

Kontinuierliche und Wiederkehrende Prüfung von Schallemissionssensoren

Markus G.R. SAUSE¹, Stefan SCHMITT¹, Philipp POTSTADA¹

¹ Universität Augsburg, Institut für Materials Resource Management, Mechanical Engineering, Augsburg

E-Mail: markus.sause@mrm.uni-augsburg.de

Kurzfassung. In vielen Anwendungsbereichen der Schallemission kann es bei der Prüfung zu einer nachhaltigen Veränderung der Sensorcharakteristik kommen. Dies kann durch mechanische Beschädigung, thermische Belastung oder Verwendung unter aggressiven Umweltbedingungen geschehen. Unabhängig von visuell prüfbar Beschädigungen der Sensoren kann es dabei zu einer Verschiebung der spektralen Empfindlichkeit, einer Verringerung der absoluten Empfindlichkeit oder einer Erniedrigung des Signal-Rausch Verhältnis kommen. Bei der Prüfung erfordert dies eine Möglichkeit zur periodischen Überprüfung der Sensoren inklusive der verwendeten Koppelhilfsmittel. Für die wiederkehrende Prüfung finden sich entsprechende Handlungsempfehlungen in der Richtlinie SE 02 „Verifizierung von Schallemissionssensoren und ihrer Ankopplung im Labor“. Dieser Beitrag diskutiert Möglichkeiten zur kontinuierlichen Überwachung der Sensoren während der Prüfung und präsentiert ein Anwendungsbeispiel zur teilautomatisierten wiederkehrenden Prüfung von Schallemissionssensoren unter Anwendung der Richtlinie SE 02. Hierzu wurde ein Teststand für die Zuführung der zu prüfenden Sensoren konstruiert und die Signalaufzeichnung und Datenreduktion in entsprechenden frei verfügbaren Softwareprogrammen umgesetzt. Anhand ausgewählter Fallbeispiele wird die Funktionsweise demonstriert.

1. Einführung

Abhängig von der Zielanwendung der Schallemission (SE) kann es dazu kommen, dass die verwendeten Sensoren bei der Benutzung beschädigt werden. Dies kann durch mechanische Einwirkung, aber auch aufgrund des Auftretens von thermischen Lasten, der Benutzung unter aggressiven oder korrosiven Medien sowie durch radioaktive Strahlung geschehen. Zur sicheren Interpretation der aufgezeichneten Schallemission ist es daher notwendig, im Betrieb, sowie vor der Wiederverwendung von SE-Sensoren eine Prüfung der Funktionsfähigkeit durchzuführen. Während die Prüfung im Betrieb üblicherweise im eingebauten Zustand an einem Prüfobjekt stattfindet, ist für die wiederkehrende Prüfung üblicherweise ein (Labor-) Prüfstand vorgesehen. In beiden Fällen ist das Ziel die **Prüfung** des aktuellen Zustands relativ zum Ursprungszustand. Eine entsprechende Empfehlung für die Vorgehensweise zur wiederkehrenden Prüfung wurde durch die Richtlinie SE 02 „Verifizierung von Schallemissionssensoren und ihrer Ankopplung im Labor“ erarbeitet.

Im Unterschied hierzu handelt es sich bei der **Kalibrierung** von SE-Sensoren um eine Herangehensweise zur Ermittlung der spektralen Sensitivität des SE-Sensors bezogen auf eine Referenzgröße. Als Verfahren der Primärkalibrierung stehen derzeit nur die ASTM E 1106 und die Reziprozitätsmethode nach CEN-ISO/TR 13115:2011 (bzw. NDIS 2109) zur



Verfügung. Eine entsprechende Norm für die Sekundärkalibrierung stellt die ASTM E1781M-13 dar. Alle diese Herangehensweisen haben dabei zum Ziel, die spektrale Sensitivität quantitativ zu erfassen (z.B. in V/m oder Vs/m). Dennoch ist insbesondere die Gültigkeit der Reziprozitätsmethode aktuell Gegenstand kontroverser wissenschaftlicher Diskussionen [1,2]. Für praktische Belange ist die Relevanz der absoluten spektrale Sensitivität ebenfalls Gegenstand von Diskussionen, zumal diese nicht sensorspezifisch ist, sondern für jedes Prüfmedium separat zu bestimmen ist [3,4]. Dies liegt im Wesentlichen an der Ausbildung eines elektromechanisch gekoppelten Systems von SE-Sensor und Prüfmedium, sowie am akustischen Impedanzunterschied von Sensoroberfläche und Prüfmedium.

