

Eine einfache Methode für den Vergleich der Empfindlichkeit unterschiedlicher Sensormodelle für die Tankbodenprüfung

Hartmut VALLEN, Jochen VALLEN, Jens FORKER,
Vallen-Systeme, Icking

Kurzfassung. Schallemissionsprüfungen an großen Lagertanks erfahren zunehmende Akzeptanz. Sensoren werden an der Tankaußenwand angebracht. Kleinste Anregungen im Frequenzbereich 25-45 kHz sollen sich vom Hintergrundrauschen unterscheiden. Unterschiedliche Sensormodelle sind für diese Anwendung am Markt verfügbar. Sind sie hinsichtlich der Sensitivität und dem Signal-Rausch-Verhältnis vergleichbar? Der Betrag beschreibt eine relativ einfach nachvollziehbare Methode für einen Sensorvergleich. Sowohl für eine reproduzierbare kontinuierliche Anregung wie auch für eine Burstanregung wird ein für niedrige Frequenzen geeigneter Aufbau und die erzielten Ergebnisse beschrieben. Die Ermittlung des Rauschspektrums erläutert den Einfluss der Frequenzfilterung auf das Signal-Rausch-Verhältnis.

Grundlagen:

Dieser Beitrag richtet sich an AE-Praktiker der Schallemissionsprüfung (AT) von atmosphärischen Lagertanks unterschiedlichster Größen, die mittels einer einfachen Methode die Empfindlichkeit unterschiedlicher Sensormodelle oder Exemplare vergleichen möchten.

Die wichtigsten Standards für die Kalibrierung von Sensoren für Schallemission (AE) sind ISO 12713 (Primary Calibration, extrem aufwändig) und ISO 12714 (Secondary Calibration). Beide Standards sind für Kalibrierlabore gedacht, sie nutzen einen sehr großen und schweren Kalibrierblock. AE-Dienstleister haben in den seltensten Fällen Zugriff auf solch einen Kalibrierblock. Außerdem eignet sich ISO 12714 nur für den Frequenzbereich von 100 kHz bis 1 MHz. Für die Tankprüfung nutzt man vorwiegend den Frequenzbereich 25-45 kHz. Somit sind diese Standards für den Praktiker nicht sehr hilfreich. Die weiteren Standards, wie EN 13477, ASTM E976 und E1106 sind sehr allgemein gehalten. Sie berücksichtigen z.B. nicht, dass sich Plattenwellen in unterschiedlichen Modi ausbreiten.

Um auch kleinste AE Signale noch gut detektieren zu können soll der Sensor ein möglichst hohes Signal-Rausch-Verhältnis aufweisen, d.h. er soll für eine bestimmte Anregung eine möglichst hohe Signalspannung liefern, die mit möglichst geringem Eigenrauschen überlagert ist.

Für einen Vergleich zweier Sensoren ist dann wie folgt vorzugehen:

1. Beide Sensoren genau gleich akustisch anregen und zwar so stark, dass der Rauschanteil gegenüber dem Ausgangssignal aus der Anregung vernachlässigbar ist. Das Ausgangssignal sei dann U_A . Zweckmäßigerweise nimmt man gleich den Frequenzgang des Sensors auf.
2. Das Rauschen der Sensoren messen, dies ist die Ausgangsspannung ohne jegliche akustische Anregung. Diese sei U_R .

3. Das Signal-Rauschverhältnis (SNR für Signal-Noise-Ratio) eines Sensors bei gegebener Anregung und Frequenz ist dann: $SNR = U_A / U_R$. wenn die Messwerte in linearer Einheit ($\mu V..V$) vorliegen, oder, $SNR[dB] = U_A - U_R$. [dB], wenn sie in dB vorliegen.
4. Sowohl die Frequenzgangmessung wie auch die Rauschmessung muss mit den Filtern in der Messkette durchgeführt werden, die auch bei der Anwendung verwendet werden.
5. Der Sensor mit dem höchsten SNR kann die geringsten Anregungsamplituden vom Rauschen unterscheiden, ist also der Empfindlichere. Voraussetzung dafür ist eine ausreichende Verstärkung, so dass das Rauschen am Vorverstärker-ausgang höher ist als das Rauschen des AE-Signalprozessors.

