, mit der die kontinuierliche Änderung von Materialeigenschaften gut abgebildet werden kann. Dadurch entstehen jedoch umfangreiche Signalreihen, die eine Automatisierung der Analyse erforderlich machen. Die dafür verwendeten numerischen Verfahren reagieren jedoch sensibel auf Signalstörungen wie das Driften der Signalamplituden. Dies wurde in Signalreihen kombinierter Kompressions- und Scherwellenmessungen an Zementleimen regelmäßig beobachtet. Die hier präsentierte Arbeit stellt einen adaptiven Algorithmus vor, der geeignet erscheint, driftende Signale zu erkennen. Dieser basiert auf fundamentalen statistischen Methoden zur Klassifizierung und Gewichtung von Signalamplituden. Ein besonderes Merkmal ist die Verwendung von Signaleigenschaften als Basis für Gewichtsfunktionen und zur Parametrierung des Analyseverfahrens. Das ermöglicht das adaptive Verhalten des Verfahrens, erweitert dessen Anwendungsspektrum und erhöht die Treffsicherheit. Das Verfahren wurde anhand von Signaldaten getestet, die mittels Ultraschall-Versuchen mit dem FreshCon-Gerät an Zementleimen aus gewöhnlichem Portlandzement mit unterschiedlichen Wasser-Bindemittel-Werten erhoben wurden. Die Berechnungsergebnisse, basierend auf 15 Signalreihen, zeigen eine stabile Übereinstimmung mit der visuellen Erkennung. Es hat sich gezeigt, dass der Algorithmus auf Signaldaten von Kompressions- und Scherwellenmessungen im selben Maße anwendbar ist. Die detektierten Signale können nachfolgend gezielt unterschiedlichen Methoden der Drift-Korrektur unterzogen werden. Außerdem liefert die Analyse weitere statistische Basisdaten, die für die nachfolgende, automatisierte Signalanalyse benötigt werden. In weiterer Folge erscheint es sinnvoll zu sein, in die nachfolgende Signalanalyse eine Rückkopplungsschleife zu integrieren, um die Eingangsparmetrierung der Drift-Erkennung weiter zu präzisieren.

1. Einführung

Drift-Erscheinungen haben großen Einfluss auf Stabilität und Genauigkeit der mathematischen Verfahren, die in der Signalanalyse zur Anwendung kommen. Diese wurden in Signalreihen kombinierter Kompressions- und Scherwellenmessungen an Zementleimen, besonders im frühen Stadium der Hydratation, regelmäßig beobachtet. Es ist deshalb sinnvoll, driftende Signale zu isolieren, um diese nachfolgend einer gesonderten Behandlung zuzuführen. Da die aufgezeichneten Datenmengen einen großen Umfang haben (576 Signale pro Versuch), ist eine Automatisierung des Vorgangs erforderlich.

In der hier präsentierten Arbeit wird ein Verfahren vorgestellt, das dafür geeignet erscheint, driftende Signale in Signalreihen aus Messungen von Zementleimen unter Verwendung des Ultraschall-Puls-Transmissionsverfahrens zu erkennen.

Das Problem tritt insbesondere dann in Erscheinung, wenn die Signalamplituden aufgrund der starken Dämpfung im frühen Stadium der Hydratation von Zementleimen noch sehr klein sind ($\approx 10^{-3}$ Volt). Das Verfahren trägt diesem Umstand Rechnung, indem eine Trennung in Messbereich und Detektionsbereich eingeführt wird (beides sind Zeitbereiche des Probenalters). Der Detektionsbereich umfasst den Bereich, in dem die Signalamplituden klein sind. Im Messbereich werden Schwellenwerte ermittelt, die für die Detektion benötigt werden. Daraus ergibt sich ein weitgehend selbst-parametrierender, adaptiver Algorithmus, der eine stabile, vollständig automatisierte Detektion von driftenden Signalen ermöglicht. Zudem besteht die Möglichkeit, die verbliebenen Eingangsparameter des Verfahrens an die Anforderungen nachfolgender Algorithmen anzupassen und damit die Treffsicherheit der Drift-Erkennung zu erhöhen.

Die Funktionsweise des Verfahrens wird hier anhand eines ausgewählten Versuchs im Detail dargestellt. Eine Statistik detektierter Signale für 15 Laborversuche einer Testserie findet sich am Ende des Abschnitts 3. Um die hier präsentierten Ausführungen nachvollziehbar zu machen, werden die Basisdaten[1] und der Programmcode[2] unter offenen Lizenzen am Repositorium[3] der Technischen Universität Graz zur Verfügung gestellt.