Ziel dieses Beitrags ist es, eine praktische Umsetzung der Richtlinie SE 02 „Verifizierung von Schallemissionssensoren und ihrer Ankopplung im Labor“ vorzustellen, welche eine teilautomatisierte Prüfung der SE-Sensoren zulässt. Dies ist insbesondere für hohe Sensorstückzahlen einer manuellen Prüfung vorzuziehen. Die in diesem Rahmen implementierte Software eignet sich darüber hinaus ebenfalls für die kontinuierliche Prüfung der SE-Sensoren im eingebauten Zustand am Prüfobjekt.

2. Experimenteller Aufbau

Für die wiederkehrende Prüfung von SE-Sensoren wurde ein modular nutzbarer Prüfstand umgesetzt, welcher in Abb. 1 dargestellt ist. Herzstück des Aufbaus ist ein $415 \times 415 \times 185$ mm großer Aluminiumblock als Propagationsmedium. Zur Reduktion der Reflektionen von den Seitenflächen wurde der Block mittels eines Gemisches aus Wolframpartikeln und Epoxidharz vollflächig strukturiert.

Als Signalquelle für die Erzeugung von Schallwellen wird ein Arbiträrwellenformgenerator Agilent 33210A genutzt. Dieser legt einen Signalpuls mit 20 ns Anstiegszeit und 10 V_{pp} Maximalspannung an ein konisches PZT-Element, welches durch einen Messingzylinder gedämpft wird. Die in Abb. 1 dargestellte Geometrie entspricht der in [5] als optimal ermittelten Geometrie als SE-Sensor. Das PZT-Element wird als Sender betrieben und mit einer Rate von 50 Hz gepulst. Zur Gewährleistung gleichbleibender Ankopplung wurden die Übergänge mit elektrisch leitfähigen Klebern ausgeführt und ein Federmechanismus für den Ausgleich von thermischen und mechanisch induzierten Längenausdehnungen konzipiert.

Der zu prüfende SE-Sensor wird auf der gegenüberliegenden Seite zur Signalquelle befestigt. Das Koppelmittel wird mit einer Dosierspritze auf den Sensor gegeben. Für die mechanische Kopplung wurde ein doppelt geführter Federmechanismus konzipiert, welcher einen gleichbleibenden Anpressdruck des SE-Sensor gewährleistet. Die Zuführung zum Prüfblock geschieht über einen Spannhebel. Über eine Kunststoff-Passform wird der SE-Sensor elektrisch vom Haltersystem entkoppelt. Diese Passform kann zudem ausgetauscht werden, so dass der Prüfstand für beliebige Sensorbauformen verwendet werden kann. Die Signalaufzeichnung kann mit jedem Schallemissionssystem vorgenommen werden, welches die Aufzeichnung der Wellen mit entsprechender Bandbreite (hier bis 1 MHz) zulässt. Im vorliegenden Fall wurde eine PCI-2 Karte (Mistras) in Verbindung mit einem 2/4/6 Vorverstärker (Mistras) bei einer Abtastrate von 40 MSP/s verwendet.

