

Eine neue ISO Norm zur Bestimmung der Empfindlichkeitsspektren von AE Sensoren

Hartmut VALLEN¹

¹ Vallen Systeme GmbH, Wolfratshausen

Kontakt E-Mail: hvalLEN@outlook.de

Kurzfassung.

Etliche Normen zur Schallemissionsprüfung von zB sicherheitskritischen Strukturen definieren eine minimale Sensorempfindlichkeit zur Anwendung der jeweiligen Norm. Jeder Hersteller und Anwender von Schallemissionssensoren muss sicherstellen, dass die verwendeten Sensoren diese geforderte Mindestempfindlichkeit erfüllen. Bisher gab es keine etablierte, nicht-kontroverse und für Dienstleister praktisch durchführbare Norm zur Bestimmung der Empfindlichkeitsspektren von Schallemissionssensoren. Eine solche Norm ist für die Vereinheitlichung der Schallemissionsprüfung, der Datenkorrelation und -interpretation und für einen sinnvollen Austausch von Daten zwischen unterschiedlichen Anwendungs- und Forschungsgruppen unbedingt erforderlich.

Alle bisher existierenden ISO- und ASTM-Normen zur Bestimmung der Empfindlichkeitsspektren von Schallemissionssensoren erfordern einen schweren (zB 2 t), immobilen Prüfblock, der für spezialisierte Labors handhabbar sein mag, aber für die meisten Schallemissionsdienstleister praktisch nicht zu handhaben ist. Der neue Standard ISO 24543 wurde mit dem Ziel entwickelt, die Bestimmung der Empfindlichkeitsspektren mit einfachen und preisgünstigen Hilfsmitteln und einfacher Handhabung realisieren zu können.

“ISO 24543, Zerstörungsfreie Prüfung — Schallemissionsprüfung — Überprüfung der Empfangsempfindlichkeitsspektren von piezoelektrischen Schallemissionssensoren” wurde vom Gremium ISO/TC135/SC9/WG9 entwickelt und erhielt im September 2022 den Veröffentlichungsstatus in englischer Sprache.

Dieser Beitrag präsentiert einen Überblick über diesen Standard.





SCHALL 23
Entwicklung und Anwendung
der Schallemissionsanalyse
und Zustandsüberwachung mit
geführten Wellen
21./22. März 2023 in Wetzlar
www.dgzfp.de/seminar/schall23

vallen
systeme

DGZFP

**Ein neuer ISO-Standard zur Bestimmung der
Empfindlichkeitsspektren von AE Sensoren**

Hartmut VALLEN
Vallen Systeme GmbH, 82515 Wolfratshausen, Germany,
hvallen@outlook.de
Convenor of ISO TC135/SC9/WG9 (WG9 ist aufgelöst, da Ziel erreicht)

DGZFP Kolloquium SCHALL 23 - 21./22. März 2023 in Wetzlar 1

Outline

vallen
systeme

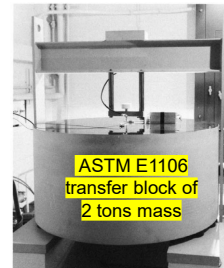
- Warum noch ein Standard für die Sensor-Empfindlichkeitsbestimmung?
- Definition der Empfindlichkeit
- Direktkopplung: Grundlagen, Blockschaltbild, wichtige Signale
- Bestimmung der Empfangsempfindlichkeit von AE Sensoren
- Zweck und Blockdiagramm des **Laservibrometer Aufbaus**
- Bestimmung von 5 Senderempfindlichkeiten für 5 Sensordurchmesser
- Zusammenfassung und Auslassungen

DGZFP Kolloquium SCHALL 23 - 21./22. März 2023 in Wetzlar 2

Warum ein neuer Standard?



