

# Sensorverifikation in absoluten Einheiten ohne großen Transferblock

Hartmut VALLEN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vallen Systeme GmbH, Schäftlarnner Weg 26, Icking

Kontakt E-Mail: hartmut@vallen.de

**Kurzfassung.** Anwender des Phänomens Schallemission wünschen sich seit Jahren eine einfache, praktikable Methode für die Verifizierung der Empfindlichkeit von Schallemissionssensoren (AE-Sensoren) in absoluten Einheiten, z.B. Volt per mm/s Partikelgeschwindigkeit oder Volt per nm Partikelverschiebung. Aktuelle Standards erfordern hierzu u.a. einen schweren unhandlichen Transferblock (ca 2 Tonnen) und einen besonderen Referenzsensor. Beides ist im Handel nicht erhältlich und eine Realisierung wäre extrem aufwändig. Die meisten Sensorhersteller verwenden die Methode der Direktkopplung: Ein elektrisch angesteuerter Transmitter (TM) regt den face-to-face (F2F) angekoppelten und zu verifizierenden Sensor (SUT) an, dessen elektrische Antwort auf die Anregung gemessen wird. Diese Methode liefert eine gut reproduzierbare Empfindlichkeitskurve, allerdings nur, wenn immer das gleiche TM-Exemplar verwendet wird. Der Beitrag berichtet von der flächigen Vermessung der von einem elektrischen Impuls stimulierten Bewegung von 3 TMs mit einem Scanning-Laservibrometer. Es wurden Unterschiede festgestellt, zB inhomogene Bewegungsmuster aus TM-internen Reflexionen, wenige  $\mu\text{s}$  nach dem Puls, und unterschiedliches Nachschwingverhalten, das 50  $\mu\text{s}$  oder länger andauern kann. Der Vortrag wird den aktuellen Status der Arbeiten beleuchten.

## Einführung

Die hier behandelte Methode der Verifikation der Empfindlichkeit eines Sensors für die Schallemission (AE, für Acoustic Emission) in einer „face to face“ (F2F) Kopplung wurde schon 1982 von Hill in [1] erwähnt. Erst 2008 beschrieb Ono und Cho in [2] Details einer experimentellen Anwendung der Methode. 2015 kritisierten Burks und Hamstad in [3] insbesondere die nicht nachvollziehbare und uneinheitliche Verwendung der Referenz auf  $\text{V}/\mu\text{Bar}$ . 2015 erschien von Ono in [4] eine systematische Studie über die Methoden der AE Sensorkalibrierung und über eine Modernisierung der F2F Methode durch Verwendung eines Punktlaservibrometers zur Vermessung von Transmittern. In [5] und [6] berichtete der Autor über den Einsatz eines Scanning Laservibrometers zur flächigen Vermessung der aktiven Fläche eines Transmitters, in [5] bei Anregung mit einem sinusförmigen Signal, in [6] mit einem Impulssignal. Da in [6] der auch für diesen Beitrag verwendete Aufbau recht detailliert beschrieben ist, und [6] mit dem Link in der Referenzliste abgerufen werden kann, wiederholt dieser Beitrag nur Details, die zum Verständnis dieses Beitrags notwendig sind.

Eine einfach durchführbare und ökonomisch vertretbare Methode für die Verifikation der Empfindlichkeit von AE Sensoren mit reproduzierbaren Ergebnissen, auch wenn unterschiedliche Transmitter (TM) eingesetzt werden., steht auf dem Wunschzettel vieler AE Experten sehr weit oben. Die meisten Sensorhersteller verwenden die Face-to-Face (F2F)



Methode zur Endprüfung ihrer Produkte und stellen den Kunden Software zur Verfügung, mit der handelsübliche Signalgeneratoren zur Erzeugung des elektrischen Stimulationssignals und das normale AE System zur Messung der Antwort des zu verifizierenden Sensors (SUT) verwendet werden können. Das Ergebnis dieser gängigen Verifikationsmethode ist eine Kurve der Funktion „Spannungsausgang des SUT in Volt, über der Frequenz in kHz, pro  $\mu\text{bar}$  Druckerregung, meist konvertiert in dB mit Referenz  $0\text{dB} = 1 \text{ V}/\mu\text{bar}$ .

### Prinzipieller Aufbau einer Face-to-Face Sensorverifikation

Abb. 1 zeigt das Blockdiagramm der F2F Sensorverifizierung: Der Transmitter erhält vom arbiträren Funktionsgenerator (AFG) die Anregungsspannung  $U_T$  und erzeugt eine Bewegung, die vom SUT in eine Antwortspannung ( $U_{SUT}$ ) umgesetzt wird. Beide Spannungen werden von einem Transientenrecorder aufgezeichnet und angezeigt.

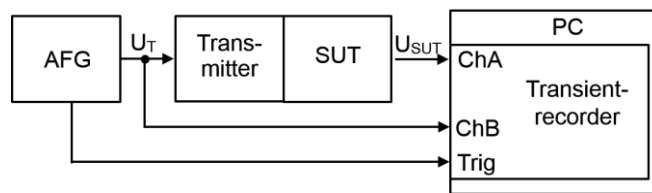


Abb. 1. Blockschaltbild der F2F Sensorverifizierung

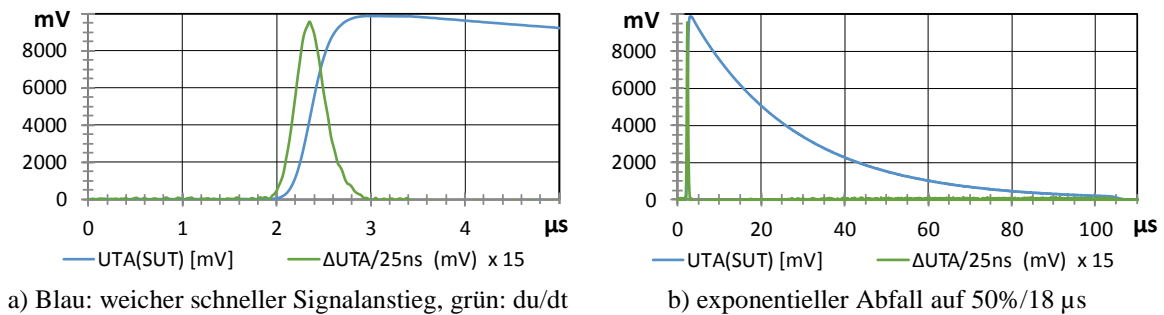


Abb. 2. Stimulationssignal  $U_T$  am TM im F2F-Aufbau.

