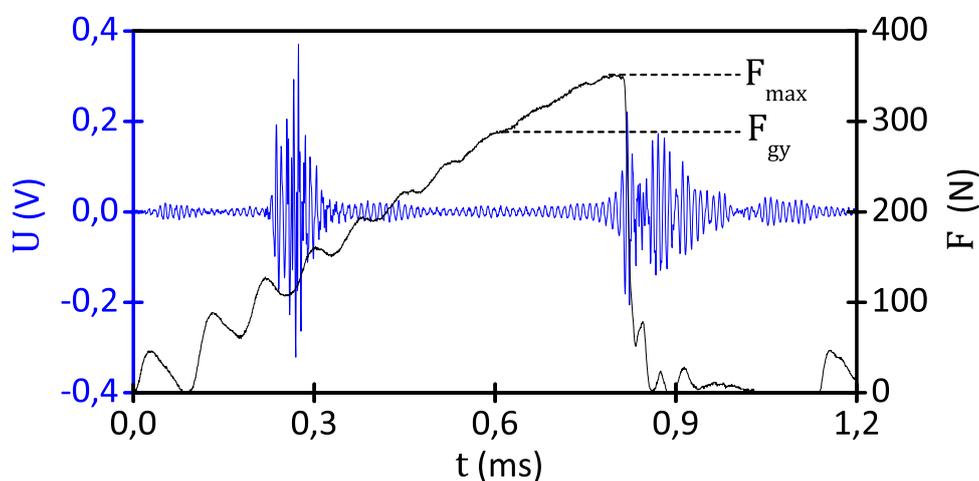
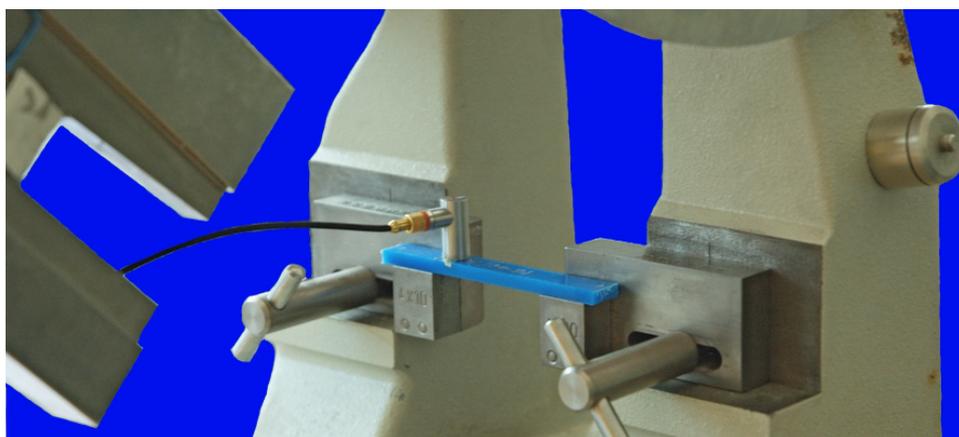


## Prüfung von Kunststoffen Schallemissionsprüfung

### Prozedur zur Validierung von akustischen Sensoren für die Schallemissionsprüfung an Kunststoffen



PSM-Prozedur  
PSM-AE (2022-05)

#### Autoren

Schoßig, Marcus, Dr.-Ing.  
Bierögel, Christian, Prof. Dr.  
Grellmann, Wolfgang, Prof. Dr.

#### Postanschrift

Polymer Service GmbH Merseburg  
Geusaer Str. 81f  
06217 Merseburg

#### Internet

[www.psm-merseburg.de](http://www.psm-merseburg.de)

#### Geschäftsführung

Prof. Dr. Valentin Cepus (Vors.)  
Prof. Dr. Wolfgang Grellmann  
Prof. Dr. Katrin Reincke

Tel.: +49 3461 30889 50  
Fax: +49 3461 30889 99

E-Mail: [info@psm-merseburg.de](mailto:info@psm-merseburg.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie .....</b>	<b>4</b>
2.1	Schallemissionsprüfung und -analyse .....	4
2.2	Frequenzanalyse .....	7
2.3	Validierung akustischer Sensoren nach ASTM E976 und ASTM E2374.....	9
<b>3</b>	<b>Beschreibung der Prozedur PSM-AE (2022-05) .....</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>Beispielauswertung einer Validierung .....</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Literaturhinweise .....</b>	<b>15</b>

# Prozedur zur Validierung von akustischen Sensoren für die Schallemissionsprüfung an Kunststoffen

Marcus Schoßig, Christian Bierögel und Wolfgang Grellmann

## 1 Einleitung und Motivation

Die Anforderungen an einen modernen Kunststoff sind vielfältig und stehen häufig miteinander in direkter Verbindung. Der Werkstoff muss dabei neben höchsten mechanischen Ansprüchen auch den Anforderungen an die elektrischen, optischen und akustischen Eigenschaften genügen. Diese Vielfalt wird ergänzt durch technische Erfordernisse an die Verarbeitbarkeit und Recyclingfähigkeit, welche wiederum wirtschaftlichen Zwängen unterliegen.

Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, sind in der Kunststoffprüfung in den letzten Jahren viele Anstrengungen unternommen worden, um die Charakterisierung des Eigenschaftsbildes mit den Ergebnissen von morphologischen Untersuchungen zu koppeln. Zielstellung ist die Ableitung von Korrelationen, die zur Aufstellung von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen verwendet werden [1]. Dabei stehen mechanische Eigenschaften wie Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit besonders im Mittelpunkt des Interesses.

Die Wachstumskurve für Kunststoffanwendungen zeigt stetig nach oben. Dabei ist eine reproduzierbare, zuverlässige quantitative Bestimmung der Eigenschaften von besonderer Bedeutung und die Erweiterung der Einsatzgebiete von Kunststoffen geht einher mit dem maßgeschneiderten Einstellen aller relevanter Eigenschaften.

Eine Grundvoraussetzung für die gezielte Weiterentwicklung von Kunststoffen ist die Kenntnis der festigkeits- und verformungsbestimmten Deformations- und Bruchmechanismen. Hieraus leitet sich unmittelbar die Notwendigkeit ab, Kunststoffe unter dem Aspekt der vollständigen Ausnutzung der Werkstoffeigenschaften hinsichtlich ihrer Eigenschaften mit modernen diagnostischen Methoden zu bewerten, die eine erhöhte Werkstoffinformation gegenüber konventionellen Prüfverfahren liefern. Die Schallemissionsanalyse als quasi-zerstörungsfreie Prüfmethode ermöglicht sowohl die Bewertung der Schädigungskinetik als auch mit Hilfe der Frequenzanalyse der aufgezeichneten Schallemissionen die Korrelation der auftretenden Schädigungsmechanismen mit charakteristischen Frequenzbereichen [2-7].

Die Sicherstellung des Nachweises der Funktionsfähigkeit der verwendeten akustischen Sensoren unter den jeweiligen Bedingungen ist von wesentlicher Bedeutung, da sich ein Defekt des akustischen Sensors nicht zwingend aus dem Signalverlauf ableiten lässt. Um Fehlinterpretationen der aufgezeichneten Schallemissionen zu vermeiden, wird in dieser Prozedur mittels eines einfachen, reproduzierbaren Einzelereignisses eine Möglichkeit beschrieben, mit Hilfe der eine Validierung von akustischen Sensoren durchgeführt werden kann.

In der nationalen und internationalen Normung steht eine Vielzahl von Standards zur Verfügung, welche sich mit der Schallemissionsanalyse auch unter Berücksichtigung der Validierung der Sensoren beschäftigen. Nachstehend wird in der Tabelle 1 eine Zusammenfassung relevanter Standards, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, gegeben.