- Bisher existierten drei gültige ISO Dokumente für die AE Sensorkalibrierung:
- **ISO 12713:1998** (primary calibration of AE sensors) entstand aus der ASTM E1106, die letzte Version ist E1106-12 (2017 reapproval). ISO 12713 wurde noch nie revidiert und ist überholt. Servicedienstleistungen nach **E1106** werden weltweit kaum noch angeboten, NIST hat dieses Serviceangebot an externe Kunden schon vor Jahren eingestellt.
- **ISO 12714:1999** (secondary calibration of AE sensors) entstand aus der ASTM E1781-98, die letzte Version ist von 2020. Eine Revision der ISO 12714 wurde 2016 begonnen aber 2017 abgebrochen, da keine Aussicht bestand, dass hierfür erforderliche primärkalibrierte AE Sensoren am Markt zur Verfügung stehen werden.
- **ISO/TR 13115:2011** (absolute reciprocal sensor calibration) ist ein informelles ISO Dokument. Um es zu einem normativen Dokument weiterzuentwickeln, fehlt internationale Akzeptanz.
- **ISO 12713** und **ASTM E1106** erfordern einen Transferblock mit 2 Tonnen Masse, ISO 12714 mit 300 kg, beides ist für die meisten Anwender der AE nicht praktikabel.
- Die neue **ISO 24543** ist sowohl für Experten im Labor, als auch für AE Dienstleister konzipiert.



Mehr Argumente für einen neuen ISO Standard

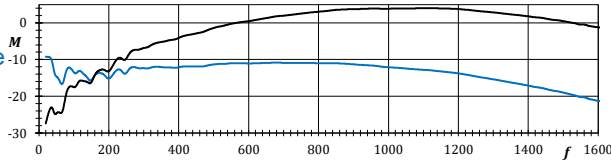


- Weltweit verfügen nur wenige Forschungseinrichtungen über einen Kalibrieraufbau nach E1106 oder E1781. Für neue AE-Anwender und -Dienstleister gab es bisher keinen internationalen Standard für einen praktikablen und reproduzierbaren Aufbau zur Bestimmung der AE Sensorempfindlichkeit in absoluten Einheiten (zB V/nm, V/(m/s))
- Standards für die Anwendung der Schallemissionsmethode zur Prüfung von zB umweltgefährdenden Strukturen spezifizieren eine minimale Empfindlichkeit der zu verwendenden AE Sensoren. Somit muss jeder Anwender eines solchen Standards überprüfen und gewährleisten können, dass die genutzten Sensoren diese geforderte Empfindlichkeit aufweisen.
- Ein praktikabler und in Expertenkreisen akzeptierter Standard zur Ermittlung der Sensorempfindlichkeit, basierend auf einem einfach zu handhabenden und kosteneffizienten Prüfaufbau und Prüfprozess, war dringend notwendig.
- Diese Norm hat nun den ISO-Publikationsstatus erreicht:
ISO 24543 Non-destructive testing — Acoustic emission testing — Verification of the receiving sensitivity spectra of piezoelectric acoustic emission sensors.

Definition der Empfindlichkeit



- Der Begriff "Empfindlichkeit" ist in der Messtechnik definiert als die „Änderung des Wertes der Ausgangsgröße eines Messgerätes bezogen auf die sie verursachende Änderung des Wertes der Eingangsgröße“ (Wikipedia).
- Die Empfindlichkeit eines AE Sensors ist definiert als „Ausgangsspannung dividiert durch die verursachende Anregung an der empfindlichen Fläche“. Die Anregung kann als Verschiebung, zB in nm, oder als Geschwindigkeit, zB in mm/s angegeben werden.
- Ausgangsspannung und Anregung sind meist frequenzabhängige Wechselgrößen. Die Empfindlichkeit wird üblicherweise als Spektrum angegeben, mit dem Quotient „M = Ausgangsspannung/Anregung umgerechnet in dB“ an der Vertikalachse und Frequenz an der Horizontalachse.
- Das Bild zeigt in schwarz das Empfindlichkeitsspektrum eines breitbandigen AE Sensors, bezogen auf die Verschiebung am Eingang, und in blau bezogen auf die Geschwindigkeit. M = 0dB entspricht 1 V/ns (schwarz) bzw. 1 V/(mm/s) (blau).