Abb 2 zeigt das TM-Signal ( $U_T$ ) im F2F Aufbau. Links zeigt die blaue Kurve den Signalanstieg und die grüne dessen erste Ableitung, die einer Gaussfunktion entspricht und bei der gegebenen kapazitiven Last proportional zum TM-Strom ist. Rechts sieht man den langsamen exponentiellen Abfall auf 50% pro 18  $\mu\text{s}$ . Bei vorwiegend kapazitiver Last des TM und idealer TM-Funktion wäre die blaue Kurve proportional zur Verschiebung und die grüne proportional zur Geschwindigkeit der angeregten Partikelbewegung.

### Prinzipielle Ermittlung der Empfindlichkeit auf Geschwindigkeitsanregung

Formel 3 in [2] kann wie folgt umgestellt werden

$$U_{SUT} = U_T + R_V + T_V \quad (1)$$

$$T_V = V - U_{TL} \quad (2)$$

Dies führt zu:

$$R_V = (U_{SUT} - V) + (U_{TL} - U_T). \quad (3)$$

Jede Variable in (1) bis (3) adressiert ein Spektrum in dB, wobei 0dB einer der nachfolgend angegebenen [Einheit] entspricht:

$U_{SUT}$ : SUT Ausgangsspannungsspektrum in [V]

$U_T$ : TM Eingangsspannungsspektrum in [V]

$R_v$	Empfindlichkeit auf Partikelgeschwindigkeit in [V/(mm/s)]
$T_v$	TM-Funktion auf Partikelgeschwindigkeit in [(mm/s)/V]
$V$	Partikelgeschwindigkeit (vom Laservibrometer) in [mm/s]
$U_{TL}$	Spannungsspektrum am TM bei Geschwindigkeitsmessung in [V].

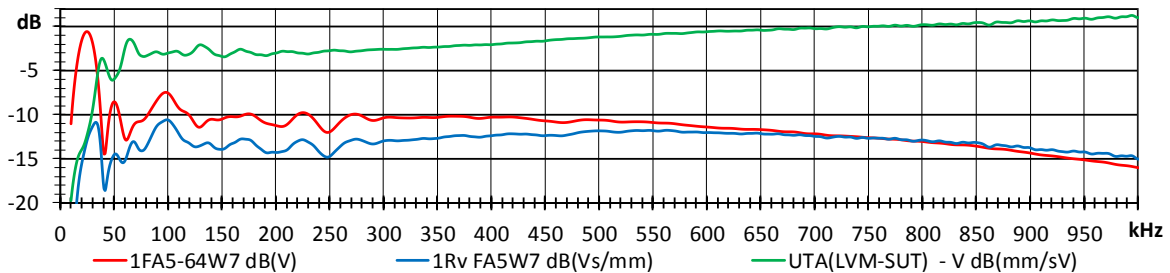


Abb. 3. Wichtige Spektren zur Bestimmung der Empfindlichkeit  $R_v$

Abb. 3 zeigt in rot das Antwortspektrum eines SUT, in diesem Fall ein V103 Breitbandsensor, in grün die Summe  $U_{TL} - U_T - V$ , und in blau das resultierende Empfindlichkeitsspektrum auf Geschwindigkeitsanregung ( $R_v$ ), als Summe der roten und grünen Kurve.

### Messung der Partikelgeschwindigkeit mit einem Scanning Laservibrometer

Noch immer ist eine Herausforderung nicht befriedigend gelöst: Die Streuung bestimmter Eigenschaften der kommerziell verfügbaren Transmitter (TM) kann in den gewonnenen Empfindlichkeitsspektren nicht vernachlässigbare Abweichungen verursachen. Deshalb können die Hersteller (noch) nicht garantieren, dass die mit dem Hersteller-TM erzeugten Empfindlichkeitskurven identisch sind mit denen, die mit dem Kunden-TM erzeugt werden. Es wird dem Kunden empfohlen, von neuen Sensoren eine Referenzkurve aufzunehmen, um später Abweichungen vom Neuzustand feststellen zu können.

Die Vermessung der aktiven TM-Fläche hatte u.a. das Ziel, Korrelationen zwischen der Streuung der Empfindlichkeitskurven und der Streuung der Partikelbewegung zu entdecken. Wir verwendeten ein Scanning Laservibrometer (LVM), um die Partikelgeschwindigkeit in absoluten Millimeter pro Sekunde an 161 Positionen auf der aktiven Fläche des TM (Olympus V104) zu messen. Abb. 4 zeigt das Schema der Messpositionen: 10 Ringe mit je 16 Positionen und eine Zentralposition. Der Ringabstand betrug 1,27 mm, der äußerste Ringdurchmesser 25,4 mm.

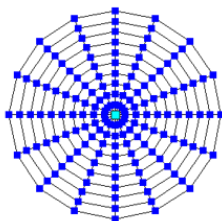


Abb. 4. Positionen der Messpunkte

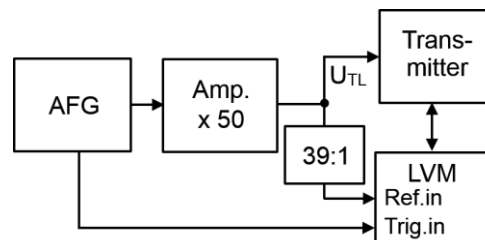


Abb. 5. Blockdiagramm des LVM Aufbaus

Das Blockdiagramm der LVM Messung in Abb. 5 unterscheidet sich von Abb. 1 durch die zusätzliche Verwendung eines Hochspannungsverstärkers für die TM-Spannung  $U_{TL}$  und den 39:1 Spannungsteiler, der die hohe TM-Spannung auf den Messbereich des LVM reduziert. Die zusätzliche Verstärkung verbessert das Signal-Rauschverhältnis des LVM Ausgangssignals.