2. Hilfsmittel

Der Vergleich wurde mit folgenden Hilfsmitteln durchgeführt:

2.1 Funktionsgenerator (FG)

Der FG erzeugt eine Sinusspannung einstellbarer Frequenz und Amplitude, bzw. einen Puls mit einstellbarer Dauer und Amplitude. Verwendet wurde Modell 33220A (Agilent).

2.2 Sensor-Anregung

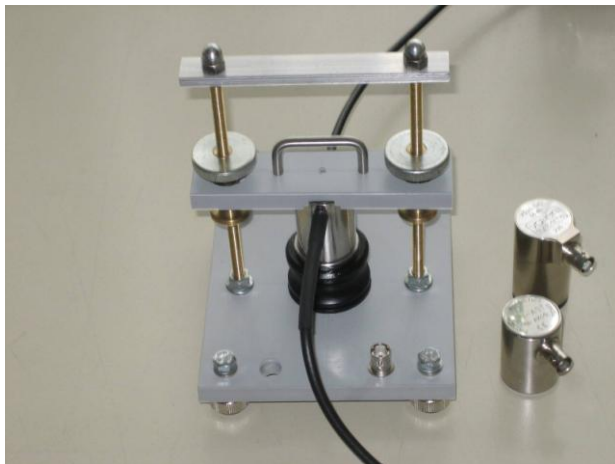


Bild 1 Direktpkopplung eines V101 (unten) an den Probanden

Die zu untersuchenden Sensoren (Probanden) müssen in exakt gleicher und reproduzierbarer Weise akustisch angeregt werden. Als Stimulus wurde ein Ultraschallprüfkopf Modell V101 (Panametrics) in Direktpkopplung zum Probanden verwendet. Bild 1 zeigt den Aufbau. Der V101 (unten) koppelt über ein Koppelmittel (leichtes Öl) direkt in die sensitive Fläche des

Probanden (darüber) an. Es wird mittels eines Sinussignals eine sinusförmige Anregung erzeugt und die Amplitude des vom Probanden gelieferten AE-Signals gemessen. Dieses Verfahren wird auch Direktpkopplung oder face-to-face-coupling genannt.

Dieses Verfahren ist sehr einfach und liefert reproduzierbare Ergebnisse. Daher eignet es sich für den regelmäßigen Einsatz. Allerdings können folgende Einwände gemacht werden:

- a) Die Tankbodenprüfung analysiert Burst-AE und keine kontinuierliche AE, somit sollte ein Vergleich auch eine Burstanregung untersuchen.
- b) Unterschiedliche Probanden könnten eine unterschiedliche Rückwirkung auf den V101 ausüben und so das Vergleichsergebnis verfälschen.



Bild 2. Kopp-lung über Stab

Um diese Einwände zu berücksichtigen wurde ein Vergleich mit einem zweiten Stimulus, einer Pulsanregung über einen 610mm langen Aluminium-Rundstab mit 19mm Durchmesser und polierten Enden durchgeführt (Bild 2). Beide Anregungsmethoden führen für den Frequenzbereich 25-45 kHz zum gleichen Ergebnis.

2.3 Probanden

Untersucht wurde ein Vallen VS30-SIC-46dB, S/N 120 und ein Mitbewerbermodell das hier mit „XXX“ identifiziert sein soll.

Beide Sensoren sind mit integriertem Verstärker für 28 V DC Betriebsspannung auf der Signalleitung ausgestattet. Beide Sensoren haben 20,6 mm Durchmesser. VS30-SIC ist 52,8 mm, XXX 38,8 mm hoch. Die Ankopplfläche des VS30-SIC ist eine isolierende Keramikscheibe, die des XXX eine nicht-isolierende Metallfläche. XXX besitzt ein integriertes Kabel, 1m lang, endend in einer BNC Buchse, beim VS30-SIC-46dB ist die BNC Buchse fest am Gehäuse montiert.