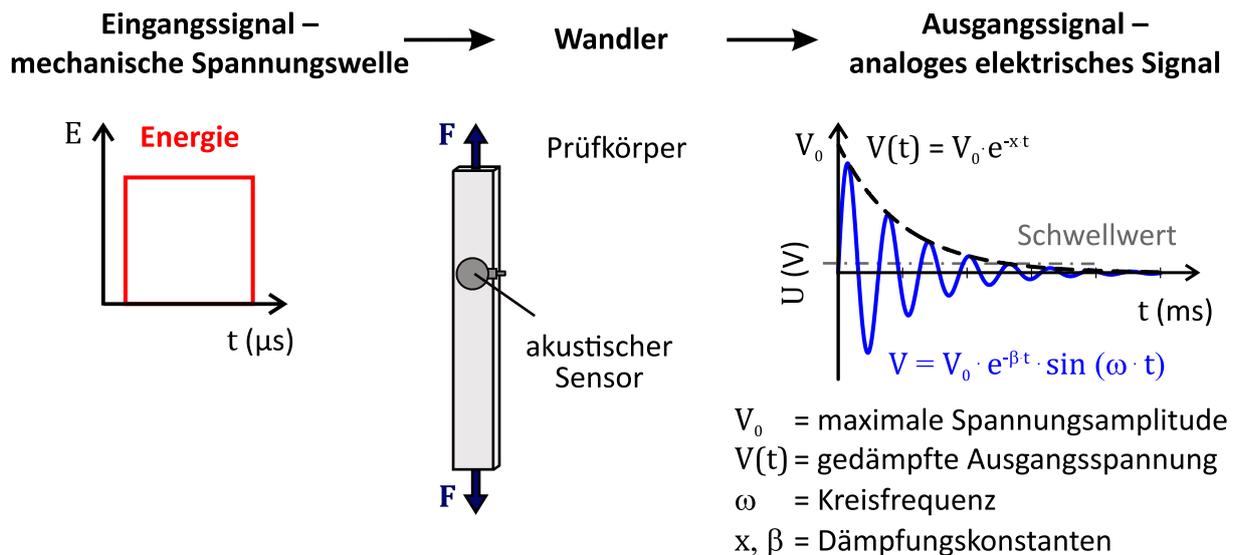
**Tabelle 1:** Auflistung relevanter Standards für die Schallemissionsanalyse

Standard	Titel
ASTM E976-15 (2021)	Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response
ASTM E2374-16 (2021)	Standard Guide for Acoustic Emission System Performance Verification
DIN EN 1330-9 (2017-10)	Zerstörungsfreie Prüfung – Terminologie – Teil 9: Begriffe der Schallemissionsprüfung
DIN EN 13477-1 (2013-11)	Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Gerätecharakterisierung Teil 1: Gerätebeschreibung
DIN EN 13477-2 (2021-12)	Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Gerätecharakterisierung Teil 2: Überprüfung der Betriebskenngrößen
DIN EN 13554 (2011-04)	Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Allgemeine Grundsätze
ISO 12713 (1998-07)	Non-destructive Testing – Acoustic Emission Inspection – Primary Calibration of Transducers
ISO 12714 (1999-07)	Non-destructive Testing – Acoustic Emission Inspection – Secondary Calibration of Acoustic Emission Sensors
ISO 12716 (2001-06)	Non-destructive Testing – Acoustic Emission Inspection – Vocabulary

## 2 Theorie

### 2.1 Schallemissionsprüfung und -analyse

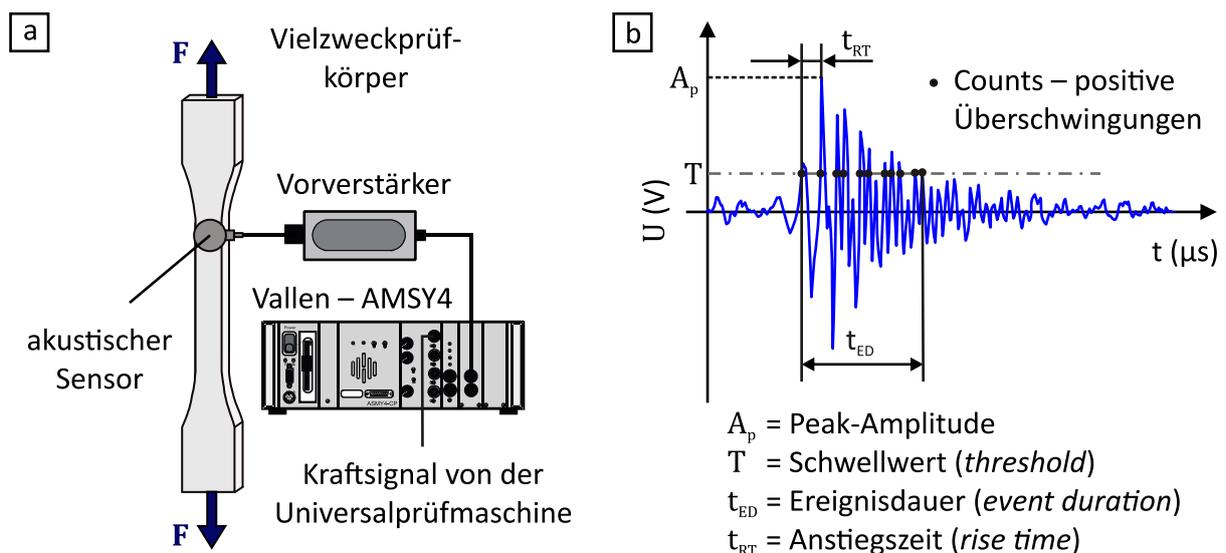
Die Schallemissionsprüfung (SEP) ist ein quasi-zerstörungsfreies Prüfverfahren, das an schädigungsinduzierende Prozesse gebunden ist. Die dabei freigesetzten Schallemissionen können durch mechanische, biologische oder chemische Beanspruchungen sowohl im mikroskopischen wie auch im makroskopischen Bereich hervorgerufen werden. Damit hat sich für die Schallemissionen die Definition nach BARDENHEIER bewährt, welcher in [8] angibt: „*Schallemissionen (SE) treten in jedem Festkörpern immer dann auf, wenn mit dem Überschreiten bestimmter Werkstoffanstregungen elastische Energiemengen in Form mechanischer Spannungswellen freigesetzt werden*“. Die mechanischen Spannungswellen breiten sich kugelförmig von der Schallemissionsquelle als Volumenwellen aus, werden in Oberflächenwellen transformiert und können mit Hilfe piezoelektrischer Wandler (SE-Sensor) in analoge, elektrische Signale überführt werden. Allerdings erfährt das ursprüngliche Signal, welches als Rechteckimpuls definiert werden kann, durch die Ausbreitung im Werkstoff eine starke Veränderung durch Dispersion und Reflexionen sowie Wellenmodenwandlung. So kann aus dem Rechteckimpuls ein langes, langsam an- und abschwellegendes Signal werden, welches zusätzlich durch immanente Verlustmechanismen eine exponentielle Abnahme aufweist [8]. In Bild 1 ist schematisch die Signalverarbeitung bei der Schallemissionsanalyse (SEA) dargestellt.



**Bild 1:** Prinzip der Signalverarbeitung bei der Schallemissionsanalyse; in Anlehnung an [8]

Die aufgezeichneten Signale können prinzipiell in 2 Typen klassifiziert werden. So wird in der DIN EN 1330-9 [9] ein trotz hoher Zeitauflösung nicht trennbares Signal als kontinuierliche Emission und Ereignisse, welche voneinander getrennt werden können als Burst-Emission bzw. transiente Signale bezeichnet. Charakteristische Beispiele für kontinuierliche Emissionen sind plastische, homogene Verformungen von Metallen, Leckageströmungen oder Fließvorgänge. Diskontinuierlich auftretende Ereignisse wie Rissbildungs- und Rissfortschrittsvorgänge sowie bei faserverstärkten Werkstoffen Faser *pull-out* und Faserbruch führen zu Burst-Emissionen.