2. Materialien und Methoden

Materialien und Mischungen: Für sämtliche Laborversuche wurden Zementleime bestehend aus Portland-Zement CEM I 42.5 N und gewöhnlichem Leitungswasser verwendet. Die Materialien wurden vor dem Mischen auf Raumtemperatur gelagert ($\approx 20^\circ\text{C}$). In der zugrundeliegenden Testserie wurden die Wasser-Zement-Werte (w/z) variiert. Dabei wurden folgende Werte verwendet: $w/z = \{0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60\}$ Die Menge der Mischungen wurde so gewählt, dass die benötigte Mindestmenge um ca. 10% überschritten wurde. Die Einwaage der Mischungsbestandteile erfolgte mit einer Genauigkeit von ± 0.5 g.

Versuchsgeräte: Alle Zementleim-Mischungen wurden mit dem Zwangsmischer Hobart N50-619 hergestellt. Die Ultraschall-Versuche wurden mit dem FreshCon-Gerät durchgeführt. Dabei kamen piezoelektrische Kontaktprüfköpfe von Olympus-IMS (Kompressionswelle: V101-RB, Scherwelle: V150-RB, Länge der Messstrecke: 50 mm) zum Einsatz. Die Anregung der Sensoren erfolgte mittels Hochspannungs-Puls-Generator piezosystem Jena HVP-1000 (Puls-Spannung: 800 Volt, Puls-Weite: 2.5 μsec). Die Signaldaten wurden mit dem Oszilloskop PicoScope 4262 aufgezeichnet (Abtastrate: 10 MHz, Vertikal-Auflösung: 16 bit).

Herstellung der Mischungen: (1) Mischer mit Zement befüllen, (2) Wasser zugeben, (3) 60 sec Mischen, (4) 30 sec Abkratzen von Rückständen von der Wand des Mischbehälters, (5) 90 sec Mischen.

Herstellung der Probekörper: (1) beide Schalungen des FreshCon-Geräts bis zur Hälfte mit Zementleim füllen, (2) 10 sec manuell verdichten, (3) beide Schalungen bis ≈ 2 cm unter der Oberkante der Schalung mit Zementleim befüllen, (4) 10 sec manuell Verdichten. Das Verdichten diente dazu, größere Luftblasen zu vermeiden. Dafür wurde die Schalung ≈ 10 Mal 3-4 cm vertikal angehoben und wieder fallen gelassen.

Durchführung der Ultraschall-Versuche: Die Versuche wurden in Form von kombinierten Kompressions- und Scherwellen-Messungen (FreshCon) im Abstand von 5 Minuten innerhalb der ersten 24 Stunden nach Wasserzugabe durchgeführt. Der Versuch wurde dabei automatisiert von der Software FreshCon 4.0 gesteuert. Die Messergebnisse jedes Versuchs bestehen aus zwei Signalreihen zu jeweils 288 Textdateien. Für die Analyse wurden die Messdaten in das native, binäre Datenformat von GNU octave umgewandelt.

Signalanalyse: Das Analyseverfahren zur Drift-Erkennung ist Bestandteil der Signalanalyse zur Bestimmung von Materialparametern. Diese umfasst alle notwendigen Prozesse von der Signalkonditionierung bis hin zur Kalibrierung von Materialmodellen zur Bestimmung der mechanischen Materialparameter. Die Drift-Erkennung ist dabei der Signalkonditionierung vorangestellt und liefert die dafür benötigten Daten. Siehe auch **Abb. 1**.