Wichtige Symbole



- R_D Empfangsempfindlichkeit eines Sensors in V pro nm Verschiebung, umgerechnet in dB, 0 dB entspricht 1 V / nm;
- R_V Empfangsempfindlichkeit eines Sensors in V pro mm/s Geschwindigkeit, umgerechnet in dB, 0 dB entspricht 1 V s / mm;
- T_D Sendeempfindlichkeit eines Senders in nm / V, umgerechnet in dB, 0 dB entspricht 1 nm / V;
- T_V Sendeempfindlichkeit eines Senders in mm/ s V, umgerechnet in dB, 0 dB entspricht 1 mm / s V
- R_{SS} Signal-Stimulations-Verhältnis einer Sensor-Sender-Kombination in dB, 0dB entspricht 1 V/V (U_S / U_F)

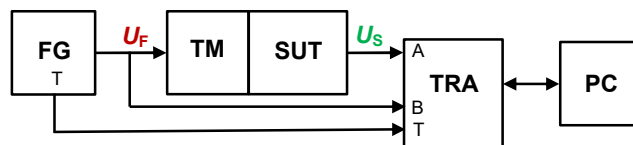
Anmerkung:

- R steht für receiving sensitivity (Empfangsempfindlichkeit),
- T steht für transmitting sensitivity (Sendeempfindlichkeit),
- D steht für particle displacement (Teilchenverschiebung),
- V steht für particle velocity (Teilchengeschwindigkeit)

R und T sind Frequenzspektren

Ermittlung der Empfindlichkeit

- Zur Ermittlung der Empfindlichkeit wird der zu verifizierende Sensor **SUT** durch eine direkt angekoppelte Ultraschallsonde **TM** angeregt und seine Ausgangs-spannung U_S gemessen und über eine FFT in das Spektrum $F(U_S)$ in dB umgerechnet. **TM** wird durch den elektrischen Impuls U_F angeregt.
- Das Spektrum "Signal-Stimulation-Verhältnis" in dB ergibt sich aus $R_{SS} = F(U_S) - F(U_F)$.
- Die Sensorempfindlichkeit R_D in dB ergibt sich aus $R_D = R_{SS} - T_D$ wobei die Sendempfindlichkeit T_D gemäß den Vorgaben der ISO 24543 zu ermitteln ist.