In Bild 2a ist schematisch das Prinzip der Schallemissionsmessung mit der aus dem akustischen Sensor, einem Vorverstärker und dem Analysator bestehenden Messkette dargestellt. Ein typisches transientes Signal mit den ableitbaren Messgrößen zeigt Bild 2b.



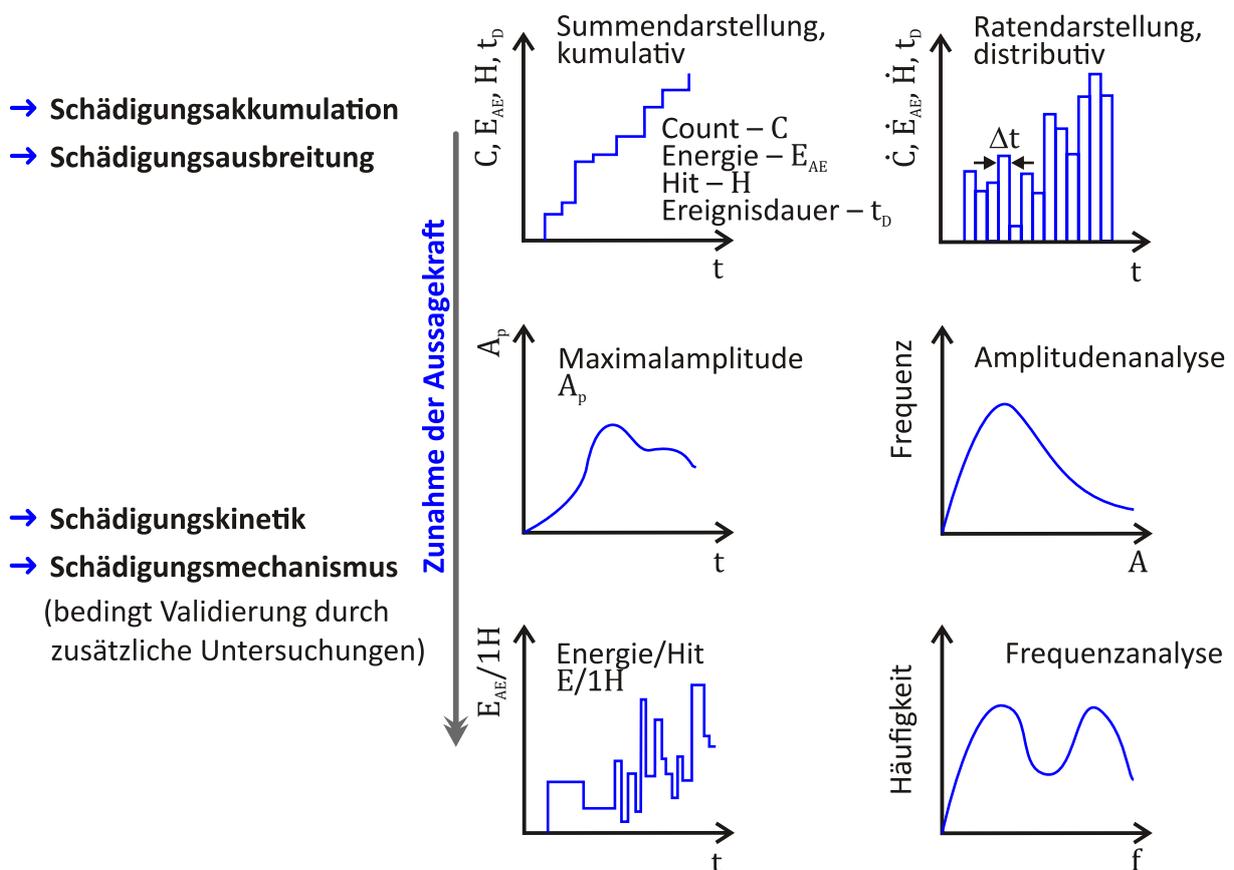
**Bild 2:** Schallemissionsmessung am Beispiel einer Zugbeanspruchung (a) und beispielhaftes transientes Signal mit den ableitbaren charakteristischen Messgrößen (b)

Ein Signal wird in der Literatur als *Event* oder *Hit* bezeichnet, wobei im Rahmen dieser Prozedur die in der DIN EN 1330-9 [9] festgelegte Bezeichnung *Hit* verwendet wird. Eine weitere,

nicht im Bild 2b dargestellte Größe ist die Signalenergie  $E_{AE}$ , welche nach Gl. (1) durch Integration des akustischen Signals erhalten wird. Aufgrund der Amplituden-Zeit-Darstellung wird die Einheit der Energie mit *eu* für *energy unit* abgekürzt, was physikalisch 1nVs entspricht.

$$E_{AE} = \int_0^{t_{ED}} U(t) dt \quad (1)$$

Die aufgezeichneten Signale können mit der Schallemissionsanalyse vielfältig analysiert werden. So wird zur Darstellung die Impuls-, die Energie- und Ereignismessung sowohl im Summen- (kumulativ) wie auch im Ratenmodus (distributiv) gewählt. Darüber hinaus kann eine Amplituden- und Frequenzanalyse erfolgen [2, 8]. Die Möglichkeiten der Auswertung der Schallemissionen sind schematisch in Bild 3 dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse in Summen- und Ratenform dient der Charakterisierung der Signaldynamik und damit der last- und deformationsbezogenen Schädigungsentwicklung und -akkumulation. Dagegen können über die Darstellung der Amplitudenwerte und mit Hilfe der Frequenzanalyse Aussagen über die Schädigungsmechanismen und die zeitliche Zuordnung getroffen werden. Es wird in [10] allerdings darauf hingewiesen, dass die Darstellung über die Amplitudenanalyse nur bedingt Rückschlüsse auf die Schädigungen aufgrund der Schwächung der mechanischen Spannungswellen durch den im Werkstoff zurückgelegten Weg und damit vom Abstand der Schallemissionsquelle zum Sensor zulässt. In diesen Fällen ist nur mittels der Frequenzanalyse eine Zuordnung der Schädigungsmechanismen möglich [10, 11].



**Bild 3:** Darstellungsmöglichkeiten der Messgrößen der Schallemissionsanalyse; in Anlehnung an [8]

Die SEP wird unter zwei wesentlichen Gesichtspunkten angewendet. Zum einen sind Applikationen im technischen Sinne, z. B. im Bereich der Bauteilüberwachung von Behältern oder in der Überwachung des Risswachstums an Brücken und Staudämmen [12], möglich und zum

anderen liegt der Anwendungsbereich im werkstoffwissenschaftlichen Feld in der Aufklärung von Schädigungsmechanismen und daraus ableitbaren Korrelationen zu Werkstoffkennwerten [2, 8].