2.4 Messkette mit Filtervariationsmöglichkeiten

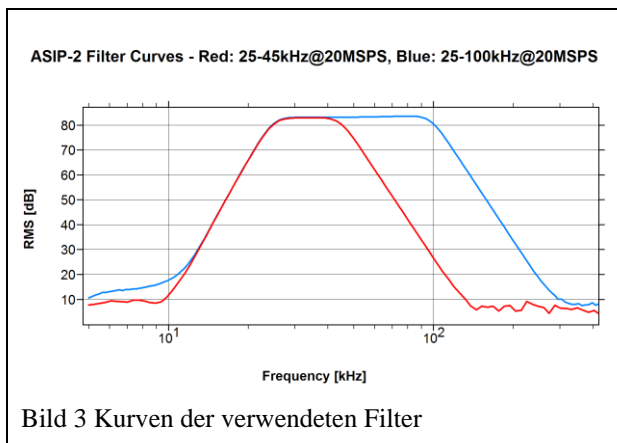


Bild 3 Kurven der verwendeten Filter

Verwendet wurde ein Vallen AMSY-5 AE-System mit einem AE-Signalprozessor ASIP-2. Folgende Bandpässe wurden verwendet: 25-45 kHz (erste Messung), 25-100 kHz (2. Messung). Es handelt sich um je einen digitalen Hoch- und Tiefpass mit jeweils 48 dB Filtersteilheit pro Oktave. Bild 3 zeigt die Kurven der beiden verwendeten Filter. Zur Aufnahme der Kurven wurde eine Sinusspannung mit 1 V Spitzenamplitude an den Signalprozessor angelegt und in der Frequenz variiert. 1 V (Spitze) bei 0 dB Vorverstärkung entspricht 120 dB_{AE} Spitzenwert und 117 dB Effektivwert (RMS). Die Software rechnet auf einen Vorverstärker mit 34 dB zurück und zeigt deshalb im Durchlassbereich 117-34 = 83 dB RMS an.

2.5 Vorgehensweise mit kontinuierlicher Sinusanregung

Verwendet wurde die Vallen VST Sensor Tester Software mit folgenden Einstellungen:

- Frequenz: 15 kHz – 200 kHz,
- Amplitude: 50 mV @ 50 Ω
- Kurvenform: Sinus.

Der FG-Ausgang (extern mit 50 Ω abgeschlossen) geht an den V101 und sorgt dort für die Anregung des Probanden mit einer Sinusschwingung. Das Ausgangssignal des Probanden geht zum AE-Signalprozessor, wird dort digitalisiert und anschließend digital gefiltert. Dann wird der Effektivwert (RMS) bestimmt und danach für die nächste Messung die Frequenz erhöht. So entstanden die Frequenzgangkurven in Bild 3-5, rot für 25-45 kHz Filter und blau für 25-100 kHz Filter.

Zur Messung des Rauschens wurde der V101 vom Funktionsgenerator getrennt, d.h. die akustische Stimulanz ausgeschaltet, der Sensorausgang wurde mittels eines Hilfsverstärkers um 40 dB verstärkt, damit das Rauschen nachfolgender Stufen garantiert zu vernachlässigen ist. So entstanden die horizontalen Kurven in orange (25-45 kHz) und grün

(25-100 kHz). Bei der Bestimmung des Rauschens wurde darauf geachtet, dass keine akustischen Störquellen wie z.B. Lüfter, knacksen, sprechende Personen usw. Störungen im betrachteten Frequenzgang verursachten.

Beide Probanden wurden exakt gleich behandelt.

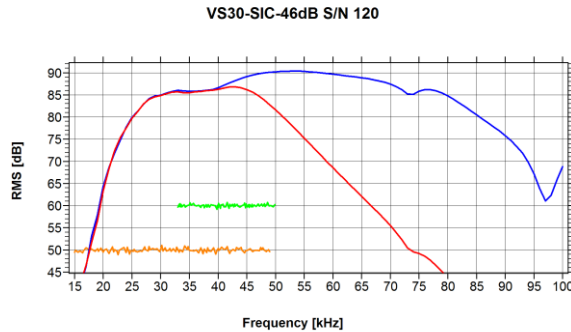


Bild 4 Frequenzgang und Rauschen VS30-SIC-46dB
25-45 kHz: rote und orange Kurven; 25-100 kHz: blaue und grüne Kurven