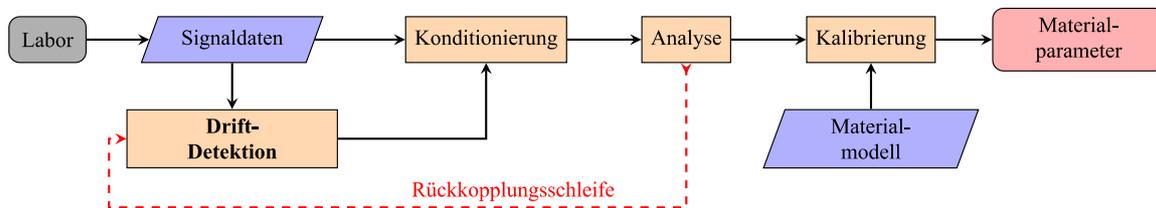


Abb. 1: Signalanalyse, Ablaufschema

Drift-Erkennung: Zuerst wird aus den Amplituden einer Signalreihe R (z.B. Kompressionswellen) eine Gewichtsfunktion W generiert (Alg. A1). Mithilfe von W und einem vorgegebenen Schwellenwert t_w wird der Signalindex J in Messbereich J_m und Detektionsbereich J_d geteilt. Im zweiten Schritt werden in J_m die Schwellenwerte t_1 und t_2 der Signaleigenschaften E_1 und E_2 bestimmt (Alg. A2.1, Alg. A2.2). In J_d erfolgt die Drift-Erkennung basierend auf den zuvor ermittelten Signaleigenschaften und Schwellenwerten. Um die Stabilität des Algorithmus zu erhöhen, wird für E_1 und E_2 das Maximum der gewichteten Intervall-Eigenschaften von drei überlappenden Intervallen verwendet. Die Schwellenwerte t_1 und t_2 errechnen sich aus den Perzentilen der Verteilungsfunktion von E_1 und E_2 in J_m . Im letzten Schritt wird die Bewertungsfunktion B_{drift} aus E_1 , E_2 , t_1 , t_2 in J_d bestimmt (Alg. A3). Für jeden Signalindex j für die B_{drift} den Wert 1 annimmt, handelt es sich um den Signalindex j_{drift} eines driftenden Signals. Das Ablaufschema des Verfahrens ist in **Abb. 2** dargestellt. Genauere Ausführungen zu den Algorithmen finden sich im Abschnitt 3.

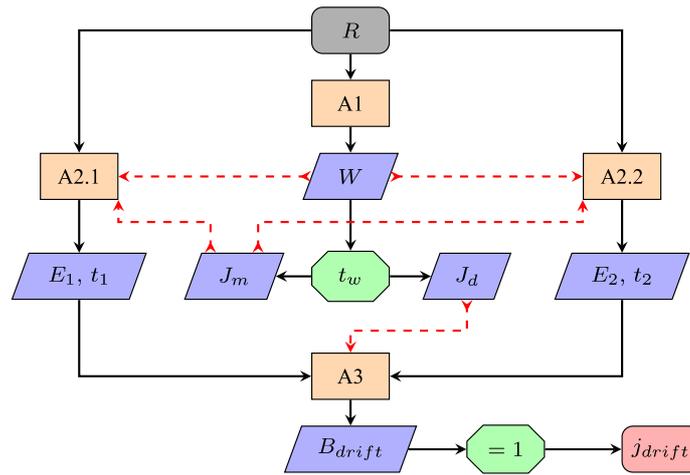


Abb. 2: Drift-Detektion, Ablaufschema

3. Resultate

Die Algorithmen und Berechnungsergebnisse sind nachfolgend exemplarisch anhand eines Ultraschalltests (ts1_wc040_d50_6: $w/z=0.40$, $d=50\text{mm}$, No. 6) dargestellt (siehe **Abb. 3**). Am Ende dieses Abschnitts findet sich eine Statistik zur Detektion von driftenden Signalen, die auf der Basis von 15 Laborversuchen einer Testserie erstellt wurde.

Messergebnisse: Die Messergebnisse aus einem Ultraschalltest bestehen aus zwei Signalreihen (Kompressionswellen C und Scherwellen S) aus jeweils 288 zeit-diskreten Signalaufzeichnungen. Eine Signalreihe $R=C=S$ besteht aus einer Sequenz von Signalaufzeichnungen $R = \{r_j\}$ mit $j = [1, N^j]$. Eine Signalaufzeichnung r ist definiert durch: $r = \{a_i\}$ mit Signalamplitude a und dem Index der Signalamplitude $i = [1, N^i]$. Ein Auszug aus den Signaldaten ist in **Abb. 3** dargestellt.