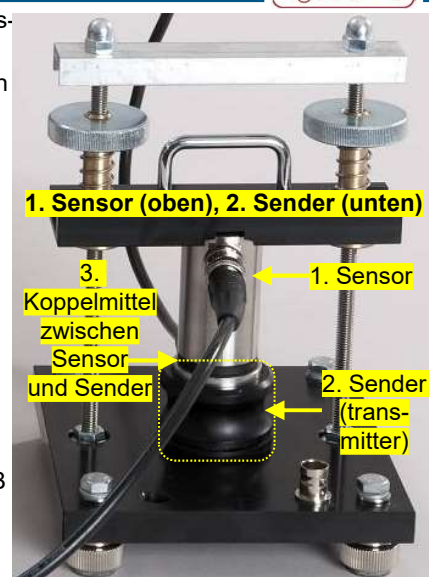


Blockschaltbild Direktkopplung

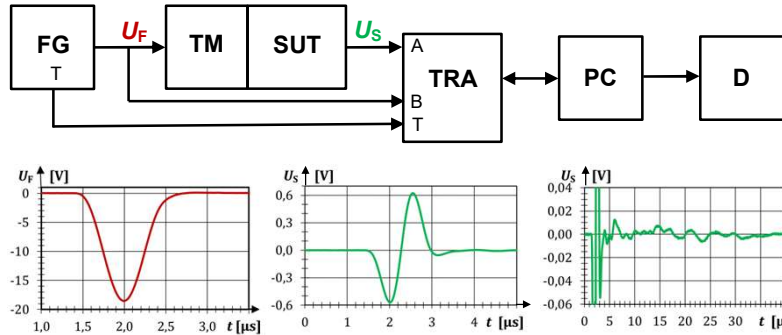
Bedeutung der Bezeichnungen im Blockschaltbild, von links: **FG**: Funktionsgenerator, **TM**: Transmitter, **SUT**: zu verifizierender Sensor, **TRA**: Transientenrekorder, **PC**: Personal Computer, A, B: TRA-Signaleingänge, T: TRA-Triggereingang, FG-Triggerausgang

Beispiel für einen Direktkopplungsaufbau

- ISO 24543 verwendet einen Direktkopplungsaufbau:
- Der Sender (Ultraschallsonde) wandelt einen elektrischen Impuls U_F in eine mechanische Teilchenverschiebung D .
- Dieser mechanische Impuls D gelangt über ein Koppelmittel an die sensitive Fläche des Sensors.
- Der Sensor wandelt den mechanischen Impuls am Eingang in einen elektrischen Impuls U_S
- U_F und U_S werden per Transientenrekorder gemessen und in die Empfindlichkeit R_D umgerechnet.
- Dieser Aufbau ist wesentlich einfacher zu handhaben als ein massiver Block, wie er zB in ASTM E1106 vorgeschrieben ist.



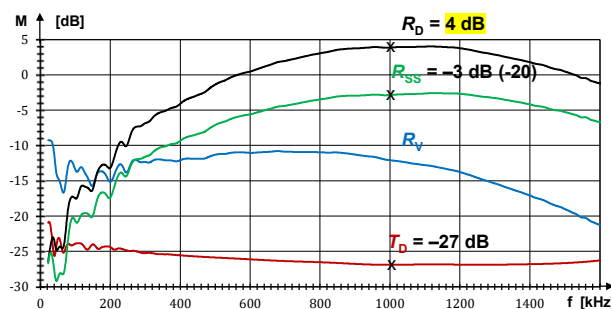
Signalbeispiel für einen breitbandigen AE Sensor



Das rote Signal zeigt den Impuls U_F am Eingang des Senders **TM**.

Das grüne Signal in der Mitte zeigt den Impuls U_S am Ausgang des SUTs (Prüfung). Das zweite grüne Signal rechts zeigt die Amplitude skaliert auf das Nachschwingen, und einen längeren Zeitbereich. Man sieht das Nachschwingen am Sensorausgang klingt ca. 35 μ s nach dem Hauptimpuls ab.

Spektren zum breitbandigen Signalbeispiel



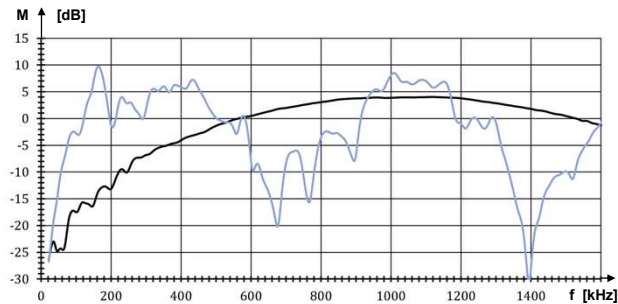
- M:** FFT-Magnitude in dB **f:** Frequenz in kHz
- Empfindlichkeit auf Teilchenverschiebung R_D in dB re 1 V/nm
 - Empfindlichkeit auf Teilchengeschwindigkeit R_V in dB re 1 Vs/mm
 - Sendempfindlichkeit für Teilchenverschiebung T_D in dB re 1 nm/V
 - Signal-zu-Stimulationsverhältnis $R_{SS} = F(U_S) - F(U_F)$ in dB re 1 V/V
- Kurve R_{SS} ist um 20 dB erhöht, damit sie in die Skala passt.