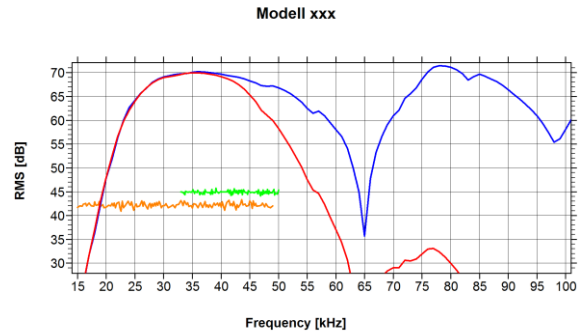


Bild 5 Frequenzgang und Rauschen XXX
25-45 kHz: rote und orange Kurven; 25-100 kHz: blaue und grüne Kurven

Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Sie können aus den je 4 Kurven pro Diagramm in Bild 4 und 5 abgelesen werden, wobei das Rauschen um die 40 dB Nachverstärkung korrigiert wurde:

Tabelle 1 Ergebnisse für kontinuierliche Sinusanregung

Sensor:	VS30-SIC-46dB		XXX	
Filter:	25-45 kHz	25-100 kHz	25-45 kHz	25-100 kHz
Max. Amplitude (RMS):	87 dB,	90,5 dB,	70 dB	72 dB
Kurvenfarbe:	rot	blau	rot	blau
Freq @ Max.Amp.:	35 kHz	53 kHz	35 kHz	78 kHz
RMS Rauschen:	10 dB	20 dB	2,5 dB	5 dB
Kurvenfarbe:	orange	grün	orange	grün
Signal-Rausch-Verhältnis SNR:	77 dB	70,5 dB	67,5 dB	67 dB
Relativ zu XXX@25-45 kHz	9,5 dB	3 dB	0 dB	-0,5 dB

Wie am Rauschen und der Maximalamplitude zu erkennen ist, ist die Verstärkung des XXX niedriger als die des VS30-SIC-46dB. Entscheidend ist aber das Signal-Rausch-Verhältnis, denn dieses ist von der Verstärkung unabhängig.

Ergebnis: Mit kontinuierlicher Anregung und einem Filter 25-45 kHz weist der VS30-SIC-46dB, im Vergleich zum XXX, eine um 17 dB höhere Signalamplitude und ein um 9,5 dB besseres Signal-Rausch-Verhältnis auf.

2.6 Vorgehensweise mit Burstanregung

Zwischen V101 und Proband wurde ein 610mm langer Aluminiumstab, 19mm Durchmesser, eingefügt. Der V101 wird mit einem Puls (1 μ s Dauer) angeregt. Der Stab stellt sicher, dass den Probanden zuerst nur eine symmetrische niederfrequente Longitudinalwelle trifft. Longitudinalwellen höherer Ordnung können gemäß [1] und Bild 6 nur mit Frequenzen über 180 kHz auftreten, die in Bild 7 und 8 weggefiltert werden.

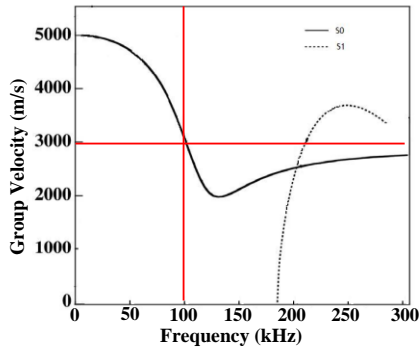


Bild 6 Dispersionskurven der ersten zwei Longitudinalmoden, nach [1]

Die Welle benötigt bei einer Gruppengeschwindigkeit von 5m/ms vom Stimulus zum Proband mindestens 122 μ s, und 244 μ s bis die Reflexion wieder den Stimulus erreicht und 366 μ s, bis die reflektierte Welle erneut am Probanden ankommt. Eine unterschiedliche Rückwirkung der Probanden auf den Stimulus kann somit auf die Messung frühestens 244 μ s nach der direkten Ankunft Einfluss nehmen. Tatsächlich ist in Bild 7-10 bei etwa 270 μ s der Einsatz einer niederfrequenten Welle zu sehen, der mit der zweifachen Reflexion erklärt werden kann, auf das Ergebnis aber keinen Einfluss nimmt.

Für XXX betrug die Pulsamplitude $5V_P$, für VS30-SIC-46dB wurde die Amplitude auf $1V_P$ reduziert, da 5V aufgrund der höheren Empfindlichkeit zur Sättigung führten. Der FG Ausgang war mit 50Ohm (parallel zum V101) abgeschlossen.