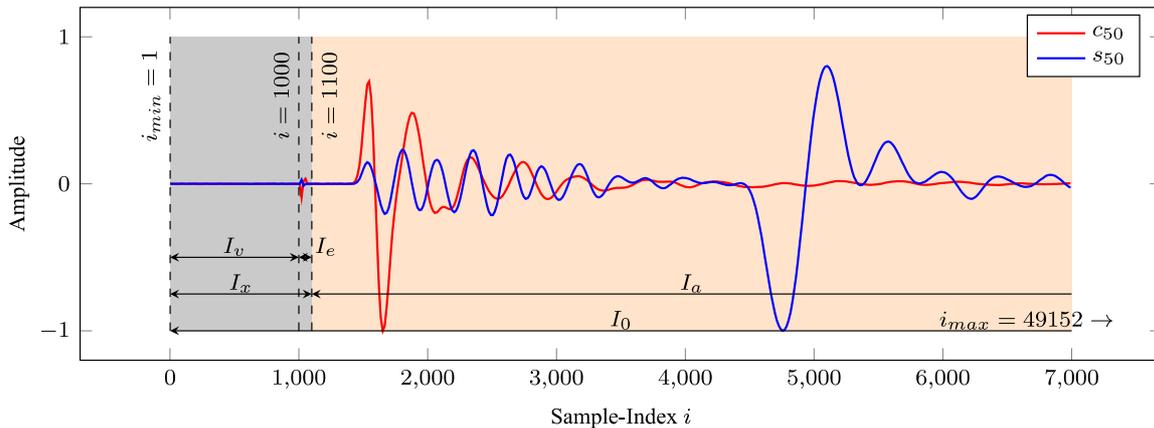


Abb. 3: Kompressionswelle c_{50} und Scherwelle s_{50} . Alter (nach Wasserzugabe) $A_{50} = 252$ min. Intervalle: Aufzeichnung $I_0 = \cup\{I_v, I_e, I_a\}$; Vorspann (Rauschen) I_v ; elektromagnetische Störung I_e ; Analysebereich I_a ; unberücksichtigt bleibt $I_x = \cup\{I_v, I_e\}$.

Algorithmus A1, Gewichtsfunktion W: Die Gewichtsfunktion W geht aus einer Transformation T_w der Signalamplituden hervor. Die Teilung des Gesamtindex der Signalreihe $J = [1, N^j]$ in Detektionsbereich J_d und Messbereich J_m erfolgt bei Index j_i in dem die Funktionswerte von W den vorgegebenen Schwellenwert t_w unterschreiten. Siehe **Abb. 4**.

$$T_w := R \mapsto W:$$

$$w_0 = \text{range}(R), w_{0,j} = \text{range}(r_j)$$

$w_1 = TPF(w_0) \dots$ Tiefpass – Filter, $ff = \text{boxcar}$, $fb = 3$

$$w_2 = w_1 - \min(w_1), w_3 = \frac{w_2}{\max(w_2)}, W = 1 - w_3$$

$$j_{\min} = \text{index}(W < t_w), J_d = [1, j_t], J_m = [j_t + 1, N^j]$$

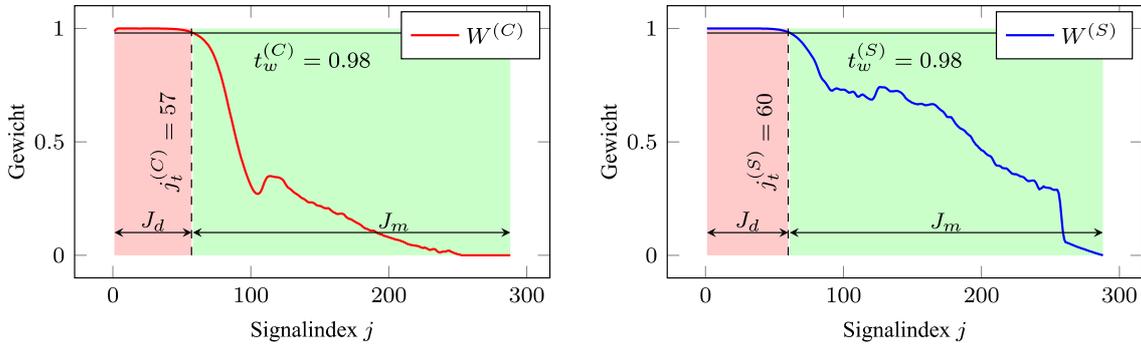


Abb. 4: Gewichtsfunktionen $W^{(C)}$, $W^{(S)}$.

