

Stephan Kock

Bachelor-Arbeit

Thema: Körperschallmessungen an techn. Systemen

Bachelor-Thesis

Title: Measurement of structure born sound at technical systems

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Bachelor-Studiengang Elektrotechnik
Fachrichtung Mikroelektronik
der Fachhochschule Düsseldorf

Betreut an der Fachhochschule Düsseldorf durch Herrn Prof. Dr. Fülber.
Durchgeführt bei der Firma ICOS GmbH betreut durch Herrn Dipl.-Ing. (FH) Uwe Duerkop.

Thema der Bachelor-Arbeit:

Körperschallmessungen an techn. Systemen

Kurzzusammenfassung:

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Messplatzes zur Erfassung von Körperschallemissionen eines technischen Systems. Der Leser dieser Arbeit soll einen Einblick in die physikalischen und normativen Grundlagen einer Körperschalluntersuchung erhalten. Er soll weiterhin in die Lage versetzt werden, den entwickelten Messplatz zu verstehen und eigenständig Prüfungen durchzuführen.

Title of this Bachelor-Thesis

Measurement of structure born sound at technical systems

Abstract:

This thesis discusses the development of a measurement setup to capture structure born sound emissions from technical systems. The reader of this thesis should get an insight into the physical and normative principles of structure born sound measurement. He should also be enabled to understand the developed measurement setup and to perform an examination on his own.

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation zu Thema und Anwendungen.....	9
1.1 Schall in der allgemeinen Erfahrungswelt.....	9
1.2 Körperschall in der allgemeinen Erfahrungswelt.....	9
1.3 Warum misst man Körperschall?.....	10
1.4 Warum müssen die spezifizierten Grenzwerte eingehalten werden?.....	11
1.5 Warum benötigt man einen Messplatz im Bereich der Entwicklung?.....	12
1.6 Motivation des Autors.....	12
2 Theoretische Grundlagen.....	13
2.1 Physikalische Betrachtung von Schall	13
2.2 Physikalische Betrachtung von Körperschall.....	14
2.2.1 Eigenschaften des Festkörpers als Medium für Schall.....	15
2.2.2 Bewegungsgleichung der Teilchen.....	17
2.2.3 Wellenarten im Festkörper.....	18
2.2.3.1 Longitudinale Wellen.....	19
2.2.3.2 Transversale Wellen.....	20
2.2.3.3 Torsionswellen.....	21
2.2.3.4 Biegewellen.....	22
2.2.4 Feldgrößen des Körperschalls.....	23
2.2.5 Das Verhalten von Schallwellen an Grenzflächen.....	25
2.3 Systemtheoretische Betrachtung	26
2.3.1 Übertragungsfunktion.....	26
2.3.2 Mechanische Impedanz des Festkörpers.....	29
2.3.3 Analogien zu Systemen der Elektrotechnik.....	30
2.3.4 Betrachtung eines einfachen Systems.....	32
2.4 Fouriersynthese.....	34
2.5 Verschiedene Messverfahren.....	36
2.5.1 Problem der ruhenden Bezugsmasse.....	36
2.5.2 Seismische Masse.....	37
2.5.3 Piezoelektrische Beschleunigungssensoren.....	38
2.5.4 Laser-Doppler-Verfahren.....	39
3 Wie kann man Körperschall normgerecht messen?.....	41
3.1 Betrachtete Normen zur Schallmessung.....	41
3.2 DIN EN ISO 7779.....	42

3.3 DIN 45635-1.....	43
3.4 DIN 45635-8.....	43
3.4.1 Messgrößen und deren Einordnung.....	44
3.4.2 Sensoren und Messgeräten sowie die Kalibrierung des Messsystems... 47	
3.4.2.1 Der Sensor.....	47
3.4.2.2 Die Verstärkung und Filterung.....	47
3.4.2.3 Kalibrierung des Messsystems.....	48
3.4.2.4 „Abgrenzung, Aufstellung und Betriebsbedingungen der Maschinen“	49
3.4.3 Positionierung der Sensoren.....	49
3.4.4 Durchführung der Messung und relevante Rahmenbedingungen.....	51
3.4.5 Berechnung und Korrekturen zur Ermittlung der abgestrahlten Luftschalleistung.....	53
3.4.6 Aufbau des zu erstellenden Berichtes über die durchgeführte Messung.	57
4 Aufbau eines normgerechten Messplatzes.....	61
4.1 Der Messplatz.....	61
4.1.1 Abwägen absoluter oder relativer Messungen.....	61
4.1.2 Gewählter Sensor.....	62
4.1.3 Diskussion der Verarbeitung und Auswertung der Messwerte auf Rechner-Ebene.....	65
4.1.4 Auswahl der Analog-Digital-Wandler-Stufe.....	66
4.1.5 Der Messverstärker.....	67
4.1.5.1 Einstellbare Referenzquelle.....	68
4.1.5.2 Die Verstärkerschaltung	68
4.1.6 Beschreibung der Auswertesoftware.....	71
4.1.6.1 Fast-Fourier-Transformation.....	72
4.1.6.2 Darstellungsarten.....	74
4.1.6.3 Kalibrierungsdaten.....	74
4.1.7 Der realisierte Messplatz.....	74
4.2 Kalibrierung der Messmittel.....	76
4.2.1 Sensor.....	76
4.2.2 Messverstärker.....	77
4.2.3 Auswertesoftware.....	78
5 Durchführung einer Prüfung auf Körperschallemission	81
5.1 Körperschall-Spezifikation des Auftraggebers für das zu prüfende Rechnersystem.....	81
5.2 Messaufbau.....	83

5.2.1 Benötigte Messmittel.....	83
5.2.2 Aufstellung des zu prüfenden Gerätes.....	84
5.2.3 Anordnung der Sensoren.....	86
5.2.4 Befestigung der Sensoren.....	87
5.3 Der Betriebszustand.....	88
5.4 Durchführung der Messung.....	89
5.5 Auswertung der erfassten Daten.....	91
5.5.1 Vorbereitung der erfassten Daten.....	91
5.5.2 Einstellung der Auswertesoftware.....	92
5.5.3 Aufbereitung der gewonnen Daten.....	93
5.5.4 Diskussion eines Ergebnis-Spektrums.....	94
6 Fazit.....	97

1 Motivation zu Thema und Anwendungen

1.1 Schall in der allgemeinen Erfahrungswelt

Nahezu jeder kommt mit Schall in Berührung. Mal wird er als störend empfunden, wie zum Beispiel der Lärm aus dem Kopfhörer drei Reihen hinter uns im Bus oder als sehr angenehm und entspannend, wie dieselbe Musik für den *Träger* des Kopfhörers, obwohl er vermutlich der größeren Lautstärke ausgesetzt ist. Schon dieses kleine Beispiel zeigt, dass die Bewertung von Schallereignissen nicht einfach ist. Die Bewertung und Einteilung von Schallereignissen nutzt sehr subjektive und teilweise schlecht bewertbare Skalen.

Neben der subjektiven Perspektive gibt es auch Möglichkeiten Schallereignisse objektiv und wissenschaftlich zu beurteilen. Die einfachste objektive und somit wissenschaftliche Einteilung kann mit Hilfe einer Lautstärkemessung vorgenommen werden.

1.2 Körperschall in der allgemeinen Erfahrungswelt

Auch Körperschall ist Teil unserer direkten Erfahrungswelt. Auch hier gibt es das Problem der Bewertung dieser Schallereignisse.

In der Regel nehmen wir Körperschall jedoch selten als direktes Ereignis wahr, wie zum Beispiel die Vibrationen eines Vibrationsalarms oder eines Presslufthammers, der dafür sorgt, dass der Boden unter den Füßen vibriert, sondern er dient als Zwischenstufe zum Transport der Schallenergie, wie zum Beispiel bei den Klopfzeichen, die über die Wasserrohre übertragen werden oder dem Dröhnen eines Bleches am Auto.

Es gibt aber Bereiche, in denen Körperschall gezielt eingesetzt wird. So ist eine Ultraschalluntersuchung nur möglich, weil das Verhalten des Schalls im Festkörper genutzt wird, um sich ein Bild über das Innere des Körpers zu verschaffen.

Eine andere Anwendung ist die Analyse der Körperschallereignisse, die bei der Verformung von Blech auftreten, um zu entscheiden, ob ein Airbag ausgelöst wird oder nicht. Man kann anhand der Schallereignisse auch den Verschleiß-Zustand von Lagern beurteilen.

1.3 Warum misst man Körperschall?

Der Körperschall, den ein System in ein anderes übergeordnetes System einbringt, kann in diesem System zu Störungen von Teilfunktionen oder der Gesamtfunktion führen.

Dies kann auf direktem Wege geschehen, indem Teile des Systems durch die Schwingungen eine Fehlfunktion hervorrufen. Daneben kann die Schwingung den Ausfall einer anderen Teilkomponente bewirken, wie zum Beispiel das Brechen einer Verbindung oder das Provozieren von Lesefehlern bei optischen Laufwerken, wenn die eingetragenen Schwingungen ab einer bestimmten Amplitude oder Frequenz vom Regelkreis des Laufwerks nicht mehr ausgeglichen werden können.

Abgesehen von der direkten Einwirkung auf das System, wird Körperschall auch an Grenzflächen in Luftschall umgewandelt und trägt somit zur Luftschallemission eines Systems bei, welche, neben den direkten körperlichen Auswirkungen auf den Nutzer des Systems, bei Dauerbelastung auch zu einer unterschweligen Stress-Reaktion führen kann.

Körperschall entsteht, wenn mechanische Strukturen direkt durch gleichförmige Erregung zur Schwingung angeregt werden, zum Beispiel durch die Unwucht eines Lüfters oder die Elektrorestriktion von Spulen-Kernen. Die Erregung kann aber auch auf

indirektem Wege durch Luftschall, wie zum Beispiel an Kanten verwirbelte Strömungen, entstehen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die theoretischen Grundlagen, die benötigten Messmittel sowie das Vorgehen bei einer Körperschalluntersuchung aufzuzeigen.

1.4 **Warum müssen die spezifizierten Grenzwerte eingehalten werden?**

Neben der allgemeinen Reaktion des Menschen auf die aus Körperschall resultierende Luftschallbelastung, kann Körperschall auch negative Einflüsse auf ein Gesamt- oder Teilsystem haben.

In diesem Fall, der auslösendes Ereignis für diese Arbeit war, werden vom Auftraggeber Grenzwerte für die direkte Körperschallemission gefordert. Die Tatsache, dass Grenzwerte für den reinen Körperschall vorliegen, zeigt, dass hier einer Besonderheit der Applikation Rechnung zu tragen ist.

Das zu betrachtende Gesamtsystem ist ein Unterwasserfahrzeug, in dem das Teilsystem, ein bei der Firma ICOS GmbH entwickelter und hergestellter Rechner, eingesetzt wird. Neben den Anforderungen an die mechanische und klimatische Umweltverträglichkeit sind, aufgrund der festen Verbindung mit dem Schiffskörper, auch Vorgaben für Körperschallemissionen zu erfüllen, um die Gesamtemission des Fahrzeugs zu minimieren.

1.5 **Warum benötigt man einen Messplatz im Bereich der Entwicklung?**

Die Körperschallemission ist ohne Messmittel nur schwer zu bewerten. Da das hier betrachtete Rechnersystem allerdings sehr komplex ist, ist der Erfolg einzelner Maßnahmen nur sehr schwer mathematisch oder durch Simulation vorherzusagen. Um also die ergriffenen Dämmmaßnahmen zu beurteilen, ist eine Messung am realen System erforderlich.

Der Zeitaufwand und Kostenaufwand, der in einem externen Labor entstehen kann, um diese Vorversuche durchzuführen, steht unter Umständen in keinem Verhältnis zu den Ergebnissen. Insbesondere ist zu berücksichtigen, dass ein externes Labor nicht immer sofort zur Verfügung steht.

Um also schneller und flexibler Probleme erkennen und beseitigen zu können, ist ein eigener Messplatz für Körperschalluntersuchungen von Vorteil. Es ist allerdings nicht unbedingt Aufgabe dieses Messplatzes mit seiner Hilfe den Nachweis der Einhaltung einer Spezifikation zu führen.

1.6 **Motivation des Autors**

Der Autor dieser Arbeit setzt sich schon länger im Rahmen von tontechnischen Tätigkeiten mit Umsetzung von Luftschall in elektrische Signale auseinander. Vor diesem Erfahrungshintergrund ist die Aufgabe, sich in dieser Abschlussarbeit mit der Wandlung und Analyse von Körperschallereignissen zu beschäftigen, eine motivierende sowie neue Herausforderung der Ingenieurwissenschaft.

Sie ermöglicht es das erworbene elektrotechnische Wissen auf eine neue Aufgabe zu übertragen und den Erfahrungshorizont des Autors auf ein vielfältiges Gebiet der Physik zu erweitern.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Physikalische Betrachtung von Schall

Zunächst werden Definitionen aus unterschiedlichen Quellen dargestellt.

Ivar Viet definiert Schall in seinen Buch „Technische Akustik“ wie folgt:

„Schall besteht seiner physikalischen Natur nach aus mechanischen Schwingungen elastischer Medien. Solche Schwingungen entstehen, wenn die kleinsten Teilchen eines elastischen Stoffes, nämlich seine Moleküle, durch eine äußere Kraft aus ihrer Gleichgewichtslage herausbewegt und anschließend sich selbst überlassen werden. Infolge der ihnen inne wohnenden Elastizitäts- und Trägheitskräfte pendeln die Materieteilchen um ihre Ruhelage hin und her. Das Auftreten von Schall ist untrennbar an die Existenz von Materie gebunden.[...] Im Vakuum gibt es keinen Schall.“¹ „Schall erzeugt man dadurch, indem man beispielsweise einen Körper zu elastischen Schwingungen anregt.“²

Das Taschenbuch der technischen Akustik von Gerhard Müller und Michael Möser hält folgende Definition bereit:

„Unter Schall versteht man mechanische Schwingungen im Hörbereich (etwa 16 Hz bis 16 kHz). Falls die Schwingungen in Luft erfolgen, spricht man von Luftschall, bei Flüssigkeitsschwingungen von Flüssigkeitsschall (z. B. Wasserschall) und bei festen Körpern von Körperschall.“³

1 [VEI01] S. 25

2 [VEI01] S. 25

3 [MÜL01] S. 1

Der Schall ist also die Schwingung von kleinen Materieteilchen, die wie aus der Ruhelage gebrachte Pendel schwingen. Wenn ein solches Pendel während seiner Schwingung Energie, zum Beispiel durch Stoß, an ein benachbartes Pendel überträgt, setzt sich die Schwingung fort und es wird Energie durch das Trägermedium transportiert. Ein Teil der Energie wird aufgrund von zum Beispiel Reibung im Medium in Wärme umgesetzt.

Da sich diese Ausarbeitung primär mit Körperschall beschäftigt, wird auf die Betrachtung von Luft- und Flüssigkeitsschall weitgehend verzichtet.

2.2 Physikalische Betrachtung von Körperschall

Definition von Körperschall nach dem Buch „Körperschall“ von Michael Möser und Wolfgang Kropp:

„Eine sehr große Zahl der Schallereignisse, die unser Ohr erreichen - sei es der Klang einer Geige, das Quietschen einer Bremse oder eine lautstarke Unterhaltung in der nachbarlichen Wohnung - werden durch schwingende Festkörper erzeugt oder fortgeleitet. Man bezeichnet das Gebiet der Physik, das sich mit der Erzeugung, Übertragung und Abstrahlung von - meist sehr kleinen – zeitlich wechselnden Bewegungen und Kräften in festen Körpern beschäftigt als ‚Körperschall‘ [...]. Dabei drückt die Bezeichnung ‚Schall‘ bereits aus, dass das Hauptaugenmerk bei den hörbaren Frequenzen - also etwa im Bereich 16 Hz bis 16000 Hz - liegt. Diese Frequenzen sind jedoch durchaus nicht als starre Grenzen anzusehen, so ist es beispielsweise ohne weiteres möglich, dass die Messmethoden, mit denen die Körperschalleigenschaften von Materialien im hörbaren Bereich bestimmt werden, auch im Ultraschallgebiet angewandt werden. Es können andererseits auch Verfahren, die für tiefe Frequenzen (z. B. in der Seismologie oder in der mechanischen Schwingungslehre) entwickelt wurden, auch für Körperschallprobleme benutzt werden.“⁴

4 [MÖS01] S.2

So definiert die DIN 45635-8 Körperschall:

„Als Körperschall werden nach dieser Norm Schwingungen fester Körper im Bereich des hörbaren Schalls bezeichnet“⁵

Diese Definitionen sagen nicht mehr über die physikalische Natur des Körperschalls aus als die allgemeinen Definitionen. Sie definieren lediglich den zu untersuchenden Frequenzbereich und legen das Medium fest. In Verbindung mit den allgemeinen Definitionen von Schall wird aber klar, dass der Festkörper als Medium bestimmte Eigenschaften haben muss.

2.2.1 Eigenschaften des Festkörpers als Medium für Schall

Damit der Festkörper als Medium zur Übertragung von Schall dienen kann, muss er bestimmte Eigenschaften haben. Er muss nach der Definition des Buches „Technische Akustik“ ein elastisches Medium sein. Eine Eigenschaft des Festkörpers ist das Vorhandensein eines Elastizitätsmoduls. Diese materialspezifische Größe beschreiben das Verhalten des Festkörpers im Bereich der elastischen Verformung. Sie geht als Materialkonstante in das Hookesche Gesetz ein. Dieses Gesetz beschreibt die Verformung eines Festkörpers, auf den eine mechanische Spannung einwirkt.

Da ein Festkörper ein Elastizitätsmodul besitzt, kann er von einer einwirkenden Spannung elastisch verformt werden und danach wieder seinen Ursprungsform annehmen. Wenn die Spannung zu groß wird, kann der Körper seine Ursprungsform nicht wieder annehmen, sondern wird dauerhaft also plastisch, verformt. Die Zugspannung σ entsteht bei Krafteinwirkung parallel zur Betrachtungsachse, während die Schubspannung τ entsteht, wenn die Kräfte orthogonal zur Betrachtungsachse einwirken. Das Hookesche Gesetz gilt nur für den Bereich der elastischen Verformung.

5 [DIN 45635-8] S.3

Wie zum Beispiel aus Zugversuchen bekannt, verjüngt sich ein Draht unter starker Zugbelastung. Es entsteht also nachweislich eine Spannung, die den Festkörper orthogonal zusammenzieht. Zu jeder ursächlichen Zugspannung in eine bestimmte Richtung gehören im Festkörper also resultierende Schubspannungen, welche orthogonal zur Richtung der ursächlichen Spannung verlaufen.

Das daraus entstehende Gleichungssystem für die Betrachtung eines infinitesimal kleinen Volumenelements des Festkörpers enthält also im kartesischen Koordinatensystem für jede Raumdimension eine Gleichung für die mechanische Zugspannung und zwei Gleichungen für die resultierende Spannung. Bei einer Betrachtung in drei Raumdimensionen entsteht also eine Matrize mit neun Spannungen.

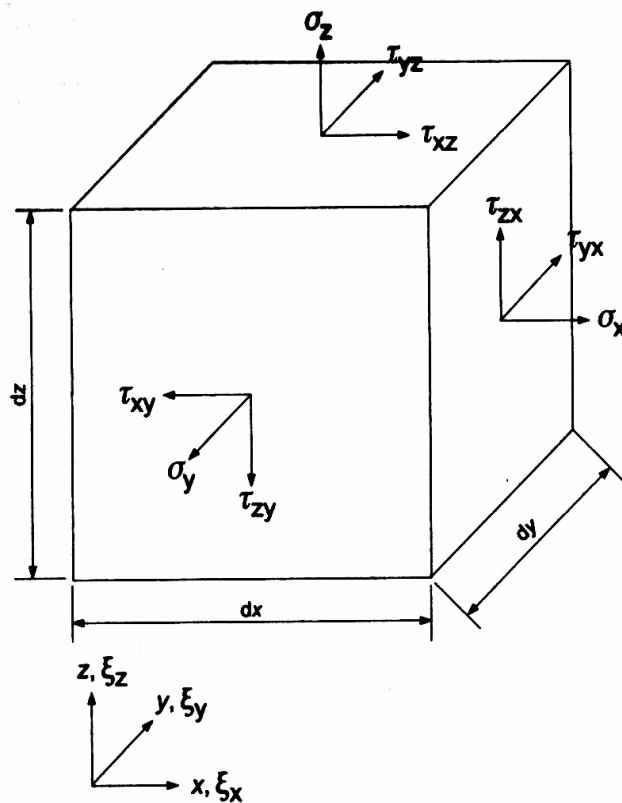


Abbildung 1: Spannungen an einem infinitesimal kleinen Teil des Kontinuums ([MÜL01] S. 12)

Um aus den neun Spannungen die neun resultierenden Verschiebungen mit allen Beeinflussungen der Elemente untereinander zu erfassen, muss das dreidimensionale Elastizitätsmodul ein dreidimensionaler Tensor vierter Ordnung sein. Es handelt

sich um ein System mit 3^4 , also 81 Komponenten. Von diesen Komponenten sind, aufgrund mathematischer Symmetrien und der Körpergeometrie, verschiedenen abhängig, wodurch sich das System auf maximal 21 Komponenten reduziert.⁶

2.2.2 Bewegungsgleichung der Teilchen

Allgemein kann man die aktuelle Position ξ_F der infinitesimal kleinen Teilchen eines Festkörpers, wie schon im Kapitel 2.1 geschehen, als Auslenkung ξ um einen Ruhelage ξ_0 beschreiben. Diese Auslenkung erfolgt durch eine äußere Kraft, welche eine Spannung im Festkörper zur Folge hat.

$$\xi_F = \xi_0 + \xi(x, y, z, t)$$

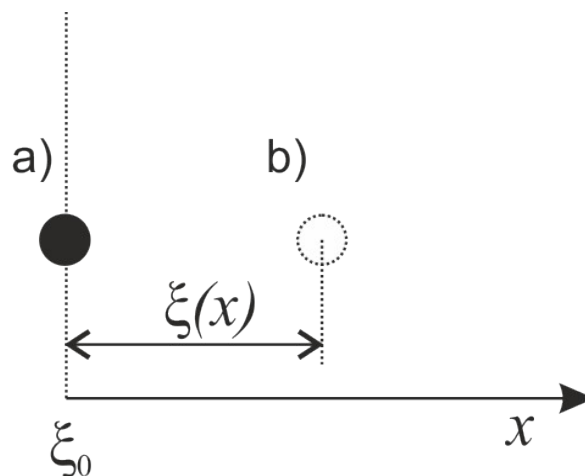


Abbildung 2: Auslenkung eines infinitesimal kleinen Teilchen aus Position ξ_0 a) in x Richtung zu Position b) um $\xi(x)$

Wenn diese Auslenkung im elastischen Bereich erfolgt, ist nach dem Entfernen der äußeren Kraft das Teilchen bestrebt seine Ruhelage wieder einzunehmen. Diese Bewegung folgt der allgemeinen Differentialgleichung der Schwingungen. Die Geschwindigkeit mit der dies geschieht, bezeichnet man als „Schnelle“ oder wie in „Technischer Akustik“ präziser formuliert: „Unter Schallschnelle oder Schnelle v (Einheitenzeichen m/s) versteht man die Wechselgeschwindigkeit, mit der die

⁶ Vgl. [BEC01] S. 26 ff

schwingenden Partikel des Schallübertragungsmediums um ihre Ruhelage oszillieren. Die Schnelle ist definiert als Schallausschlag pro Zeiteinheit

$$v = \frac{d\xi}{dt}, \quad (\xi = \int v dt).$$

Erfolgt die Bewegung der Mediumteilchen sinusförmig mit der Frequenz $f = \omega/2\pi$, so ist

$$v = \omega \cdot \xi. \quad {}^7$$

Je nach Bewegungsrichtung der Teilchen, relativ zur Ausbreitungsrichtung der Welle, kann man verschiedene Wellenarten mit unterschiedlichen Bewegungsgleichungen unterscheiden.

2.2.3 Wellenarten im Festkörper

Abhängig von der Fachliteratur, die man zu Rate zieht, trifft man auf unterschiedliche Einordnungen der Schallwellen in verschiedene Wellenarten. Literatur die sich auf den Körperschall beschränkt unterscheidet folgende Wellenarten:

1. Longitudinale Wellen
2. Transversale Wellen
3. Torsionswellen
4. Biegewellen

Auf die Herleitung der Wellengleichungen der verschiedenen Wellenarten wird verzichtet, da dies den Umfang der Arbeit überschreiten würde. Der interessierte Leser kann diese im 2. Kapitel des Buches „Körperschall“ von Michael Möser und Wolfgang Kropp nachvollziehen.⁸

⁷ [VEI01] S. 31

⁸ Vgl. [MÖS01] S. 29ff

Zusätzlich zu den reinen Wellen treten Mischwellen wie Dehnwellen auf. So ist, wie in Kapitel 2.2.1 schon beschrieben, die alleinige Existenz von Zugspannungen ohne resultierende Schubspannungen nicht möglich. Eine longitudinale Welle bedingt also eine resultierende Transversalwelle. Die Ausprägung dieser Schwingung ist abhängig von der Körpergeometrie. Deshalb kann diese resultierende Welle in der Praxis unter Umständen vernachlässigt werden.