## 2.2 Frequenzanalyse

### FOURIERREIHE UND FOURIERTRANSFORMATION

Die Interpretation eines Zeitsignals kann mit Hilfe von Transformationen durchgeführt werden. Jede **periodische Funktion** lässt sich als eine Summe aus Sinus- und Kosinustermen in Form einer **Fourierreihe** schreiben Gl. (2). Dabei drücken die Fourier-Koeffizienten  $A_k$  und  $B_k$  aus, in welcher Weise die Amplituden der einzelnen Terme gewichtet und die Phase verschoben werden müssen, um die Ausgangsfunktion zu beschreiben.

$$U(t) = \sum_{k=0}^{\infty} (A_k \cdot \cos \omega_k t + B_k \cdot \sin \omega_k t), B_0 = 0 \quad (2)$$

$$\omega_k = \frac{2\pi \cdot k}{T}, \text{ mit dem auftretenden Frequenzschema } \omega = 0, \frac{2\pi}{T}, \frac{4\pi}{T}, \frac{6\pi}{T}, \dots \quad (3)$$

Die Kreisfrequenz  $\omega_k$  wird dabei nach Gl. (3) berechnet, mit  $T$  als Periode der Funktion  $U(t)$ . Bei der Superposition von Sinus- und Kosinusfunktionen kommen nur ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz, gemäß dem dargestellten Schema, vor ( $2\pi$ -periodische Funktionen) [13]. **Nichtperiodische transiente Signale**, deren Signalamplitude infolge der Dämpfung in endlicher Zeit gegen Null geht, können mit Hilfe der Fouriertransformation analysiert werden. Differenziert wird dabei zwischen der **kontinuierlichen** und **diskreten** Fouriertransformation (DFT). Der Unterschied liegt im zeitlichen Signalverlauf, der im Falle einer diskretisierten Funktion, im Gegensatz zur kontinuierlichen Funktion, nur zu  $N$  diskreten Zeiten bekannt ist (Gl. 4).

$$t_k = k \cdot \Delta t, k = 0 \dots N - 1 \text{ mit } N \text{ eine Potenz von } 2 \quad (4)$$

Außerhalb des gesampelten Intervalls  $T = N \cdot \Delta t$  ist die Funktion und deren Verlauf unbekannt. Dies trifft für jede digitale Datenaufnahme zu. Aus diesem Grund wird die Annahme gemacht, dass außerhalb des betrachteten Intervalls die Funktion periodisch fortgesetzt wird [13]. Die Fouriertransformation stellt ein Signal spektral, d. h. in seinem Frequenzinhalt dar, dabei gibt die Fouriertransformierte  $U'(f)$  an, mit welcher Amplitude die jeweilige Frequenz im Signal enthalten ist (Gl. 5).

$$U'(f) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t) \cdot e^{-2\pi \cdot i \cdot f \cdot t} dt \quad (5)$$

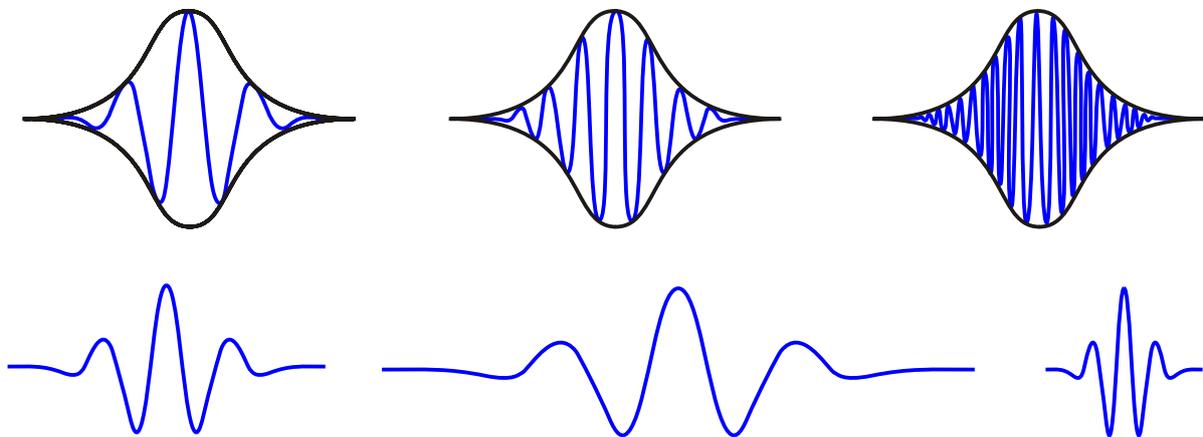
Es wird vorausgesetzt, dass es sich um ein stationäres, d. h. nicht kurzfristig änderndes Signal handelt. Als Ergebnis der Transformation steht die globale Frequenzinformation ohne zeitliche Zuordenbarkeit zur Verfügung. Die schnelle Fouriertransformation (FFT) ist ein optimierter Algorithmus für die DFT.

## KURZZEIT-FOURIERTRANSFORMATION

Der Nachteil des Verlustes der zeitlichen Information eines Signals ist durchaus von größerer technischer Bedeutung, da für die betrachteten Signale die zugrundeliegenden Ursachen und Zuordnung zum Ursprungssignal von Interesse sind. Eine Verbesserung im Hinblick auf die Zeitauflösung bietet die Kurzzeit-Fouriertransformation (*Short Time Fourier Transform – STFT*), auch gefensterter Fouriertransformation (*Windowed Fourier Transform – WFT*) genannt. Das Signal wird in kleine Zeitbereiche aufgeteilt, die dann einzeln transformiert werden. Dazu wird das Signal mit einer Fensterfunktion  $w$  multipliziert und es werden für das betrachtete Signal die Fourier-Koeffizienten berechnet. Durch diese Fensterung ist eine zeitliche Einteilung der Spektren möglich. Probleme ergeben sich in zweierlei Hinsicht. An den Fensterkanten liegt durch die abrupte Änderung der Amplituden im Zeitbereich eine Unstetigkeit vor, was eine Überlappung der Fenster bedingt. Ein weiterer Nachteil der gefensterter Fouriertransformation liegt in der willkürlich zu wählenden Fensterbreite. Ein enges Fenster ermöglicht eine gute zeitliche Auflösung, bedingt aber maximal detektierbare Frequenzen, welche mit einer vollen Periode in das Zeitfenster passen müssen. Umgekehrt wird bei einem breiten Fenster die Frequenzauflösung verbessert, aber gleichzeitig die zeitliche Auflösung herabgesetzt.

## WAVELET-TRANSFORMATION

Der Nachteil der gegenläufigen Zeit- und Frequenzauflösung bei der gefensterter Fouriertransformation wird bei der Wavelet-Transformation dadurch vermieden, dass die Fensterbreite variabel ist und die Anzahl der Oszillationen im Fenster konstant ist (Bild 4).



**Bild 4:** Frequenzanalyse im Fourier-Raum (oben) bei der Verwendung einer gefensterter Fouriertransformation und im Wavelet-Raum (unten) durch Dehnen und Stauchen eines *Mother-Wavelets* (links unten) [14]

Damit wird einerseits eine Änderung der Fensterbreite, d. h. der Zeitbasis, und andererseits die notwendige Frequenzvariation erreicht. Das Dehnen und Stauchen des Wellenzuges wurde von MORLET [14] **Wavelet** genannt, wobei die Form der verwendeten Ausgangsfunktion (*Mother-Wavelets*) erhalten bleibt. Das Wort Wavelet ist eine Neuschöpfung aus dem franz. Wort „*ondelette*“, was kleine Welle bedeutet, welches teils wörtlich („*onde*“ → „*wave*“), teils phonetisch („*-lette*“ → „*-let*“) ins Englische übertragen wurde und so auch im Deutschen verwendet wird. Die Wavelet-Transformierte  $W$  eines Zeitsignals  $f$  ist in Gl. (6) aufgeführt [15] und für das Gabor-Wavelet sowie für die Fouriertransformierte gelten Gl. (7) und Gl. (8) [16]. Analog zu der Fouriertransformation geben die Koeffizienten  $a$  und  $b$  an, wie die zur Analyse