Werte bei 1 MHz
im Graph:

$$\text{Relevante Formel: } R_D = R_{SS} - T_D$$

$$R_{SS} = -3 \text{ dB (Graph)} -20 \text{ dB (erhöht)} = -23 \text{ dB, } T_D = -27 \text{ dB, } R_D = -23 - (-27) = 4 \text{ dB}$$

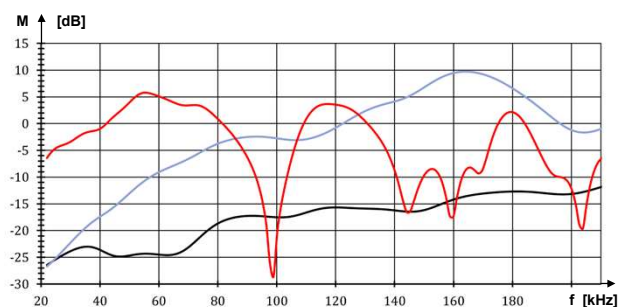
Sensitivitätsspektren für Breitband- und 150 kHz SUT



M: FFT-magnitude f: frequency in kHz
 — R_D eines Breitband-SUT1 (V103 Olympics)
 — R_D eines 150 kHz Schmalband-SUT3 (VS150 –M Vallen)

Dieser Graph demonstriert eine (10 bis 25) dB höhere Sensitivität eines 150 kHz Sensors (blau), im Vergleich zu einem Breitbandsensor (schwarz), im Bereich (50 bis 450) kHz.

Niederfrequenzvergleich von SUT01, SUT03, SUT04



M: FFT-magnitude f: frequency in kHz
 — R_D of a SUT01 (wide-band, V103)
 — R_D of a SUT03 (150 kHz narrow-band, VS150)
 — R_D of a SUT04 (30 kHz low-frequency, VS 30)

Dieser Graph demonstriert eine (15 bis 20) dB höhere Sensitivität eines 30 kHz Sensors (rot), im Vergleich zu einem 150 kHz Sensor (blau) im Bereich (20 bis 60) kHz. **Hinweis: Aufbauten nach ASTM E1106 (und andere) liefern keine Spektraldaten unter 100 kHz.**

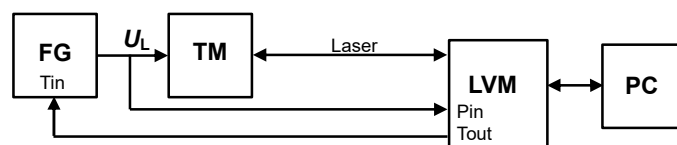
Zweck des Laservibrometer-Aufbaus



- Zweck des Laservibrometer- (LVM) Aufbaus ist die Bestimmung der Sendempfindlichkeit T_D eines piezoelektrischen Senders (en: transmitter) in der absoluten Einheit von Nanometer Verschiebung pro Volt Sendeeingangsspannung, umgerechnet in dB, wobei 0 dB der Verschiebung von 1 nm/V entspricht.
- T_D wird zur Bestimmung der Empfangsempfindlichkeit R_D eines AE-sensors im Direktkopplungsaufbau benötigt, mit $R_D = R_{SS} - T_D$, in absoluter Einheit von Volt Ausgang pro Nanometer Eingang.
- Relevante Formel:

$T_D = F(D) - F(U_L)$, wobei $F(D)$ das Spektrum der Verschiebung ist, und $F(U_L)$ das Spektrum von U_L , beides in dB. 0 dB referenziert auf 1 pm Verschiebung von D , oder auf 1 mV der Spannung U_L , oder 1 pm/mV Sendempfindlichkeit T_D .