Algorithmus A2.1, Eigenschaft E₁: Die Eigenschaft E₁ basiert auf dem Maximum der Anteile der positiven und negativen Amplituden (f_k^+ , f_k^-) in dem für die Analyse verwendeten Indexbereich I_a eines Signals. Dabei wurde das Intervall I_a in drei überlappende Teilintervalle (I_k , $k = 1,3$) geteilt. Das Intervall I_1 deckt die erste Hälfte von I_a ab, das Intervall I_2 die zweite Hälfte. Das Intervall I_3 liegt in der Mitte von I_a und überlappt I_1 und I_2 jeweils zur Hälfte. Die Eigenschaft wird zunächst in den drei Intervallen bestimmt, um den Wert - 0.5 in die x-Achse verschoben und mit w_k gewichtet ($=e_k$). Das Maximum der Intervall-Eigenschaften repräsentiert die Eigenschaft E₁ eines Signals. Der Schwellenwert t_1 wird mit dem 80%-Perzentil (Eingangsparameter) der Verteilungsfunktion von E₁ im Messbereich J_m festgelegt. Siehe **Abb. 5**.

$$n_k = \text{card}(a_i), i \in I_k$$

$$f_k^+ = \frac{\text{card}(a_i)}{n_k}, a_i \geq 0, i \in I_k$$

$$f_k^- = \text{card}(a_i), a_i < 0, i \in I_k$$

$$h_k = \max(f_k^+, f_k^-) - 0.5$$

$$g_k = \text{range}(a_i), w_k = \frac{g_k}{\max_{k \in \{1,3\}}(g_k)}$$

$$e_k = h_k \cdot w_k$$

$$E_1 = \max_{k \in \{1,3\}}(e_k), E_{1,w} = E_1 \cdot W$$

$$t_1 = \text{percentile}(E_{1,w}, p), \forall j \in J_m, p = 80\%$$

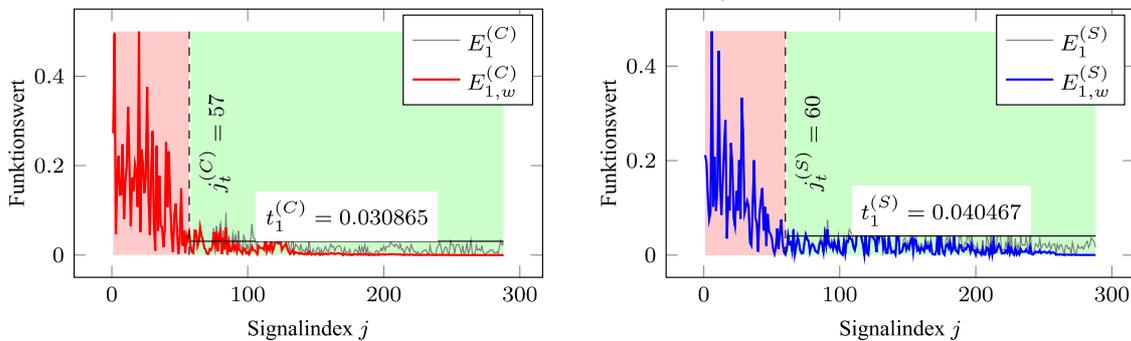


Abb. 5: Signaleigenschaften $E_1^{(C)}$, $E_{1,w}^{(C)}$ und Schwellenwert $t_1^{(C)}$

Algorithmus A2.2, Eigenschaft E₂: Die Eigenschaft E₂ basiert auf dem Mittelwert der Amplituden im Intervall I_a . Die weitere Bestimmung erfolgt gleich wie für E₁. Siehe **Abb. 6**.

$$\begin{aligned}
h_k &= \text{abs}(\text{mean}(a_i))_{i \in I_k} \\
g_k &= \text{mean}(a_i)_{i \in I_k}, w_k = g_k / \max(g_k)_{i \in I_k} \\
e_k &= h_k \cdot w_k \\
E_2 &= \max_{k \in \{1,3\}}(e_k), E_{2,w} = E_2 \cdot W \\
t_2 &= \text{percentile}(E_2, p), \forall j \in J_m, p = 80\%
\end{aligned}$$