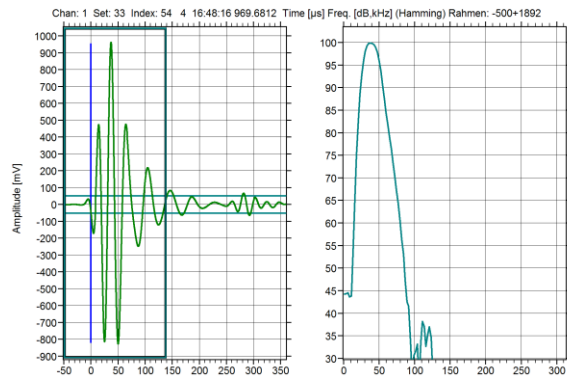


Bild 7 Impulsantwort VS30-SIC-46dB, Filter: 25-45 kHz, Anregung $1V_P \times 1\mu$ s. Max 940mV im Zeitsignal oder 100 dB in FFT. Rauschen: 0,58mV $_P$

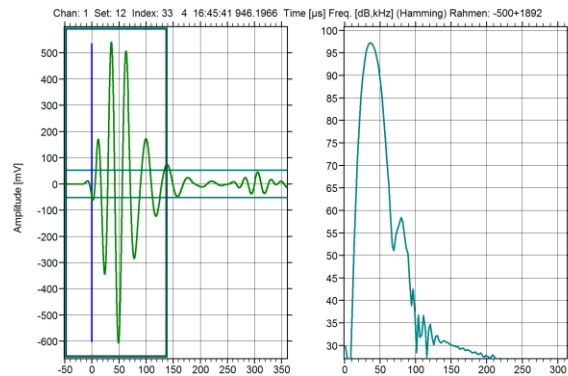


Bild 8 Impulsantwort XXX, Filter: 25-45 kHz, Anregung $5V_P \times 1\mu$ s. Max 600mV im Zeitsignal, 97 dB in FFT. Rauschen: 0,20mV $_P$

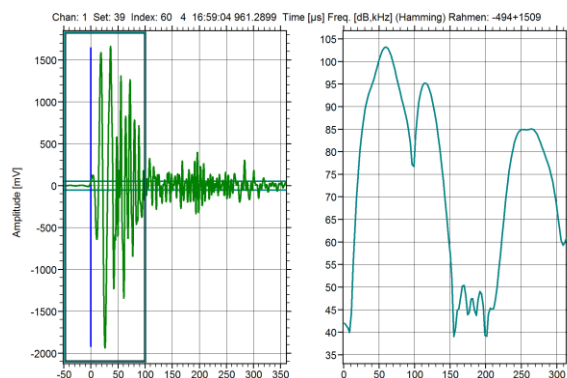


Bild 9 Impulsantwort VS30-SIC-46 dB, Filter: 25-300 kHz, Anregung $1V_P \times 1\mu$ s. Max 1900 mV / 103 dB@60 kHz. Rauschen: 2,18 mV $_P$. Einsatz der s1 bei $t=30\mu$ s. Nicht zur Bewertung empfohlen

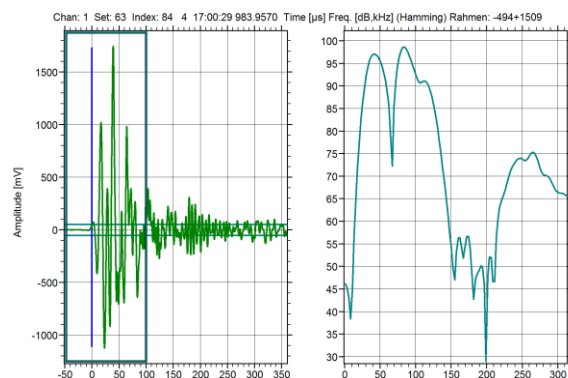


Bild 10 Impulsantwort XXX, Filter: 25-300 kHz, Anregung $5V_P \times 1\mu$ s. Max 1750 mV / 98 dB@80 kHz, Rauschen: 0,33 mV $_P$

Bild 7 zeigt die Antwort des VS30-SIC-46dB bei 1V Pulsamplitude am Stimulus, Bild 8 die des XXX bei 5 V am Stimulus, jeweils mit Filter 25-45 kHz. Für die FFT wurde eine Hamming-Window-Funktion und ein Zeitbereich um die ersten 140 μ s (45 kHz Tiefpass) bzw 100 μ s (300 kHz Tiefpass) gewählt. Der Vergleich der FFT in Bild 7 und 8 zeigt, dass VS30-SIC-46dB bei 14 dB geringerer Anregung (1V statt 5V) ein 3 dB höheres Signal liefert, das wäre bei gleicher Anregung ein 17 dB höheres Signal, wie bei der kontinuierlichen Anregung. Die Anregung des Modes s0 (Bild 7 und 8) erscheint gut reproduzierbar und für einen Vergleich gut geeignet.