Blockdiagramm des Laservibrometersaufbaus

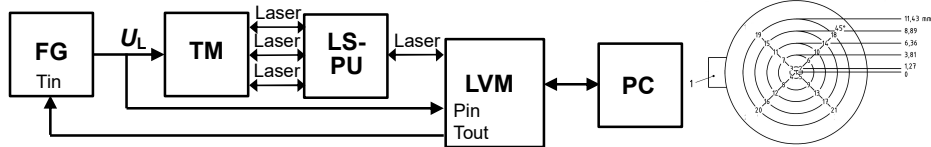


Vereinfachtes Blockdiagramm des Laservibrometersaufbaus (LVM setup)

Der Funktionsgenerator **FG** liefert den elektrischen Impuls U_L (gleich zu U_F im Direktkopplungsaufbau) zum Sender **TM** und zum parametrischen Eingang des Laservibrometers **LVM**.

Die Teilchenverschiebung D am Ausgang des Senders **TM** wird vom **LVM** gemessen. Zur Rauschminderung werden zehntausend Messungen gemittelt und ein Savatzky-Golay Filter eingesetzt. Dies führt zu einer Auflösung des Signals D von weniger als 1 pm.

Messung von D an mehreren Senderpositionen

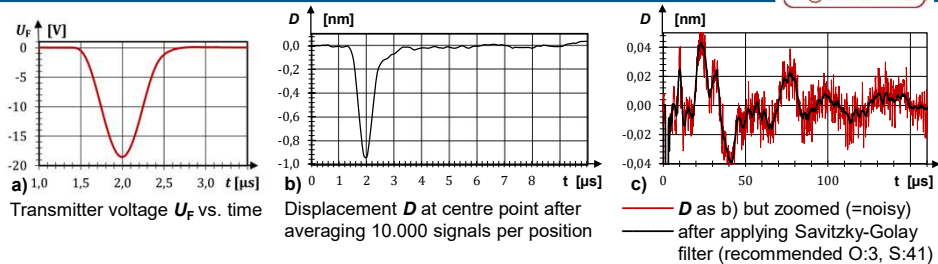


Das gleiche Sendermodell soll für die Überprüfung von Sensoren mit unterschiedlichen Durchmessern verwendet werden. Es werden für fünf Durchmesser die mittlere Verschiebung D_1 bis D_5 und die Sendempfindlichkeit T_{D1} bis T_{D5} ermittelt und gespeichert, so dass für Sensoren mit unterschiedlichen Durchmessern der empfindlichen Fläche die zutreffende Sendempfindlichkeit angewendet werden kann.

Mit einer Laserpositioniereinheit **LS-PU** zwischen **LVM** und Senderabstrahlfläche wird der Laserstrahl sequentiell auf 21 Positionen an der Senderfläche gerichtet: an 5 konzentrischen Ringen sind je 4 Positionen verteilt, hinzu kommt eine Zentrumspostion. Bild rechts zeigt schematisch die 21 Positionen.

Beispiel: Für einen SUT mit weniger als 5,1 mm Durchmesser der sensitiven Fläche werden nur die Positionen 1 (Zentrum) und 2-5 (innerster Ring) zur Bestimmung der Senderempfindlichkeit verwendet.

Nachschwingen des Verschiebungssignals D

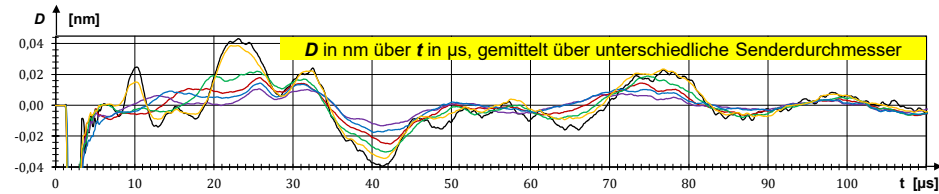


Graph a) zeigt den elektrischen Eingangsimpuls des Senders.