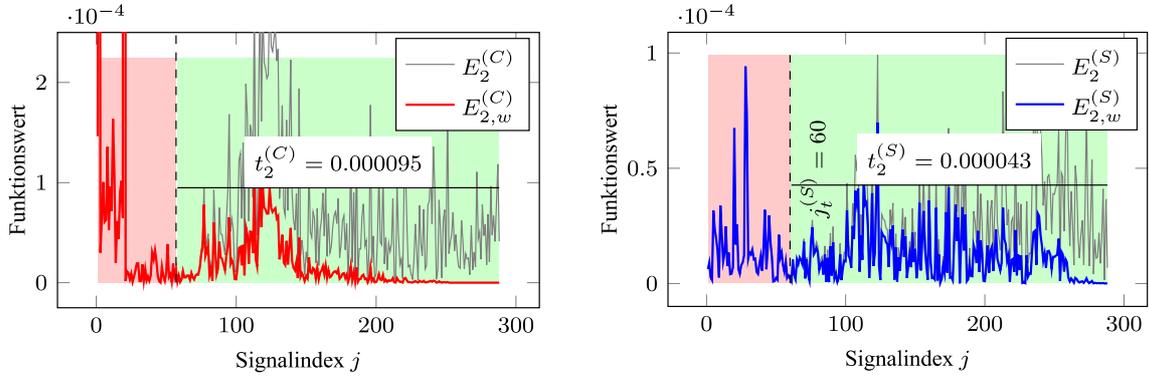


Abb. 6: Signaleigenschaften $E_2^{(C)}$, $E_{2,w}^{(C)}$ und Schwellenwert $t_2^{(C)}$

Algorithmus A3, Drift-Detektion: Für die Drift-Detektion werden die zuvor ermittelten Signaleigenschaften unter Verwendung der Schwellenwerte t_1 , t_2 bewertet, gewichtet und kombiniert ($=B_{\text{drift}}$). Bei allen Signalindizes j für die B_{drift} im Detektionsbereich J_d den Wert 1 annimmt, handelt es sich um die Signalindizes driftender Signale j_{drift} . Die Bewertungsfunktionen sind in **Abb. 7** dargestellt, eine Auswahl driftender Signale in **Abb. 8**.

$$\begin{aligned}
B_1 &= E_{1,w} > t_1, & B_{1,j} &\in [0,1] \\
B_2 &= E_{2,w} > t_2, & B_{2,j} &\in [0,1] \\
g_1 &= 0.5, g_2 = 0.5 \\
B_{\text{drift}} &= B_1 \cdot g_1 + B_2 \cdot g_2 \\
j_{\text{drift}} &= \text{index}(B_{\text{drift}} = 1), \forall j \in J_d
\end{aligned}$$

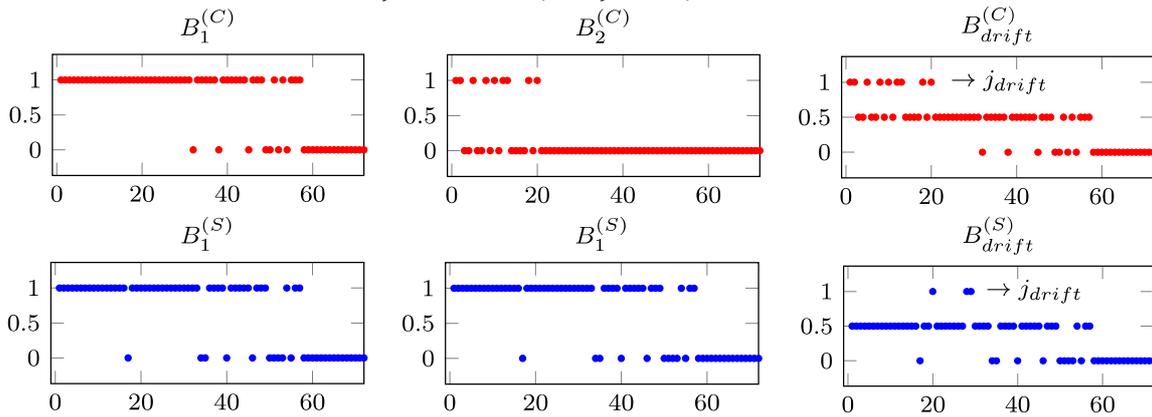


Abb. 7: Bewertungsfunktionen. x-Achse: Signalindex j , y-Achse: Bewertung.