In der Praxis kommen nahezu reine Wellen nur bei bestimmten Körpergeometrien vor. Sind die Ausdehnungen des schwingenden Körpers um Größenordnungen über der Wellenlänge, kann man von nahezu reinen Wellen ausgehen.⁹

2.2.3.1 Longitudinale Wellen

„Bei reinen Longitudinalwellen (auch als Kompressions- oder Dilatationswellen bezeichnet) bewegen sich die Festkörperteilchen [...] in Ausbreitungsrichtung der Welle.“¹⁰

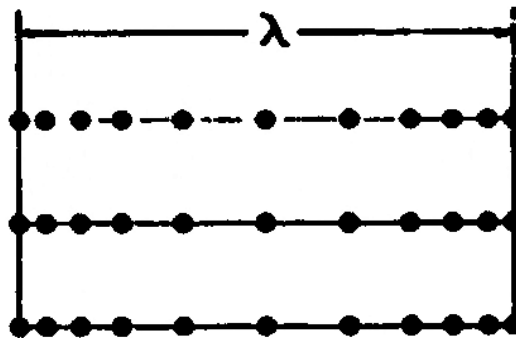


Abbildung 3: Verteilung der Teilchen in einer longitudinalen Welle ([HEN01] S. 22)

„Longitudinalwellen sind in der Regel dann von Interesse, wenn der untersuchte Körper verglichen mit der Wellenlänge sehr groß ist“¹¹

9 [HEN01] S. 21f

10 [MÜL01] S. 13

11 [MÜL01] S. 13

Die Wellengleichung einer reinen longitudinalen Welle lautet:

$$„ D \frac{\partial^2}{\partial x^2}(\sigma_x, v_x) = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\sigma_x, v_x) “^{12}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der longitudinalen Welle kann wie folgt bestimmt werden:

$$„ c_L = \sqrt{D/\rho} “$$

Die Konstante D , die wie σ_x die Dimension Kraft/Fläche besitzt (z. B. N/m^2), sei als die longitudinale Steife des Materials bezeichnet.“¹³

Diese Wellenform ist die einzige, die nicht nur im Festkörper, sondern auch in flüssigen und gasförmigen Medien auftritt.¹⁴

2.2.3.2 *Transversale Wellen*

Im Festkörper „können bei entsprechender Querkraftanregung auch reine transversale Schubwellen auftreten.“¹⁵ Diese Wellen schwingen also orthogonal zu Ausbreitungsrichtung der Welle.

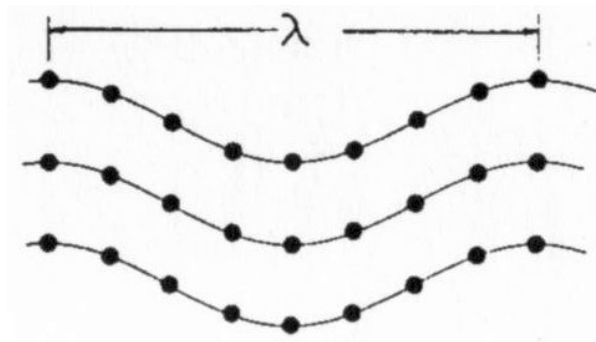


Abbildung 4: Verteilung der Teilchen in einer transversalen Welle ([HEN01] S. 22)

¹² [MÖS01] S. 31

¹³ [MÖS01] S. 30

¹⁴ Vgl. [MÖS01] S. 30ff

¹⁵ [HEN01] S. 22

Die Wellengleichung einer reinen transversalen Welle lautet:

$$„ G \frac{\partial^2}{\partial x^2}(\tau_{xy}, v_x) = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\tau_{xy}, v_x) \quad “ 16$$

Diese Welle breitet sich mit der, durch folgende Gleichung bestimmten, Geschwindigkeit aus:

$$„ c_T = \sqrt{G/\rho} \quad “ 17$$

2.2.3.3 Torsionswellen

Eine Torsionswelle schwingt um eine Rotationsachse, die parallel zur Ausbreitungsrichtung der Welle verläuft.

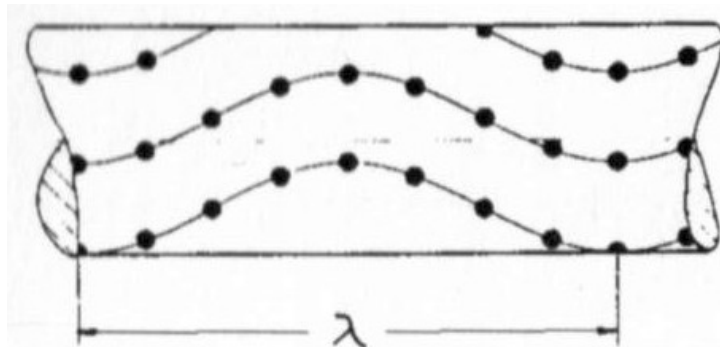


Abbildung 5: Verteilung der Teilchen in einer Torsionswelle ([HEN01] S. 23)

Die Wellengleichung einer reinen Torsionswelle lautet:

$$„ T \frac{\partial^2}{\partial x^2}(M_x, w_x) = \Theta' \frac{\partial^2}{\partial t^2}(M_x, w_x) \quad “ 18$$

Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit wird mit folgender Gleichung bestimmt:

$$„ c_T = \sqrt{T/\Theta'} = \sqrt{G/\rho} \quad “ 19$$

16 [MÖS01] S. 41

17 [MÖS01] S. 41

18 [MÖS01] S. 45

19 [MÖS01] S. 45

Dabei ist zu beachten, dass T und Θ' nur für rotationssymmetrische Querschnitte anwendbar sind. Für andere Querschnitte werden im Buch „Körperschall“ von Michael Möser und Wolfgang Kropp Umrechnungsfaktoren für rechteckige Querschnitte gleicher Fläche angegeben.²⁰

2.2.3.4 Biegewellen

„Von den [...] genannten Wellenformen sind die Biegewellen die kompliziertesten, jedoch für die Ausbreitung und Abstrahlung von Körperschall die wichtigsten. Es sind Wellen mit transversaler Auslenkung der Struktur bei gleichzeitiger Schrägstellung der Körperquerschnitte.“²¹ Diese Wellenform hat im Gegensatz zu den bisherigen vier beschreibende Feldgrößen.

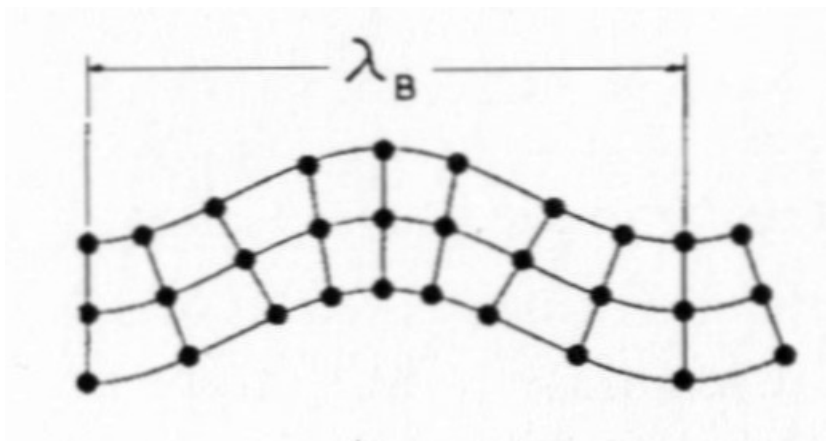


Abbildung 6: Verteilung der Teilchen in einer Biegewelle ([HEN01] S. 23)

Die Wellengleichung einer eindimensionalen Biegewelle lautet:

$$-B \frac{\partial^4}{\partial x^4} (v_y, w_z, M_z, F_y) = m' \frac{\partial^2}{\partial t^2} (v_y, w_z, M_z, F_y) \quad \text{“ 22}$$

Es handelt sich hierbei nicht mehr um eine verzerrungsfreie Wellenausbreitung.

²⁰ Vgl. [MÖS01] S. 43 ff

²¹ [HEN01] S. 23

²² [MÖS01] S. 52

Wie in der folgenden Gleichung erkennbar ist, ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit oder hier richtiger „Phasen-Geschwindigkeit“ von der Frequenz abhängig.

$$c_B = \sqrt[4]{\frac{B}{m'}} \sqrt{\omega} \quad \text{“ 23}$$

Es kommt also zu dem Effekt, dass unterschiedliche Wellenlängen unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten haben, was in der Physik allgemein als Dispersion bezeichnet wird. ²⁴

2.2.4 Feldgrößen des Körperschalls

So wie die elektromagnetische Welle den Energiegehalt des elektrischen und des magnetischen Feldes nutzt, um ihre Energie zu transportieren, so benutzt die Körperschallwelle die potenzielle und die kinetische Energie der Materieteilchen, um ihre Energie zu transportieren. Die Feldgrößen der Schallwelle sind die potenzielle und die kinetische Energie der Festkörperteilchen. Abhängig von der Wellenart kommt es zu unterschiedlichen Verteilungen der Energieformen.

Für Wellen mit zwei Feldgrößen, also longitudinale Wellen, transversale Wellen und Torsionswellen, kann man der Verlauf aus der folgenden Abbildung entnehmen (hier am Beispiel einer longitudinale Wellen).

In Abbildung 7 sind die Verhältnisse über eine Strecke zu einem bestimmten Zeitpunkt dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Energie abhängig vom Ort pulsiert. Der Leistungstransport findet also nicht kontinuierlich statt, sondern pulsiert. Michael Möser stellt hier noch die Intensität J dar. ²⁵

$$J = c_L E_{ges} \quad \text{“ 26}$$

²³ [MÖS01] S. 52

²⁴ Vgl. [MÖS01] S. 47 ff

²⁵ Vgl. [MÖS01] S. 32ff

²⁶ [MÖS01] S. 32

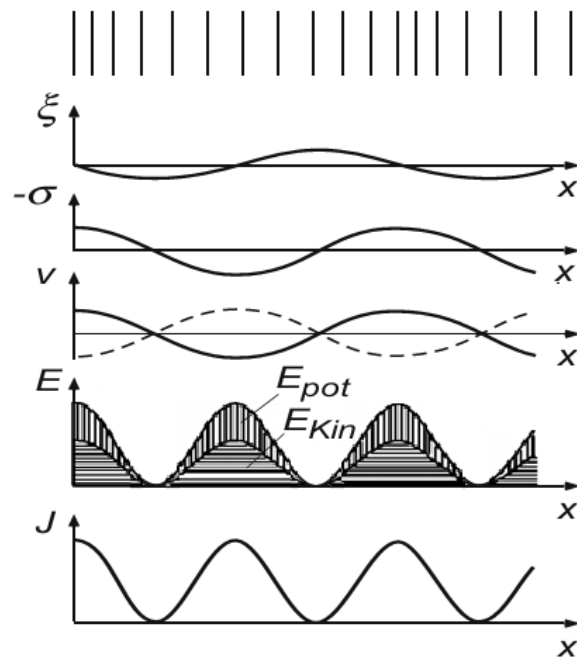


Abbildung 7: Feld und Energieverteilung in einer sinusförmigen Longitudinalwelle
([MÖS01] S. 33)

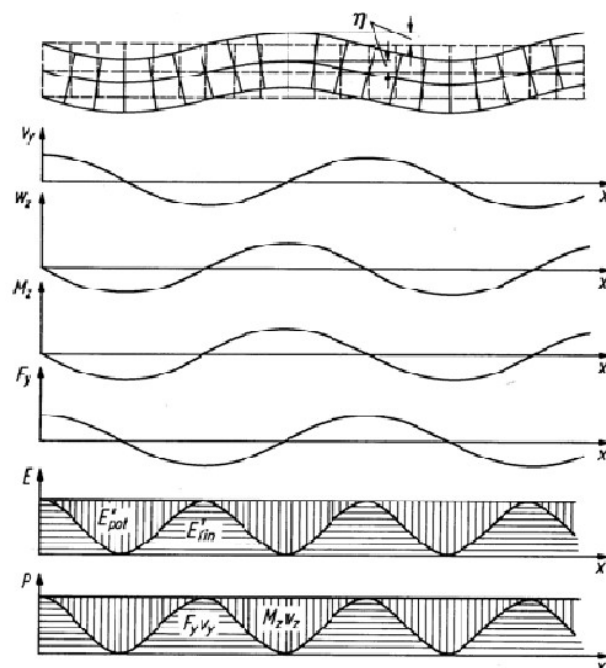


Abbildung 8: Verteilung der Feld- und Energiegrößen in einer sinusförmigen Biegewelle
([MÖS01] S. 56)

Anders verhält es sich bei Wellen mit vier Feldgrößen, wie zum Beispiel Biege- wellen. Die Abbildung 8 zeigt grafisch den Verlauf der Feld- und Energiegrößen einer sinusförmigen Biege- welle. Auch hier ist eine Momentaufnahme gezeigt.

2.2.5 Das Verhalten von Schallwellen an Grenzflächen

Dort, wo zwei unterschiedliche Medien aufeinander treffen, entsteht eine Grenzfläche. Da beide Medien einen eigenen mechanischen Wellenwiderstand aufweisen, verhält sich die akustische Welle ähnlich, wie es eine elektrische Leitungswelle bei falscher Anpassung des Leitungswellenwiderstands täte. Ein Teil der auf die Grenzfläche zu laufenden Energie e wird reflektiert. Je weiter das Verhältnis der beiden

Wellenwiderstände $\frac{Z_1}{Z_2}$ von Eins entfernt ist, umso größer ist der Anteil der reflektierten Energie r .

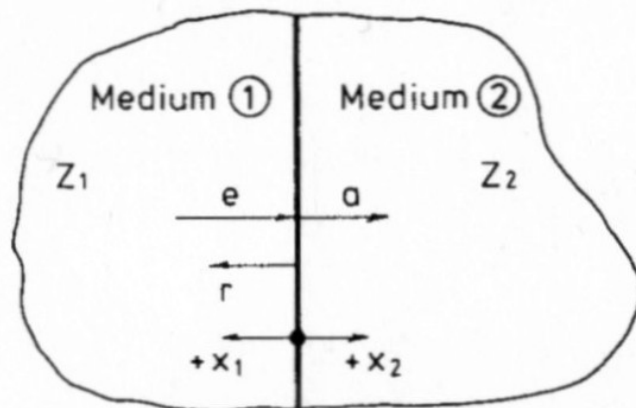


Abbildung 9: Schallreflexion und -durchgang an der Grenze zweier unterschiedlicher Medien ([HEN01] S. 267)

Die reflektierte Welle wird so lange durch den Festkörper laufen, bis sie entweder durch die Dämpfung in Wärme umgesetzt wurde, also abgeklungen ist, oder eine andere Grenzfläche erreicht. Lediglich der Rest der Energie a kann als Welle durch das neue Medium laufen und dort festgestellt werden.

Diese Tatsache kann man sich Zunutze machen, um die Emission der Körperschallleistung zu minimieren. Wenn man bewusst Fehlanpassungen in den Weg der Welle legt, wird die von ihr transportierte Energie nur zu einem geringen Anteil weiter transportiert.

Ein Schwingungsdämpfer ist eine solche gezielte Fehlanpassung. Da allerdings der Wellenwiderstand abhängig von der Frequenz ist, muss bei solchen Dämpf-Maßnahmen die Auswirkung über den gesamten zu betrachtenden Frequenzbereich berücksichtigt werden. Was bei 1 kHz noch eine Fehlanpassung ist, kann bei 100 Hz zur vollständigen Transmission der Welle führen.²⁷

2.3 Systemtheoretische Betrachtung

„Akustische Übertrager und schwingfähige Strukturen lassen sich durch eine ‚Ursache-Wirkungs-Kette‘ beschreiben, die auch als ‚System‘ bezeichnet wird: durch eine Anregung $x(t)$ (im Folgenden meist als ‚Eingangssignal‘ bezeichnet) werden Schwingungsfelder erzeugt, die (z. B. an einem fest gewählten Ort) in einer beobachtbaren Schwingungsgröße $y(t)$ (dem ‚Ausgangssignal‘) resultieren.“²⁸

Es wird also ein System aus Körperschallerreger, einem Übertragungssystem und einer resultierenden oder Messgröße beschrieben.

2.3.1 Übertragungsfunktion

Das Übertragungssystem kann durch eine Funktion beschrieben werden, wenn es ein lineares zeitinvariantes System ist. Diese Funktion wird dann als Übertragungsfunktion bezeichnet.

„ $y(t) = L\{x(t)\}$ “²⁹

²⁷ Vgl. [HEN01] S. 265 ff

²⁸ [MÜL01] S. 2

²⁹ [MÜL01] S. 2

Darin bezeichnet L die Verformung des Eingangssignals durch das Übertragungssystem, also die Übertragungsfunktion. In anderer Literatur stößt man auch auf D als Symbol für die Übertragungsfunktion.

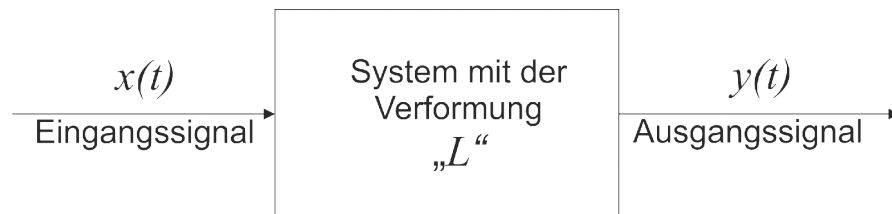


Abbildung 10: Schematische Darstellung eines Systems mit einem Eingangssignal $x(t)$, der Verformung L und dem Ausgangssignal $y(t)$

Die Linearität des Körperschall-Überträgers ist gegeben, wenn der Körper mit hinreichend kleinen Schwingungsamplituden, noch im Bereich der elastischen Verformung, schwingt. Dies ist in der Regel der Fall. Wenn die Erregung nicht mehr diesen Bedingungen entspricht, sind andere Methoden anzuwenden, deren Beschreibung jedoch den Umfang dieser Arbeit überschreiten würde.

Systeme heißen zeitinvariant, wenn sich ihre Reaktion $y(t)$ nach verzögerter Wiederholung des Eingangssignals ebenfalls nur durch eine Zeitverschiebung ergibt.

$$y(t-\tau) = L\{x(t-\tau)\} \quad \text{“ 30}$$

Die Eigenschaft der Zeitinvarianz oder „der Nichtveränderung mit der Zeit“ ist stark davon abhängig, welchen Zeitraum man betrachtet. So kann zum Beispiel ein System, das nach mehreren Jahren einen Ermüdungsbruch erleidet, streng genommen nicht als zeitinvariant bezeichnet werden. Für Betrachtungsintervalle von Stunden oder Tagen kann es aber durchaus diese Bedingung erfüllen, so dass eine Übertragungsfunktion gefunden und verwendet werden kann.

Man kann die Übertragungsfunktion entweder auf theoretischem Weg durch Bestimmung der akustischen Impedanz-Matrix oder auf experimentellem Weg durch Bestimmung der Impulsantwort ermitteln.

Für ein einfaches eindimensionales System sieht die Übertragungsfunktion normiert auf die anregende Kraft F wie folgt aus:

$$D(\omega) = \frac{1}{-m\omega^2 + j\omega r + s} \quad \text{“ 31}$$

mit m als schwingende Masse, s als Steife der Feder und r als Reibungswiderstand des Dämpfers.³²

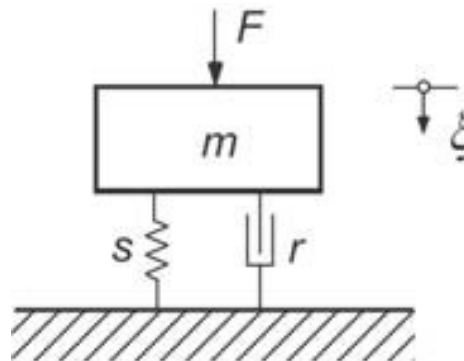


Abbildung 11: Masse-Feder System ([MÖSO1] S.3)

Nach der Einführung der Abklingkonstante $\delta = \frac{r}{2m}$, resultierend aus der viskosen Dämpfung verändert sich die Eigenfrequenz zu $\omega_{0D} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$. Nun lässt sich die Übertragungsfunktion auch wie folgt schreiben:

$$D(\omega) = \frac{1}{m[-\omega^2 + j\omega 2\delta + \omega_0^2]} \quad \text{“ 33}$$

Die Abbildungen 12 und 13 zeigen den Verlauf der komplexen Übertragungsfunktion eines Einmassenschwinger mit unterschiedlichen Abklingkonstanten.

31 [MÖSO1] S. 4

32 Vgl. [MÖSO1] S. 3ff

33 [MÖSO1] S. 5

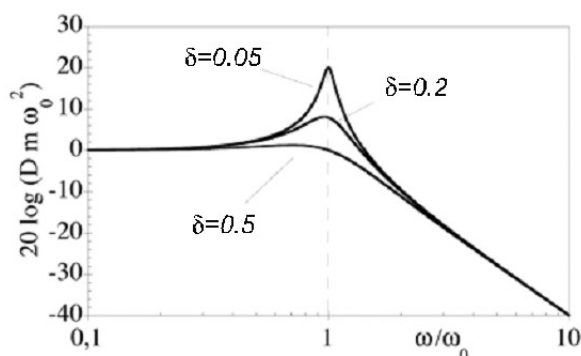


Abbildung 12: Betrag der Übertragungsfunktion für einen Einmassenschwinger mit verschiedenen Abklingkonstanten δ ([MÖS01] S. 5)

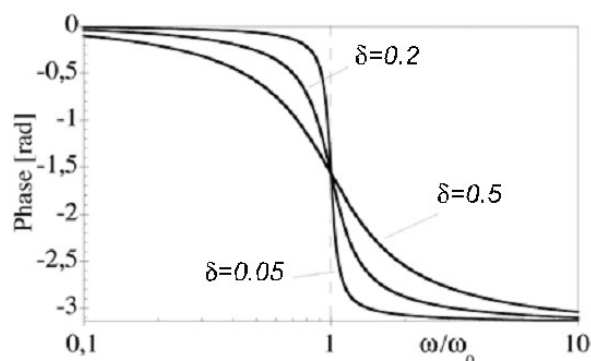


Abbildung 13: Phase der Übertragungsfunktion für einen Einmassenschwinger mit verschiedenen Abklingkonstanten δ ([MÖS01] S. 5)

2.3.2 Mechanische Impedanz des Festkörpers

„Im Umgang mit mechanischen Schwingungsgebilden, z. B. bei elektroakustischen Wandlern, benutzt man den Begriff der mechanischen Impedanz Z_m (Einheitenzeichen: Ns/m):

$$Z_m = \frac{F_{\sim}}{v} ; F_{\sim} = \text{Wechselkraft} \quad \text{“ 34}$$

$$\text{Mechanische Impedanz} = \frac{\text{Wechselkraft}}{\text{Schnelle}}$$

Die mechanische Admittanz ergibt sich, wie in der Elektrotechnik, als Kehrwert der Impedanz $Y_m = 1/Z_m$. Diese Zusammenhänge gelten auch im Mehrdimensionalen, wobei die Impedanz dann eine Matrize wird.

Es ist jedoch leichter die Admittanz experimentell zu bestimmen, da für die experimentelle Bestimmung der Impedanz die angeregte Struktur in allen Freiheitsgraden, außer dem angeregtem, blockiert werden muss, also v für diese Freiheitsgarde gleich Null sein muss.³⁵

³⁴ [VEI01] S. 33

³⁵ Vgl. [MÖS01] S. 8 ff

2.3.3 Analogien zu Systemen der Elektrotechnik

„Es ist allgemein üblich, mechanische Schwingungsgebilde durch analoge elektrische Ersatzschaltbilder darzustellen. Neben der besseren Anschaulichkeit, die diese Darstellungsweise vor allem für Elektrotechniker besitzt, liegt der große Vorteil solcher Analogien darin, dass man in der Praxis Änderungen an einer elektrischen Schaltung einfacher und schneller vornehmen kann als an einem mechanischen Schwingungsgebilde.“³⁶ Dies gilt besonders, wenn sich die Schaltung in einer Simulationsumgebung befindet und dort bearbeitet und ausgewertet wird.