verwendete Wavelet-Funktion  $\Psi$  verändert werden muss, damit das Signal mit der Wavelet-Funktion  $\Psi$  berechnet werden kann. Die Parameter  $a$  und  $b$  beschreiben dabei die Dehnung bzw. Stauchung sowie die Verschiebung der Mother-Wavelets. Das Integral über ein Wavelet ist vereinbarungsgemäß stets null, so dass man als Produkt eines Wavelets mit einer Konstanten ebenfalls null erhält [15, 17]. In Gl. (7) ist  $\omega_p$  die Mittenfrequenz und  $\gamma$  eine Konstante, welche eingeführt wird, damit die Zuverlässigkeitsbedingung erfüllt ist, d. h. mit der Konstante  $\gamma$  wird sichergestellt, dass es sich um ein Orthonormalsystem handelt Gl. (9). Aus der Fouriertransformation wird die Halbwertszeit  $2 \cdot \gamma / \omega_p$  für das Gabor-Wavelet sowie die Halbwertsfrequenz  $1/2 \cdot \omega_p / \gamma$  ermittelt. Im Ergebnis steht eine Ansammlung von Waveletkoeffizienten (WT-Koeffizienten), wobei jeder Koeffizient durch die Parameter  $a$  und  $b$  definiert und somit der Frequenz und Zeit zuordenbar ist.

$$Wf(a, b) := \langle f, \Psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (6)$$

$$\Psi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} \cdot \left( \frac{\omega_p}{\gamma} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[ -\frac{t^2}{2} \cdot \left( \frac{\omega_p}{\gamma} \right)^2 + i\omega_p \cdot t \right] \quad (7)$$

$$\hat{\Psi}(\omega) = (2 \cdot \pi)^{\frac{1}{2}} \cdot \pi^{-\frac{1}{4}} \cdot \left( \frac{\omega_p}{\gamma} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[ -\frac{t^2}{2} \cdot \left( \frac{\omega_p}{\gamma} \right)^2 \cdot (\omega - \omega_p)^2 \right] \quad (8)$$

$$\gamma = \pi \cdot \left( \frac{2}{\ln 2} \right)^{\frac{1}{2}} = 5,336 \quad (9)$$

Die Darstellung als Kontourkarte (Spektrogramm oder *Voiceprint*) zeigt, wie die Signalintensität der einzelnen Frequenzen sich mit der Zeit ändert und enthält damit im hier betrachteten Fall die charakteristischen Eigenschaften des akustischen Signals auf einen Blick [16].

### 2.3 Validierung akustischer Sensoren nach ASTM E976 und ASTM E2374

#### EINLEITUNG

In der ASTM E976 [18] und ASTM E2374 [19] ist eine einfache und zeitsparende Prozedur zur Überprüfung der Vergleichbarkeit unterschiedlicher AE-Sensoren beschrieben. Dabei ist eine absolute Kalibrierung der AE-Sensoren nicht vorgesehen. Für diesen Zweck sind die ISO 12713 [20] bzw. ISO 12714 [21] heranzuziehen.

Das Ziel sowohl in der Norm ASTM E976 als auch dieser Prozedur liegt stattdessen darin, eine Veränderung der elektrischen bzw. akustischen Charakteristik aufgrund von Alterung oder Beschädigung zu ermitteln. Dabei werden folgende Sachverhalte berücksichtigt:

- Überprüfung der Zeitstabilität
- Überprüfung auf mögliche Beschädigungen nach Missbrauch oder falscher Benutzung sowie Unfall
- Vergleich von unterschiedlichen AE-Sensoren gleicher Baureihe, um eine Nutzung in einem Mehrkanal-System sicher zu stellen
- Überprüfung des Ansprechverhaltens nach einer thermischen Beanspruchung oder Auslagerung in einem aggressiven Medium/Milieu

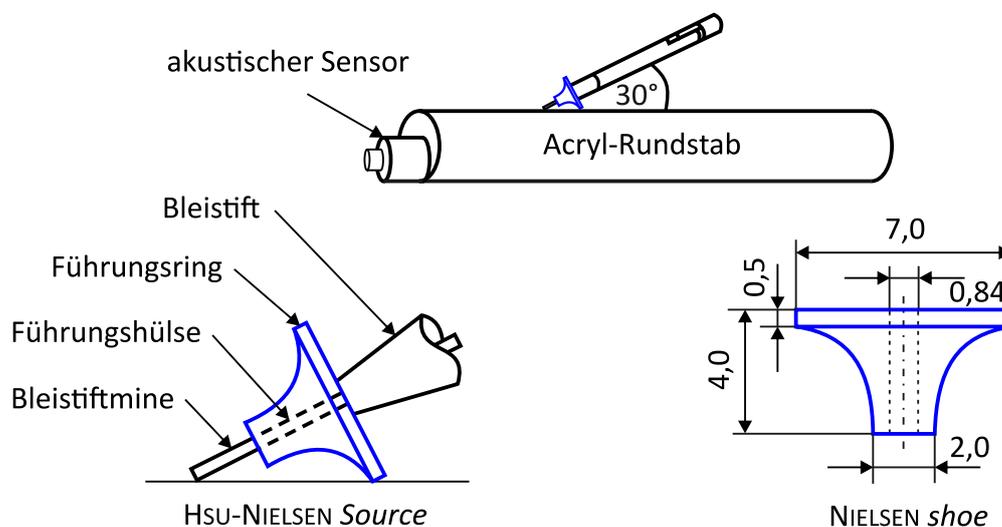
Die Norm sieht für die Überprüfung der Funktionsfähigkeit insgesamt drei verschiedene Signalquellen vor. Als geeignet erwiesen sich demnach ein elektrisch betriebener Ultraschall-Signalgeber (*ultrasonic transducer*), ein Gasstrahl (*gas jet*) oder ein Bleistiftminenbruch (*pencil lead break*). Im Folgenden wird nur auf den Bleistiftminenbruch eingegangen, welcher eine einfache Möglichkeit zur Erzeugung von reproduzierbaren, definierten Schallemissionsereignissen darstellt.

#### EXPERIMENTELLE VORAUSSETZUNGEN

Die für die Durchführung der Untersuchungen nötigen messtechnischen Voraussetzungen in den Normen beziehen sich im Wesentlichen auf den Vorverstärker. So ist eine Kabellänge von mehr als 2 m zu vermeiden, um Störungen im niedrigen Frequenzbereich zu minimieren. Ebenso wird eine Eingangsimpedanz von größer als 20 k $\Omega$  verlangt und die Verstärkung muss variabel im Bereich von 40–60 dB einstellbar sein. Weiterhin sollte der Vorverstärker eine Bandbreite von 20–1200 kHz aufweisen.

#### VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Um ein reproduzierbares akustisches Signal zu erhalten, wird eine Graphitmine mit definiertem Durchmesser und Härtegrad (Bleistiftmine) in einer geeigneten Halterung auf einem Acryl-Rundstab (*acrylic polymer rod*) vorsichtig gebrochen. Der plötzliche Bruch der Bleistiftmine generiert ein akustisches Signal, was von den zu untersuchenden AE-Sensoren aufgezeichnet wird. Eine schematische Darstellung des Bleistiftminenbruchs zeigt Bild 5.



**Bild 5:** Technische Anforderungen an den Führungsring (NIELSEN shoe) sowie an die Bleistiftmine (Hsu source) und schematische Darstellung des Bleistiftminenbruchs [18, 19] (Dimensionen in mm)

Die Anforderungen an die Bleistiftmine, wie Härtegrad, Durchmesser oder Länge der Mine sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Bleistiftmine wird als Hsu *pencil source* und der Führungsring als NIELSEN shoe bezeichnet, so dass in der Literatur die Bezeichnung Hsu-NIELSEN Source verwendet wird. In der ASTM E976 wird ein Abstand von 10 cm (4 in.) zwischen Sensor und Ort des Minenbruchs empfohlen und in der ASTM E2374 wird ein Winkel von 30° zur Oberfläche angegeben. Eine permanente Datenaufzeichnung der Wellenform mit anschließender Frequenzanalyse zur Validierung des transienten Signals durch den Bruch der Bleistiftmine ist die bevorzugte Auswertemethode.