Bilder 9 und 10 sind mit einem höherfrequenten Bandpass, 25-300 kHz, entstanden. Bild 9 zeigt etwa bei $t=30\mu\text{s}$ die Ankunft des s1 Modes, gemäß Bild 6 mit knapp 4m/ms bei 250 kHz. Mit diesem höherfrequenten Bandpass zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen den beiden Sensormodellen. So ist zu sehen, dass VS30-SIC-46dB eine Resonanz bei etwa 60 kHz aufweist, XXX bei 40 kHz und 80 kHz mit einer Antiresonanz bei 60 kHz.

Wegen des unklaren Einflusses des s1 Modes ist ein Vergleich von Bild 9 und 10 nur begrenzt möglich. Deshalb wurden in Tabelle 2 keine Werte für das Signal-Rauschverhältnis für den Bandpass 25-300 kHz übernommen.

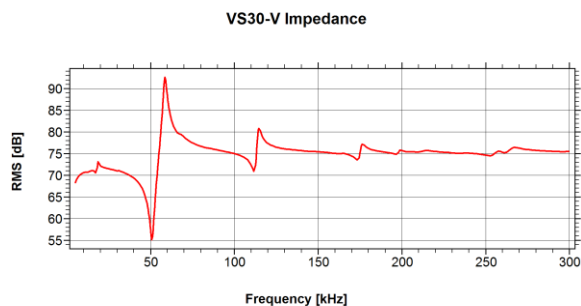
Tabelle 2 Ergebnisse für Burstanregung

#	Sensor:	VS30-SIC-46dB		XXX	
1	Filter	25-45 kHz	25-300 kHz	25-45 kHz	25-300 kHz
2	Max. Amp [mV _P]	940 mV _P 119,4 dB	1900mV _P 125,6 dB	600mV _P /5 101,6 dB	1750mV _P /5 110,9 dB
3	Max. Amp (FFT) [dB]	100 dB	103 dB	97-14 dB	98-14 dB
4	Max. Rauschen [mV _P]	0,58mV 55,2 dB	2,18 mV 66,8 dB	0,2 mV 46 dB	0,33 mV 50,3 dB
Auf maximale Amplitude im Zeitbereich bezogenes Signal-Rausch-Verhältnis:					
5	SNR mV (#2[dB]-#4[dB])	64,2 dB		55,6 dB	
6	SNR mV (-55,6dB)	8,6		0,0	
Auf maximale Amplitude in der FFT bezogenes Signal-Rausch-Verhältnis:					
7	SNR dB (#3-4)	44,8 dB		37,0 dB	
8	SNR dB (-37,0)	7,8		0,0	

Die in den Bildlegenden angegebenen Rauschwerte wurden in einem separaten Schritt aufgenommen. Es handelt sich um Maximalwerte die nicht häufiger als 1/s auftreten. Die 40 dB Hilfsverstärkung für die Rauschmessung sind bereits abgezogen. Alle Skalierungen beziehen sich auf die Eingangsspannung des AE-Signalprozessors (ASIP-2). Die um Faktor 5 stärkere Stimulation des XXX wurde durch Abzug von 14 dB der Maximalantwort in der Tabelle 2 einbezogen.

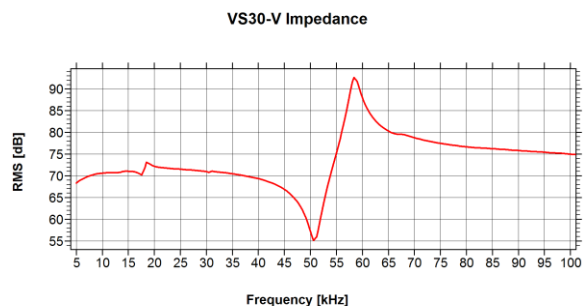
Ähnlich zur kontinuierlichen Anregung weist auch bei gleicher Burstanregung der VS30-SIC-46dB, im Vergleich zu XXX, eine um 17 dB höhere Amplitude und ein um etwa 9 dB höheres Signal-Rausch-Verhältnis auf.