Da die Abtastrate des LVM (Polytec PSV 400) auf 2,56 Megasample per Sekunde (MS/s) begrenzt ist, wurde diese Rate mittels „sinc“ Funktion (in Matlab verfügbar) auf

40 MS/s interpoliert. Da [6] den Interpolationsfehler nicht erwähnt, soll hier kurz darauf eingegangen werden:

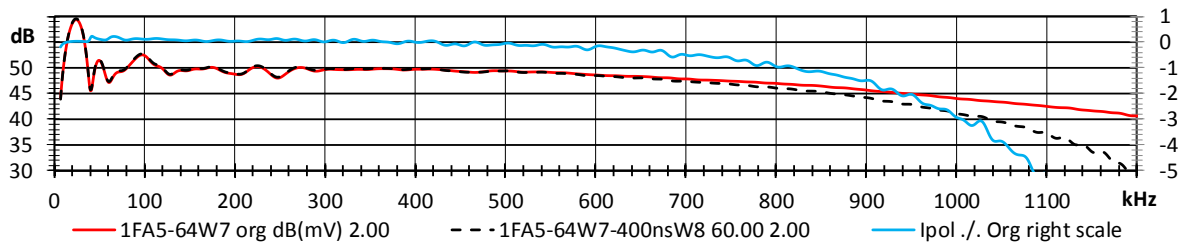


Abb. 6. Auswirkung der Interpolation von 2,56 MS/s auf 40 MS/s auf die FFT an einem Beispielsignal

Abb. 6 zeigt in rot die FFT einer mit 40 MS/s abgetasteten Sensorantwort. Die schwarz-gestrichelte Kurve zeigt die FFT des interpolierten Signals, das aus jedem 16. Abtastwert des roten Signals gebildet wird. Die blaue Kurve zeigt die Abweichung, wofür die rechte Achsenskala in dB gilt. Sie bleibt bis ca. 580 kHz unter  $\pm 0,2$  dB, und erreicht bei 820 kHz -1 dB. In der späteren Realisierung kann ein Algorithmus auf diese Weise eine erste Interpolation mittels einer zweiten Interpolation selbst überprüfen und korrigieren.

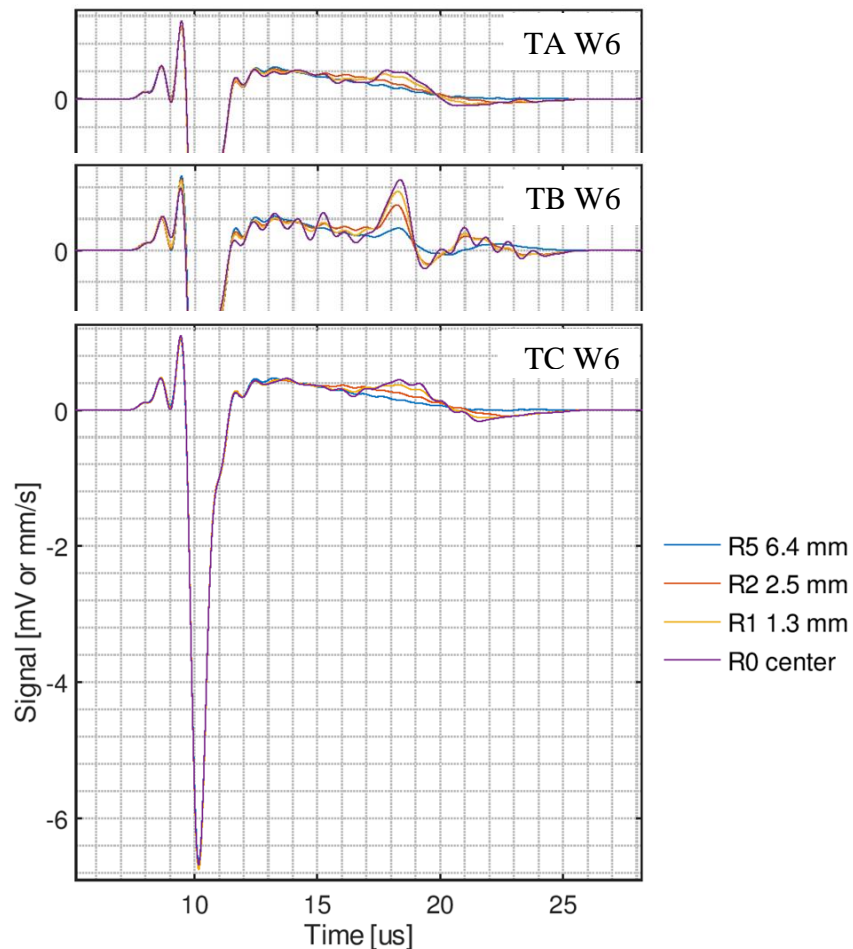
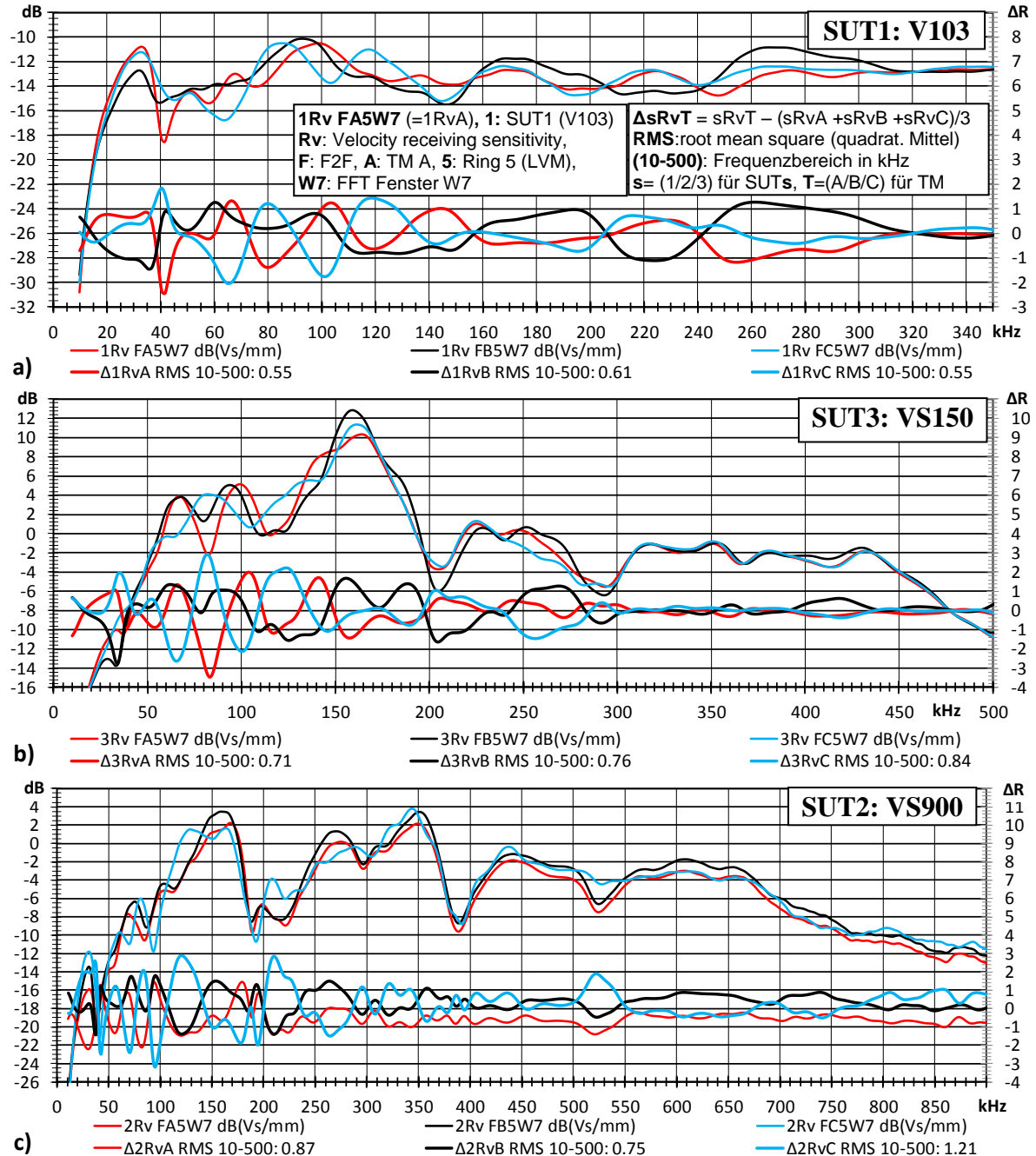