Graph b) zeigt das vom LVM ausgegebene Verschiebungssignal D (am Zentrum).

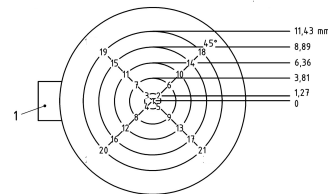
Graph c) zeigt das Nachschwingen des D -Signals in angepasster Skalierung, in rot mit dem vom LVM gelieferten Rauschen, nach Mittelung von 10000 Messungen, und in schwarz nach Anwendung des Savitzky-Golay Filters.

D-Signal nach Mittelung über multiple Positionen



d)

- D -Signal nach Savitzky-Golay filter, am Sendermittelpunkt (= Ring 0)
- D -Signal gemittelt über Ring 0 bis 1 (Positionen 1 bis 5) für SUT Durchmesser < 5,1 mm
- D -Signal gemittelt über Ring 0 bis 2 (Positionen 1 bis 9) für SUT Durchmesser 5,2...10,1 mm
- D -Signal gemittelt über Ring 0 bis 3 (Positionen 1 bis 13) für SUT Durchmesser 10,2...15,2 mm
- D -Signal gemittelt über Ring 0 bis 4 (Positionen 1 bis 17) für SUT Durchmesser 15,3...20,3 mm
- D -Signal gemittelt über Ring 0 bis 5 (Positionen 1 bis 21) für SUT Durchmesser 20,4...25,4 mm



Zusammenfassung



- ISO 24543 definiert eine Methode für die Ermittlung der Empfangsempfindlichkeitsspektren von AE Sensoren in absoluten Einheiten von V pro nm Teilchenverschiebung oder V pro mm/s Teilchengeschwindigkeit im Frequenzbereich von 20 kHz bis 1,5MHz.
- Der Sensor wird mit einem Bewegungsimpuls aus einem direkt angekoppelten Sender angeregt.
- Die Ermittlung der Sendeempfindlichkeit des Senders in der absoluten Einheit von 1 V/nm, mittels Laservibrometer, ist ebenfalls in ISO 24543 definiert.
- Die ermittelten Empfindlichkeiten sind unabhängig von Wellenausbreitungseigenschaften am Prüfobjekt. Nur die akustische Impedanz des Materials des Prüfobjekts beeinflusst das Empfindlichkeitsergebnis, dies kann aber korrigiert werden.
- Die Empfindlichkeitsergebnisse eines AE Sensors, ermittelt nach ISO 24543, sollten überall und von jedem Bediener reproduzierbar sein.
- Derzeit ist diese Reproduzierbarkeit noch limitiert durch kleine Abweichungen der Eigenschaften der auf dem Markt verfügbaren Sender. Wir hoffen, dass Sender mit verbesserter Reproduzierbarkeit bald auf dem Markt erscheinen.

Wegen begrenzter Vortragszeit und Beitragsumfang konnten folgende Themen, die in der **ISO 24543**, berücksichtigt sind, in dieser Präsentation nicht behandelt werden:

- Halterung für Sensor und Sender und Kopplungsmittel zur Sicherung einer reproduzierbar guten Anregungskopplung
- Ermittlung der Empfangsempfindlichkeit von Sensoren mit integriertem Verstärker
- Einfluss der Länge und Kapazität des Sensorkabels
- Erläuterung von FFT Ergebnissen, Skalierungseffekte etc.
- Die minimale FFT-Fensterlänge für den unteren Frequenzbereich
- Minimierung des Einflusses von Signalsprüngen im Zeitbereich auf das FFT Ergebnis
- Methode und Kriterien zur Aussortierung nicht geeigneter Senderexemplare
- Kalibrierung des Laservibrometers
- Erkennung einer Drift der Empfindlichkeit eines Senders, und mehr.

Danke für die Aufmerksamkeit