**Tabelle 2:** Angegebene experimentelle Parameter in der ASTM E976

	<b>ASTM E976</b>
<b>Vorverstärker</b>	
Verstärkung (dB)	40–60
Bandbreite (kHz)	20–1200
Kabellänge (m)	≤ 2
<b>Bleistiftmine</b>	
Härtegrad	2H
Durchmesser (mm)	0,3–0,5
Minenlänge (mm)	2–3
Abstand Sensor und Ort des Minenbruchs (cm)	10
Abstand Sensor und Prüfkörperende (cm)	–

### 3 Beschreibung der Prozedur PSM-AE (2022-05)

#### EXPERIMENTELLES

Die in der Prozedur verwendeten experimentellen Bedingungen orientieren sich an der ASTM E976. Aufgrund der spezifischen Eigenheiten des Messsystems sowie der Nutzung des Vielzweckprüfkörper Typ 1A mit einer Gesamtlänge  $l_3$  von 170 mm nach DIN EN ISO 3167 [22], ergeben sich die in der Tabelle 3 genannten Abweichungen.

**Tabelle 3:** Vergleich der experimentellen Parameter zwischen der ASTM E976 und der MPK-AE

	<b>ASTM E976</b>	<b>MPK-AE</b>
<b>Vorverstärker – AEP-3</b>		
Verstärkung (dB)	40–60	40
Bandbreite (kHz)	20–1200	95–1000
Kabellänge (m)	≤ 2	1,2
<b>Bleistiftmine</b>		
Härtegrad	2H	2H
Durchmesser (mm)	0,3–0,5	0,3
Minenlänge (mm)	2–3	2
Abstand Sensor und Ort des Minenbruchs (cm)	10	5
Abstand Sensor und Prüfkörperende (cm)	–	5

Der Bleistiftminenbruch auf dem Vielzweckprüfkörper aus Polypropylen (PP) mit 20 Masseprozent Kurzglasfasern ist fünfmal zu wiederholen und für die Aufzeichnung ist ein Transientenrekorder mit einer Abtastrate (*sample rate*) von 10 MHz und 1024 Einzelmesspunkten (*samples*) zu verwenden.

Die Aufzeichnung des aus dem Bleistiftminenbruch resultierenden akustischen Signals ist vor der ersten Nutzung des Sensors durchzuführen, wobei die Ergebnisse dieser Messungen als Referenz für zukünftige Messungen dienen.

## AUSWERTUNG

Die Auswertung der aufgezeichneten transienten Signale beinhaltet die Ermittlung der Frequenzcharakteristik der zu untersuchenden Sensoren. Dabei wird sowohl die Fouriertransformation als auch die Wavelet-Transformation verwendet.

Bei der Fouriertransformation wird der Peak-Amplitudenwert  $A_p$  als Charakteristikum des Bleistiftminenbruchs verwendet und aus den fünf Einzelmessungen der Mittelwert gebildet. Zur Bewertung der Vergleichbarkeit von Wiederholungsmessungen bzw. von typgleichen Sensoren kann der Signifikanztest nach Gl.(10) [23] durchgeführt werden. Bei der Bewertung der Sensoren nach Gl. (11) liegt damit ein mathematisch begründbares Kriterium für die Vergleichbarkeit akustischer Sensoren vor.

$$z = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{n} + \frac{\sigma_y^2}{n}}} \quad (10)$$

...  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  die Mittelwerte der zu prüfenden Frequenz

...  $\sigma_{x/y}$  die Standardabweichung

...  $n$  die Anzahl der Messwerte

$$|z| > z_\alpha \text{ mit } z_\alpha = 2,575 \text{ für } \alpha = 0,01 \quad (11)$$

Für die Auswertung mit Hilfe der Wavelet-Transformation ist ein Mittelwertdatensatz aus den fünf Einzelmessungen (transiente Signale) zu errechnen, welcher anschließend in geeigneter Weise 2- bzw. 3-dimensional dargestellt wird, was die Grundlage für die Auswertung des Bleistiftminenbruchs bildet. Damit ist eine Bewertung der Charakteristik der akustischen Sensoren mit Hilfe der Messgrößen Frequenz  $f$  und Zeit  $t$  möglich.

Für die erfolgreiche Validierung von akustischen Sensoren wird die These zu Grunde gelegt, dass bei einem vergleichbaren sowie reproduzierbaren Ergebnis von einer Funktionsfähigkeit ausgegangen werden kann.

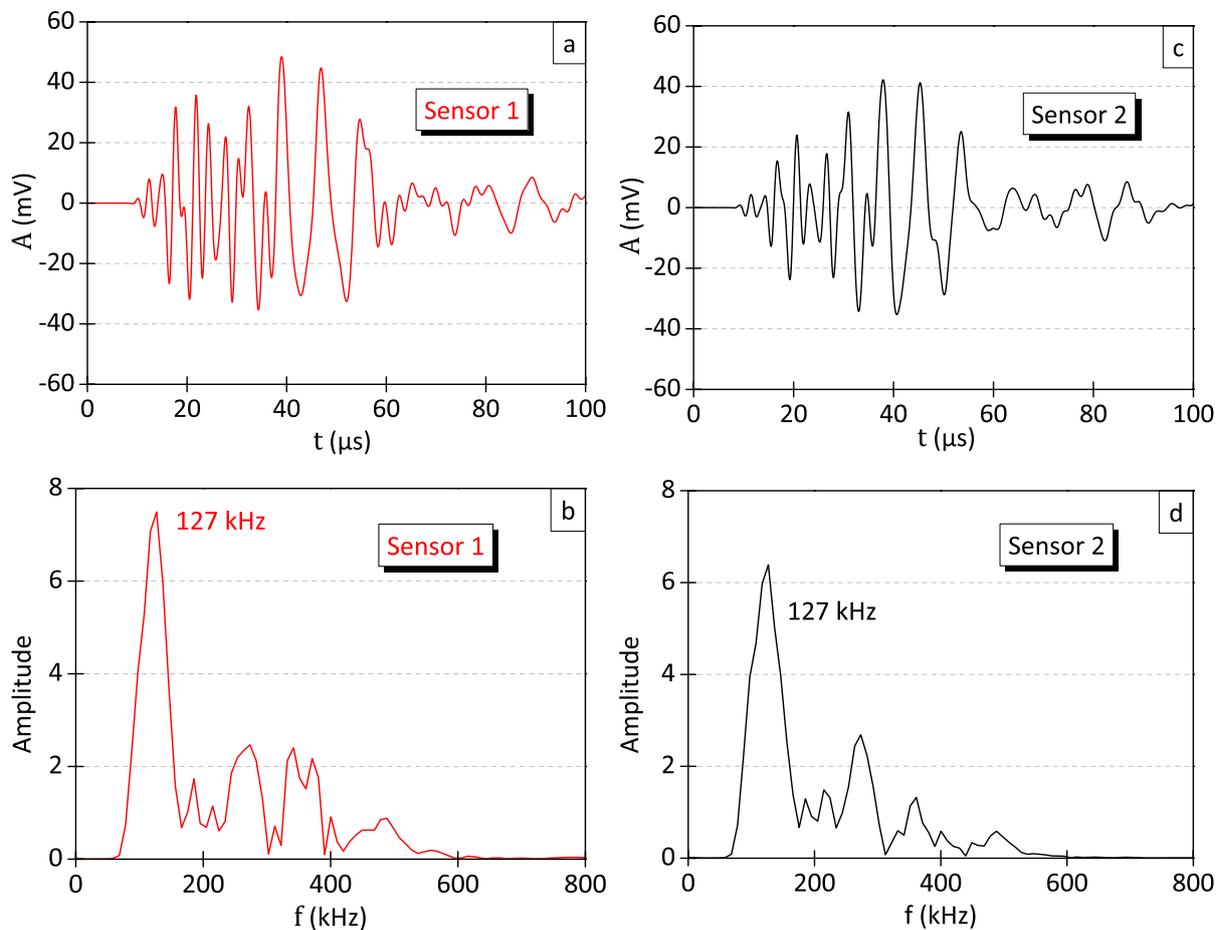
## 4 Beispielauswertung einer Validierung