Abb. 7. Partikelgeschwindigkeiten über die Flächen von 4 angegebenen Radien über der Zeit, der Transmitter TA, TB und TC.

Das LVM liefert für jede Messposition eine ASCII Datei mit dem Zeitsignal. 16 Zeitsignale von 16 Positionen pro Ring werden in ein Ringsignal gemittelt. Vom Zentrums punkt (auch Ring 0 genannt) ausgehend, werden aus den Ring-Signalen (1 bis 9, der 10. Ring wird nicht benutzt) die entsprechenden Flächensignale berechnet. Abb. 7 zeigt die Flächensignale 0, 1, 2 und 5. Die Legende zeigt den Radius der jeweiligen Fläche. Auffallend ist die extrem gute Übereinstimmung des Hauptimpulses aber auch die Existenz

eines zusätzlichen Impulses, 8  $\mu$ s nach dem (negativen) Maximum des Hauptimpulses. Die an dem zusätzlichen Impuls auseinanderlaufenden Kurven signalisieren eine TM-spezifische Inhomogenität der Bewegungsverteilung über der TM-Fläche. TM B zeigt die höchste Inhomogenität.

### Empfindlichkeitsunterschiede: 3 Transmitter, 3 SUTs, 2 Fensterlängen

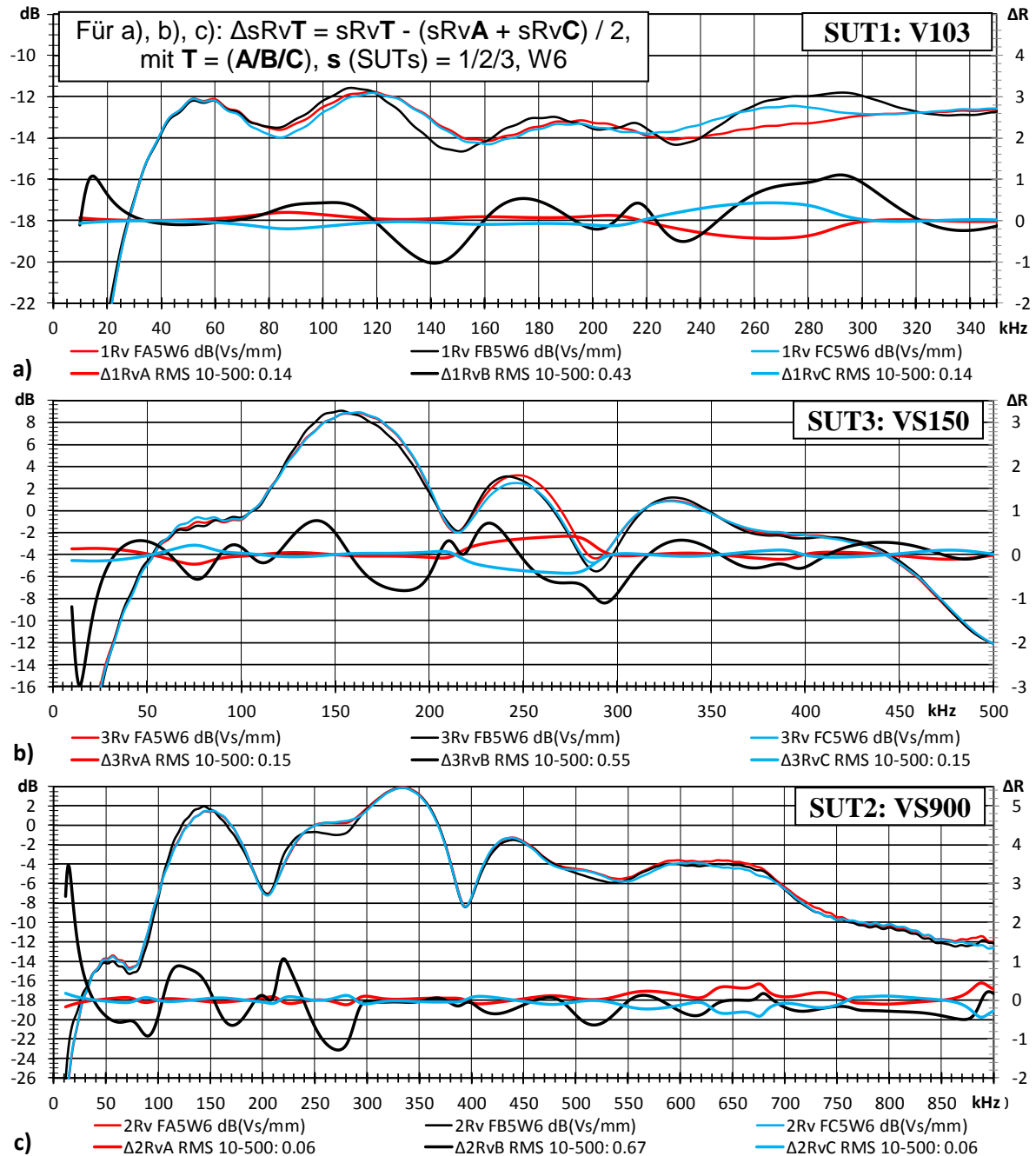


**Abb. 8.** Empfindlichkeitsspektren (sRvT), oberes Triplet, linke Skala, und Abweichungen vom Mittel ( $\Delta sRvT$ ), unteres Triplet, rechte Skala, s (für SUT1/2/3), T (für TM A/B/C). Anregung von drei SUTs 8a) V103, 8b) VS150, 8c) VS900, durch TA (rot), TB (schwarz), TC (blau), Zeitfenster: W7.

Das Prinzip der Signalbenennung in der Legende ist in Abb. 8a) zwischen den Kurventriplets erläutert. Im Folgenden ist mit „sRvT“ das Spektrum der Empfindlichkeit (Rv) des SUTs (1/2/3), angeregt durch den Transmitter T (A/B/C) gemeint, mit „ $\Delta sRvT$ “ die Abweichung des Spektrums „sRvT“ vom Mittelwert. Die Zeitsignale  $U_{SUT}$  und V (Geschwindigkeit)

wurden für Abb. 8 mit dem Fenstersignal **W7** multipliziert. **W7** steigt von  $-3 \mu\text{s}$  bis  $-1 \mu\text{s}$  weich (Cosinus-halbwellenförmig, nicht dargestellt) von 0 auf 1 an und fällt von  $50 \mu\text{s}$  bis  $60 \mu\text{s}$  weich auf 0 ab. Das Impulsmaximum liegt bei  $0 \mu\text{s}$ ,