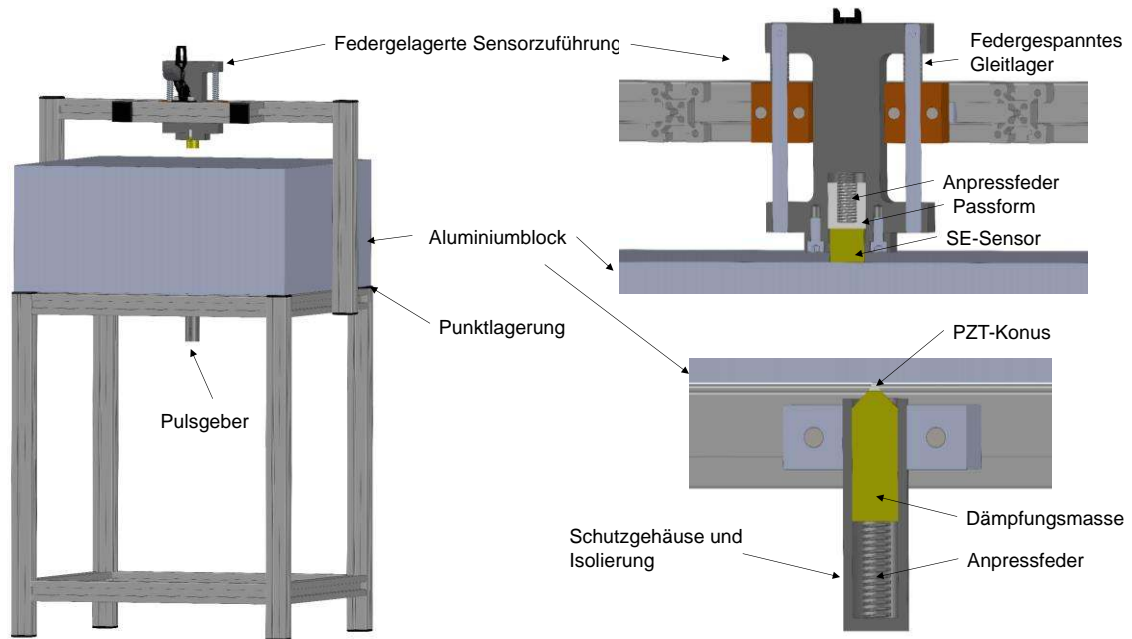


Abb. 1. Darstellung des Prüfstands (links) sowie des Pulsgebers und des Haltersystems (beide rechts).

Zur Bewertung der aufgezeichneten Testsignale wurde das Softwareprogramm SENSORtoolbox innerhalb des Programmpaket MATLAB™ entwickelt [6]. Grundlage für die Bewertung bildet ein Vergleich von Sensor-Referenzkurven mit den aktuellen Werten. Hierzu werden zunächst die Referenzsignale geladen und deren Mittelwert gebildet. Anschließend werden die aktuell gemessenen Signale geladen und deren Mittelwert gebildet. Das Programm zeigt hierzu die spektralen Kurvenverläufe, sowie ihre jeweiligen Standardabweichungen an (vgl. Abb. 2). Aus beiden Kurven werden typische Signalparameter aus der gemessenen Signalspannung $U(t)$ und der zugehörigen FFT-Werte $\tilde{U}(f)$ (s. Tab. 1) ermittelt, welche für den Vergleich von Soll- und Istzustand im Sinne der Richtlinie SE 02 herangezogen werden. Für die Mittelwertbildung, bzw. für die Triggerung der Signale muss ein Schwellwert in dB_{AE} angegeben werden. Eine Veränderung dieses Wertes hat mitunter signifikanten Einfluss auf die berechneten Signalparameter, muss jedoch abhängig vom jeweiligen Sensortyp spezifisch gewählt werden.

Als Ergebnis der Messung erhält der Benutzer direkt die Ausgabe des Prüfergebnisses als PASSED/FAILED (grün/rot) Anzeige, sowie protokolliert anhand der einzelnen SE-Parameter die ermittelte Signifikanz z für jeden SE-Parameter P_1 im Vergleich zur Referenz P_2 zu:

$$z = \frac{\bar{P}_1 - \bar{P}_2}{\sqrt{\frac{\bar{P}_1^2}{N} + \frac{\bar{P}_2^2}{N}}} \quad (1)$$

Hierbei wird mit \bar{P}_i der Mittelwert des Parameters bei einer Stichprobengröße N bezeichnet. Als Kriterium wird für eine signifikante Abweichung $|z| > 2,575$ auf Basis eines Signifikanzniveau $> 0,01$ festgelegt. Aufgrund des logarithmischen Bezugswert der Signalamplitude wird hier abweichend zu den restlichen Parametern in Tab. 1 ein Wert $|z| > 1.000$ angesetzt.