Ivar Viet unterscheidet in seinem Buch „Technische Akustik“ zwei Analogiesysteme:

1. Kraft-Spannungs-Analogie oder 1. Analogie
2. Kraft-Strom-Analogie oder 2. Analogie

Im Kraft-Spannungs-Analogiesystem vergleicht er die Spannung mit der Kraft und überführt mechanische Größen folgendermaßen in elektrische Größen:

Tabelle 1: Kraft-Spannungs-Analogiesystem oder Analogie 1. Art ([VEI01] S. 76)

Kraft	$F \rightarrow$ Spannung	u
Geschwindigkeit	$v \rightarrow$ Strom	i
Masse	$m \rightarrow$ Induktivität	L
Nachgiebigkeit	$n \rightarrow$ Kapazität	C
Reibungswiderstand	$r \rightarrow$ Ohmscher Widerstand	R

Im Kraft-Strom-Analogiesystem vergleicht er den Strom mit der Kraft und überführt mechanische Größen folgendermaßen in elektrische Größen:

³⁶ [VEI01] S. 75

Tabelle 2: Kraft-Strom-Analogiesystem oder Analogie 2. Art ([VEI01] S. 76)

Kraft	$F \rightarrow$ Strom	i
Geschwindigkeit	$v \rightarrow$ Spannung	u
Masse	$m \rightarrow$ Kapazität	C
Nachgiebigkeit	$n \rightarrow$ Induktivität	L
Reibungswiderstand	$r \rightarrow$ Reziproker Ohmscher Widerstand (= Leitwert G)	$1/R$

Ein mechanischer Parallel-Schwingkreis lässt sich also wie folgt darstellen:

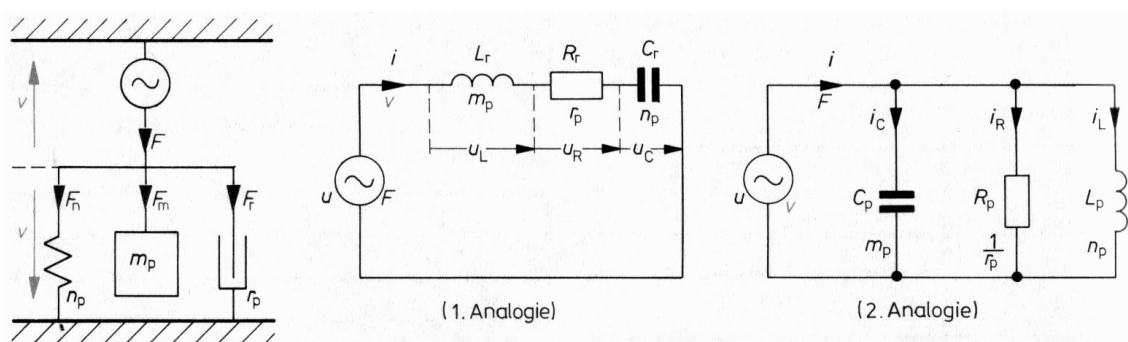


Abbildung 14: Mechanischer Parallel-Schwingkreis verglichen mit einem elektrischen Reihen- bzw. Parallelschwingkreis bei erzwungener Schwingung ([VEI01]S. 78)

Bei der Betrachtung komplexer System wird die resultierende Schaltung schnell sehr umfangreich und kann nur noch durch Simulation des realen Aufbaus in vertretbarem Zeitrahmen brauchbare Ergebnisse liefern. Doch selbst diesem experimentellen Ansatz sind dort Grenzen gesetzt, wo der Aufwand einer Umsetzung des mechanischen Systems in ein elektrisches zu groß wird. ³⁷

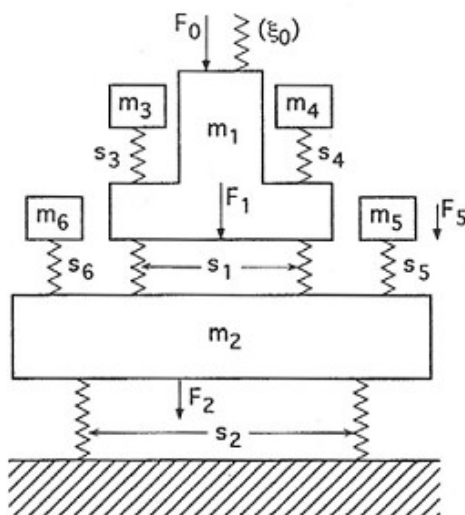
³⁷ Vgl. [VEI01] S. 75ff

2.3.4 Betrachtung eines einfachen Systems

Abhängig davon, wie komplex das zu betrachtende System ist, kann eine mathematische Lösung schnell sehr umfangreich werden. Hier wird das System eines Laboraufbaus mit sechs schwingenden Massen und einer Schwingungsrichtung betrachtet. Die Bewegung wird für dieses System durch sechs lineare Gleichungen wiedergegeben:

$$\begin{matrix}
 \text{"} \\
 \left[\begin{array}{cccccc}
 a_{11} & -s_1 & -s_3 & -s_4 & 0 & 0 \\
 -s_1 & a_{22} & 0 & 0 & -s_5 & -s_6 \\
 -s_1 & 0 & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\
 -s_4 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\
 0 & -s_5 & 0 & 0 & a_{55} & 0 \\
 0 & -s_6 & 0 & 0 & 0 & a_{66}
 \end{array} \right] \begin{matrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \xi_4 \\ \xi_5 \\ \xi_6 \end{matrix} = \begin{matrix} F_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix}
 \end{matrix}$$

mit $a_{11} = -\omega^2 m_1 + s_1 + s_3 + s_4$, $a_{22} = -\omega^2 m_2 + s_1 + s_2 + s_5 + s_6$,
 $a_{33} = -\omega^2 m_3 + s_3$, $a_{44} = -\omega^2 m_4 + s_4$, $a_{55} = -\omega^2 m_5 + s_5$ " 38
 und $a_{66} = -\omega^2 m_6 + s_6$



$$F_0 - E_1 + E_3 + E_4 = -\omega^2 m_1 \xi_1 ; E_1 = s_1 (\xi_1 - \xi_2)$$

$$E_1 - E_2 + E_5 + E_6 = -\omega^2 m_2 \xi_2 ; E_2 = s_2 \xi_2$$

$$0 - E_3 = -\omega^2 m_3 \xi_3 ; E_3 = s_3 (\xi_3 - \xi_1)$$

$$0 - E_4 = -\omega^2 m_4 \xi_4 ; E_4 = s_4 (\xi_4 - \xi_1)$$

$$0 - E_5 = -\omega^2 m_5 \xi_5 ; E_5 = s_5 (\xi_5 - \xi_2)$$

$$0 - E_6 = -\omega^2 m_6 \xi_6 ; E_6 = s_6 (\xi_6 - \xi_2)$$

m_1 = Bezugskörper; m_2 = Labortisch; m_3, m_4 = Massen, die zu "inneren Resonanzen" des Bezugskörpers führen; m_5, m_6 = Massen von aufliegenden Teilen, z.B. Meßgeräte.

Abbildung 15: Idealisierung eines Messaufbaus, der aus mehreren Teilen besteht ([MÖS01] S. 11)

Aus diesem Gleichungssystem lässt sich die Admittanz für bekannte Parameter bestimmen.

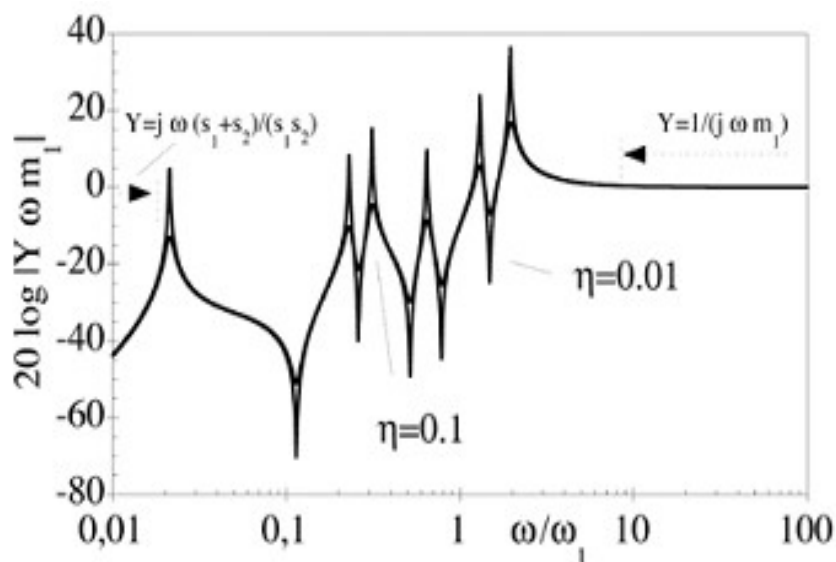


Abbildung 16: Admittanz für die Anordnung in Abbildung 15. Parameter: $m_2/m_1 = 1$, $m_3/m_1 = 3$, $m_4/m_1 = 1.8$, $m_5/m_1 = 5$, $m_6/m_1 = 32$, $s_2/s_1 = 0.02$, $s_3/s_1 = 0.8$, $s_4/s_1 = 1.1$, $s_5/s_1 = 0.4$, $s_6/s_1 = 0.76$ ([MÖS01] S. 11)

Für diese sechs Massen und den einen betrachteten Freiheitsgrad ist das System noch überschaubar. Wenn sich jedoch die Anzahl der Freiheitsgrade oder der Massen erhöht, steigt auch schnell die Zahl der Gleichungen auf einen schwer überschaubare Größe.

2.4 Fouriersynthese

Die Aussage der, in der Elektrotechnik bekannten, Fouriersynthese ist es, dass beliebige unendliche periodische Wellenformen sich aus einer Grundschwingung, einer Summe von Oberwellen und einem Gleichanteil zusammensetzen lassen. Wenn man die Wellenform (hier ein Rechteck) wie in Abbildung 17 im Zeitbereich darstellt, sind die einzelnen Komponenten schlecht oder gar nicht zu erkennen. In der Abbildung sind aufgrund der begrenzten Anzahl von Oberwellen die Schwingungen teilweise noch zu erkennen.

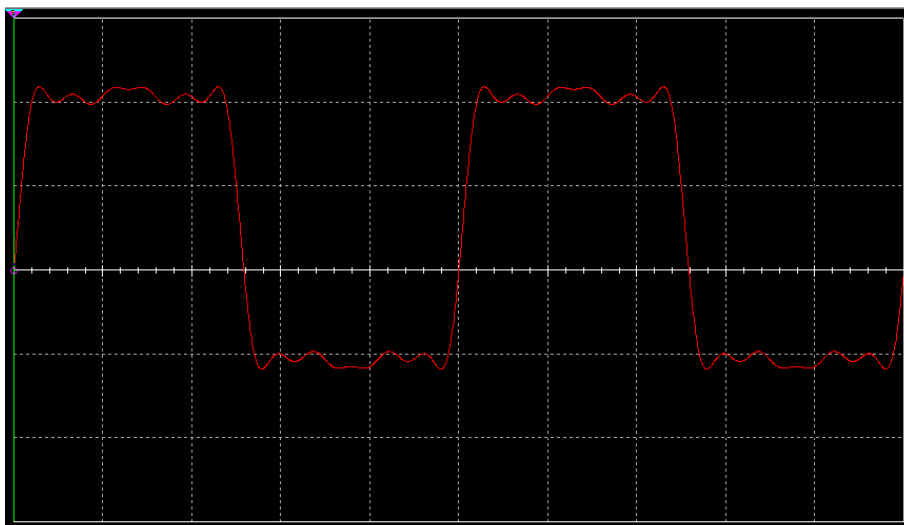


Abbildung 17: Darstellung eines Rechtecks im Zeitbereich in einem Screenshot aus der Software Multisim von National Instruments.

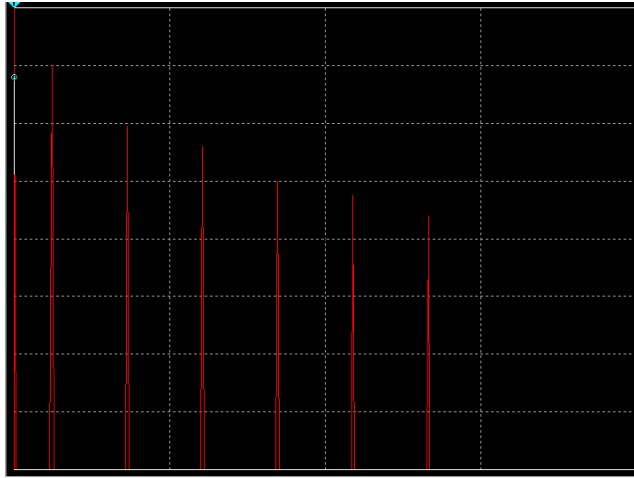


Abbildung 18: Darstellung eines Rechtecks im Frequenzbereich in einem Screenshot aus der Software Multisim von National Instruments.

Eine Betrachtung dieses Signals im Frequenzbereich offenbart Grundschwingung, die einzelnen Oberwellen und ganz links den Gleichanteil. Diese wird in Abbildung 18 gezeigt. Um also die Frequenzanteile einer Wellenform besser analysieren zu können, erhält man durch eine Transformation in den Frequenzbereich eine wesentlich anschaulichere Darstellung.

2.5 **Verschiedene Messverfahren**

Zur experimentellen Ermittlung der Schnelle eines Festkörpers verwendet man unterschiedliche Sensoren. Gemeinsam ist allen Sensoren, dass sie eine mechanische Größe in eine elektrische Größe umwandeln. Je nach Funktionsprinzip kann die mechanische Größe die Beschleunigung oder auch direkt die Schnelle sein. Ebenso können die Eingangsgrößen in unterschiedlichste elektrische Ausgangsgrößen umgewandelt werden, wie beispielsweise Ladungsverschiebung, Spannungsänderungen oder Stromänderungen.

2.5.1 **Problem der ruhenden Bezugsmasse**

Allen Messungen von Körperschall ist das Problem der ruhenden Bezugsmasse gemein. Die Messung einer Schwingung ist immer das Feststellen der relativen Positionsänderung eines Messpunktes auf der schwingenden Oberfläche gegenüber der Position des Messmittels, also dem Bezugspunkt (zum Beispiel auf dem Labortisch auf dem die Messung stattfindet).

Dabei kann das Messmittel nicht unterscheiden, ob eine Änderung der Position des Bezugspunkts oder eine Änderung der Position des Messpunktes vorliegt. Wenn also der Messpunkt ruht, aber der Bezugspunkt schwingt, folgt daraus der gleiche Messwert wie im umgekehrten Fall. Dieses Problem tritt insbesondere bei höheren Frequenzen auf.³⁹

³⁹ Vgl. [MÖS01] S. 9f

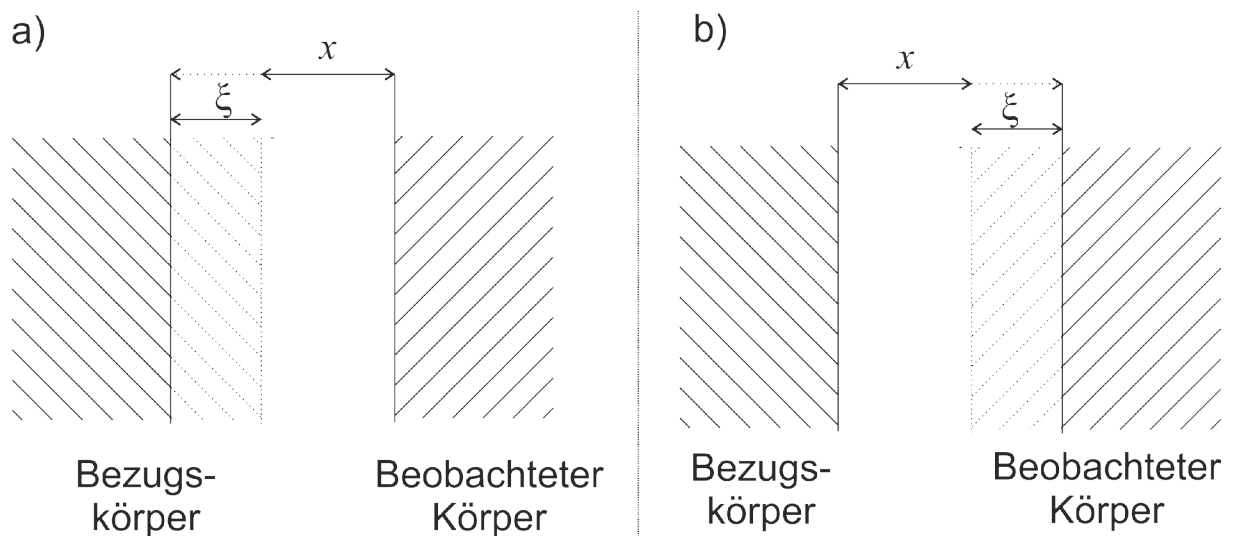


Abbildung 19: Auslenkung ξ und erfasste Messgröße x bei a) bewegtem Bezugskörper und b) bewegtem beobachtetem Körper

2.5.2 Seismische Masse

Zur Lösung des Problems der ruhenden Bezugsmasse gibt es abhängig vom Medium unterschiedliche Lösungen. Im Bereich des Körperschalls hat das Konzept der seismischen Masse große Verbreitung gefunden.

Um das Problem der ruhenden Bezugsmasse beherrschbar zu machen, kommt statt einer undefinierten Masse wie dem Laborsystem eine definierte und berechenbare Masse zum Einsatz. Diese Masse wird schwingfähig im Sensor angebracht. Aufgrund der Massenträgheit bleibt diese Masse bei kleinen Amplituden in Ruhe und eine Schwingung, die sich von außen auf das Sensorgehäuse überträgt, kann relativ zu dieser ruhenden Masse gemessen werden.⁴⁰

Auch dieses schwingende System hat eine Übertragungsfunktion in aus Abbildung 12 der bekannten Form. Es gibt einen linearen Bereich, einen Bereich der Resonanz, in dem der Sensor eine Spitze in der Ausgangskennlinie hat und von dort einen Bereich in dem die Kennlinie schnell fällt. Der nutzbare Bereich, also der lineare Bereich der Kennlinie, endet etwa bei einem Drittel der Resonanzfrequenz.

⁴⁰ Vgl. [MÖS01] S. 10

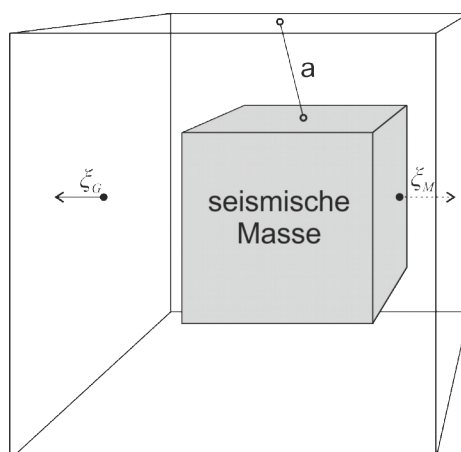


Abbildung 20: Beispiel für eine seismische Masse mit der schwingfähigen Aufhängung a , der Auslenkung ξ_G des Gehäuses und Auslenkung der seismischen Masse ξ_M relativ zum Gehäuse.

Die Größe dieser Masse hat großen Einfluss auf die Empfindlichkeit und die Grenzfrequenz des Sensors. Die Empfindlichkeit des Sensors steigt mit Erhöhung der seismischen Masse. Jedoch sinkt mit der Größe der Masse auch die Resonanzfrequenz. Es ist also wichtig zu wissen nach welchem Prinzip der genutzte Sensor arbeitet und welche Messbereiche für Frequenz und Empfindlichkeit gefordert sind. Wenn die Sensoren mit seismischer Masse diese nicht erfüllen können ist ein anderes Messverfahren zu wählen.⁴¹

2.5.3 Piezoelektrische Beschleunigungssensoren

Im Bereich der Körperschallmessung wird gerne auf Beschleunigungssensoren zurück gegriffen. Sie sind, sowohl was die Handhabung als auch was die Qualität der Messergebnisse angeht, unkompliziert.

Im Sensor gibt es eine seismische Masse die, abhängig von der Anzahl der messbaren Achsen, in bis zu drei Achsen schwingend gelagert ist. Die Bewegung der Masse wird durch ein Piezoelement in eine Ladungsverschiebung umgewandelt. Diese Ladungsverschiebung wird durch einen Ladungsverstärker in eine Spannung proportional zur Beschleunigung umgesetzt. Der Ladungsverstärker ist bei aktiven Sensoren

⁴¹ Vgl. [DIN 45635-8] S. 2

integriert, während passive Sensoren einen externen Ladungsverstärker erfordern. Da zur Auswertung Schnelle-Signale benötigt werden sind die Ausgangssignale der Ladungsverstärker noch zu integrieren. Eine tiefer gehende Betrachtung der Messkette erfolgt im Kapitel 4

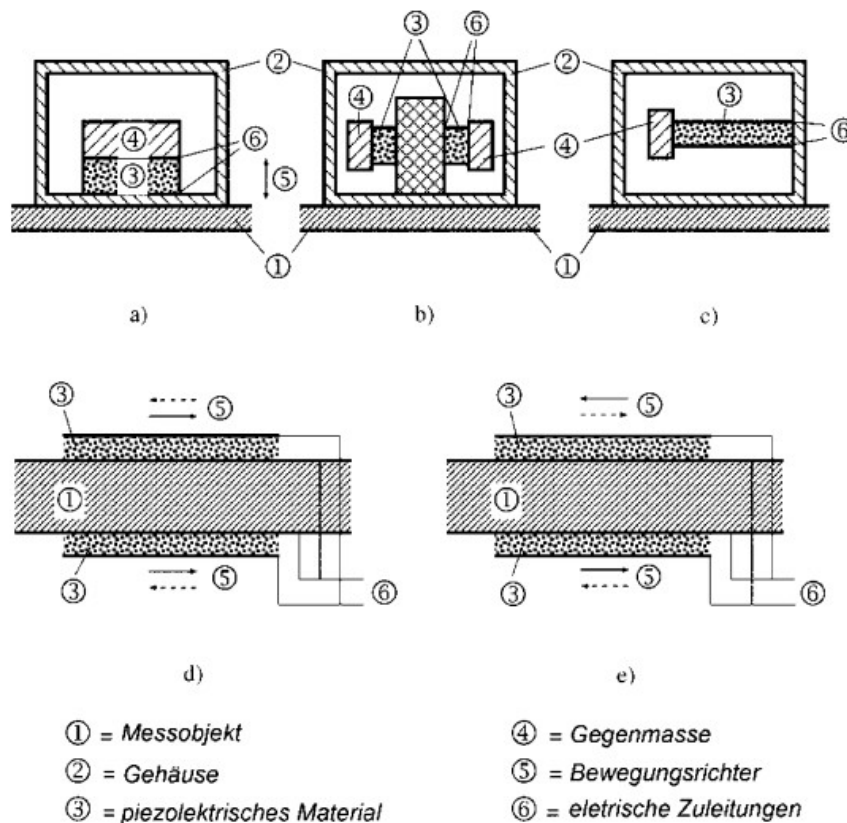


Abbildung 21: Beispiele piezoelektrischer Wandler. a) Dickenschwinger, b) Scherschwinger, c) Biegeschwinger, d) Longitudinalschwinger auf Piezofolienbasis, e) Biegewandler auf Piezofolienbasis ([MÖS01] S. 540)

2.5.4 Laser-Doppler-Verfahren

Ein anderes Messverfahren, welches häufig zur Eichung herangezogen wird, ist das Laser-Doppler-Verfahren. Es nutzt den Dopplereffekt, um einen Laserstrahl einer Frequenzmodulation zu unterziehen.

Es wird eine schwingende Oberfläche mit einem Laserstrahl bestrahlt. Diese Oberfläche reflektiert den Laser-Strahl, der nur Licht einer Wellenlänge, also einer Frequenz,

enthält. Aufgrund des Dopplereffekts wird der Laserstrahl mit der Schwingung der Oberfläche frequenzmoduliert. Mit Hilfe der modernen optoelektronischen Verfahren kann man dieses frequenzmodulierte Lasersignal auswerten und in gut weiter-zu-verarbeitende elektrische Signale umwandeln.

Die Optik, deren prinzipieller Aufbau der Abbildung 22 entnommen werden kann, wird als handlicher Messkopf in die Nähe der schwingenden Oberfläche gebracht, ohne diese jedoch zu berühren oder Rückkopplungen von der Oberfläche zu erfahren.

Diese Messung ist berührungslos hat aber, da es sich um eine Differenzmessung handelt das Problem der ruhenden Bezugsmasse, welches im Messaufbau berücksichtigt werden kann, indem man den Messkopf als seismische Masse ausführt.⁴²

Dieses Verfahren wandelt die Schnelle direkt, also ohne Integration, in eine elektrische Größe um.