Für Abb. 9 wurde das Fenstersignal **W6** verwendet, das wie **W7** ansteigt, aber schon von  $11 \mu\text{s}$  bis  $16 \mu\text{s}$  weich auf 0 abfällt. Abb. 13 links zeigt die Auswirkung dieser Fensterung am Beispiel der Antwort eines 150 kHz Sensors.



**Abb. 9.** Empfindlichkeitsspektren, Abweichungen, SUTs und TMs wie in Abb 8,  
 $\Delta sRvT = (sRvA + sRvC)/2$ ,  $s$  steht für den SUT (1/2/3),  $T$  für den TM (A/B/C), Zeitfenster:  $W6$

Die oberen Kurventriplets in allen Diagrammen in Abb. 8 und 9 zeigen drei Empfindlichkeitsspektren (**Rv**) a) für SUT1 Typ V103 SN64 (Breitband), b) für SUT3, Typ VS150-M SN 6379 (150 kHz resonant), und c) für SUT2, Typ VS900-M SN 4464 (multiresonant), die unter Verwendung der TM A (rot), B (schwarz) und C (blau), in Bezug auf die linke Skala in dB. Das untere Kurventriplett zeigt in gleicher Farbzuordnung die Abweichungen vom Mittelwert der Rv Kurven ( $\Delta sRvT$ ), in Bezug auf die rechte Skala in dB. Für Abb. 8

wurden alle drei Rv Kurven gemittelt, für Abb. 9 nur RvA und RvC, da gemäß Abb. 7 die TMs A und C homogener sind als B. Die Rv Kurven in Abb. 9 sind bereits mit der mittleren Abweichung der gemessenen Kurven (Abb. 10 b)) korrigiert. Dies bewirkt nur sehr kleine Änderungen für TA und TC aber große für TB. Jede Legende der  $\Delta Rv$  Kurven zeigt einen Frequenzbereich in kHz und einen Zahlenwert, der dem quadratischen Mittelwert (englisch RMS) der  $\Delta Rv$  Kurve über dem genannten Frequenzbereich entspricht.

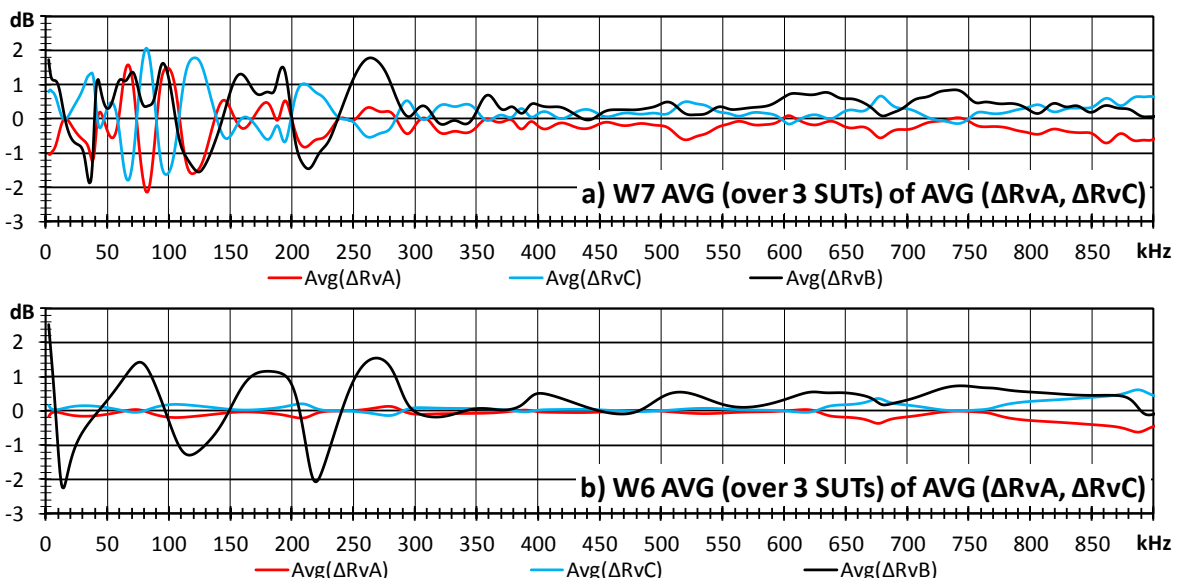
Von den Spektren in a) wird nur der Bereich bis 350 kHz angezeigt, um die Auflösung für niedrige Frequenzen zu erhöhen. Die Abweichungen über 320 kHz sind nicht relevant.