Wie in Abschnitt „Validierung akustischer Sensoren nach ASTM E 976 und ASTM E 2374“ und im Abschnitt „Beschreibung der Prozedur MPK-AE (2019-02)“ erläutert, erfolgt die Validierung der akustischen Sensoren durch die Generierung eines reproduzierbaren Einzelsignals (Bleistiftminenbruch), welches als Maß für die Funktionsfähigkeit der Sensoren dient. Bei vergleichbarer Frequenzcharakteristik unterschiedlicher Sensoren kann von einer gesicherten Funktionalität bezüglich des Frequenzbereichs und der Empfindlichkeit der Messkette ausgegangen werden.

Zur Aufzeichnung der transienten Signale wurde das 3-kanalige Messsystem AMSY-4 (VALLEN-SYSTEME GMBH, ICKING, DEUTSCHLAND) mit einem Vorverstärker vom Typ AEP-3 und einem Breitbandsensor vom Typ AE204A verwendet. Die Bandbreiten des Vorverstärkers und des Sensors betragen 95–1000 kHz sowie 100–780 kHz. Die Impedanzanpassung bei der Applizierung des Sensors auf der Prüfkörperoberfläche erfolgte durch Bienenwachs.

## FOURIERTRANSFORMATION

Das aufgezeichnete transiente Signal für einen einzelnen Bleistiftminenbruch der typgleichen Sensoren sowie die Ergebnisse der Fouriertransformation sind im Bild 6 dargestellt.



**Bild 6:** Beispielhafte Darstellung der aufgezeichneten transienten Signale sowie die Ergebnisse der Fouriertransformation für den Sensor 1 (a–b) und Sensor 2 (c–d)

Für die Auswertung des Bleistiftminenbruchs wurde der maximale Peak der Frequenz  $f_p$  ermittelt. Durch die Bildung des Mittelwertes sowie der Standardabweichung aus den fünf Bleistiftminenbrüchen ist eine mathematische Absicherung gegeben. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 aufgelistet.

**Tabelle 4:** Frequenz des maximalen Peaks des Bleistiftminenbruchs sowie die Ergebnisse des Signifikanztests

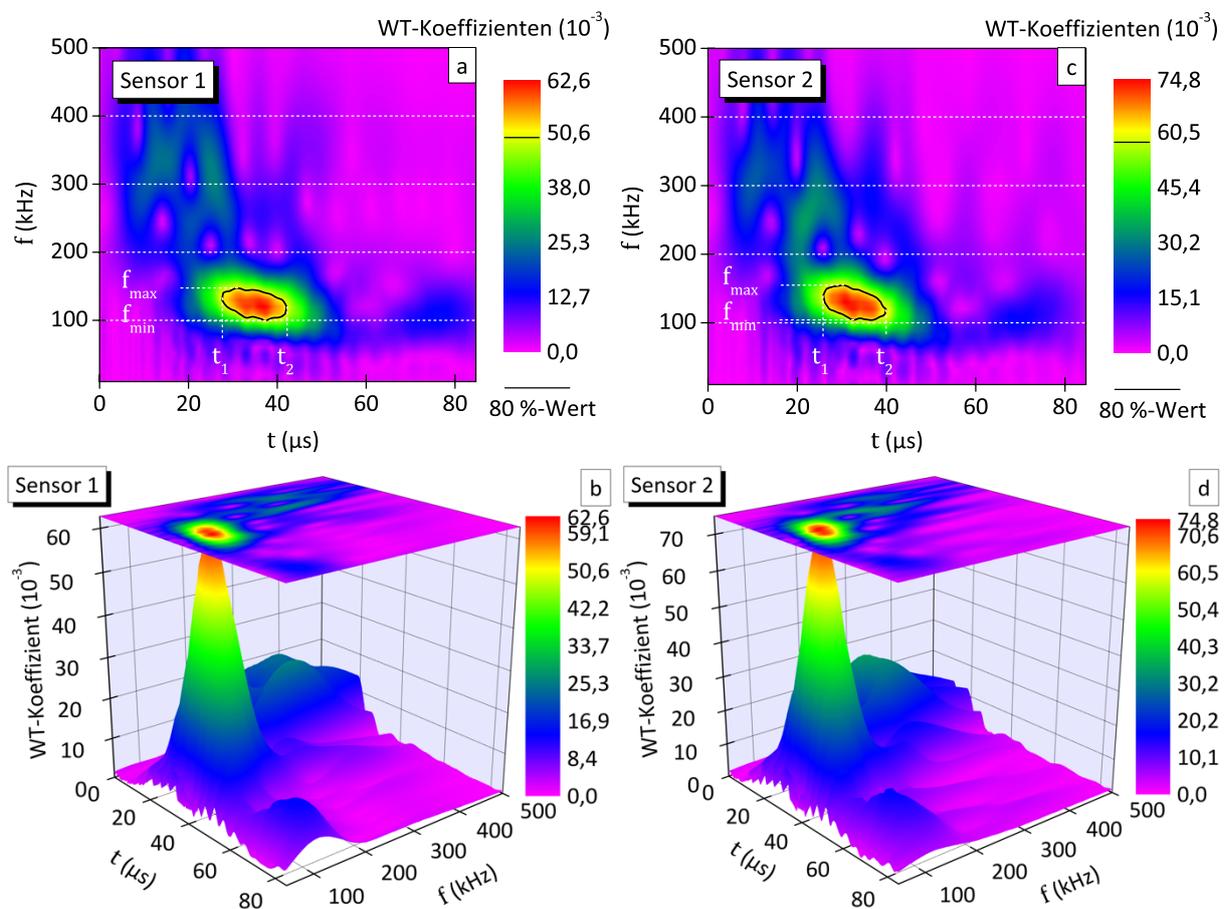
Sensor – Farbe des Sensorkabels	Maximaler Frequenzpeak $f_p$ (kHz)	Signifikanztest		
		Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,01$	Signifikanzwert $Z_\alpha$	Wert für $Z$ $Z_\alpha >  Z $
Sensor 1 – Rot	$121 \pm 5,17$	2,575	2,525	Ja
Sensor 2 – Schwarz	$127 \pm 0,44$		2,525	Ja

Es konnte eine Frequenz von 121 kHz für den Sensor 1 und 127 kHz für den Sensor 2 bestimmt werden. Mit Hilfe der Signifikanzüberprüfung der für beide Sensoren errechneten Peak-Frequenzen  $f_p$  konnte nachgewiesen werden, dass sich die Frequenzen nicht signifikant voneinander unterscheiden.

## WAVELET-TRANSFORMATION

Die Auswerteprozedur bei der Wavelet-Transformation unterscheidet sich im Vergleich zu der Fouriertransformation dahingehend, dass aus fünf Einzelmessungen ein Mittelwertdatensatz generiert wird, um eine mathematische Absicherung zu gewährleisten. Die bestimmten Koeffizienten aus dem Mittelwertdatensatz ermöglichen die Ermittlung des typischen Frequenzbereiches sowie den zeitlichen Ablauf des Bleistiftminenbruchs.