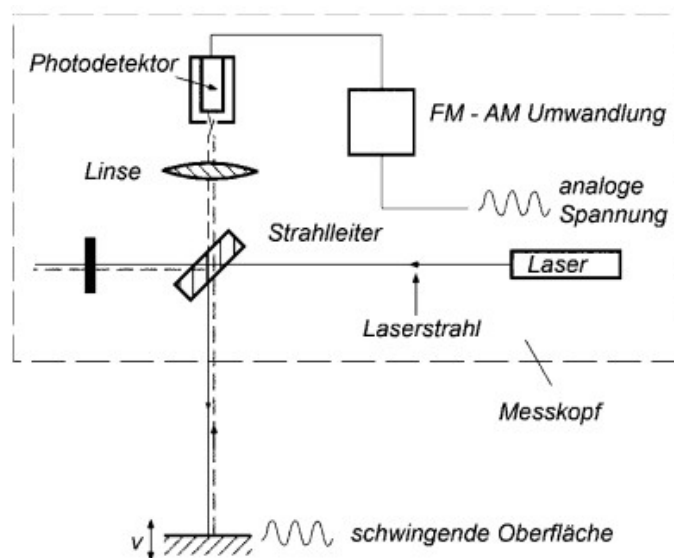


Abbildung 22: Prinzipaufbau eines Laser-Doppler-Vibrometers ([MÖS01] S. 528)

⁴² Vgl. [MÖS01] S. 527 f

3 Wie kann man Körperschall normgerecht messen?

Eine normgerechte Messung ist wichtig, um die Wiederholbarkeit und die Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten. Der Vorteil einer normierten Messung ist, dass der Herausgeber der Norm die von ihm geforderten Verfahren evaluiert und optimiert hat, um sie robust gegen fehlerhafte Anwendung zu machen. Die Anwendung normierter Messverfahren sorgt für die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Es erfordert in der Regel einen höheren Aufwand ein Messverfahren selbst zu entwickeln. Die Mehrzahl der Normen bieten jedoch Raum für Interpretation, da nicht alle Anwendungsfälle vorherzusehen sind.

3.1 Betrachtete Normen zur Schallmessung

Der Autor hat folgende Normen zur Schallmessung gefunden.

- DIN EN ISO 7779 aus 11-2011
- DIN 45635-1 aus 04-1984
- DIN 45635-8 aus 06-1985

3.2 DIN EN ISO 7779

Die Norm DIN EN ISO 7779 beschäftigt sich primär mit der „Geräuschemissionsmessung an Geräten der Informations- und Telekommunikationstechnik“⁴³. Sie beschreibt die zur Messung von Luftschall nötigen Messaufbauten und die Auswertung der Messergebnisse auch in Sonderfällen, wie zum Beispiel das Vorgehen im Falle des Auftretens von hohen tonalen Anteilen in den Spektren.

Da es sich aber um eine zuletzt in 2011 überarbeitete Norm handelt, bietet sie Informationen, mit welchen Parametern eine Fast-Fourier-Transformation im Bereich der Schallmessung vorzugsweise zu versehen ist, um realitätsnahe Messergebnisse zu erhalten. „Der Analysator muss die Effektivwertbildung (jedoch lineare Mittelung anstatt der exponentiellen Mittelung), ein Hanning-Zeitfenster, eine obere Grenzfrequenz, die hoch genug ist, um die Berechnung der hier geforderten Größen für den untersuchten Einzelton zu ermöglichen und eine FFT-Auflösung von weniger als 1 % der Tonfrequenz besitzen.“⁴⁴ Was diese Parameter bedeuten und welche Auswirkungen sie auf das ermittelte Spektrum haben wird im Abschnitt 4.1.6.1 noch ausführlicher diskutiert.

Ebenso enthält diese Norm eine Anweisung zur Messdauer von nicht statischen Signalen. „Wenn ein Gerät sich wiederholende Betriebszyklen aufweist (z. B. eine Kuvvertiermaschine), muss die Messdauer mindestens drei Betriebszyklen umfassen. Für Geräte, die eine Folge sich verändernder Betriebszyklen aufweisen, muss sich die Messdauer über die gesamte Folge erstrecken.“⁴⁵

43 [DIN EN ISO 7779] S. 1

44 [DIN EN ISO 7779] S. 51

45 [DIN EN ISO 7779] S. 18

3.3 **DIN 45635-1**

Die DIN 45635-1 bezieht sich auf die Messung der abgegebenen Luftschall-Energie von Maschinen. In ihr wird beschrieben, welche Messverfahren, Rahmenbedingungen und Messmittel zur Ermittlung von Luftschallemissionen an Maschinen jedweder Art und Form, von Baumaschinen bis hin zu Mixern, anzuwenden sind.

„Diese Norm ist anwendbar auf technische Schallquellen wie Geräte, Maschinen, Maschinenteile, Baugruppen, Anlagen, in dieser Norm als Maschine bezeichnet.“⁴⁶

Für die geforderte Messung von Körperschall ist diese Norm als Hintergrundlektüre von Interesse, jedoch sind ihre Verfahren nicht anwendbar.

3.4 **DIN 45635-8**

Die DIN 45635-8 fasst Messverfahren, Rahmenbedingungen, Messmittel und Bewertungsverfahren zur Messung von Körperschallemissionen zusammen. Jedoch beurteilt sie den erzeugten Körperschall einer Maschine als Ursache eines Luftschalleignisses. Sie wendet entsprechend ähnliche Prüfaufbauten wie die DIN 45635-1 an, um die Schnelleverteilung auf einer Fläche zu ermitteln.

Diese DIN findet unter anderem Anwendung, wenn die Umgebungs- oder Betriebsbedingungen eine Anwendung der DIN 45635-1 nicht erlauben, da zum Beispiel ein Maschinenteil einzeln betrachtet werden sollte, der nicht ohne Zusatzaggregate betreibbar ist.

Mit ihrer Hilfe kann von der Messplatz-Kalibrierung bis hin zur Bewertung der Messergebnisse die gesamte Messung durchgeführt werden.

46 [DIN 45635-1] S. 4

Neben der im Kapitel 2.2 schon verwendeten Definition zum Körperschall beinhaltet die Norm im einzelnen Vorgaben und Hinweise zu folgenden Themen:

- Messgrößen und deren Einordnung
- Sensoren und Messgeräten sowie die Kalibrierung des Messsystems
- „Abgrenzung, Aufstellung und Betriebsbedingungen der Maschinen“⁴⁷ (hier das zu vermessende Rechner-System)
- Positionierung der Sensoren
- Durchführung der Messung und relevante Rahmenbedingungen
- Berechnung und Korrekturen zur Ermittlung der abgestrahlten Luftschalleistung
- Aufbau des zu erstellenden Berichtes über die durchgeführte Messung

3.4.1 Messgrößen und deren Einordnung

Die Norm beschreibt verschiedene Messgrößen.

Zunächst ist die Schnelle zu nennen. Sie wird in der Norm als „die flächennormale Komponente der Geschwindigkeit der schwingenden Oberfläche“⁴⁸ definiert. „Der Effektivwert der Schnelle wird hier mit v bezeichnet.“⁴⁹

Davon wird der Schnellepegel abgeleitet: „Der Schnellepegel ist durch folgende Gleichung definiert:

$$L_v = 10 \lg \frac{v^2}{v_0^2} \text{ dB} \quad [..]$$

Hierein bedeuten:

47 [DIN 45635-8] S. 2

48 [DIN 45635-8] S. 2

49 [DIN 45635-8] S. 2

v Effektivwert der Schnelle im interessierenden Frequenzband

$$v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s} = 50 \text{ nm/s} \quad \text{Bezugsschnelle [...]}$$

Anmerkung 1: Die Benutzung dieses Bezugswertes $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s} = 50 \text{ nm/s}$ bedeutet, daß der Intensitätspegel, der Schalldruckpegel und der Schnellepegel für eine fortschreitende Welle in Luft zahlenmäßig fast gleich sind (Siehe ISO 1683-1983).⁵⁰

Als zweite wichtige Größe wird der „Abstrahlgrad“ σ [...] durch folgende Gleichung definiert:

$$\sigma = \frac{P_s}{\rho c S_s \langle v^2 \rangle} \quad \text{[.]}$$

Hierin bedeuten:

P_s die von der schwingenden Körperoberfläche abgestrahlte Luftschalleistung

ρ Dichte der Luft

c Schallgeschwindigkeit in Luft

ρc Schallkennimpedanz der umgebenden Luft

S_s Fläche der schwingenden Oberfläche (Körperschallmessfläche)

$\langle v^2 \rangle$ quadratischer Effektivwert der Schnelle gemittelt über die Fläche S_s ⁵¹

Der Abstrahlgrad verknüpft die Luftschalleistung mit der Schnelle und somit eine Luftschallgröße mit einer Körperschallgröße.

„Der Ausdruck $10 \lg \sigma$ wird Abstrahlmaß genannt“ ⁵²

50 [DIN 45635-8] S. 2

51 [DIN 45635-8] S. 2

52 [DIN 45635-8] S. 2

Die letzte in der Norm definierte Größe ist der Luftschallleistungspegel. „Der Luftschallleistungspegel L_{ws} infolge von Körperschallabstrahlung ist durch folgende Gleichung definiert:

$$L_{ws} = 10 \lg \frac{P_s}{P_0} \text{ dB} \quad [..]$$

Hierin bedeuten:

P_s Schallleistung infolge Körperschallabstrahlung

$P_0 = 10^{-12} \text{ W} = 1 \text{ pW}$, Bezugsschallleistung“⁵³

Zusätzlich werden noch Hilfsgrößen wie der Fremdkörperschall definiert. Hierbei handelt es sich um den messbaren Körperschall, der dann auftritt, wenn das zu vermessende System inaktiv ist.

Einen andere Hilfsgröße ist die Körperschallmessfläche welche als „die Maschinenoberfläche oder Teile derselben, auf der die Meßpunkte liegen“⁵⁴ definiert wird.

Im Zusammenhang mit der Schnelle verweist die DIN 45635-8 noch auf die, aus der Physik bekannten, Zusammenhänge zwischen Weg und Beschleunigung als zeitliche Integration beziehungsweise Differentiation der Geschwindigkeit und gibt die folgenden Umrechnungsformeln an.⁵⁵

„ $s = \frac{v}{2\pi f}$ “⁵⁶ mit s als zurückgelegtem Weg oder die Auslenkung.

„ $a = 2\pi f \cdot v$ “⁵⁷ mit a als Beschleunigung.

53 [DIN 45635-8] S. 2

54 [DIN 45635-8] S. 2

55 Vgl. [DIN 45635-8] S. 2

56 [DIN 45635-8] S. 2

57 [DIN 45635-8] S. 2

3.4.2 Sensoren und Messgeräten sowie die Kalibrierung des Messsystems

Das Messsystem setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen. Die DIN 45635-8 bietet für die Auswahl der verschiedenen Komponenten Hinweise und Vorgaben. Das erste Glied in der Messkette ist der Körperschallaufnehmer. Er setzt die Körperschallenergie in eine elektrische Größe um. Diese Größe wird dann entsprechend ihrer Ausprägung verstärkt und gegebenenfalls noch weiterverarbeitet um eine Größe proportional zur Schnelle zu erhalten. Je nach gewünschtem Messergebnis wird jetzt entweder eine Filterung vorgenommen, um ein Spektrum zu erhalten, oder es kann direkt breitbandig der Effektivwert ausgewertet werden. Gegebenenfalls ist noch eine Gewichtung vorzunehmen, um der Empfindlichkeit des menschlichen Ohres oder der subjektiven Wahrnehmung von Schallemissionen Rechnung zu tragen. Die Gewichtung erfordert wiederum das Zerlegen des Signals in Spektralanteile.

3.4.2.1 *Der Sensor*

Bei der Wahl des Sensors sind laut Norm verschiedene Aspekte zu beachten. Der Sensor muss so gewählt werden, dass er im zu betrachtenden Frequenzbereich linear ist. Die Norm fordert hier eine maximale Abweichung von +/- 1dB.

Ebenso ist die Masse des Sensors zu berücksichtigen, da diese das Schwingungsverhalten der zu messenden Maschine beeinflussen kann. Für spezielle Fälle weist die Norm auf berührungslose Verfahren wie das Laser-Doppler-Verfahren hin. Die Norm empfiehlt für den Regelfall piezoelektrische Beschleunigungssensoren, erlaubt sind aber auch andere Systeme, wenn diese in einer besonderen Messsituation sichere Ergebnisse erzielen.⁵⁸

3.4.2.2 *Die Verstärkung und Filterung*

Die vom Körperschallaufnehmer erzeugten elektrischen Signale müssen in der Regel verstärkt werden, um Unterschiede in der Empfindlichkeit der unterschiedlichen Auf-

⁵⁸ Vgl. [DIN 45635-8]S. 2f

nehmer zu kompensieren. Zusätzlich ist unter Umständen, wie zum Beispiel bei der Verwendung von Beschleunigungssensoren, noch eine Verarbeitung des Signals nötig. Auch diese Verstärkung sollte sowohl im untersuchten Frequenzbereich als auch im Dynamikbereich der geforderten Linearität entsprechen.

Speziell im Bereich des Integrators, der benötigt wird, um aus Beschleunigungssignalen Schnellesignale zu gewinnen, wird auf das Einhalten des Dynamikbereichs der Messketten hingewiesen. Wenn dort die Gefahr eines systematischen Messfehlers entstehen kann, fordert die Norm eine mathematische Lösung, da diese dann zu sichereren Ergebnissen führt.

Wenn der Übergang zu einem Spektrum oder eine Gewichtung einzelner Frequenzen gefordert ist, werden Filter nötig, um die einzelnen Spektralanteile zu trennen und diese einzeln zur Anzeige zu bringen. „Die Filter müssen den Anforderungen der DIN 45651 oder der DIN 45652 entsprechen.“⁵⁹ Es wird in der Regel auf Oktav- oder Terz-Spektren zurückgegriffen, um den Filteraufwand nicht ausufern zu lassen.⁶⁰ Eine weitere Betrachtung sowohl der Filter als auch des Integrators wird vom Autor nicht vorgenommen, da, wie in späteren Abschnitten dargestellt, hier nicht auf Analogtechnik zurückgegriffen wird, sondern diese Aufgaben durch das Auswertesystem auf der digitalen Ebene im Rechner übernommen werden.

3.4.2.3 Kalibrierung des Messsystems

Dem Thema der Kalibrierung der Messkette widmet sich die DIN 45635-8 in einem anderen Abschnitt. Sie fordert eine Kalibrierung des Messsystems für mindestens eine Frequenz, ohne jedoch diese oder die Amplitude des Signals festzulegen. Zusätzlich wird ein Überprüfungsintervall von zwei Jahren für die Messgeräte vorgeschrieben. Als Beispiel wird hier die Kalibrierung eines Messsystems mit Beschleunigungssensor mit Hilfe eines Beschleunigungssignals von $1g$ also $9,81\text{ m/s}^2$ Amplitude und 100 Hz angegeben. Hierbei ist ein Schnellepegel von $106,9\text{ dB}$ als Messwert zu erwarten. Wie oder wodurch dieses Beschleunigungssignal erzeugt wird, legt die Norm nicht weiter fest.⁶¹

59 [DIN 45635-8] S. 3

60 Vgl. [DIN 45635-8] S. 3

61 Vgl. [DIN 45635-8] S. 3

3.4.2.4 „**Abgrenzung, Aufstellung und Betriebsbedingungen der Maschinen**“⁶²

„In vielen Fällen hängt die abgestrahlte Schalleistung sowohl von den Aufstellungs- als auch von den Betriebsbedingungen ab.“⁶³ Eine genaue Bestimmung dieser Bedingungen ist entweder, soweit existent, den maschinenspezifischen Vorschriften für das entsprechende System oder anderen Quellen, wie zum Beispiel der Spezifikation des Systems, zu entnehmen.

Es folgen ein paar allgemeine Hinweise. Bei der Abgrenzung der Maschinen ist zu berücksichtigen, welche Einrichtungen Teil der Maschinen sind und welche nicht. Diese Abgrenzung wird besonders zur Ermittlung des Fremdkörperschalls wichtig.

Des Weiteren wird auf die Aufstellung der Maschinen eingegangen. So soll die Maschine so aufgestellt und befestigt werden, wie es für den Betrieb am Einsatzort üblich ist. Wenn vor Ort Dämmmaßnahmen auf der Maschinenoberfläche getroffen werden, so ist der Körperschallaufnehmer auf dieser Dämmung zu platzieren, diese also mit zu vermessen.

Zum Schluss wird noch auf den Betriebszustand der Maschine eingegangen. Er ist so zu wählen, dass er den typischen Bedingungen im normalen Betrieb entspricht. Dieser muss nicht unbedingt der Betriebszustand der maximalen Körperschallemission sein, wenn dieser untypisch ist. Es kann sinnvoll sein mehrere Messungen in unterschiedlichen Betriebsbedingungen durchzuführen, um sicherer Ergebnisse zu erzielen.⁶⁴

3.4.3 **Positionierung der Sensoren**

Zur Positionierung der Sensoren gibt die DIN45635-8 eine bestimmte Vorgehensweise vor.

Zunächst ist die Fläche, die den Körperschall abstrahlt, im weiteren Körperschallmessfläche genannt, zu identifizieren. Die Norm legt ausdrücklich fest, dass, soweit maschinenspezifische Folgeteile existieren, diese anzuwenden sind. Gibt es diese

⁶² [DIN 45635-8] S. 2

⁶³ [DIN 45635-8] S. 3

⁶⁴ Vgl. [DIN 45635-8] S. 3

Folgeteile nicht, muss bei der Auswahl der Körperschallmessfläche verschiedenes berücksichtigt werden.

Die Körperschallmessfläche ist dann als Ergebnis einer Voruntersuchung festzulegen. Zunächst sind die strahlenden Flächen zu identifizieren. Falls vorhanden sind sich wiederholende Strukturen mit gleichartiger Anregung zur Vereinfachung der Messung auszunutzen, soweit die Symmetrie bezogen auf die mittleren Schnellepegel nachgewiesen wurde.

Ist die Körperschallmessfläche festgelegt, muss die Verteilung der Messpunkte gewählt werden. „Die Genauigkeit der Meßergebnisse hängt weitgehend von der Anzahl und Anordnung der Meßpunkte und der Schnelleverteilung auf der Körperschallmeßfläche ab.“⁶⁵

Die Verteilung kann gleichmäßig auf den Mittelpunkten der Teilflächen erfolgen, die sich aus der Anzahl der Messpunkte und Körperschallmessfläche ergeben. Ist als Ergebnis der Voruntersuchung mit einer räumlichen Konzentration der Abstrahlung zu rechnen, muss diese bei der Festlegung der Messpunkte berücksichtigt werden.

Zur Anzahl der Messpunkte wird zunächst eine Tabelle angegeben.

*Tabelle 3: Anfangszahl der Meßpunkte (S_s Körperschallmeßfläche $S_0=1\text{m}^2$)
([DIN 45635-8] S. 4)*

Körperschallmeßfläche	Anfangszahl der Meßpunkte
$S_s \leq 1\text{m}^2$	10
$1\text{m}^2 \leq S_s \leq 10\text{m}^2$	20
$S_s > 10\text{m}^2$	$2 S_s / S_0$

„Die Anzahl der Meßpunkte ist zu erhöhen, wenn bei der angegebenen Anfangsmeßpunktdichte der Unterschied zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Schnellepegel in dB im Frequenzband größer ist als die in Tabelle [...] [3]

⁶⁵ [DIN 45635-8] S. 3

angegebene Gesamtzahl. Eine solche Erhöhung der Meßpunktzahl kann z. B. beim Auftreten deutlicher Töne im Frequenzband nötig sein.

Die Meßpunktzahl ist solange zu verdoppeln bis der Schnellepegel \bar{L}'_v [...] innerhalb einer Spanne von 1dB konstant bleibt.“⁶⁶

3.4.4 Durchführung der Messung und relevante Rahmenbedingungen

Zur Durchführung der Messung wird in der DIN 45635-8 folgendes vorgegeben. „Der Schnellepegel \bar{L}'_v ist als zeitlich energetisch gemittelter Pegel (Mitteilungspegel analog zu DIN 45641) an jedem Meßpunkt für alle Frequenzbänder im interessierenden Frequenzbereich für die festgelegten Betriebsbedingungen zu bestimmen.“⁶⁷

Wenn die Schnellepegel nicht direkt ermittelt werden können oder die Umwandlung von Beschleunigungswerten durch einen Integrator nicht möglich ist, kann der Schellepegel auch rechnerisch aus dem gemessenen Beschleunigungspegel ermittelt werden.

Wenn der Fremdkörperschallpegel weniger als 10 dB unterhalb der Pegel der Maschinen im zu vermessenden Betriebszustand liegt, ist der Fremdkörperschallpegel ebenfalls zu ermitteln. Dieser geht dann in eine Korrekturrechnung ein, welche in Kapitel 3.4.5 beschrieben wird.

„Die Messzeit soll im Hinblick auf die Art des abgestrahlten Geräusches und die Art der Signalverarbeitung angemessen gewählt werden.

So soll bei stationärem Geräusch für Mittenfrequenzen ab 200Hz (also ab einer oberen Grenzfrequenz von 400Hz) die Messzeit mindestens 10 s betragen. Bei zeitlich schwankenden Geräuschen [zum Beispiel Schwebung durch Überlagerung verschiedener Grundschwingungen] ist die Meßzeit so zu wählen, daß das Maschinengeräusch bei dem betreffenden Betriebszustand eindeutig erfasst wird.“⁶⁸

66 [DIN 45635-8] S. 4

67 [DIN 45635-8] S. 4

68 [DIN 45635-8] S. 4

Die Körperschallaufnehmer sind laut Norm so anzubringen, dass der Aufnehmer möglichst genau die Schnelle am Messpunkt im zu untersuchenden Frequenzbereich wiedergibt. Die schwingende Achse des Messaufnehmers soll senkrecht auf der schwingenden Fläche stehen.⁶⁹

Zur Befestigung werden im Anhang der Norm verschiedene Techniken vorgestellt. Diese sind Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Verschieden Techniken zur Befestigung von Körperschallsensoren nach DIN 45635-8 (Vgl. [DIN 45635-8] S. 7)

Befestigungstechnik	Anwendungsbereich
Befestigung durch Magnete	Abhängig von der Dicke der Stahlplatte bis 2,5 kHz anwendbar aber sehr gut lösbar, ferromagnetischen Oberflächen wie zum Beispiel Eisen- oder Stahloberflächen.
Befestigung mit dünner Klebewachsschicht	Abhängig von der Temperatur und der Messoberfläche bis 10 kHz anwendbar und gut lösbar auf nahezu allen Oberflächen.
Befestigung mit speziellem Klebstoff	Unabhängig von der Temperatur bis 10 kHz, aber Probleme beim Ablösen von beschichteten Oberflächen, wie zum Beispiel Lackierungen.

Zusätzlich spricht die Norm im Anhang noch „Empfehlungen zur Verlegung des Aufnehmerkabels“⁷⁰ aus.

Die Gefahr bei Aufnehmern mit anschließendem Ladungsverstärker besteht in der Empfänglichkeit des Verstärkers gegen Ladungsverschiebung, die durch Bewegung der Sensorleitung, in der Elektrotechnik als triboelektrischer Effekt bekannt, entstehen. Diese Störsignale überlagern das eigentliche Nutzsignal des Aufnehmers und verfälschen so die Messergebnisse.

⁶⁹ Vgl. [DIN 45635-8] S. 4

⁷⁰ [DIN 45635-8] S. 7

Um dieses Problem zu vermeiden, ist sowohl der Auswahl als auch der Verlegung des Aufnehmerkabels besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Man kann als Alternative auch aktive Sensoren verwenden, da diese gegen den triboelektrischen Effekt unempfindlich sind.⁷¹

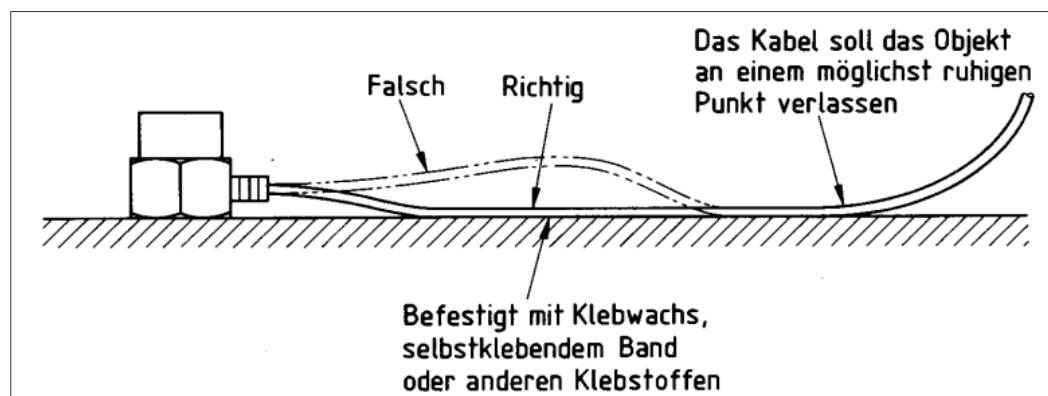


Abbildung 23: Verlegung des Kabels ([DIN 45635-8] S. 7)

3.4.5 Berechnung und Korrekturen zur Ermittlung der abgestrahlten Luftschalleistung

Zur letztlichen Berechnung des Luftschalleistungspegels als Folge von Körperschallabstrahlungen sind nach der Ermittlung der Schnellepegel noch verschiedene rechnerische Schritte notwendig. Die DIN 45635 beschreibt wie dabei vorzugehen ist.