Tabelle 1 fasst die Streuungen in Abb. 8 und 9 zusammen: Mit der Anwendung von W6 statt W7 kann die Empfindlichkeitsstreuung bei Verwendung von TA und TC drastisch reduziert werden. Die unterste Linie der Tabelle 1 zeigt, als Verbesserungsfaktor, das Verhältnis der Werte in Zeile  $\emptyset W7$  zu  $\emptyset W6$ .

**Tabelle 1.** Empfindlichkeitsunterschiede von drei Transmittern, drei SUT Typen, zwei FFT-Fenster

SUT		RMS Werte in dB			Spitze-Spitze-Werte (PP) in dB		
Abb	Typ	TA	TB	TC	TA	TB	TC
8a)	V103	0.55	0.61	0.55	4.50	2.60	3.20
8b)	VS150	0.71	0.76	0.84	5.50	4.50	5.80
8c)	VS900	0.87	0.75	1.21	3.50	3.10	6.20
<b><math>\emptyset W7</math></b>		<b>0.71</b>	<b>0.71</b>	<b>0.87</b>	<b>4.50</b>	<b>3.40</b>	<b>5.07</b>
9a)	V103	0.14	0.43	0.14	1.60	2.20	1.60
9b)	VS150	0.15	0.55	0.15	0.60	1.90	0.50
9c)	VS900	0.06	0.67	0.06	0.40	4.40	0.40
<b><math>\emptyset W6</math></b>		<b>0.12</b>	<b>0.55</b>	<b>0.12</b>	<b>0.87</b>	<b>2.83</b>	<b>0.83</b>
*		<b>6.09</b>	<b>1.28</b>	<b>7.43</b>	<b>5.19</b>	<b>1.20</b>	<b>6.08</b>

$\emptyset Ww$  = Durchschnitt f.  $Ww$  \* = Verbesserungsfaktor ( $\emptyset W7 / \emptyset W6$ )

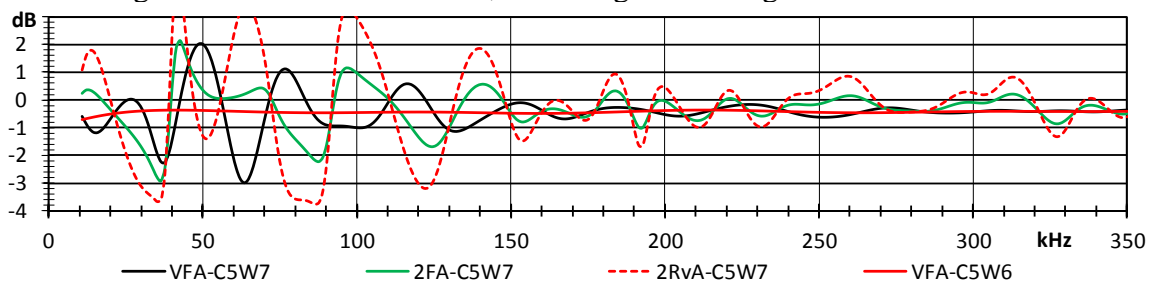


**Abb. 10.** Über 3 SUT Typen gemittelte Abweichungen vom Mittelwert ( $\Delta Rv$ ) der Empfindlichkeitsspektren RvA & RvC (ohne RvB), a) mit Fenster W7, b) mit Fenster W6.

Für Abb. 10 wurde, wie für Abb. 9, der Mittelwert aus RvA und RvC (ohne RvB) bestimmt. Gemäß Abb. 10b) sind mit W6 die Empfindlichkeiten von TA und TC fast identisch, aber TB (schwarz) ist deutlich anders. Dies ist plausibel, da gemäß Abb.7 der TB größere Inhomogenitäten der Bewegung aufweist als TA und TC. Abb. 10a) (W7) zeigt für  $\Delta RvB$  (schwarz) eine ähnliche Kurve wie 10b), aber auch starke Unterschiede zwischen

$\Delta RvA$  und  $\Delta RvC$ , zB bei 80 kHz, 120 kHz und 210 kHz, die nicht plausibel sind. Dies zeigt ebenfalls, dass ein längeres Fenster als W6 die Unsicherheiten vergrößert.

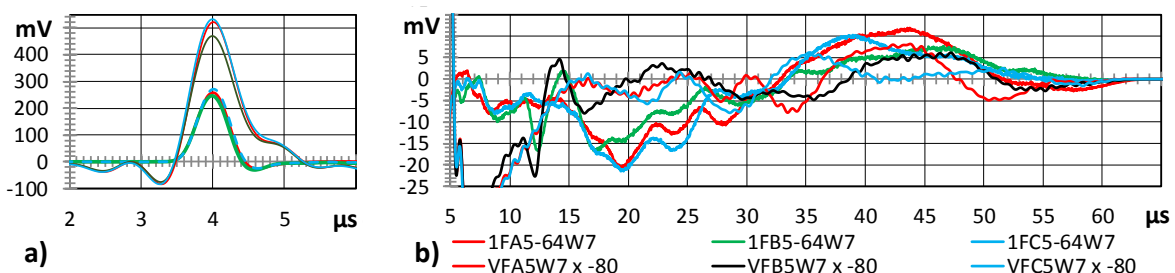
Die Empfindlichkeit, zB  $RvA$ , wird gemäß Formel (3) im Wesentlichen über das Verhältnis der Sensorantwort ( $U_{SUT}$ ) zur vom LVM-gemessenen Partikelgeschwindigkeit des Transmitters (VA) bestimmt. Die  $Rv$ -Streuungen können sowohl aus Abweichungen der Sensorantworten, als auch aus Differenzen zwischen gemessener Geschwindigkeit bei freiem TM und tatsächlicher Geschwindigkeit bei angekoppeltem SUT resultieren. Abb. 11 zeigt in schwarz die Differenz der mit LVM gemessenen Geschwindigkeitssignale von TA minus TC, in grün die Differenz der SUT2 Antworten (VS900-M SN 4464) bei Anregung mit TA minus TC, und rot gestrichelt die Differenz der  $Rv$  Kurven aus Anregung mit TA minus TC. Man würde erwarten, dass grün der Anregung in schwarz folgt. Das ist aber für Fenster W7 weitgehend nicht der Fall. Offensichtlich entwickelt sich die Nachschwingbewegung des SUT anders als die des TM. Die rote Kurve zeigt die Geschwindigkeitsdifferenz bei Anwendung des kürzeren Fensters W6, die sehr gleichförmig ist.