Überschreitet ein einzelnes Kriterium die jeweilige Signifikanz, so wird der Zustand als „FAILED“ ausgegeben. Durch die Überlagerung der beiden Mittelwert-Spektren besteht zudem die Möglichkeit einer schnellen visuellen Überprüfung des ermittelten Zustandes.

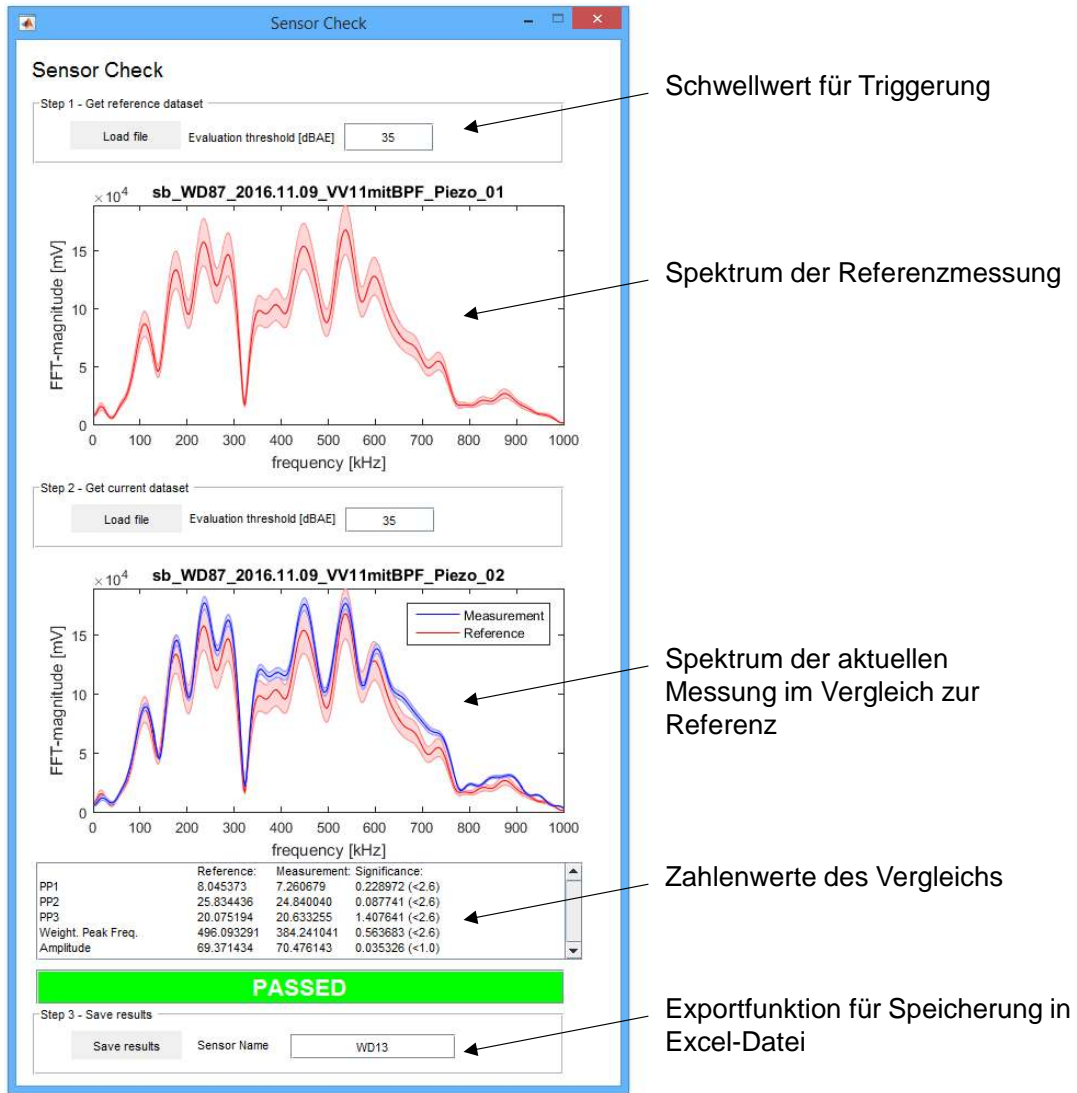


Abb. 2. Darstellung der Bedienoberfläche der SENSORtoolbox 1.38 (32 bit).