Zur Korrektur des Fremdkörperschalls wird die folgende Tabelle 5 angegeben.

⁷¹ [DIN 45635-8] S. 7

Tabelle 5: Korrektur für Fremdkörperschall ([DIN 45635-8] S. 4)

Differenz zwischen den Schnelle- (bzw. Beschleunigungs-) pegel der betriebenen Maschine und des Fremdkörperschalls allein	Korrektur K_{li} , die von dem mit betriebener Geräuschquelle ermittelten Schnellepegel (bzw. Beschleunigungspegel) abzuziehen ist, um den Pegel zu erhalten, der von der Quelle allein erzeugt wird
dB	dB
3	3
4	2
5	2
6	1
7	1
8	1
9	1
10	0

Danach ist noch, soweit nötig, die Aufnehmermasse zu korrigieren. Die hierzu nötigen Informationen kann man dem Anhang B der Norm entnehmen. Zur Bestimmung der bereinigten Schnelle kann unter anderem die Gleichung verwendet werden.

$$v^* = v' \sqrt{1 + \frac{8,6 (f_c m_a^2)^2}{(\rho_s c_L h^2)^2}} \quad [..]$$

Hierin bedeuten:

m_a Masse des Aufnehmers und Adapters

h Dicke der Platte oder Schale

ρ_s Dichte der Platte

c_L Longitudinalwellengeschwindigkeit der Platte

f_c Mittenfrequenz des Frequenzbandes

Dieser Gleichung liegt die Annahmen zugrunde, daß Z die Punktimpedanz einer gleichförmigen ebenen Platte ist.“⁷² In der Regel sollten die Aufnehmer aber so gewählt werden das eine Korrektur nicht nötig ist.⁷³

Die Berechnung der korrigierten Schnellpegel ist nach der folgenden Formel für jeden Messpunkt in den relevanten Frequenzbändern durchzuführen.

$$„ L_{vi} = L'_{vi} - K_{ii} + K_{Mi} \quad [..]$$

Hierin bedeuten

L'_{vi} gemessener Schnellepegel [..]

K_{ii} Korrektur für Fremdkörperschall [...]

K_{Mi} Korrektur für die Aufnehmermasse“⁷⁴

Aus den einzelnen Punktpegeln ist nun der „Mittelwert \bar{L}_v über die Körperschallmeßfläche S_S “⁷⁵ zu berechnen. Abhängig von der Anordnung der Messpunkte kann hierzu eine der folgenden Formeln herangezogen werden.

„a) Gleichmäßige Messpunktanordnung [...]

$$\bar{L}_v = 10 \lg \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cdot 10^{0,1 \cdot L_{vi} / dB} \right] dB \quad [..]$$

b) Ungleichmäßige Messpunktanordnung [...]

$$\bar{L}_v = 10 \lg \left[\frac{1}{S_S} \sum_{i=1}^N S_{Si} \cdot 10^{0,1 \cdot L_{vi} / dB} \right] dB \quad \text{“ 76}$$

Zum Abschluss wird der „Luftschalleistungspegels infolge Körperschallabstrahlung“⁷⁷ mit Hilfe der folgenden Formel berechnet:

⁷² [DIN 45635-8] S. 8

⁷³ Vgl. [DIN 45635-8] S. 8

⁷⁴ [DIN 45635-8] S. 4

⁷⁵ [DIN 45635-8] S. 5

⁷⁶ [DIN 45635-8] S. 5

⁷⁷ [DIN 45635-8] S. 5

$$L_{ws} = \bar{L}_v + \left(10 \lg \frac{S_s}{S_0} + 10 \lg \sigma + 10 \lg \frac{\rho c}{(\rho c)_0} \right) dB \quad [..]$$

Hierin bedeuten:

\bar{L}_v Über die Körperschallmessfläche S_s energetisch gemittelte Schnellepegel [..] bezogen auf $5 \cdot 10^{-8} m/s$ nach Abschnitt 7.2 [der Norm]

S_s Körperschallmeßfläche

$$S_0 = 1 m^2$$

ρ Abstrahlgrad

ρc Schallkennimpedanz der umgebenden Luft

$(\rho c)_0 = 400 Ns/m^3$ Schallkennimpedanz der Luft bei einer Temperatur von $20^\circ C$ und einem statischen Druck von $1000 mbar = 10^5 Pa$

Aus den Pegeln in den Frequenzbändern wird dann A-Schalleistungspegel nach Anhang C [der Norm] berechnet.“⁷⁸

Das Abstrahlmaß $10 \lg \rho$ kann entweder aus einer Messung nach Anhang D der Norm ermittelt werden oder eine Abschätzung mit der folgenden Gleichung erfolgen.

$$10 \lg \rho = -10 \lg \left(1 + 0,1 \frac{c^2}{(fd)^2} \right) \quad [..]$$

Hierin bedeuten:

f Frequenz

d typische Maße der Maschine (Durchmesser des Kugelstrahlers nullter Ordnung), z. B. $d \approx \sqrt{\frac{S}{\pi}}$ oder $d \approx \sqrt[3]{2V}$, wobei S die ungefähre Oberfläche der Maschine und V das ungefähre Volumen der Maschine sind.

c Schallgeschwindigkeit in Luft“⁷⁹

Wenn keine Möglichkeit besteht, das Abstrahlmaß zu bestimmen, kann angenommen werden, dass $\sigma=1$ also $10 \lg \sigma=0$ ist. Unter dieser Annahme vereinfacht sich die Formel für die Luftschalleistung zu folgender Form:

$$„ L_{ws} = \bar{L}_v + 10 \lg \frac{S_s}{S_0} dB “^{80}$$

Das Ergebnis dieser Abschätzung ergibt immer einen Wert für L_{ws} der größer als der reale Wert ist, da der Wert für das Abstrahlmaß in der Regel kleiner als 1 ist.⁸¹

3.4.6 **Aufbau des zu erstellenden Berichtes über die durchgeführte Messung**

Zunächst muss der Bericht einen Hinweis auf die zugrundeliegende Norm und, soweit vorhanden, auf den maschinenspezifischen Folgeteil, der angewandt wurde, enthalten.

Die DIN 45635-8 gibt ein straffes Gerüst für den Ergebnisbericht vor.⁸²

„[...]1 **Untersuchte Maschine**

- a) Beschreibung der untersuchten Maschine (Abgrenzung, Maße der Maschine, konstruktiver Aufbau der abstrahlenden Flächen)
- b) Aufstellungsbedingungen
- c) Betriebsbedingungen
- d) Anordnung der Maschine in der Meßumgebung

⁷⁹ [DIN 45635-8] S. 5

⁸⁰ [DIN 45635-8] S. 5

⁸¹ Vgl. [DIN 45635-8] S. 5

⁸² Vgl. [DIN 45635-8] S. 6

- e) Bei mehreren am Meßobjekt vorhandenen Schallquellen die Angabe, welche davon bei der Messung betrieben wurden.
- f) Datum der Messung

„[.]2 **Atmosphärische Bedingungen**

Lufttemperatur in $^{\circ}C$, Luftdruck in *mbar*

[.]3 **Meßgeräte**

- a) Benutzte Meßausrüstung, einschließlich Angaben über Name, Typ, Seriennummer und Hersteller
- b) Bandbreite des Frequenzanalysators
- c) Frequenzgang des Meßsystems
- d) Angewandtes Kalibrierverfahren für das Meßsystem; Angaben von Ort und Datum der Kalibrierung
- e) Befestigungsart des Aufnehmers.

[.]4 **Körperschall- und Luftschalldaten**

- a) Genaue Beschreibung der Körperschallmeßfläche und deren Maße und Meßpunktanordnung (Skizze)
- b) Schnellepegel für jeden Meßpunkt und jedes Frequenzband, gegebenenfalls A-bewertet
- c) Falls erforderlich, Korrekturen in dB für jedes Frequenzband oder A-bewertet zur Berücksichtigung des Fremdkörperschalls und der Aufnehmermasse
- d) Mittlerer Schnellepegel \bar{L}_v für jedes Frequenzband oder A-bewertet, Bezugsschnelle

- e) Körperschallmeßflächeninhalt S_s
- f) Abstrahlmaß $10 \lg Q$, Art der Herleitung [...]
- g) Luftschalleistungspegel L_{ws} infolge Körperschallabstrahlung für jedes Frequenzband und/oder A-bewerteter Luftschalleistungspegel.

[.] Ergebnisbericht

Es sind nur Daten [...] im Bericht anzugeben, die für den Meßzweck erforderlich sind.

Der Bericht muß die Feststellung enthalten, daß die Schalleistungspegel in voller Übereinstimmung mit den Verfahren dieser ermittelt wurden und sie, bezogen auf $1 \mu\text{W}$, in dB angegeben werden.“⁸³

4 **Aufbau eines normgerechten Messplatzes**

Die Vorteile eines normgerechten Messplatzes liegen, wie schon beschrieben, in der Vorarbeit, die der Autor der Norm schon im Bezug auf die Stabilität, Reproduzierbarkeit und Sicherheit der Messung geleistet hat. Dennoch kann eine Norm nicht jeden Spezialfall abdecken, so dass auch Spielraum für die Anpassung an spezielle Situationen vorhanden ist. Hier kommt es dann auf die richtige Interpretation und Anpassung der Vorgaben an die Messsituation an.

4.1 **Der Messplatz**

Der Messplatz soll in erster Linie der Beurteilung verschiedener Dämmmaßnahmen dienen. Dazu reicht es aus reproduzierbare Messungen vornehmen zu können und diese dann miteinander zu vergleichen, also relativ zu messen. Wenn eine Untersuchung der Körperschallemissionen von Systemen in absoluten Skalen möglich wird, kann man den Messplatz vielseitiger einsetzen.

4.1.1 **Abwägen absoluter oder relativer Messungen**

Was ist aber nun nötig, um reproduzierbar relativ messen zu können?

Zunächst muss es möglich sein eine Messung auch nach beliebiger Zeit wiederholen zu können, ohne dass sich die Messergebnisse verändern. Es muss also eine Komponente in der Messkette vorhanden sein, die ein Wiederherstellen der Messbedingungen ermöglicht, wenn zwischenzeitlich andere Messungen vorgenommen worden sind oder der Messaufbau neu aufgebaut werden muss.

Es ist also eine Referenzsignalquelle zu realisieren, um die einstellbaren Eingangsverstärkungen der verschiedenen Kanäle abzugleichen oder wieder herzustellen.

Was ist noch zu tun wenn man nicht mehr nur relativ messen will, sondern auch absolute Messwerte erreichen will?

Man muss neben einem Sensor mit definierter Wandlung der Eingangsgröße in eine definierte elektrische Ausgangsgröße noch dafür sorgen, dass diese bestimmte elektrische Größe am Messsystem zu einer definierten Ausgangsgröße führt. Die DIN 45635-8 fordert, dass das Messsystem bei mindestens einer Frequenz kalibriert wird, um normgerecht zu messen. Wenn man also den Sensor als kalibriert voraussetzt, kann man mit Hilfe des Referenzsignals das System kalibrieren, sofern dessen Amplitude des Signals an die Empfindlichkeit des Sensors angepasst werden kann. Man speist ein Referenzsignal einer bestimmten Höhe ein, welches am Ende der Messkette zu einem bestimmten Pegel führen soll, und gleicht die Messkette daraufhin ab.

4.1.2 Gewählter Sensor

Die Norm schlägt als einfache Art Schnellepegel zu ermitteln, den Weg über Beschleunigungssensoren mit anschließender Integration vor. Diese Art der Sensoren ist sicher und leicht zu handhaben. Um von vorneherein Probleme mit Nichtlinearitäten von Ladungsverstärkern und Störungen durch den triboelektrischen Effekt in der Sensorleitung zu vermeiden, schränkt sich der Autor bei der Wahl der Sensoren auf aktive Sensoren ein.

Ein weiteres Kriterium für die Auswahl des Sensors ist die Grenzfrequenz und die Empfindlichkeit der Sensoren. Wie im Kapitel über die seismische Masse dargestellt, muss man im Bereich der Sensoren für größere Empfindlichkeit verfügbare Bandbreite opfern. Da alle betrachteten Sensoren noch konstante Beschleunigungen, also mit Frequenzen nahe Null Hertz, umsetzen, ist es also die obere Grenzfrequenz, die geringer wird, wenn die Empfindlichkeit steigt.

Es ist also unter der Vorgabe, dass nicht beliebig viel Geld für Sensoren zur Verfügung steht, ein Kompromiss aus der benötigten Empfindlichkeit und der noch akzeptablen Bandbreite zu finden. Der Autor hatte sich entschieden Sensoren aus dem Bereich der Massenelektronik einzusetzen, um die Sensorkosten niedrig zu halten.

Dies hat aber zur Folge, dass die obere Grenzfrequenz auf 2 kHz begrenzt ist. Dafür kann mit Empfindlichkeiten bis zu 600 mV/g gearbeitet werden. Es ist sicherlich möglich Sensoren mit ähnlicher Empfindlichkeit und einer höheren Grenzfrequenz im Markt zu finden. Jedoch liegt dann ein Faktor von 100 bis 1000 zwischen den Preisen. Ein Massenprodukt kostet etwa 5€, während das Nischenprodukt für Messlabore in der Preisspanne von 500€ für einen passiven einachsigen und 5000€ für einen aktiven dreiachsigen Sensor liegt.

Wie man anhand der Formel $L_v = 20 \lg \frac{\hat{a} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}{2 \pi f v_0 \cdot \sqrt{2}}$ zur Bestimmung des Schnelle-

pegels erkennen kann, treten bei konstantem Pegel mit steigender Frequenz auch größere Beschleunigungen auf. Die Empfindlichkeit des Sensors kann also sinken und trotzdem noch verwertbare Ausgangs-Amplituden liefern. Unter Umständen kann es also sinnvoll sein mit Sensoren unterschiedlicher Empfindlichkeit zu messen, um einen größeren Frequenzbereich abzudecken.

Da die Körperschallerregung im betrachteten System primär von der Unwucht rotierender Lüfter ausgeht und deren Frequenz selbst bei Drehzahlen von 5400 Umdrehungen pro Minute $5400 \text{ min}^{-1} / 60 \frac{s}{\text{min}}$ also 90 Hz nicht überschreitet und bei einer Grenzfrequenz von 2kHz des Sensors noch die 21. Oberwelle erfasst wird, ist dieser Frequenzbereich ausreichend, um Voruntersuchungen vorzunehmen. Dies gilt, obwohl der Frequenzbereich sich nicht mit den 16 kHz aus der Spezifikation des Kunden deckt.

Ab 1 kHz nicht mehr so energiereiche Schwingungen zu erwarten. Und sollten diese trotzdem auftreten, führt die Resonanz des Sensors dazu, dass höhere Frequenzen bis etwa zu vier Dritteln der Resonanzfrequenz, also je nach Sensor 3 bis 5 kHz, mit zu großer Amplitude gemessen werden. Dies ist aus der Übertragungskennlinie des Einmassenschwingers ersichtlich. Wenn also die Grenzkurve in diesem Frequenzbereich trotzdem erfüllt wird, sind die realen Werte sogar weiter unter der Grenzkurve als die gemessenen. Eine Möglichkeit der nachträglichen Linearisierung bietet even-

tuell das verwendete Messsystem, falls es in der Lage ist Nichtlinearitäten im Frequenzbereich zu kompensieren.

Solange die Spezifikation des Kunden einen Frequenzbereich über 1 kHz hinaus vorsieht, ist zur Körperschallqualifikation ein zertifiziertes Labor zu bemühen, dass diese Forderung erfüllen kann. Jedoch kann man nach einer Voruntersuchung mit einer wesentlich höheren Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass die Prüfung erfolgreich ist.

Das letzte berücksichtigte Kriterium ist die Anzahl der benötigten Sensorachsen. Die Norm ist ursprünglich vorgesehen, um aus dem gemessenen Körperschall indirekt eine Laufschallemission zu bestimmen, wenn eine direkte Messung der Luftschallemission nicht möglich ist.

Da der Auftraggeber jedoch Grenzwerte für die Körperschallemission vorgibt, sind im Gegensatz zu den in der Norm geforderten einachsigen Sensoren dreiachsige einzusetzen. Die einachsigen Sensoren nehmen, wenn die Messachse senkrecht auf einer Oberfläche steht, nur den Teil der Schwingung dieser Fläche auf, der eine longitudinale Wellen in der umgebende Luft anregt.

Da hier die Körperschallemission in einen angrenzenden Festkörper ermittelt werden soll, ist die Schnelle in allen drei Raumdimensionen zu ermitteln. Dies ist nötig um alle im Kapitel 2.2.3 beschriebenen Wellenarten nach Möglichkeit zeitgleich zu erfassen. Es ist also ein dreiachsiger Sensor zu verwenden.

Die Wahl des Autors fällt auf den Sensor LIS332 der Firma ST Microelectronics. Er hat eine Resonanzfrequenz von 2 kHz und eine Empfindlichkeit von 600 mV/g . Dieser Sensor arbeitet mit einer Kapazitätsänderung zur Umsetzung der Relativbewegung der seismischen Massen in eine Ladungsänderung.

Ein integrierter Ladungsverstärker wandelt diese Ladungsänderung dann in eine Spannungsänderung um. Dieser Ladungsverstärker wird zwischen den einzelnen Achsen hin und her geschaltet. Durch diese Schaltvorgänge entsteht eine Nadel im Spektrum, die nicht auf der Anregung durch das zu prüfende Gerät beruht.

Eine schematische Darstellung der Innenschaltung des Sensors ist in der folgenden Abbildung zu finden.

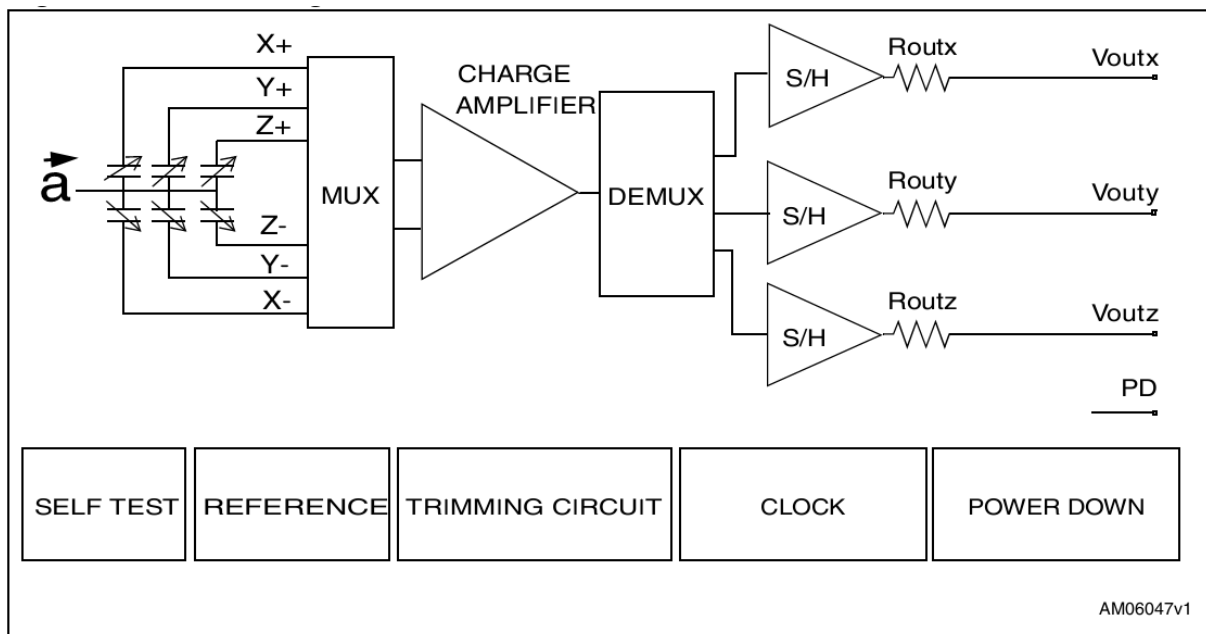


Abbildung 24: Schematische Darstellung der Innenschaltung des verwendeten Sensors ([STM01] S. 3)

4.1.3 Diskussion der Verarbeitung und Auswertung der Messwerte auf Rechner-Ebene

Zur Messung kann man wie in der DIN 45635-8 vorgeschlagen, auf analoge Filter und Anzeigegeräte zurückgreifen oder eine Digitalisierung der Beschleunigungswerte vornehmen, um dann eine Auswertung auf Rechner-Ebene vorzunehmen.

Der Autor hat sich aus verschiedenen Gründen für die Rechner-Ebene entschieden.

Die Rechner-Ebene bietet den Vorteil, dass die Messwerte zunächst aufgenommen werden und in einem zweiten Arbeitsschritt ausgewertet werden können. Sicherlich ist es während der Messung sinnvoll Messwerte zu verarbeiten, um eventuelle Fehler im Messaufbau zu finden und zu beheben. In jedem Fall entstehen jedoch Daten, die

archiviert und noch lange Zeit nach der Messung mit anderer Software ausgewertet oder mit neueren Daten verglichen werden können.

Ein weiterer Vorteil der Rechner-Ebene ist die Nutzung von rechnerbasierten Algorithmen zur Verarbeitung der Signale. Ein Beispiel ist das Integrieren der Beschleunigungssignale, um Schnellesignale zu erhalten. Für diese Aufgabe wäre auf der analogen Ebene ein Integrator mit seinen Nichtlinearitäten im Bereich der Dynamik und der Frequenzwiedergabe nötig. Auf der digitalen Ebene kann das Signal einfach mit in der Software vorhandenen Algorithmen bearbeitet werden. Auf die gleiche Weise lassen sich auch Linearitätsprobleme von Sensor oder Eingangsstufe kompensieren. Selbst die Transformation aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich kann mit Hilfe einer Fast-Fourier-Transformation im digitalen Bereich einfach und schnell durchgeführt werden. Um auf die Rechner-Ebene zu gelangen, muss man das Signal allerdings analog-digital-wandeln.

4.1.4 Auswahl der Analog-Digital-Wandler-Stufe

Es existieren allerdings auch Nachteile auf der Rechner-Ebene. Der Autor möchte an dieser Stelle nicht das ganze komplexe Thema der Digitalisierung von Signalen darlegen. Es sei nur die Einschränkung auf eine, durch die Samplefrequenz vorgegebene, oberere Grenzfrequenz und die Einschränkung des Dynamikbereiches durch die Auflösung des digitalen Signals genannt. Eine nähere Erörterung erfolgt im folgenden Kapitel.

Digitale Signale sind immer in ihrer Auflösung, und somit in ihrer Dynamik eingeschränkt, da die kleinste Stufe nur so oft wiederholt werden kann, wie es die Auflösung zulässt; im einfachen Fall bei einer Auflösung von 2 Bit und einer Spannungsänderung vom Nullwert zum ersten Wert von 1 V. Es kann also maximal ein Spannungsbereich von $(2^2 - 1) \cdot 1V$, also $3V$ mit einer Auflösung von einem Volt erfasst werden. Es werden weiterhin nur die Werte 0V, 1V, 2V und 3V dargestellt. Was mit den im analogen Bereich kontinuierlichen Werten zwischen den Stufen geschieht, hängt von der Art des Wandlers ab. Da die Zahl der Stufen allerdings exponentiell

steigt, ist bei einer Auflösung von 24 Bit also 2^{24} Stufen ein theoretischer Dynamikumfang von $20 \cdot \log(2^{24}) = 20 \log(16777216) = 144,5 \text{ dB}$ zu erwarten.

Wenn die maximale Eingangsspannung 1 Volt beträgt, kann man als kleinste Stufe 59,6 Nano-Volt darstellen. Die tatsächlich mögliche Dynamik hängt dann in erster Linie von der Signalaufbereitung vor dem Wandler ab.

Die obere Grenzfrequenz wird durch das in der Elektrotechnik bekannte Abtasttheorem auf weniger als die Hälfte der Abtastfrequenz begrenzt, da ab dieser Frequenz keine eindeutige Beziehung zwischen dem abgetasteten Signal und dem digitalisierten Signal besteht. Bei einer Abtastrate von 48 kHz ist die obere Grenzfrequenz von 20 kHz sicher zu erreichen.