3. Rauschspektren, Impedanz und “Natürliche Frequenz”



FG 100mV → 10pF → Sensor → 20cm → preamp. 40dB → ASIPP (dummy filter)

Bild 11 Impedanzsprünge des VS30-V (ohne inter-geriertem Verstärker)



FG 100mVpp → 10pF → Sensor → 20cm → preamp. 40dB → ASIPP (dummy filter)

Bild 12 Zoom aus Bild 11 um die natürliche Frequenz (58 kHz)

Die Frequenz an der ein Sensor einen abrupten Sprung in seiner elektrischen Impedanz zeigt, wird nach [2] „Natural Frequency“ also „natürliche Frequenz“ genannt. Bei einem Sensor mit integriertem Verstärker sind die Anschlüsse des Piezoelements normalerweise nicht zugänglich und somit kann die Impedanz auch nicht „direkt“ gemessen werden. Wenn die Anschlüsse des piezoelektrischen Elements zugänglich sind, kann die Impedanz wie folgt gemessen werden: Man speist eine Sinusschwingung über eine hohe Impedanz, z.B. eine Kapazität von 10 pF ein, variiert die Frequenz und misst dabei die Spannung. Mit einem Sensor vom Typ VS30-V (Piezoelektrisches Element wie VS30-SIC-46dB, jedoch ohne integriertem Verstärker) ergibt sich dabei ein Spannungsverlauf gemäß Bild 11 und 12.

Bild 12 zeigt die niedrigste Impedanz bei 50 kHz und die höchste bei 60 kHz. Das besondere an dieser Frequenz der höchsten Amplitude ist, dass die Amplitude bei angeschlossenem Sensor höher ist (in Bild 12 94 dB) als wenn der Sensor nicht angeschlossen wäre (89 dB). Das Piezoelement „verstärkt“ scheinbar die vom FG über 10 pF zugeführte elektrische Energie. Dieser Effekt führt zu einer ausgeprägten Spitze im Rauschspektrum (Bild 13) und ist der Grund dafür, dass das Eigenrauschen des VS30 substantiell ansteigt, wenn die Messkette statt eines 45 kHz-Tiefpasses einen Tiefpass größer 60 kHz nutzt.

Sowohl im Rauschspektrum wie auch in der Impedanzkurve sind weitere Spitzen bei 112 kHz, 175 kHz und 270 kHz zu sehen. (Bild 11 und 13). Aus Bild 11 kann auch geschlossen werden, dass das Rauschen mit niedrigerer Hochpassfrequenz als 25 kHz nicht drastisch ansteigen würde.

Der Sensor XXX zeigt seine dominante Spitze im Rauschspektrum unterhalb 20 kHz, daraus kann geschlossen werden, dass das Rauschen mit niedriger Frequenz des Hochpasses als die hier betrachteten 25 kHz ansteigen würde. Das Rauschspektrum erklärt auch warum das Rauschen des XXX mit 100 kHz Tiefpass nicht so substantiell ansteigt wie beim VS30-SIC-46dB.

Die Messung eines reproduzierbaren Rauschspektrums erfordert eine Mittelung der FFT über viele Einzelmessungen, da einzelne Rauschmessungen in ihrer FFT stark streuen. Für Bild 13 und 14 wurde mit dem Programm Vallen FFT-Averager die FFT von jeweils 1000 Datensätzen einer Mittelung unterzogen. Erst durch die Mittelung treten die einzelnen Spitzen im Rauschspektrum deutlich hervor.

Die Skalierung von Bild 13 und 14 darf nicht miteinander verglichen werden. Die Bilder sollen die unterschiedlichen „natürlichen“ Frequenzen aufzeigen und die Auswirkung der Filterbandbreite auf das Rauschen des gefilterten Signals verdeutlichen.