Bewertungskriterium	Definition	Signifikanzwert für Akzeptanz der Messung
Partial Power [%]	$\frac{\int_{f_1}^{f_2} \tilde{U}^2(f) df}{\int_{f_{start}}^{f_{end}} \tilde{U}^2(f) df}$ <p>frequency range of interest $[f_1; f_2]$ frequency range of investigation $[f_{start}; f_{end}]$</p>	< 2,575
Weighted Peak-Frequency [Hz]	$\langle f_{peak} \rangle = \sqrt{f_{peak} \cdot \frac{\int f \cdot \tilde{U}(f) df}{\int \tilde{U}(f) df}}$	< 2,575
Amplitude [dB]	$dB = 20 \log(U_{max}/1\mu V) - dB_{preamplifier}$	< 1,000

Tab. 1 Verwendete SE-Signalparameter zur Bewertung der SE-Sensoren.

3. Ergebnisse

Der Prüfablauf gliedert sich im Wesentlichen in zwei Teile. Zunächst wird die Betriebsbereitschaft des Prüfstandes sichergestellt (Pulsgeberverifizierung). Im Anschluss daran findet der eigentliche Prüfvorgang der SE-Sensoren (Sensorverifizierung) statt.

3.1 Pulsgeberverifizierung

Aufgrund des vergleichenden Charakters der Messung muss zur Inbetriebnahme des Prüfstandes eine Referenzmessung durchgeführt werden. Diese soll gewährleisten, dass sich außer dem zu prüfenden SE-Sensor keine Änderungen am Prüfstand ergeben haben. Dies betrifft insbesondere die Ankopplung des Pulsgebers, sowie die Einstellungen des Arbiträrwellenformgenerators und der Signalaufzeichnungsprogramme. Hierzu wird als Signalquelle der Bleistiftminenbruch nach Hsu-Nielsen verwendet und der Pulsgeber als SE-Sensor betrieben (s. Abb. 3-a). Die Wahl des Bruchwinkels, sowie die Länge der Bleistiftmine haben dabei entscheidenden Einfluss auf die Stärke und Frequenzlage des Signals [7]. Im Sinne der Selbst-Referenzierung sollte diese Parameter daher möglichst konstant gehalten werden. Für die Verifizierung werden 10-20 SE-Signale erzeugt, welche mit der SENSORtoolbox gegen eine frühere Messung verglichen werden können. Liegen die so ermittelten SE-Signalparameter unterhalb der jeweiligen Signifikanz kann der Prüfstand verwendet werden.

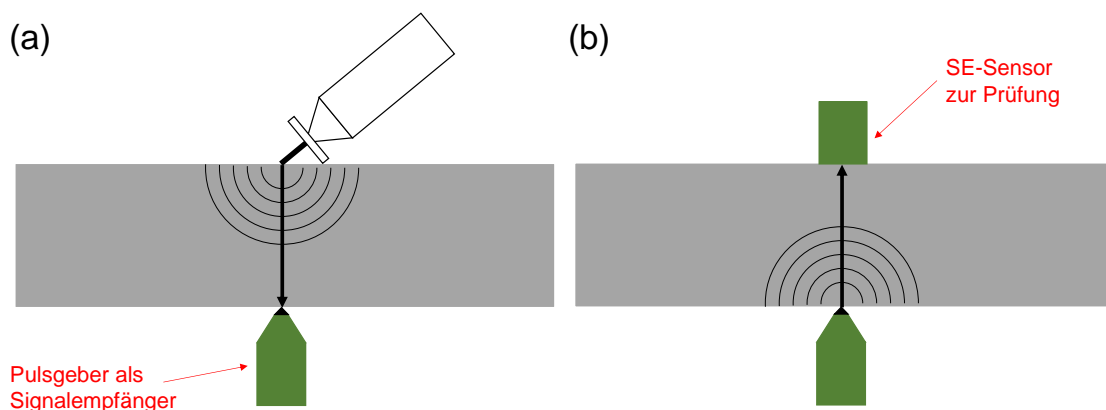


Abb. 3. Konfiguration zur Pulsgeberverifizierung (a) und zur Sensorverifizierung (b).