Der Autor wählte das Produkt FW1814 der Firma M-Audio aus dem Bereich der Studioausrüstung. Laut Datenblatt besitzt es eine digitale Auflösung von 24 Bit und einen tatsächlichen Dynamikumfang von 108 dB (A-gewichtet). Es erfüllt den gewünschten Dynamikbereich.

Für den Frequenzbereich des AD-Interfaces gibt das Datenblatt bei einer Samplefrequenz von 48 kHz eine Bandbreite von 22 Hz bis 22 kHz mit 0,1 dB Abweichung an. Ein weiterer wichtiger Grund für die Wahl des Autors sind die acht analogen Eingänge des Audiointerface FW1814 und die Möglichkeit über einen Lichtwellenleiter weitere acht Kanäle digital anzubinden. Zudem wird das Produkt mit einem stabilen und verständlichem Treiber ausgeliefert.

4.1.5 Der Messverstärker

Der vom Autor entwickelte Messverstärker bereitet das Sensorsignal für den Eingang des Analog-Digital-Wandlers auf. Die Verstärkung der einzelnen Vorstufen sollte einstellbar sein, da es eine große Auswahl an aktiven Sensoren mit unterschiedlichen Empfindlichkeiten gibt. Deshalb ist es nötig vor die eigentliche Analog-Digital-Wandler Stufe eine Verstärkerstufe zu schalten, die die unterschiedlichen Empfindlichkeiten an die maximale Eingangsamplitude des Wandlers anpasst, um die Eingangsdynamik

namik voll zu nutzen. Da ein dreiachsiger Sensor benötigt wird, ist es sinnvoll seine drei Verstärkerstufen und eine Referenzquelle zu jeweils einer Einheit zusammen zu fassen.

4.1.5.1 Einstellbare Referenzquelle

Die Referenzquelle soll eine Sinusschwingung mit einer definierten Amplitude und Frequenz liefern. Da der Autor an dieser Stelle auf digitale Signalgeneratoren verzichten will, bedient er sich einer analogen Oszillatorschaltung, die er einer Applikations-Anleitung der Firma Texas Instruments entnimmt ⁸⁴. Es handelt sich um den „Wien Brücken Oszillator mit automatischer Verstärkungs-Steuerung“ ⁸⁵ Für genauere Informationen über die Dimensionierung und Funktion der Schaltung verweist der Autor auf dieses Dokument.

Eine nachgeschaltete Verstärkerstufe ermöglicht es das Referenzsignal auf die gewünschte Amplitude einzustellen. Seine Frequenz ist auf 1kHz festgelegt. Aufgrund von Klimaschwankungen und Bauteiltoleranzen kann es zu Abweichungen von der Zielfrequenz kommen, welche bei der absoluten Kalibrierung berücksichtigt werden müssen.

4.1.5.2 Die Verstärkerschaltung

Die drei baugleichen Verstärkerschaltungen bestehen aus einem Spannungsverstärker und einen Ladungsverstärker. Der Ladungsverstärker wird für aktive Sensoren nicht benötigt und soll lediglich die Option offen halten auch passive Sensoren verwenden zu können. Er ähnelt in der Funktion einem Integrator. Nur ist hier die Kapazität so ausgelegt, dass schon eine geringe Ladung in der Kapazität einen großen Spannungshub bewirkt und so die Ausgangsspannung proportional zu Ladung wird. Letztlich hat der Autor, nach dem er den Entschluss fasste die passiven Sensoren im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter zu verfolgen, keine weiteren Experimente mit diesem Teil der Schaltung durchgeführt. Sie wird für den später beschriebenen Messaufbau nicht benötigt und nicht weiter dokumentiert.

⁸⁴ Vgl. [TEX01] S. 34f

⁸⁵ [TEX01] S. 35

Der zweite Teil des vom Autor verwendeten Doppeloperationsverstärkers ist als reiner Spannungsverstärker geschaltet. Durch Spindel-Potenzimeter im Rückkoppelzweig lassen sich Verstärkungen von 1 bis zu 1000 einstellen. Besonders ist hier die Aufteilung in zwei Potenziometer. Dies ermöglicht es einen groben Verstärkungsbereich mit dem hochohmigerem Potenziometer zu wählen und dann mit dem niederohmigen die Verstärkung sehr fein einzustellen.

Der große Einstellbereich der Verstärkung ermöglicht es Analog-Digital-Wandler mit geringerem nutzbarem Dynamikumfang (zum Beispiel mit 0,1 g als maximaler Aussteuerung) zu betreiben um dadurch die zu erwartenden Messwerte in den Dynamikumfang des Wandlers einzupassen falls dies nötig wird.

Da die verwendeten Sensoren in der Regel nicht mit symmetrischer Spannungsversorgung arbeiten und die konstante Erdbeschleunigung zu einer Signaländerung führt, werden die Sensoren über einen Koppelkondensator an den Spannungsverstärker angekoppelt, um bei größeren Verstärkungen ein Übersteuern durch den Gleichspannungsanteil aus dem Sensor zu vermeiden. So hat ein Offset von 0,1 Volt bei einem Verstärkungsfaktor von 100 oder 40 dB eine Ausgangsspannungsänderung von $0,1\text{ V} \cdot 100$ also 10 V zur Folge. Bei einer Betriebsspannung von $\pm 5\text{ Volt}$ ist also in jedem Fall mit einer Übersteuerung zu rechnen. Die Art der Gleichspannungsentkopplung hat eine Begrenzung der unteren Grenzfrequenz zu Folge.

Die obere Grenzfrequenz der Verstärkerstufe ergibt sich aus dem, aus der Schaltungstechnik bekannten, Verstärkungsbandbreite-Produkt und der gewählten Verstärkung. Bei einfacher Verstärkung ist die Bandbreite 24 MHz. Erst wenn die Verstärkung steigt, verringert sich die Bandbreite entsprechend der folgenden Tabelle:

Tabelle 6: Bandbreite des Messverstärkers bei unterschiedlichen Verstärkungen

Verstärkung in dB	Verstärkungsfaktor	Bandbreite in Hz
0	1	24.000.000
20	10	2.400.000
40	100	240.000
60	1000	24.000

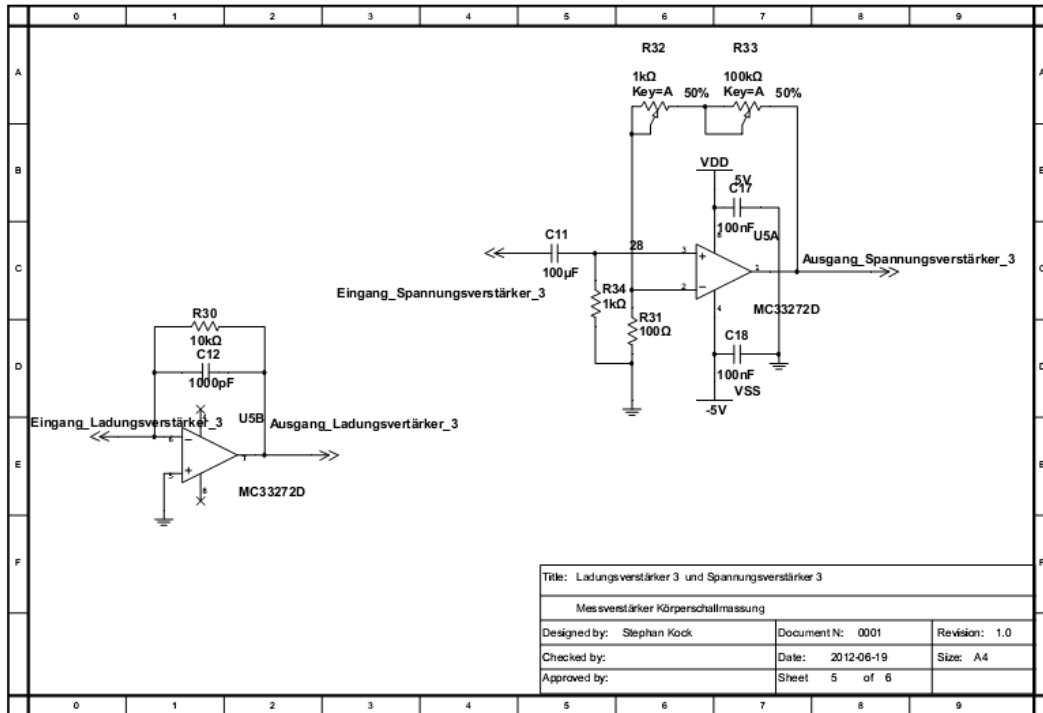


Abbildung 25: Schaltung einer einzelnen Verstärkerstufe mit Ladungs- und Spannungsverstärker

Tabelle 7: Funktion der verschiedene Bedienelemente des Messverstärkers

Bedienelement	Funktion
J1- J3	Wahl des Eingangsignals AK: Aktiver Sensor an XLR-Buchse PA: Passiver Sensor über Klinken-Buchse und Ladungsverstärker OS: Referenz-Oszillator
J4	Vorteiler für das Signal der Referenz-Quelle
Potenzio-Gruppe X-, Y- und Z-OUT	Grobe und feine Einstellung der Verstärkung des Messverstärkers
Potenzio-Gruppe OS-OUT	Grobe und feine Einstellung der Amplitude der Referenzquelle

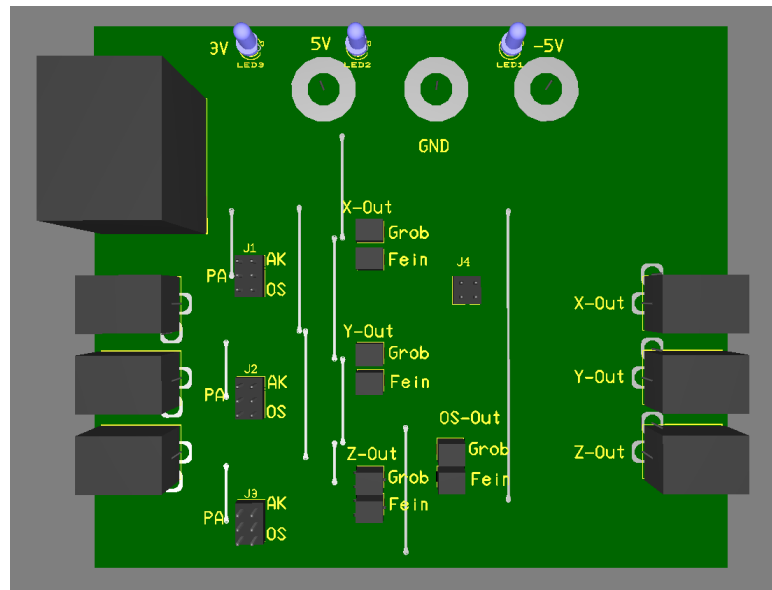


Abbildung 26: Schematische Darstellung des Messverstärkers

4.1.6 Beschreibung der Auswertesoftware

Bei der Auswahl der Auswerte-Software hat der Autor verschiedene Gesichtspunkte berücksichtigt.

Ein wichtiger Aspekt war die Kompatibilität zu einem Standard-Dateiformat, nämlich dem Wave-Format. Weiterhin sollte die Möglichkeit bestehen Grenzkurven oder alte Messwerte einzublenden und zu speichern. Die Messergebnisse sollten in einem Format abgelegt werden können, welches den Import in eine Office-Software ermöglicht. Eine Umwandlung von Beschleunigungspegeln in Schnellepegel ist eine weitere Anforderung.

Eine Möglichkeit Kalibrierdaten für die Empfindlichkeit und Frequenzverlauf des Sensors zu hinterlegen und zu berücksichtigen, wäre wünschenswert, um absolut messen zu können und den nutzbaren Frequenzbereich des Sensors zu erweitern.

Der Autor wählt die Software „spectraPLUS-FFT Spectrum Analyzer“ der Firma „Pioneer Hill Software“.

Die ausgewählte Software erfüllt alle geforderten Voraussetzungen, ist jedoch nicht in der Lage drei oder mehr Kanäle gleichzeitig zu verarbeiten. Dies ist der Grund, warum eine andere Software zur *Erfassung* der Messdaten verwendet wird. Hier entschied sich der Autor für die Software „MixPad“ der Firma NCH Software. Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Erprobung des Messplatzes und der Durchführung von Beispielmessungen jeweils auf eine kostenlose Erprobungsversion der Software zurückgegriffen.

Hier nun einige Eckdaten und Einstellparameter der Auswertesoftware:

4.1.6.1 *Fast-Fourier-Transformation*

Die Software Spektra Plus transformiert die zeit-basierten Eingangsdaten unter Verwendung der Fast-Fourier-Transformation in den Frequenzbereich. Im Offline-Modus kann man eine Vielzahl Parameter dieser Transformation einstellen, um für das auszuwertende Signal eine bessere Frequenzauflösung oder auch eine bessere Amplitudenauflösung zu erreichen. Sie werden über den Dialog „Processing Settings“ festgelegt.

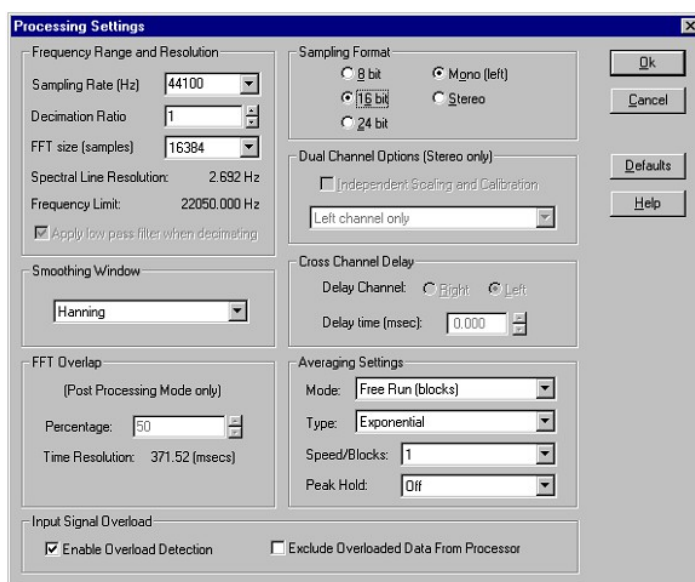


Abbildung 27: Screenshot des Dialogs „Processing Settings“ mit den Einstellparameter der Fast-Fourier-Transformation in der Software „spectraPLUS“

Wichtig sind die Parameter „FFT-Size“ und „Overlap“. Der Parameter „FFT-Size“ gibt an, wie viele Samples zur Bildung der Fast-Fourier-Transformation herangezogen werden. Eine Erhöhung der „FFT-Size“ erhöht die Frequenzauflösung, aber auch den Rechenaufwand. Wenn die gewählte Anzahl größer ist als die Menge der vorhandenen, akzeptiert die Software diese Eingabe nicht und gibt eine Warnung aus. Die sich ergebende Frequenzauflösung kann direkt im Dialog abgelesen werden.

Der Parameter „FFT-Overlap“ gibt an, wieweit die einzelnen „FFT-Size-Blöcke“ sich überschneiden. Dadurch wird es möglich bei einer kleinen Sample-Menge noch mit einer großen Blockgröße zu arbeiten, um die Frequenzauflösung feiner zu gestalten. Dieser Parameter ist nur verfügbar wenn im „Post-Process“-Modus gearbeitet wird.

Zur weiteren Beeinflussung der Darstellung kann man noch zwischen verschiedenen Glättungsalgorithmen wählen. Die Übersicht in Abbildung 28 zeigt verschiedene Algorithmen und deren Auswirkungen auf die Auflösung des Spektrums sowie den vorgeschlagenen Anwendungsbereich.

Window Type	Frequency Resolution	Amplitude Resolution	Leakage Suppression	Application
Bartlett	Fair	Fair	Moderate	Distortion Measurements High Accuracy Amplitude Measurements. Swept Sine testing
Blackman	Fair	Good	Excellent	
Flatop	Poor	Excellent	Moderate	
Hamming	Fair	Fair	Fair	Distortion testing, noise measurements
Hanning	Fair	Excellent	Excellent	
Kaiser	Fair	Fair	Poor	High resolution frequency testing
Parzen	Fair	Fair	Poor	
Uniform	Excellent	Poor	Poor	

Abbildung 28: Übersicht über verschiedene Algorithmen und deren Auswirkungen auf die Auflösung des Spektrums sowie den vorgeschlagenen Anwendungsbereich ([SPE01] S.46)

Was die verbleibenden Parameter bewirken, kann der interessierte Leser in der Anleitung der Software nachlesen.⁸⁶

⁸⁶ [SPE01] S.42 ff

4.1.6.2 *Darstellungsarten*

Wie schon beschreiben, verwendete die Auswertesoftware die Fast-Fourier-Transformation, um die Signale in den Frequenzbereich zu transformieren. Das Ergebnis einer solchen Transformation ist in jedem Fall ein Schmalbandspektrum mit konstant breiten Frequenzbändern.

In der Akustik ist es allerdings üblich mit Terz- oder Oktavspektren zu arbeiten. Bei diesen Spektren werden die betrachteten Frequenzbänder mit steigender Frequenz immer breiter. Diese Spektren sind zur Angabe von Grenzwerten weit verbreitet.

Die Software Spektra Plus bietet die Möglichkeit neben den genannten Spektren noch eine große Auswahl an anderen Spektren und Darstellungsmöglichkeiten für verschiedene Anwendungen, die der interessiertere Leser der Anleitung der Software entnehmen kann.

4.1.6.3 *Kalibrierungsdaten*

Um die Software effektiv einsetzen und absolute Werte messen zu können, ist es wichtig bei unterschiedlichen Sensorempfindlichkeiten gleiche Messergebnisse für gleiche Signale zu erzielen. Dies wird erreicht, indem die Software auf die unterschiedlichen Sensoren eingestellt werden kann. Für eine genauere Beschreibung dieses Vorgangs wird auf den Abschnitt über die Kalibrierung der Messsoftware verwiesen. Im Bereich der Kalibrierung findet auch die Umwandlung der Beschleunigungssignale in Schnellesignale statt.

4.1.7 **Der realisierte Messplatz**

Die Messkette vom Sensor zur Auswerte-Software wird durch Abbildung 29 dargestellt.

Zur Messung ist der Messplatz entsperrend der Abbildung 30 zu verdrahten und - soweit nötig -, mit dem Stromnetz zu verbinden.

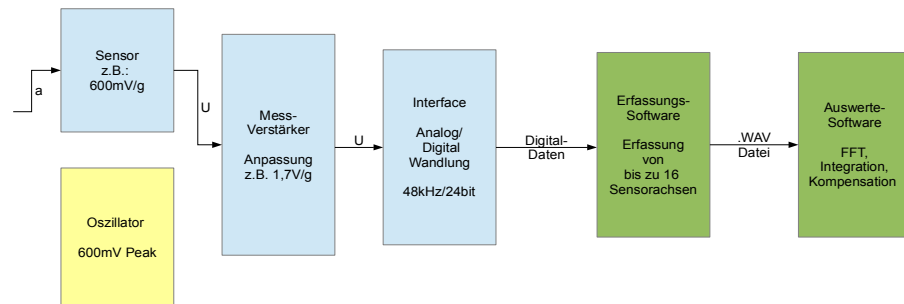


Abbildung 29: Messkette vom Beschleunigungssignal bis zur Auswertung in der Software. Die blau hinterlegten Blöcke verarbeiten Signale auf der Hardware-Ebene. Grün hinterlegte Blöcke befinden sich auf der Rechner-Ebene. Der gelb hinterlegte Oszillator kann als alternative zum Sensor verwendet werden um das Messsystem zu kalibrieren.

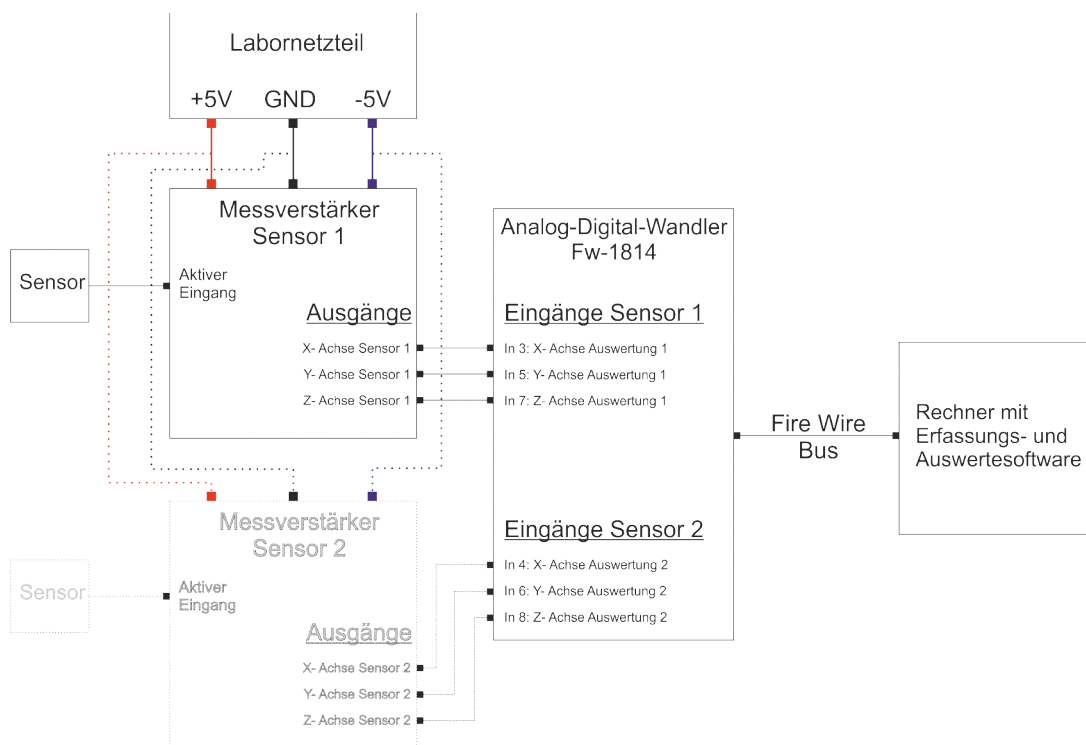


Abbildung 30: Blockschaltbild des Messplatzes zur Verbindung der einzelnen Komponenten, gestrichelte Verbindungen und Komponenten werden bei Verwendung eines zweiten Sensors benötigt. Netzversorgung der Komponenten wird vorausgesetzt.

4.2 Kalibrierung der Messmittel

Um absolute Messwerte aus dem Messaufbau zu erhalten, muss dieser einer Kalibrierung unterzogen werden. Die dazu nötigen Schritte für die einzelnen Komponenten der Messkette sind in den folgenden Abschnitten aufgeführt.

4.2.1 Sensor

Um die Kalibrierung des Sensors zu überprüfen, kann man sich das Gravitationsfeld der Erde zunutze machen. Wenn die zu untersuchende Achse orthogonal zum Gravitationsfeld steht, sollte der Sensor $\frac{1}{2} \cdot U_b = \frac{1}{2} \cdot 3V = 1,5V$ ausgeben. Wird nun die untersuchte Achse parallel zum Gravitationsfeld ausgerichtet, sollte sich der Wert um die Empfindlichkeit des Sensors ändern. Es wird also zum Beispiel bei einem Sensor mit $0,6V/g$ eine Änderung auf $1,5 \pm 0,6V/g \cdot 1g$, also auf $0,9V$ oder $2,1V$ erwartet. Entspricht die Überprüfung nicht den erwarteten Werten, ist der Sensor fehlerhaft und muss ausgetauscht werden.

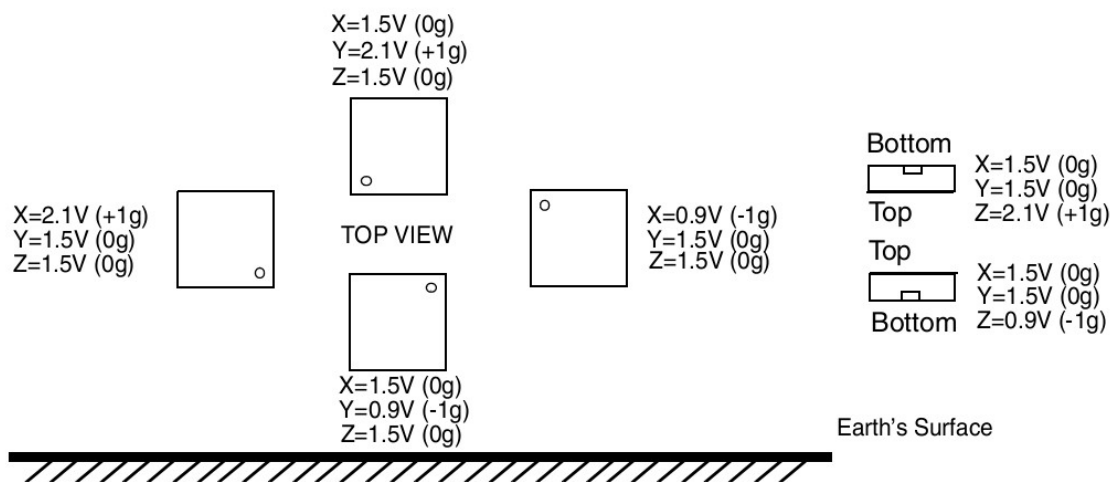


Abbildung 31: Gegenüberstellung der Ausgangswerte und der Ausrichtung des Sensors relativ zu Erdoberfläche ([STM01] S. 11)

Wie der Abbildung ebenfalls entnehmbar ist, kann man sich das Gravitationsfeld der Erde auch zunutze machen, um die Zuordnung der Sensorachsen zu den räumlichen Achsen im Labor zu vereinfachen.