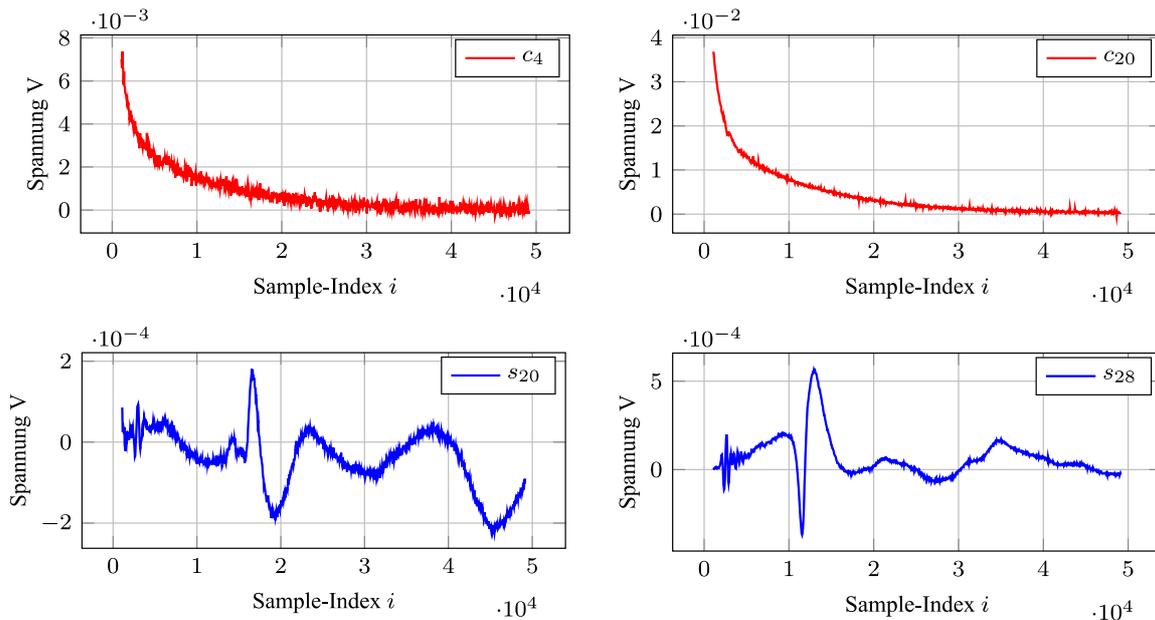


Abb. 8: Auswahl detektierter, driftender Signale.

Gesamtstatistik der Testserie: Die Werte der ersten 10 Gruppen in **Abb. 9** bestehen aus der Summe driftender Signale von jeweils 3 Versuchen (Wiederholungen mit denselben Parametern). Für die Gruppen 1,*,* und 2,*,* ist die Summe aus allen Signalreihen der Kompressions- bzw. Scherwellen (jeweils 15) dargestellt. Die Gruppe *,*,* enthält Summe aus allen 30 Signalreihen (C und S).

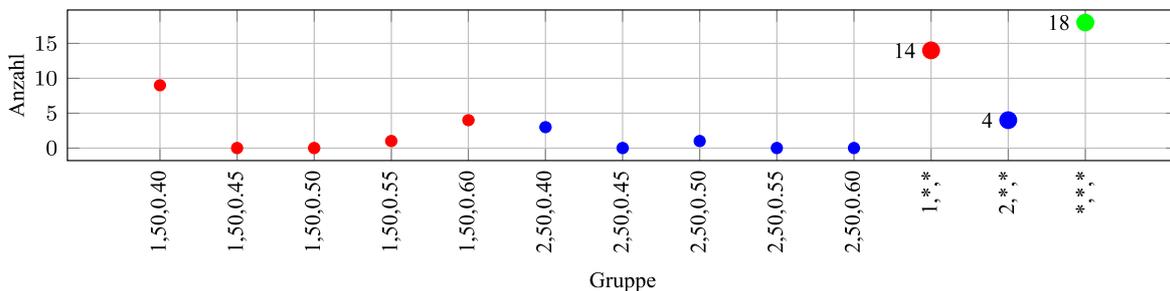


Abb. 9: Anzahl detektierter, driftender Signale der Testserie. Zusammensetzung der Gruppenbezeichnung: **a,b,c**; **a**: Kompressionswelle = 1, Scherwelle = 2; **b**: Länge der Messstrecke in mm; **c**: w/z-Wert.

4. Diskussion

Die Bestimmung der Signaleigenschaften E_1 und E_2 und deren Gewichtung in drei überlappenden Teilintervallen I_k hat sich als vorteilhaft erwiesen, da dadurch mögliche driftende Bereiche von I_a mit kleinen Signalamplituden weniger stark berücksichtigt werden. Die Bestimmung der Schwellenwerte t_1 und t_2 mittels Perzentilen vermindert die Berücksichtigung einzelner möglicher Ausreißer und wirkt dadurch stabilisierend.