**Abb. 11.** Auswirkung der W7 Anregungsdifferenz (VFA-VFC, schwarz) und der SUT2 Antwortdifferenz (2FA-2FC, grün) auf die 2Rv-Differenz (rot gestrichelt) in Kontrast zur W6 Anregungsdifferenz (rot), wobei die Bewegung der TM bei freier Fläche und die SUT Antwort bei angekoppeltem SUT gemessen wurden.

### Betrachtung der SUT- und Geschwindigkeitssignale im Zeitbereich

Da alle Messungen in Abb. 8 und 9 mit gleicher Pulsamplitude und gleicher Pulswellenform durchgeführt wurden, müssen die Streuungen der Empfindlichkeitsspektren von Eigenschaftstoleranzen des TM verursacht sein. Abb. 12 zeigt die Zeitsignale der Ausgangsspannungen der SUT1 (V103) in dickeren Linien und der Geschwindigkeiten vom LVM in dünneren Linien, bei Anregung durch TA in rot, TB in schwarz oder grün, TC in blau.



**Abb. 12.** SUT Antwortspannungen (dick, ca 250 mV) und Geschwindigkeiten vom LVM (dünn, ca 500 mV) von TA (rot), TB (grün oder schwarz), TC (blau). Hauptimpuls in a), Nachschwingungen vergrößert in b).

Abb. 12a) zeigt bei 4  $\mu s$  die Spitzenamplituden der SUT Signale (ca 260 mV) und der Geschwindigkeitssignale (ca 530 mV, um Faktor 80 verstärkt). Abb. 12b) zeigt die Nachschwingungen im Bereich von 5 bis 70  $\mu s$ . Die Legende in 12b) gilt auch für 12a). Die Namen der SUT Signale beginnen mit "1F", die der Geschwindigkeitssignale mit "VF". Das dritte Zeichen, A, B oder C, kennzeichnet den Transmitter. Die TB-Signale (grün SUT, schwarz Velocity) zeigen bei 13  $\mu s$  einen starken Anstieg, der in den TA und TC Signalen



nicht zu sehen ist. Offensichtlich stammt dieser Anstieg von dem zusätzlichen Impuls in Abb. 7, TB-W6, 8  $\mu\text{s}$  nach der Spitzenanregung.

Der Verlauf der roten und blauen SUT Kurven (1F..) von 7  $\mu\text{s}$  bis 53  $\mu\text{s}$  lässt eine Vollwelle erahnen mit einem Minimum von ca -20mV bei 19  $\mu\text{s}$  und einem Maximum von 12 mV bei 44  $\mu\text{s}$ . Eine Halbwelle von 25  $\mu\text{s}$  entspricht einer Frequenz von 20 kHz. Diese langdauernde Schwingung sehr niedriger Amplitude führt zu einer Erhöhung des Empfindlichkeitsspektrums bei 20 kHz um ca 6 dB, da die FFT-Magnitude für kurze Impulse proportional zum Produkt „Amplitudenmittel mal Zeitfensteranteil“ ist. Bei kurzem Zeitfenster werden solche Nachschwingungen ausgeschlossen, daher zeigt Signal 1Rv FC5W7 in Abb. 8a) bei 20 kHz 6 dB mehr an als 1Rv FC5W6 in Abb. 9a). Der Begriff „Empfindlichkeit“ ist bei Impulsansteuerung irreführend, wenn man annimmt, dass ein Sensor mit z.B. der blauen Empfindlichkeitskurve in Abb, 13 rechts eine höhere Impulsamplitude liefert als ein Sensor mit der roten Kurve.

### Auswirkung der Fensterlänge auf die „Empfindlichkeit“

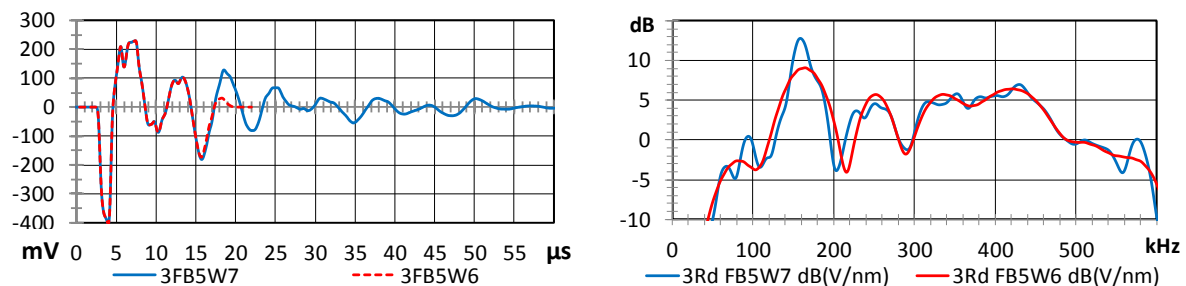


Abb. 13. Fenster W6 (rot), W7 (blau) links Zeitsignal, rechts Empfindlichkeitsspektrum (VS150)

Abb.13 links zeigt das Zeitsignal der SUT Antwort auf die Pulsanregung (Abb. 2). Am Signalanfang überdeckt die rot gestrichelte Kurve (W6) die blaue (W7). Die rote Kurve kehrt bei 21  $\mu\text{s}$  weich auf Null zurück, die blaue bei 64  $\mu\text{s}$ . Abb. 13 rechts zeigt die Empfindlichkeitskurven: Obwohl die Maximalamplituden für beide Zeitsignale in a) gleich sind, zeigt rot bei 160 kHz eine um ca 4 dB niedrigere Empfindlichkeit an, weil die rote Zeitkurve früher als die blaue auf Null zurückkehrt und die Nachschwingungen kürzt.