Die Sensorspannung kann am Messverstärker am Jumper 1-3 zur Wahl des Eingangstyps abgegriffen werden. Die Abbildung 32 zeigt den auf einer Leiterkarte montierten Sensor mit Anschlussleitung und Siebung der Versorgungsspannung. Die Leiterkarte dient der Adaptierung der Sensoranschlüsse an die Anschlussleitung.

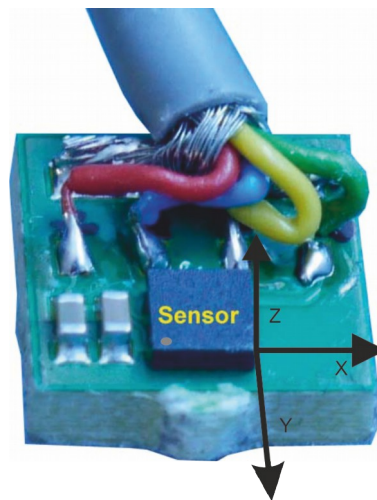


Abbildung 32: Verwendeter Sensor auf der Leiterkarte ($10 \times 10 \text{ mm}^2$) und der räumlichen Lage der Sensorsachsen.

4.2.2 Messverstärker

Da der Messverstärker der Anpassung der Sensordynamik an die Wandlerdynamik dient, muss er vor jedem Einsatz an den Sensor und den Wandler angepasst werden.

Nachdem der Verstärker mit einer Spannungsquelle mit -5V und $+5\text{V}$ versorgt wurde, muss der Referenzoszillator auf die maximale Aussteuer-Amplitude eingestellt werden. Wenn dieser also eine Empfindlichkeit von $0,6 \text{ V/g}$ hat, ist der Oszillator mit einem kalibrierten Oszillografen auf einen Scheitelwert von $0,6 \text{ V}$ einzustellen, wenn auf 1 g kalibriert werden soll.

Andere Empfindlichkeiten erfordern andere Einstellungen der Referenzquelle.

Danach ist der Oszillator über den J1, J2 oder J3 auf den einzustellenden Vorverstärker zu schalten.

Nun ist die Verstärkung so einzustellen, dass der Oszillator zu einer Vollaussteuerung in der Erfassungssoftware führt.

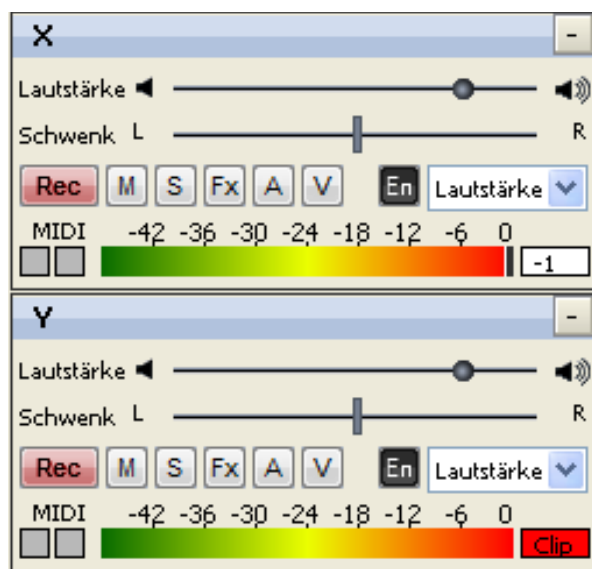


Abbildung 33: Aussteuerung der Wandler, Kanal X: optimale Aussteuerung, Kanal Y: übersteuerter Eingang

Der sicherste Weg dies zu erreichen ist, zunächst den Eingang zu übersteuern und dann die Verstärkung solange abzusenken, bis der Pegelmesser -1dB anzeigt, wie in Abbildung 1 dargestellt. Um die Software zu kalibrieren und um die Archivdaten vollständig zu haben, ist es sinnvoll nach dem Abgleich der drei Verstärker von allen dreien einmal das Referenzsignal zu erfassen.

4.2.3 Auswertesoftware

Die verwendete Auswertesoftware „spectraPLUS-FFT Spectrum Analyzer“ der Firma „Pioneer Hill Software“ muss ebenfalls kalibriert werden, um an die Empfindlichkeit der Sensoren angepasst zu werden.

Zur Vorbereitung der Kalibrierung ist zunächst die Konfiguration „Kalibrierung“ zu laden, um die genaue Oszillatorfrequenz mit der Auswertesoftware zu ermitteln. Danach ist der Zielpegel für die Frequenz und die gewählte Referenz-Beschleunigung

anhand der Formel „ $L_v = 20 \lg \frac{\hat{a} [g] \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}{2 \pi f v_0 \cdot \sqrt{2}}$ mit $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} m/s$ und der Be-

schleunigung in Meter pro Quadrat Sekunde zu berechnen. ⁸⁷

Nun kann mit der Eingabe der Kalibrierdaten begonnen werden. Diese Eingaben erfolgen in dem Fenster, das sich öffnet, wenn aus dem Menü <Options> der Punkt <Calibration> ausgewählt wird. Dieses Fenster wird in Abbildung 34 gezeigt.

Im Bereich „Calibration Signal Parameters“ ist anzugeben, welcher Pegel durch das Referenzsignal wiedergegeben wird. Für die Maximalaussteuerung mit 1 g Spitze ist hier für den Level ein Wert von 21000 einzugeben und „Peak“ auszuwählen. Der Zahlenwert für das Feld „Level“ wird durch verschiedene Randbedingungen bestimmt. Die Software verwendet intern die Einheit mm/s. Um zu Pegeln in m/s zu gelangen ist also ein Faktor von 1000 nötig.

Jetzt ist noch dem Bezugspegel durch einen weiteren Faktor Rechnung zu tragen. Die genaue Höhe dieses Faktors hängt vom gewünschten Bezugspegel ab. Da hier

$5 \cdot 10^{-8} \frac{m}{s}$ als Bezugspegel verwendet werden, ergibt sich als weiterer Faktor der

Wert 21.

Das Produkt der einzelnen Faktoren ergibt dann den Gesamtfaktor, der in das Feld „Level“ einzutragen ist. Als Einheit ist die Beschleunigung anzugeben.

Jetzt muss noch angegeben werden in welcher Einheit und Skalierung das Spektrum angezeigt werden soll. Für Schnellepegel ist der Effektivwert (rms) der Schnelle zu verwenden.

Zur genauen Anpassung der Amplitude kann im Bereich „Digital Signal Level“ jetzt die Wave-Datei mit den Kalibrieraudiodaten für die untersuchte Achse geladen wer-

⁸⁷ Vgl. [DIN 45635-8] S. 3

den, um der Software eine Referenz für das im Bereich „Calibration Signal Parameters“ beschriebene Signal zu geben.

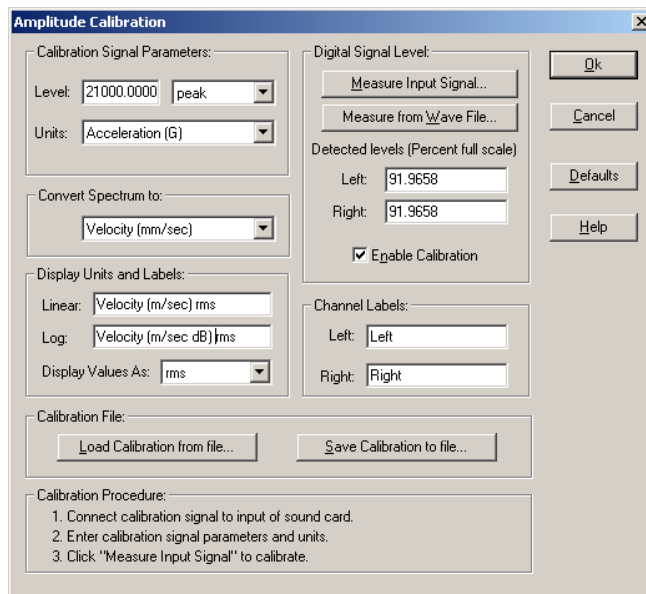


Abbildung 34: Screenshot des Amplitude Calibration Fenster der Software „spectraPLUS“ mit Kalibrierdaten für den verwendeten Sensor und einer Skalierung relativ zu $5 \cdot 10^{-8} \frac{m}{s}$

Nun ist das Referenzsignal zu analysieren. Die Amplitude sollte der berechneten entsprechen. Falls dies nicht der Fall sein sollte, muss die Kalibrierungseinstellung weiter angepasst werden.

Bei Bedarf kann die Einstellung in einer Datei hinterlegt werden, um später wieder verwendet zu werden.

Korrekturdaten für den Frequenzverlauf des Sensors lassen sich im Fenster „Scaling Control“ im Bereich „Microphonecompensation“ laden. Für die Erstellung solcher Daten ist das Manual der Software heranzuziehen.

5 Durchführung einer Prüfung auf Körperschallemission

5.1 Körperschall-Spezifikation des Auftraggebers für das zu prüfende Rechnersystem

Die Spezifikation des Auftraggebers fordert die üblichen Umwelanforderungen, wie beispielsweise elektromagnetische Verträglichkeit. Daneben stellt der Auftraggeber für das hier zu entwickelnde Rechnersystem noch spezielle Anforderungen im Bereich der direkten Körperschallemission. Da der Rechner in einem Unterwasser-Fahrzeug mit besonders geringer Wasserschallemission eingesetzt wird, sind die Anforderungen an alle Komponenten, die in diesem Fahrzeug verbaut werden, besonders streng. Es ist, wie bei Problemen der elektromagnetischen Emissionen, einfacher, Emissionen erst gar nicht zu erzeugen, statt sie im Nachhinein zu unterdrücken.

Da die Spezifikation des Kunden keine weitergehenden Angaben zum anzuwendenden Messverfahren enthält, ist es dem Autor überlassen, welches Verfahren er anwendet. Um die Vorteile der normierten Messung nicht zu verlieren, entscheidet sich der Autor die Prüfung in Anlehnung an die DIN 45635-8 durchzuführen. Dies geschieht, obwohl diese Norm hier im eigentlichen Sinne nicht anzuwenden ist. Der Zweck des in der Norm beschriebenen Messverfahrens ist die indirekte Messung einer Luftschallemission. Die Luftschallemission wird nach der Norm rechnerisch aus der Körperschallemission ermittelt. Die Vorgabe einer Körperschallgrenzkurve legt allerdings nahe, dass die Körperschallemissionen einer näheren Betrachtung unterzogen werden sollen. Da es sich um ein Rechnersystem für ein Unterwasserfahrzeug handelt, soll der Eintrag von Schallemissionen in das umgebende Wasser minimiert werden.

Dies kann, wie im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit, entweder durch Dämmmaßnahmen auf dem Weg der Emissionen oder durch Minimierung der Emissionen aus der Quelle (hier dem Rechner-System) erreicht werden. Die Körperschall-Vorgabe aus der Spezifikation des Auftraggebers dient der Minimierung der Emissionen.

Die DIN 45635-8 wird hier also nicht in ihrer ursprünglichen Intention verwendet, sondern sie dient als Gerüst zur Durchführung der geforderten Prüfung. An den Stellen, an denen es sinnvoll ist, weicht der Autor mit entsprechender Begründung bewusst von den Vorgaben der Norm ab, um Ergebnisse im Sinne der Spezifikation zu erhalten.

Die Abbildung 35 zeigt der Verlauf der Grenzkurve, die laut der Spezifikation nicht überschritten werden darf.

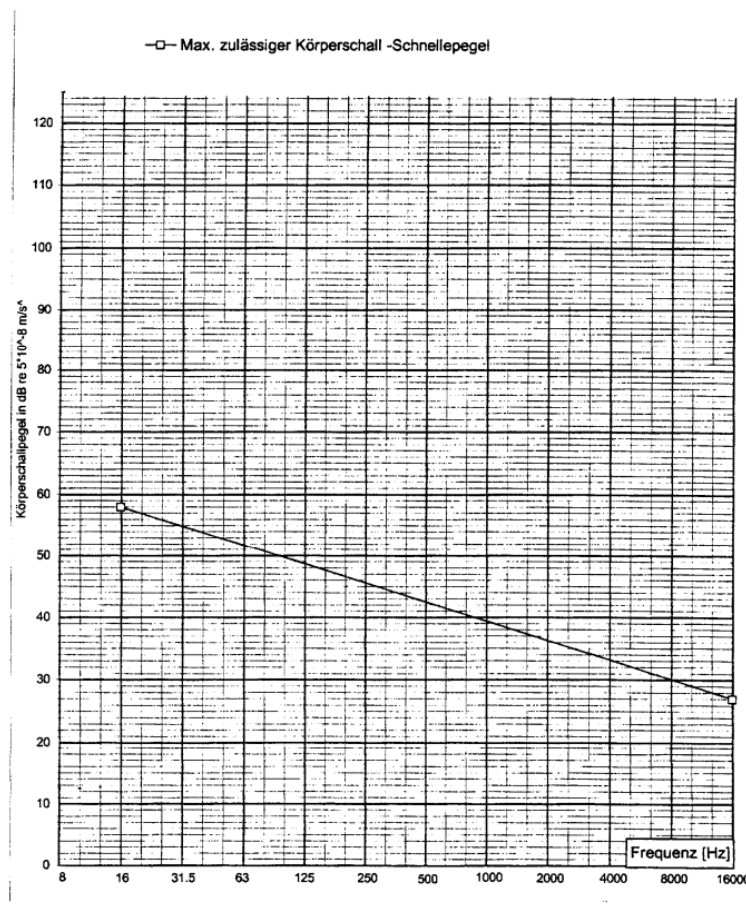


Abbildung 35: Grenzkurve für Körperschallemissionen aus der Spezifikation des Auftraggebers

5.2 Messaufbau

Der Messaufbau sollte grundsätzlich in einer Umgebung geschehen, in der die Belastung mit Störgeräuschen so gering wie möglich ist, um das Einkoppeln von störendem Luft- und Körperschall in den Prüfling zu minimieren.

Der Messplatz ist entsprechend dem Blockschaltbild in Abbildung 30 auf Seite 75 aufzubauen.

Dabei ist die Zuordnung der Sensorachsen zu den festgelegten Achsen des Laborsystems zu beachten. Wenn zum Beispiel die Z-Achse des Sensors nicht der Z-Achse des Laborsystems entspricht, kann die Zuordnung durch Veränderung der Ziele der Leitungen zwischen Messverstärker und Wandler-Einheit angepasst werden. Die Sensorachsen hängen von den Befestigungsmöglichkeiten am Prüfling ab.

5.2.1 Benötigte Messmittel

1. Körperschall-Messverstärker
2. Sensoren
3. Oszillograph
4. Spannungsversorgung für den Messverstärker (Labornetzteil mit 2 Spannungen)
5. Analog-Digital-Wandler
6. Dämmglied zu Entkopplung vom Laborsystem
7. Rechner mit installierter Software „spectraPLUS - FFT Spectrum Analyzer“ der Firma Pioneer Hill Software und Auswertesoftware (zunächst eine 30-Tage-Testversion) und „MixPad“ der Firma NCH Software (zunächst in einer 14-Tage Testversion)

5.2.2 Aufstellung des zu prüfenden Gerätes

Der Prüfling soll nach Vorschrift der DIN 45635-8 so aufgestellt werden, wie er im Normalfall betrieben würde. Eine große Maschine ist also montiert auf ihrem Maschinenfundament, oder das hier untersuchte Rechnersystem für die Rackmontage in einem entsprechendem Rack zu prüfen.

Nun ist es aber im Sinne der Spezifikation so, dass hier nicht die aus der Maschinenoberfläche abgestrahlte Luftschallemission, sondern der direkt in das Rack übertragene Körperschall die zu prüfende Größe ist.

Wenn man diesen messen will, ist es nicht sinnvoll eine Kopplung an ein anderes Medium (hier das Rack) zu erlauben, da es je nach Art der Kopplung, wie in Kapitel 2.2.5 beschrieben, zu einer Ableitung der Körperschallenergie käme. Der zu messende Wert würde also geringer ausfallen als der tatsächlich vorhandene.

Idealerweise müsste eine Messung, deren Ziel die Erfassung der gesamten Körperschallenergie an einem Punkt ist, im luftleeren Raum unter Schwerelosigkeit stattfinden. Dort könnte der Prüfling schwingungsfrei gelagert werden und wäre von kein Medium umgeben. Um möglichst nah an diese Bedingungen heran zu kommen, kann man verschiedene Maßnahmen ergreifen. Die Erzeugung eines Vakuums ist vom Aufwand her nicht vertretbar, da zwischen Luft und Prüfling schon eine so große Fehlanpassung herrscht, dass nur ein sehr geringer Anteil der Schallenergie in die Luft übertragen wird.

Der weitaus größere Teil der Energie wird über die mechanische Verbindung der Auflage oder Anschraubpunkte mit anderen Körperschalleitern bis hin zur Erdmasse abgeleitet. Es handelt sich hierbei um ein System schwingender Massen, ähnlich dem vereinfachten Laboraufbau aus Kapitel 2.3.4. Um hier die aus dem Prüfling entfernte Körperschallenergie zu minimieren, ist eine möglichst geringe Kopplung an die Laborumgebung zu erreichen. Man kann hier verschiedene Konzepte verfolgen. Allen Konzepten ist es gemein, ein schwingungsfähiges System mit möglichst niedriger Resonanzfrequenz und möglichst hoher Abklingkonstante zwischen dem Prüfling und dem Laborsystem zu platzieren.

Um dies zu erreichen, kann man zum Beispiel den Prüfling an Gummiseilen von der Decke herunter hängen lassen. Dies ist allerdings nur bis zu einer gewissen Masse des Prüflings mit vertretbarem Aufwand durchführbar.

Eine andere Möglichkeit ist es, den Prüfling auf einem mit Luft gefülltem Dämmglied aufzustellen. Dieses Glied kann im einfachsten Fall der Schlauch eines Schubkarren-Reifens sein. Der Schlauch ist dann allerdings nur soweit mit Luft zu füllen, dass der Prüfling keine direkte mechanische Verbindung zum Laborsystem mehr hat. Neben dieser einfachen und preiswerten Lösung gibt es auch sehr aufwendige Dämmglieder. Deren Nutzung würde im vorliegenden Fall, nämlich einer entwicklungsbegleitenden Voruntersuchung, den finanziellen Rahmen überschreiten.

Der Prüfling wurde also aus oben angeführten Gründen entgegen der Anweisung der Norm nicht in ein Rack montiert um im Sinne der Spezifikation prüfen zu können.

Zur Abkopplung vom Laborsystem wurde die Variante eines luftgefüllten Dämmgliedes, namentlich der Schubkarren-Schlauch, gewählt. Der Messaufbau entspricht also der Abbildung 36 auf einem Labortisch als Unterlage. Die ergriffene Dämmmaßnahmen wirken sich zusätzlich positiv auf die Einstrahlung von Fremdkörperschall in den Prüfling aus.

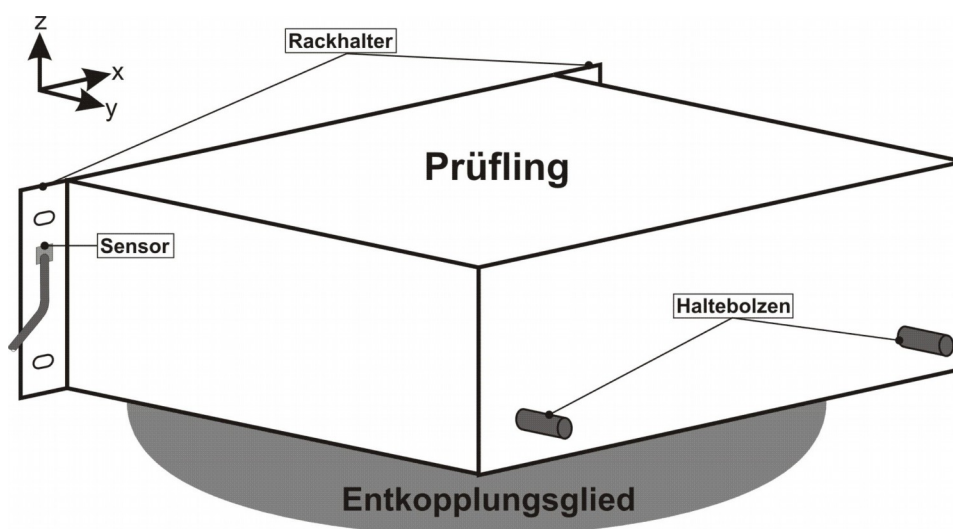


Abbildung 36: Schematische Darstellung des Prüflings im Laboraufbau, auf die Unterlage wurde zugunsten der Übersicht verzichtet.

5.2.3 Anordnung der Sensoren

Die Norm schreibt die Positionierung von mindestens zehn Sensoren auf der Oberfläche des Prüflings vor, da diese Oberfläche kleiner als 1 m^2 ist (siehe Tabelle 3). Diese Sensoren sollen nach der Norm eine empfindliche Achse senkrecht zur untersuchten Oberfläche haben.

Diese Anordnung der Sensoren ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn die Schwingungsanteile, die zu Anregung der umgebenen Luft beitragen, gemessen werden soll. Dies ist zwar das erklärte Ziel der Norm, aber nicht im Sinne der Spezifikation.

Um der expliziten Angabe von Körperschallgrenzwerten in der Spezifikation Rechnung zu tragen, ist es sinnvoller die Körperschallerregung an den Punkten zu ermitteln, an denen der Prüfling eine mechanische Verbindung mit dem Rack hat, in dem das Rechnersystem montiert werden soll. Diese Punkte sind die Rackhalter an der Front und die Haltebolzen an der Rückseite des Prüflings. Der Autor wählt also diese Punkte als Messpunkte.

Ebenso ergibt der Einsatz einachsiger Sensoren nur dann Sinn, wenn die Luftschallanregung ermittelt werden soll, da in das gasförmige Medium nur longitudinale Wellen weitergegeben werden. Diese Kompressionswellen werden durch das Schwingen der Oberfläche in senkrechter Richtung angeregt.

Eine mechanische Verbindung zweier Festkörper, hier zwischen dem Rechnersystem und dem Rack, ermöglicht jedoch die Übertragung von Energie in alle vier, aus Kapitel 2.2.3 bekannten, Wellenarten. Um den Energiegehalt dieser Wellenarten zu ermitteln ist es nötig, die hierzu proportionale Schnelle in alle drei Raumdimensionen zu ermitteln. Dies sollte nach Möglichkeit zeitgleich geschehen. Der Autor wählte also einen Sensor aus, der die Beschleunigungen in drei Achsen aufnimmt.

5.2.4 Befestigung der Sensoren

Da die Front des Gerätes aus Aluminium ist, können magnetische Halter nicht genutzt werden. Die lackierte Oberfläche der Front verbietet die Verwendung von Klebstoffen, um ihre Beschädigung zu vermeiden. Solange der Prüfling also nicht zu warm wird, bleibt dem Autor aus den Vorschlägen der Norm nur die Wahl von Klebewachs zur Befestigung der Sensoren.

In der Abbildung 37 kann man schematisch die Befestigung des Sensors an der Front in der Position der Rackbefestigung erkennen. Nachdem die Sensorposition bestimmt, ist müssen noch die Sensorachsen den Laborachsen zugeordnet werden.

Je nachdem, in welcher Lage der Sensor befestigt ist, stimmt die Zuordnung der Sensorachsen nicht mit den Laborachsen überein. Da die Achsen einzeln mit den Eingängen des Analog-Digital-Wandlers verbunden werden, kann an dieser Stelle die Zuordnung der Sensorachsen zu den Laborachsen vorgenommen werden. Die Anordnung der Sensoren und der Laborachsen ist zu dokumentieren und dem Prüfbericht beizufügen. Wie die Lage der Sensorachsen ist, kann entweder dem Datenblatt des Sensors entnommen werden oder während der Überprüfung des Sensors notiert werden.