3.2 Reproduzierbarkeit des Prüfvorgangs

Zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit des Prüfvorgangs wurden zwei verschiedene Parameter untersucht. Innerhalb einer Messreihe wurde ein identischer Sensor von einer Person 5-fach neu vermessen. Dies beinhaltet die komplette Applikation des Koppelmittels, Montage elektrische Verbindung und Messung von 500 Signalen, sowie Demontage und Reinigung. Innerhalb einer zweiten Messreihe wurde ein identischer Sensor auf die gleiche Weise von 4 Personen jeweils 5-fach neu vermessen.

Wie in Abb. 4-a zu erkennen ist zeichnet sich die erste Messreihe durch eine sehr geringe Streuung aus. Das Streuband der spektralen Empfindlichkeit ist kaum zu erkennen. Die zweite Messreihe (vier Personen) ist in Abb. 4-b dargestellt. Im Vergleich zur ersten Messreihe ist der Einfluss des Prüfpersonal bereits zu erkennen. Dieser fällt mit einer maximalen Signifikanz von 1,16 (Extremwert aller Permutationen untereinander) jedoch immer noch sehr gering aus.

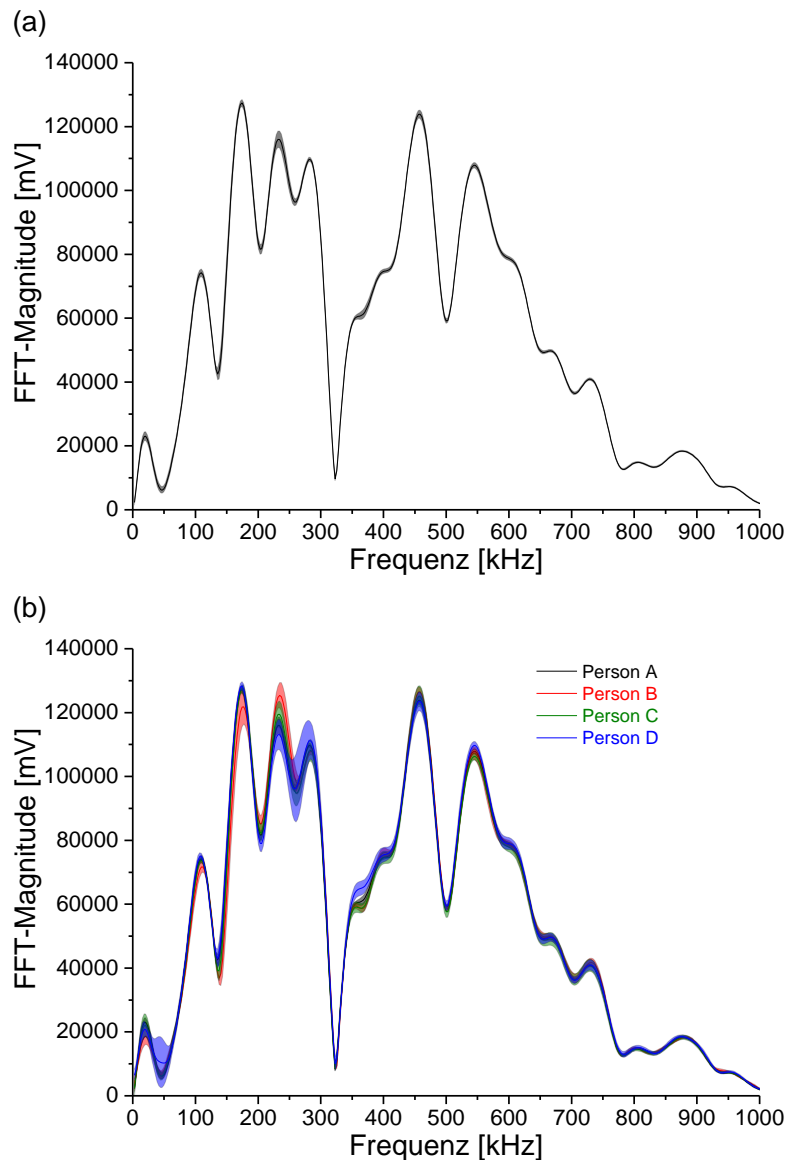


Abb. 4. Gemittelten Frequenzspektren für erste Messreihe – eine Person 2500 Signale in 5 Messungen (a) und gemittelte Frequenzspektren für zweite Messreihe – vier Personen mit je 2500 Signale (b).

3.3 Anwendung für die kontinuierliche Prüfung

Die bisher beschriebene Vorgehensweise eignet sich auch bedingt für die kontinuierliche Prüfung von SE-Sensoren an einem Prüfobjekt. Das Prinzip bleibt dabei das Referenzieren einer aktuellen Messung auf einen Ausgangszustand.

Als Schallquelle können in diesem Fall primär die SE-Sensoren selbst verwendet werden (s. Abb. 5-a). In vielen SE-Systemen können diese kontinuierlich während der Messung (oder bei kurzzeitiger Unterbrechung der Messung) als Pulsgeber aktiviert werden um ein solches Testsignal zu erzeugen. Als Referenzsignal dienen dabei die jeweils an den SE-Sensoren aufgezeichneten Signale vor dem Prüfvorgang (z.B. vor dem Aufbringen mechanischer Lasten). In periodischen Abständen könne diese Signale dann mittels der SENSORtoolbox zum Referenzsignal verglichen werden. Liegt eine nachhaltige Veränderung in der