Im Bild 7 sind die Ergebnisse für die beiden untersuchten akustischen Sensoren dargestellt.



**Bild 7:** Ergebnis der Wavelet-Transformation für die typgleichen Sensoren AE204A-X804

Das Kriterium zur Festlegung des charakteristischen Frequenzbereiches bildet der 80 %-Wert des maximalen Wavelet-Koeffizienten. Dies ist in dem Bild 7a, b durch die eingezeichnete schwarze Linie verdeutlicht. Daraus kann ein minimaler ( $f_{\min}$ ) sowie ein maximaler Wert ( $f_{\max}$ ) für die Frequenz sowie der erste ( $t_1$ ) und letzte ( $t_2$ ) Ereigniszeitpunkt bestimmt werden, welche wiederum den typischen Frequenzbereich des Bleistiftminenbruchs charakterisieren. Aufgrund dieser Festlegung konnten die in Tabelle 5 genannten Frequenzbereiche und Zeiten angegeben werden.

**Tabelle 5:** Vergleich des Frequenzbereichs und der Ereigniszeitpunkte der untersuchten akustischen Sensoren

	Sensor 1 – Rot	Sensor 2 – Schwarz
minimale Frequenz $f_{\min}$ (kHz)	146	154
maximale Frequenz $f_{\max}$ (kHz)	100	103
Frequenzbereich $\Delta f$ (kHz)	46	51
erster Ereigniszeitpunkt $t_1$ ( $\mu\text{s}$ )	27,5	26,1
letzter Ereigniszeitpunkt $t_2$ ( $\mu\text{s}$ )	42,2	40,1
Zeitdifferenz $\Delta t$ ( $\mu\text{s}$ )	14,7	14,0

Wie aus der Tabelle 5 hervorgeht, konnte für beiden Sensoren sowohl ein vergleichbarer Frequenzbereich  $\Delta f$  wie auch ein vergleichbares Zeitfenster  $\Delta t$  für den Bleistiftminenbruch bestimmt werden.

Aus den Ergebnissen der Fouriertransformation sowie der Wavelet-Transformation lässt sich unter Beachtung der o. g. These für die untersuchten akustischen Sensoren aufgrund derselben Frequenzcharakteristik die Funktionsfähigkeit und damit der technisch einwandfreie Zustand ableiten. Darüber hinaus kann der Bruch einer Bleistiftmine unter definierten Bedingungen als gültige Methode angesehen werden, um die Validität von akustischen Sensoren zu ermitteln.

Aufgrund der zusätzlichen Zuordenbarkeit des zeitlichen Ablaufs des Bleistiftminenbruchs ist die Wavelet-Transformation gegenüber der Fouriertransformation bei der Auswertung zu bevorzugen, da durch die zeitliche Komponente eine zusätzliche Messgröße zur Charakterisierung des Bleistiftminenbruchs herangezogen werden kann.

## 5 Literaturhinweise

- [1] Grellmann, W., Seidler, S. (Hrsg.): Kunststoffprüfung. Carl Hanser Verlag, München (2015), 3. Auflage 752 Seiten, 457 Abbildungen, 36 Tabellen, ISBN (ISBN 978-3-446-44350-1; E-Book: ISBN 978-3-446-44390-7)
- [2] Bierögel, C.: Zur Problematik der Schallemissionsanalyse an verstärkten Thermo- und Duroplasten. Technische Hochschule Carl Schorlemmer Leuna-Merseburg (1984)
- [3] Block, J.: Detektion von Schädigungsgrenzen in kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen mittels Schallemissionsanalyse. Universität, Kassel (1988)
- [4] Krietsch, T.: Schallemissionsanalyse struktureller Versagensprozesse in faserverstärkten Polymeren. Technische Universität, Berlin (1999)
- [5] Schoßig, M.: Schädigungsmechanismen in faserverstärkten Kunststoffen – Quasistatische und dynamische Untersuchungen. Vieweg+Teubner | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (2011)
- [6] Bierögel, C.: Hybride Verfahren der Kunststoffdiagnostik. In: Grellmann, W., Seidler, S. (Hrsg.): Kunststoffprüfung. Carl Hanser Verlag, München, 3. Auflage (2015) 529–545, ISBN (ISBN 978-3-446-44350-1; E-Book: ISBN 978-3-446-44390-7)

- 
- [7] Schoßig, M., Zankel, A., Bierögel, C., Pölt, P., Grellmann, W.: Acoustic Emission Analysis for Assessment of Damage Kinetics of Short-Glass Fibre-Reinforced Thermoplastics – ESEM Investigations and Instrumented Charpy Impact Test. In: Grellmann, W., Langer, B. (Hrsg.): Deformation and Fracture Behaviour of Polymer Materials. Springer International Publishing, 247 (2017) 139–164, ISBN 978-3-319-41877-3
- [8] Bardenheier, R.: Schallemissionsuntersuchungen an polymeren Verbundwerkstoffen – Teil I: Das Schallemissionsmeßverfahren als quasi-zerstörungsfreie Werkstoffprüfung. Zeitschrift für Werkstofftechnik 11 (1980) 41–46.
- [9] DIN EN 1330-9 (2017-10): Zerstörungsfreie Prüfung – Terminologie – Teil 9: Begriffe der Schallemissionsprüfung.
- [10] Ramirez-Jimenez, C. R., Papadakis, N., Reynolds, N., Gan, T. H., Purnell, P., Pharaoh, M.: Identification of Failure Modes in Glass/Polypropylene Composites by Means of the Primary Frequency Content of the Acoustic Emission Event. Composites Science and Technology 64 (2004) 1819–1827.
- [11] Bohse, J.: Acoustic Emission Characteristics of Micro-failure Processes in Polymer Blends and Composites. Composites Science and Technology 60 (2000) 1213–1226.
- [12] N.N., Kompendium Schallemissionsprüfung – Acoustic Emission Testing (AT) – Grundlagen, Verfahren und praktische Anwendung. DGZfP-Fachausschuss Schallemissionsprüfverfahren, 2005
- [13] Butz, T.: Fouriertransformation für Fußgänger. Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden (2012)
- [14] Hubbard, B. B.: Wavelets – Die Mathematik der kleinen Wellen. Birkhäuser Verlag, Basel Boston Berlin (1997)
- [15] Blatter, C.: Wavelets – Eine Einführung. Springer Fachmedien, Wiesbaden (2003)
- [16] Suzuki, H., Kinjo, T., Hayashi, Y., Takemoto, M., Ono, K.: Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals. Journal of Acoustic Emission 14 (1996) 69–84.
- [17] Grosse, C. U., Ruck, H.-J., Bahr, G., Analyse von Schallemissionssignalen unter Verwendung der Wavelet-Transformation. 13. Kolloquium Schallemission, Jena, 27.–28.9. 2001.
- [18] ASTM E976-15 (2021): Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response.
- [19] ASTM E2374-16 (2021): Standard Guide for Acoustic Emission System Performance Verification.
- [20] ISO 12713 (1998-07): Non-destructive Testing – Acoustic Emission Inspection – Primary Calibration of Transducers.
- [21] ISO 12714 (1999-07): Non-destructive Testing – Acoustic Emission Inspection – Secondary Calibration of Acoustic Emission Sensors.
- [22] DIN EN ISO 3167 (2014-11): Kunststoffe – Vielzweckprüfkörper.
- [23] Bronstein, I. N., Semendjajew, K. A.: Taschenbuch der Mathematik. BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig (1985)