Die Gesamtstatistik der Testserie (**Abb. 9**) lässt keine auffällige Beziehung zwischen Wasser-Zement-Wert und Drift-Erscheinungen erkennen. Sichtbar wird jedoch, dass driftende Signale, bezüglich der gewählten Eingangsparameter, in Kompressionswellen häufiger auftreten als in Scherwellen (siehe Gruppen: 1,*,*, 2,*,*). Des Weiteren lassen sich zwei Klassen driftender Signale voneinander unterscheiden. Klasse I tritt vorwiegend in Kompressionswellen auf und hat starke Ähnlichkeit mit der Spannungsverteilung der Entladung eines elektrischen Kondensators (siehe **Abb. 8**, Bilder oben). Klasse II wurde

bisher vorwiegend in Scherwellen beobachtet (siehe **Abb. 8**, Bilder unten). Die Ursachen für beide Formen wurden vom Autor dieser Arbeit bisher noch nicht genauer untersucht.

5. Schlussfolgerung

Das vorgeschlagene Analyseverfahren zur Drift-Erkennung und die damit durchgeführte Analyse einer Serie von Tests mit Zementleimen innerhalb der ersten 24h (15 Tests = 30 Signalreihen = 8640 Signalaufzeichnungen) lässt folgende Schlussfolgerungen zu:

Das Verfahren

- ist stabil (kein Abbruch beobachtet).
- zeigt gute Übereinstimmung mit der visuellen Beobachtung.
- schränkt Ergebnisse auf jenen Bereich ein, in dem ungünstige Auswirkungen am größten sind (kleine Signalamplituden).
- ist auf Signalreihen von Kompressions- und Scherwellen anwendbar.
- ermöglicht eine Abschätzung, bei welchen Signalaufzeichnungen potenziell mit Einbußen in der Genauigkeit zu rechnen ist.
- ist durch die zum Teil vorhandene Selbst-Parametrierung wahrscheinlich auch auf andere Materialien anwendbar.

Ein limitierender Faktor ist der Umstand, dass die verwendeten Eigenschaftsfunktionen keine Sensibilität für eine asymmetrische Amplitudenverteilung aufweisen. Dies stellt jedoch kein größeres Problem dar, da solche Verteilungen bisher nicht beobachtet wurden.

Ein weiterer limitierender Faktor sind die derzeit fest vorgegebenen Eingangsparameter und Funktionstypen. Um der Sensibilität der nachfolgenden Signalanalyse für driftende Signale Rechnung zu tragen, ist es in weiterer Folge sinnvoll, in die Signalanalyse eine Rückkopplungsschleife zu integrieren, um die Eingangs-Parametrierung der Drift-Erkennung zu adaptieren. Dadurch kann die Treffsicherheit der Drift-Erkennung erhöht und die Stabilität der gesamten Signalanalyse verbessert werden.

Auf Basis der aus der Drift-Erkennung gewonnenen Daten ist es im Zuge der nachfolgenden Signalkonditionierung möglich, eine Drift-Korrektur vorzunehmen. Einige Möglichkeiten dafür sind: Hochpass-Filter, Differenzbildung mit Drift-Funktion, Interpolation von Signaleigenschaften aus nicht-driftenden benachbarten Signalen.

Danksagung

Mein Dank geht an Professor Markus Krüger (Technische Universität Graz) der mich in die Thematik der zerstörungsfreien Prüfverfahren, insbesondere die zerstörungsfreie Prüfung mittels Ultraschall-Puls-Transmissionsverfahren, eingeführt hat. Des Weiteren bedanke ich mich bei den Laboranten des Instituts für die Instandhaltung und Reinigung der Versuchsgeräte und Laborräumlichkeiten.

Referenzen

- [1] Harden, J. (2023) „DGZfP Jahrestagung 2023: Datenbasis zum Manuskript“. Graz University of Technology. doi: 10.3217/g0myc-fd571.
- [2] Harden, J. (2023) „DGZfP Jahrestagung 2023: Programmcode zum Manuskript“. Graz University of Technology. doi: 10.3217/3bngf-bct42.
- [3] Repositorium der Technischen Universität Graz, <https://repository.tugraz.at/> (Zugriff am 18.04.2023)