Ankopplung der beiden SE-Sensoren (Pulsgeber und Empfänger) oder des Ausbreitungsmediums (Initiierung und Ausbreitung von Schädigung, Korrosion, etc.) vor, so steigt die gemessene Signifikanz. Messungen an Faserverbundwerkstoffen mit sechs verschiedenen Laminatkonfigurationen (Details s. [4]) zeigen jedoch, dass die Signifikanz

der in Tab. 1 definierten SE-Parameter von Beginn der Prüfung bis zum Totalversagen der Prüfkörper nur auf ca. 2,0 – 2,5 ansteigt. Im Vergleich dazu äußert sich eine Änderung der Ankopplung (z.B. durch Verschieben des SE-Sensors) mit einem Anstieg der Signifikanz auf Werte $> 2,5$.

Als alternative Schallquelle zur Erzeugung von Referenzsignalen ist in Abb. 5-b die Erzeugung von Testsignalen mittels einer Hsu-Nielsen Quelle dargestellt. Konzeptionell eignet sich diese Herangehensweise ebenfalls zur Erzeugung von Testsignalen. Jedoch ist dies mit zwei Nachteilen verbunden. Zum einen muss die Testquelle im laufenden Betrieb an identischer Stelle aufgebracht werden. Aus sicherheitstechnischen Gründen sollte das Prüfobjekt zu diesem Zweck entlastet werden, was vielfach nur schwierig oder gar nicht umsetzbar ist. Zum anderen wirkt sich die lokale Steifigkeit unterhalb der Bleistiftmine ebenfalls auf das erzeugte SE-Signal aus. Im Falle lokal auftretender Schädigungen kann somit kein gültiges Testsignal mehr erzeugt werden, bzw. die Sensorankopplung wird ggf. fälschlicherweise als defekt angenommen. Ein Verlust der lokalen Steifigkeit durch Auftreten innerer Schädigungen kann natürlich auch unterhalb eines SE-Sensor auftreten, jedoch ist der Einfluss aufgrund der typischerweise flächigen Ankopplung deutlich geringer. Ein Vorteil der Hsu-Nielsen Quelle besteht jedoch darin, dass bei gültiger Durchführung direkt nur der jeweils betroffene Sensor geprüft werden muss, während bei der Konfiguration in Abb. 5-a sowohl der Sender als auch der Empfänger die Ursache für die Zunahme der Signifikanz sein können. Durch Kreuzkorrelation (Sender 1 – Empfänger 2 und Sender 3 – Empfänger 2) kann jedoch direkt auf den maßgeblich verantwortlichen Teil der Kette geschlossen werden.