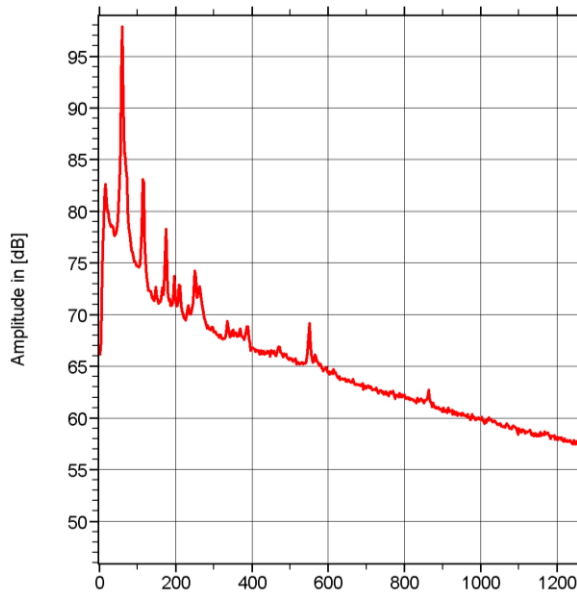


Bild 13: Rauschspektrum VS30-SIC-46dB (Mittelung von 1000 FFTs), skaliert nach 46 dB interner + 40 dB Hilfsverstärkung.

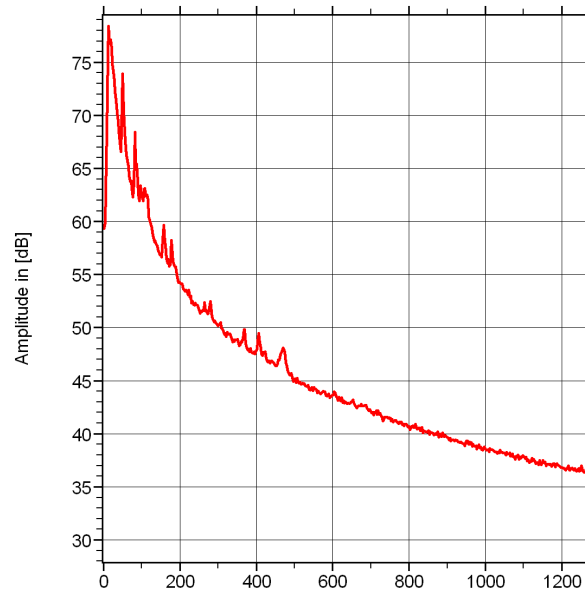


Bild 14: Rauschspektrum XXX (Mittelung von 1000 FFTs), skaliert nach interner + 40 dB Hilfsverstärkung.

Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt zwei Aufbauten zum Vergleich der Empfindlichkeit unterschiedlicher Sensormodelle, einen mit Direktkopplung und kontinuierlicher Anregung und einen mit Burst-Anregung über einen Aluminiumstab. In beiden Fällen wird eine Anregung senkrecht zur sensitiven Fläche erzeugt. Zur Betrachtung des Signal-Rauschverhältnisses muss auch das Rauschen und die Rauschspektren in Betracht gezogen werden.

Es wurden zwei Sensormodelle miteinander verglichen. Das Ergebnis hing stark vom betrachteten Frequenzbereich ab. Bei Verwendung eines Bandpasses von 25 bis 45 kHz gibt ein Sensormodell bei gleicher Anregung ein 17 dB höheres Signal und etwa 8 dB höheres Rauschen aus, weist also ein 9 dB höheres Signal-Rauschverhältnis auf als das andere Modell. Der Frequenzbereich 25-45 kHz ist für die Tankbodenprüfung optimal.

Das empfindlichere Sensormodell weist eine natürliche Frequenz bei 60 kHz auf, was zu einer Spitze im Rauschspektrum führt, die mit dem 45 kHz Tiefpass substantiell gedämpft wird. Bei Verwendung eines Tiefpasses größer 60 kHz erhöht sich das Rauschen des empfindlicheren Sensormodells und es stellt sich etwa das gleiche Signal-Rausch-Verhältnis wie beim anderen Sensormodell ein.

Referenzen

- [1] Rose, L. J. "Ultrasonic Waves in Solid Media", CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, (2004) ISBN 0 521 54889 6 Seite 149+
- [2] Gautschi G, Piezoelectric Sensorics“, Springer Verlag (2002), ISBN 3-540-42259-5, S. 195....