Wenn ein Anwender damit leben kann, dass die mit W6 statt W7 Fenster verarbeiteten Daten einige Resonanzeigenschaften unterbewertet, gewinnt er dafür den Vorteil der kleineren Streuung.

### Zusammenfassung

Die Empfindlichkeitsspektren, die mit der F2F Methode mit einem 50  $\mu\text{s}$  langen FFT-Fenster (W7) gewonnen werden, zeigen nach Tabelle 1 Abweichungen vom Mittelwert von bis zu 6,2 dB Spitze-Spitze, bis 1,2 dB RMS (root mean square), und im Mittel über alle 9 SUT-TM-Paare 0,77 dB RMS. Es wurden 3 TM Exemplare des Typs V104 und 3 SUT Typen (V103, VS150, VS900) eingesetzt. Die genannten Abweichungen lassen sich durch die Verwendung des nur 11  $\mu\text{s}$  langen Fensters W6 drastisch reduzieren, zB. die RMS Mittelwerte von  $\Delta RvA$  und  $\Delta RvC$  über alle SUTs von 0,71 dB auf 0,12 dB! Der Nachteil des kurzen Fensters: Resonanzspitzen in der FFT werden geglättet, da das Nachschwingen sehr früh ausgeblendet wird. Bei resonanten Sensoren wird der Maximalwert der Empfindlichkeit mit kurzem Fenster W6 niedriger angezeigt als mit langem Fenster W7. Dies kann zur Annahme verleiten, Sensoren seien deswegen weniger empfindlich. Abb. 13 stellt richtig, dass die Maximalamplitude mit kurzem Fenster gleich hoch ist wie mit langem Fenster, was

bei Anwendung von transienter AE wichtig ist. Bei Anwendung von kontinuierlicher AE wird mit W6 die Empfindlichkeit der Resonanzspitze tatsächlich zu niedrig angezeigt.

Hinsichtlich der Streuung der Empfindlichkeitsspektren durch TM-Unterschiede konnten wir eine Ursache, eine TM-Exemplar-spezifische Inhomogenität der Bewegungsverteilung über der TM Fläche (Abb. 7) identifizieren.

Theoretisch kommen noch mehr Effekte in Frage;

- Die enge Kopplung von SUT und TM bildet ein kombiniertes Piezoelement mit spezifischer Geometrie und Resonanzeigenschaften. Diese beeinflussen das Spektrum der Bewegung an der Grenzfläche. Jede Veränderung dieser Eigenschaften, z.B. bei Verwendung eines anderen TM, verändert das Spektrum und erhöht die Streuung.
- Abb. 12b) zeigt gemessene Nachschwingbewegungen an der freien TM Kontaktfläche. Wenn der SUT an den TM angekoppelt wird, beeinflusst die vorgenannte Kombination zweier Piezoelemente das Spektrum der Nachschwingbewegung. Verändert man nun Eigenschaften des TM, zB durch Austausch mit einem anderen TM, verändert dies das Spektrum der Nachschwingung und erhöht die Streuung.
- Abb. 12b) zeigt auch Nachschwingbewegungen des SUT, die durch den TM gemäß dessen Eigenschaften bedämpft sind. Ändern sich die Eigenschaften, zB durch Ankopplung eines anderen TM, dann ändert sich das Spektrum und das erhöht die Streuung.
- Resonanzen entwickeln sich über eine gewisse Zeit und können sehr lang anhalten. Je länger das FFT-Fenster ist, umso stärker reagieren die Spektren auf kleinste Eigenschaftsänderungen.

Auch wenn man TMs fände, die für alle SUT Typen identische Kurven ermöglichen, würde sich das Verhalten eines SUT im F2F Aufbau von dem einer praktischen Anwendung unterscheiden:

- Rayleighwellen oder schräg auftreffende Volumenwellen können die Empfindlichkeit reduzieren, wobei der Durchmesser der sensitiven Fläche des SUTs eine Rolle spielt,
- die Bedämpfung des SUTs durch ein reales Testobjekt verursacht ein anderes Nachschwingverhalten als die Bedämpfung des SUT's durch den TM.
- Die akustische Impedanz des Prüfobjektmaterials hat gewissen Einfluss.

Prinzipiell ist die Empfindlichkeit eines SUTs in der Anwendung durch viele Faktoren beeinflusst. Keine Verifikationsmethode kann für alle Anwendungen „richtig“ sein. Ziel der F2F Methode ist gute Reproduzierbarkeit, das bedeutet, dass mit jedem verifizierten Transmitterexemplar für den gleichen SUT das gleiche Ergebnis entsteht. Dieser Beitrag soll nachweisen, dass dies mit einem 11  $\mu$ s langen Fenster eher erreicht werden kann als mit einem 50  $\mu$ s langen.

## Referenzen

- [1] R. Hill, “Reciprocity and Other Acoustic Emission Transducer Calibration Techniques,” JAE 1-73 (1982)
- [2] K. Ono, H. Cho, T. Matsuo, “Experimental Transfer Functions of Acoustic Emission Sensors,” JAE 26-72 (2008)
- [3] B. Burks, M. A. Hamstad, “An Experimental-numerical Investigation of the Face-to-face Sensor Characterization Technique.” Mat Eval. 2015, 73, 414-423.
- [4] K. Ono, “Calibration methods of acoustic emission sensors,” Materials, 2016, 9, 508.
- [5] H. Vallen, “Proposal for an absolute AE sensor calibration setup”, in Proceedings of the World Conference on Acoustic Emission, Xi’an, China, 11–13 October 2017.
- [6] H. Vallen, “AE sensor sensitivity verification using a stimulated motion verified by laser-vibrometry. In Proceedings of the 33rd European Working Group on Acoustic Emission, Senlis, France, 12–14 September 2018, <https://www.ndt.net/article/ewgae2018/papers/21.pdf>