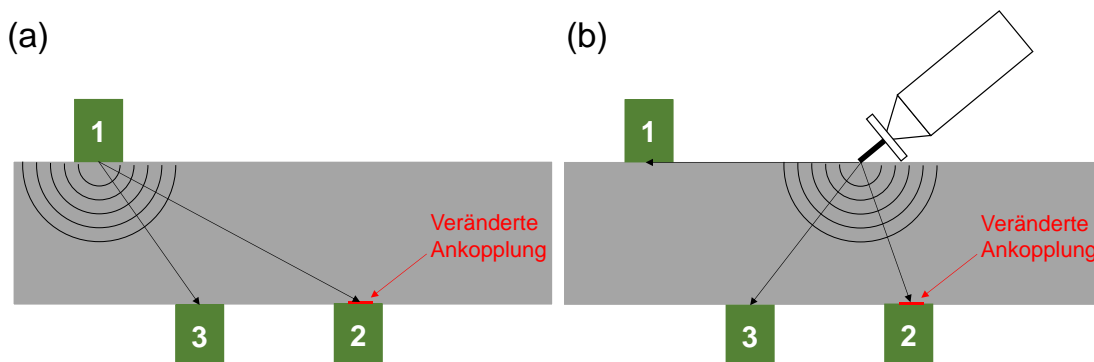


Abb. 5. Konfiguration zur kontinuierlichen Sensorverifizierung mittels Pulsgebern (a) und mittels Hsu-Nielsen Quelle (b).

5. Zusammenfassung

Der vorgestellte Prüfstand zur wiederkehrenden Prüfung von SE-Sensoren zeichnet sich durch eine hohe Reproduzierbarkeit und Benutzerunabhängigkeit aus. In Kombination mit der vorgestellten frei verfügbaren Software SENSORtoolbox 1.36 stellt dies ein gutes Hilfsmittel für die Umsetzung der Richtlinie SE 02 der DGZfP dar. Das zugrundeliegende Konzept kann zudem direkt für die Verifikation des Prüfstandes, sowie für die Bewertung der Ankopplung von SE-Sensoren im kontinuierlichen Betrieb verwendet werden.

Referenzen

- [1] K. Ono, Calibration Methods of Acoustic Emission Sensors, Materials (Basel). 9 (2016) 508. doi:10.3390/ma9070508.

- [2] H. Hatano, A Memo about Dr. Ono's Critical Observations on Reciprocity Calibration, in: *Prog. Acoust. Emiss. XVIII*, Kyoto, Japan, 2016: pp. 1–8.
- [3] L. Goujon, J.C. Baboux, Behaviour of acoustic emission sensors using broadband calibration techniques, *Meas. Sci. Technol.* 14 (2003) 903–908. doi:10.1088/0957-0233/14/7/302.
- [4] M.G.R. Sause, *In Situ Monitoring of Fiber-Reinforced Composites*, Springer International Publishing, Cham, 2016. doi:10.1007/978-3-319-30954-5.
- [5] M.G.R. Sause, M.A. Hamstad, S. Horn, Finite element modeling of conical acoustic emission sensors and corresponding experiments, *Sensors Actuators A Phys.* 184 (2012) 64–71. doi:10.1016/j.sna.2012.06.034.
- [6] M.G.R. Sause, *SENSORtoolbox 1.38*, (2016).
- [7] M.G.R. Sause, Investigation of Pencil-Lead Breaks as Acoustic Emission Sources, *J. Acoust. Emiss.* 29 (2011) 184–196.