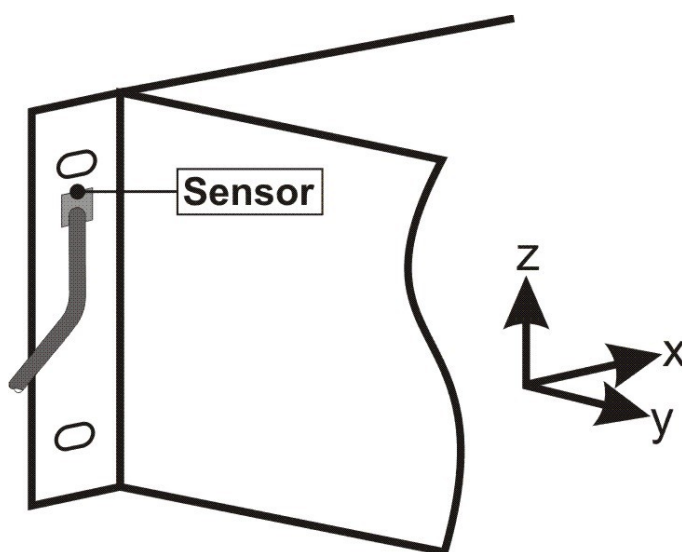


Abbildung 37: Schematische Darstellung der Sensorposition auf der Rackbefestigung

5.3 Der Betriebszustand

Bei der Wahl des Betriebszustands sind verschiedene Parameter zu berücksichtigen.

Abhängig von der Anzahl der Körperschallquellen im System und den verschiedenen möglichen Betriebsarten des Prüflings ist nur schwer eine Entscheidung über den richtigen Betriebszustand für die Prüfung zu treffen. Eine gewisse Kenntnis des Innenlebens und der geplanten Anwendung des Prüflings vereinfachen die Wahl des Betriebszustands für die Prüfung.

Zunächst sind die verschiedenen herausragenden Körperschallquellen im Prüfling zu identifizieren. So sind rotierende Massen mit einer Unwucht in der Regel starke Quellen für Körperschallenergie, während Elektro-Restriktionen von Spulen-Körpern eher einen geringen Beitrag zur Körperschallemission leisten. Also ist zu klären, ob der Prüfling Lüfter, Festplatten oder andere rotierende Massen enthält. Zusätzlich sollte man klären, ob es Mechaniken, wie beispielsweise Auswurf-Mechanismen von Floppylaufwerken, gibt, welche im normalen Betrieb verwendet werden. Diese sollten dann während der Prüfung aktiviert werden.

Im vorliegenden Prüfling sind insgesamt fünf Lüfter vorhanden und es gibt keine Festplatten. Der Zugriff auf das optische Laufwerk wird im normalen Betrieb durch eine verschlossene Klappe verhindert. Diese Mechanik kann bei der Prüfung also vernachlässigt werden.

Wichtiger für die Prüfung sind die Lüfter. Dabei werden vier baugleiche Lüfter verwendet. Da zu erwarten ist, dass die Drehzahlen der Lüfter bei gleicher Spannung nicht exakt gleich sind, ist neben der eigentlichen Erregungsfrequenz noch mit Schwebungen der Schwingungen untereinander zu rechnen. Eine akustische Kontrolle gibt Aufschluss über die Amplitude und die Frequenz dieser Intermodulationsprodukte. Wenn die Schwebung sehr langsam ist, muss man dieses bei der Wahl der

Messdauer berücksichtigen. Für diese Lüfter ist mit einer Emission bei einer Frequenz von zum Beispiel $4800 \text{ min}^{-1} / 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}$ also 80 Hz zu rechnen.

Der fünfte Lüfter ist kleiner und arbeitet mit entsprechend höherer Drehzahl, sodass seine Erregung bei etwa 120 Hz zu erwarten ist. Da er weniger Masse hat, wird diese Erregung vermutlich geringer ausfallen.

Eine temperaturabhängige Regelung der Lüfter ist nicht vorgesehen. Es ist also nicht nötig auf das Beenden eines Einschwingvorgangs zu warten, um realistische Messwerte zu erhalten.

Somit ist der vom Autor gewählte Betriebszustand für diese Prüfung der Zustand der sich einstellt, wenn auf dem System nach dem Einschalten der BIOS-Einstellungsbildschirm aufgerufen wird und es in diesem belassen wird.

Wenn die Vorüberlegungen ergeben, dass es mehrere Betriebszustände gibt, für die eine Prüfung sinnvoll ist, so sind diese alle zu prüfen.

5.4 Durchführung der Messung

Zunächst ist die Erfassungssoftware zu starten und die Vorlage-Datei entsprechend zur der Anzahl der verwendeten Sensoren zu öffnen. Diese ist dann unter dem Titel *Prüfung_Datum_Kalibriersignale* zu speichern.

Vor der Erfassung der Messwerte ist der Sensor entsprechend Kapitel 4.2.1 und der Messverstärker gemäß Kapitel 4.2.2 abzugleichen. Dann sind mindesten zehn Sekunden des Kalibriersignals zu erfassen und zu sichern.

Dazu müssen die Spuren der Sensorachsen durch Aktivieren des REC-Knopfes im Spur-Parameter-Bereich aufnahmebereit geschaltet werden. Jetzt kann durch Betätigen des REC-Knopfes im Transportbereich die Erfassung gestartet werden. Die Erfassung kann durch Betätigen des STOP-Knopfes beendet werden.

Jetzt ist der Messaufbau entsprechend der Vorüberlegungen aufzustellen und die Sensoren an den gewählten Positionen zu befestigen.

Bevor der Prüfling in Betrieb genommen wird, ist es sinnvoll den Fremdkörperschall zu erfassen. Dazu ist in der Erfassungssoftware die bekannte Vorlage-Datei zu öffnen und unter dem Titel *Prüfung_Datum_Fremdkörperschall* zu speichern.

In dieser Datei sind dann mindestens zehn Sekunden des Fremdkörperschalls zu erfassen.

Nun ist der Prüfling in den aus den Vorüberlegungen gewonnenen Betriebszustand zu versetzen und die Prüfung durchzuführen. Das Vorgehen ist wie in den beiden vorangegangenen Absätzen beschrieben. Lediglich der Titel der Datei ist in *Prüfung_Datum_Betriebszustand* zu ändern. In dieser Datei sind Messwerte für mindestens die aus den Vorüberlegungen gewonnene Erfassungszeit zu erfassen. Es sollten jedoch minimal zehn Sekunden erfasst werden, um der Norm genüge zu tun.

Während aller Prüfungen ist es sinnvoll mit Hilfe eines Kopfhörers akustisch die Erfassung der Messwerte zu überprüfen.

5.5 Auswertung der erfassten Daten

5.5.1 Vorbereitung der erfassten Daten

Die Messdaten aus der Erfassungssoftware sind vor der Auswertung noch in das Wave-Format zu überführen. Dies geschieht, indem die gewünschte Wellenform ausgewählt wird und im Menü <Datei> der Punkt <Clip exportieren als> aufgerufen wird. In der in Abbildung 38 dargestellten Dialogbox ist das Zielverzeichnis, der Dateiname und das Exportformat zu wählen. Als Dateiname ist der Titel der Quelldatei mit angefügter Sensornummer und Achse zu verwenden. Die Kalibrier audiodaten für die X-Achse von Sensor1 werden als in einer Datei mit dem Titel „Prüfung_Datum_Kalibrier audiodaten_1_X.wav“. Als Exportformat ist das PCM-Format mit 48000 Hz und 24 Bit zu wählen, wie in der Abbildung 38 gezeigt.

Dieser Vorgang ist für alle benötigten Wellenformen aus allen Erfassungsdokumenten zu wiederholen.

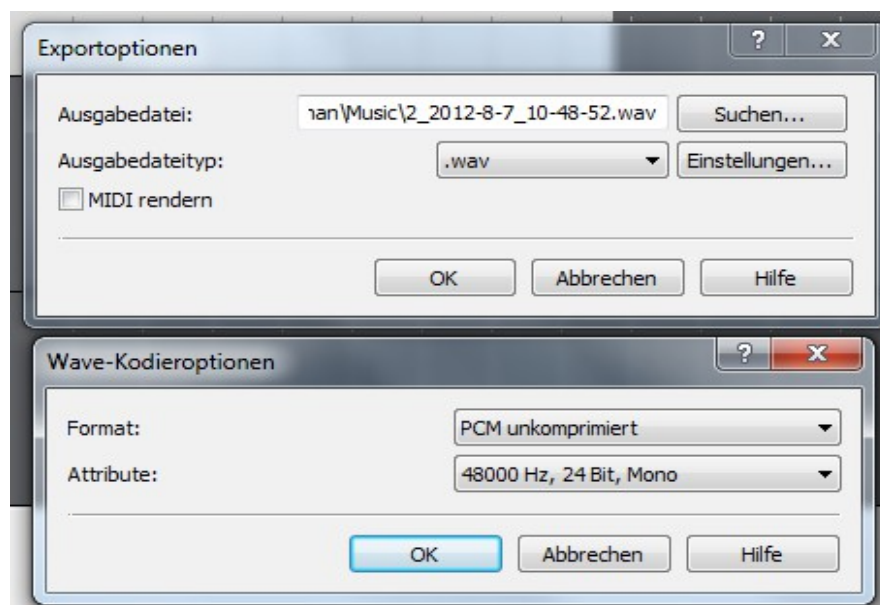


Abbildung 38: Screenshot des Dialogs zum Export der erfassten Daten in das Wave-Format

5.5.2 Einstellung der Auswertesoftware

Die Auswertesoftware bietet die Möglichkeit verschiedene Ausgabe- und Auswertekonfigurationen zu speichern, um Einstellungen wieder herstellen zu können.

Um gezielt nach Störquellen zu suchen, ist die Auswertung von Schmalbandspektren am effektivsten. Diese Spektren stellen den Frequenzverlauf mit größter Genauigkeit dar. Sie bieten dadurch die Möglichkeit anhand der Frequenz-Nadeln im Spektrum gute Rückschlüsse auf den Erreger zu ziehen. Zur Untersuchung der erfassten Daten im Schmalbandspektrum ist die Konfiguration „Schmalbandspektrum“ zu laden. Danach ist mit den Kalibrier audiodaten die Kalibrierung der Software zu prüfen.

Nun kann die Datendatei geladen und analysiert werden.

Wie in Abbildung 39 zu sehen ist, kann man bis zu sechs Kurven aus einer Datei oder der Auswertung hinterlegen und einblenden. Auf diese Weise lassen sich Daten aus anderen Messungen oder Grenzkurven einblenden. Wenn die Overlay-Daten aus einer Messung hinterlegt wurden, kann man unter Options die Daten in einer Datei ablegen, um dieses Spektrum später in einer Office-Software aufzubereiten oder es später als Overlay erneut laden.

Auf diese Weise kann man die gleiche Achsen an unterschiedlichen Sensorpositionen oder unterschiedliche Achsen an der gleichen Sensorposition oder andere Spektren von Interesse gegenüberstellen.

Die Darstellung in Oktav- oder Terzspektren kann entweder im Dialog „Scaling Control“, der sich nach Drücken der F5-Taste öffnet, eingestellt werden. Ebenso kann sie durch Laden der entsprechenden Konfiguration hergestellt werden. Das Laden der Konfiguration bietet den Vorteil, dass auch alle anderen Parameter neu gesetzt werden und so eine unabsichtliche Fehlbedienung vermieden wird.

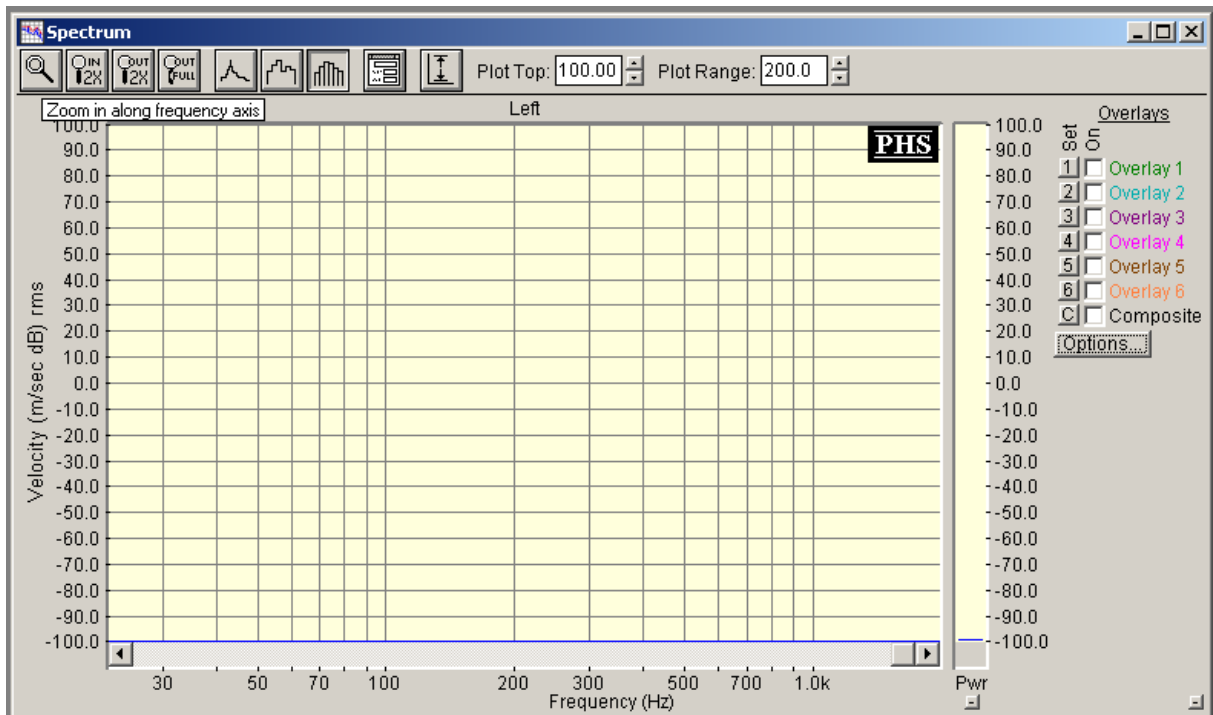


Abbildung 39: Screenshot des Anzeigefensters der Spektrumanalyse

5.5.3 Aufbereitung der gewonnenen Daten

Wenn die Prüfung zum Nachweis der Einhaltung von Umweltauflagen einer Spezifikation dienen soll ist jetzt noch ein Prüfbericht in Anlehnung an die Vorgaben der DIN 45635-8 zu erstellen. Ob die, in der Norm geforderten Berechnungen, noch nötig sind hängt davon ab ob nur die Körperschallemission nachgewiesen werden soll oder die daraus resultierende Luftschallemission Ergebnis der Prüfung sein soll.

Da hier eine entwicklungsbegleitende Voruntersuchung beschrieben wird, kann auf die Erstellung eines ausführlichen Berichtes verzichtet werden. Dennoch ist der Messaufbau sowie die all andere Rahmenbedingung zu dokumentieren um im Falle einer Veränderung am geprüften System gezielt Vergleiche anstellen zu können.

5.5.4 Diskussion eines Ergebnis-Spektrums

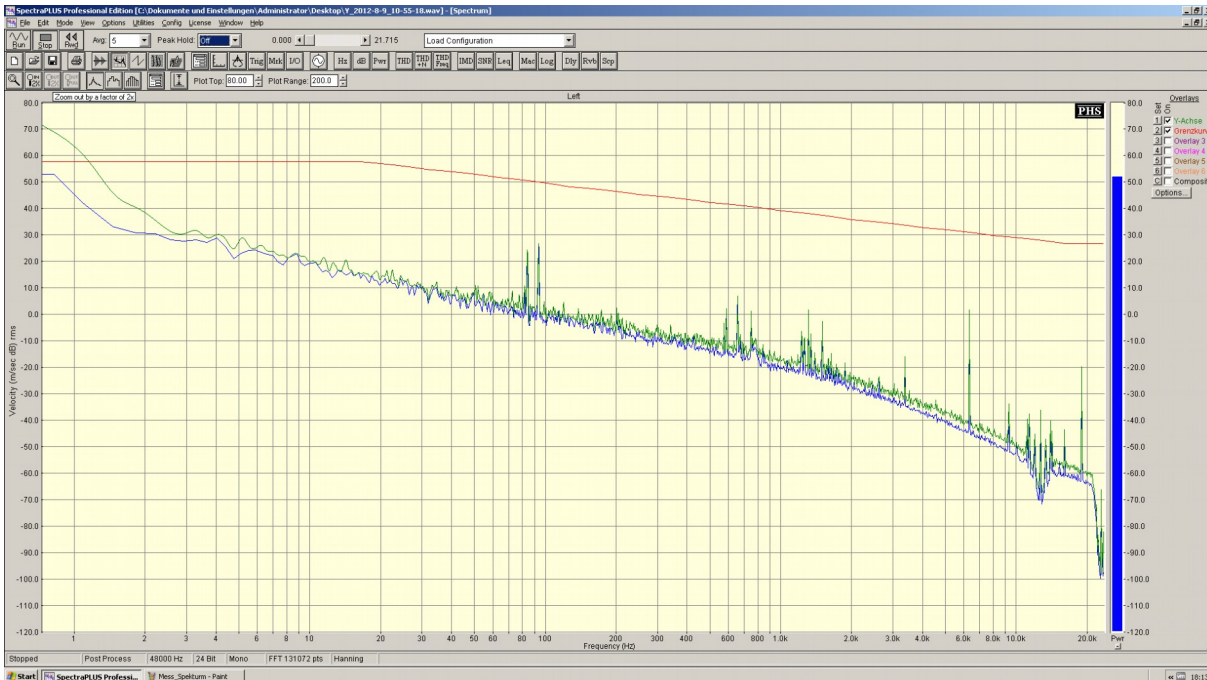


Abbildung 40: Screenshot eines Ergebnisspektrums für die Y-Achse am gezeigten Messpunkt. Rot: Vorgegebene Grenzkurve, Grün: Spektrum der Maximalwerte, Blau: zeitlich letztes Spektrum

Die Abbildung 28 zeigt ein Körperschallspektrum des Beispiel-Rechnersystems. Zu erkennen sind die Erregungen bei 93 Hz und 84 Hz. Diese sind über die Umsetzung der Frequenz in Drehzahlen den vier baugleichen Lüftern zugeordnet. Da sich hier zwei Spitzen zeigen, kann man davon ausgehen, dass die Drehzahlen nicht exakt übereinstimmen.

Die nächste Spitzen von 580 Hz, 655 Hz und 741 Hz sind vermutlich Oberwellen, die auf die Erregung durch die Lüfter zurückzuführen sind oder es handelt sich Resonanzen im Gehäuse. Die Anhäufung von Spitzen im Bereich von 1000 Hz bis 2000 Hz setzt sich vermutlich aus verschiedenen Oberwellen der unterschiedlichen Grundschwingungen und im System entstehender Luftschallerregung zusammen, die sich auf das Gehäuse überträgt.

Die Spitze bei 6300 Hz ist auf das Multiplexing des Ladungsverstärkers im Sensor zurückzuführen und daher keine Körperschallerregung. Ab dieser Frequenz sind die Messwerte zu vernachlässigen, da es neben der tatsächlichen Anregungen noch zu Frequenz-Spiegelungen aufgrund des Multiplexings kommt.

Die in rot eingeblendete Grenzkurve wird nicht überschritten. Die Prüfung wäre also für einen Frequenzbereich von 16 Hz bis 1,5 kHz bestanden.

6 Fazit

Das Ziel dieser Arbeit war es die Rahmenbedingungen für Körperschallmessungen an technischen Systemen zu ergründen, einen normgerechten Messplatz zu entwickeln und das Vorgehen bei einer Prüfung am Beispiel einer entwicklungsbegleitenden Voruntersuchung darzulegen. Weiterhin weist der Autor auf die verschiedenen Aspekte hin, die bei Körperschalluntersuchung berücksichtigt werden müssen, um richtige Ergebnisse zu erhalten. Diese Arbeit soll den Leser in Lage versetzen, mit Hilfe der vom Autor entwickelten Messumgebung eigenständig Untersuchungen durchzuführen und die gewonnenen Daten aufzubereiten.

Bei Verwendung von Kompensationsdaten für den Frequenzverlauf des Sensors ist eine absolute Messung von Körperschallemissionen in einem Frequenzbereich von 16 Hz bis 1,6 kHz mit einem Störsignalabstand von der Grenzkurve mindesten 25 dB möglich. Relative Messungen sind im Bereich bis 3,5 kHz möglich.

Der vom Autor entwickelte Messverstärker ermöglicht eine größere Bandbreite und einen dem Wandler entsprechenden Dynamikumfang. Um also den Messplatz in Zukunft weiter auszubauen, ist zunächst der Weg über andere aktive Sensoren der einfachste.

Eine andere Möglichkeit des Ausbaus wäre die Verwendung des Ladungsverstärkers, der in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet wurde. Er ermöglicht den Einsatz von passiven piezoelektrischen Sensoren am Messverstärker, um zum Beispiel eine größere Empfindlichkeit zu erreichen.

Literaturverzeichnis

- VEI01: Veit, Ivar (1996): Technische Akustik: Grundlagen der physikalischen, physiologischen und Elektroakustik; 5., durchgesehene Auflage; Würzburg: Vogel Buchverlag
- MÜL01: Müller, Gerhard; Möser, Michael (2004): Taschenbuch der Technischen Akustik; Dritte, Erweiterte und überarbeitet Auflage; Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag
- MÖS01: Möser, Michael; Kropp, Wolfgang (2010): Körperschall, Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen; 3., aktualisierte Auflage; Heidelberg, Dordrecht, [u.a.]: Springer Verlag
- DIN 45635-8: DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (1985): DIN 45635 Teil 8, Geräuschemessung an Maschinen, Luftschallemissionen, Körperschallmessung Rahmenverfahren; Stand: Juni 1985; Berlin: Beuth Verlag GmbH
- BEC01: Becker, Wilfried; Gross, Dietmar (2002): Mechanik Elastischer Körper Und Strukturen; 1. Ausgabe; Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag
- HEN01: Henn, Hermann; Sinambaru, Gh. Reza; Fallen, Manfred (2008): Ingenieurakustik, Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele; 4., Überarbeitete und erweiterte Auflage; Wiesbaden: Vieweg+Teubner GWV Fachverlage GmbH

DIN EN ISO 7779: DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2011): Akustik – Geräuschemissionsmessung an Geräten der Informations- und Telekommunikationstechnik (ISO 7779:2010); Deutsche Fassung EN ISO 7779:2010; Stand: Januar 2011; Berlin: Beuth Verlag GmbH

DIN 45635-1: DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (1984): DIN 45635 Teil 1, Geräuschmessung an Maschinen, Luftschallemission, Hüllflächen-Verfahren Rahmenverfahren für 3 Genauigkeitsklassen; Stand: April 1984; Berlin: Beuth Verlag GmbH

STM01: ST Microelectronics (2010): LIS332ARMEMS motion sensor:3-axis ± 2 g analog-output ultracompact accelerometer; Doc ID 16931 Rev 1; ST Microelectronics

TEX01: Texas Instruments Incorporated (2000): Design of op amp sine wave oscillators; Analog Applications Journal August 2000; Texas Instruments Incorporated

SPE01: Pioneer Hill Software LLC (2012): SpectraPLUS FFT Spectral Analysis System Users Guide; Version 5.0; 24460 Mason Rd. Poulsbo WA 98370 USA: Pioneer Hill Software LLC

Bachelorarbeit

Kandidat: Koch, Stephan.....

Matr.-Nr.:

5	6	5	0	8	0
---	---	---	---	---	---

Studiengang Elektrotechnik Studienrichtung

- Mikrotechnologien
 Elektrotechnik

Studiengang Kommunikations-/ Informationstechnik

- Kommunikationstechnik
 Informationstechnik
 Industriekommunikation

Anschrift:

Telefon: (0208) 45301397

Märkische Str. 11 46115 Oserhausen
 Straße und Hausnummer PLZ Ort

Die Arbeit wird angefertigt

- in der FH-D in Institut in der Firma

Telefon: 0211/52708-0

Anschrift:

Straße, Hausnummer:



Thema der Arbeit (bitte in Druckschrift – Thema wird in dieser Fassung in das Zeugnis übernommen)

Körperschallmessungen an techn. Systemen
ischen

Prüfer: Prof. Dr. C. Fülber

Dipl. Ing. Jünkers

1.
 akad. Grad Name

2.
 akad. Grad Name

Vom Prüfungsausschuss auszufüllen:

Die Arbeit ist ausgegeben worden

am 06.06.12

Die Arbeit ist abzugeben

bis 15.08.12-29.8.12 PP

Der Kandidat ist zurückgetreten (innerhalb von 4 Wochen)

am

Die Frist wird auf Antrag vom verlängert

bis

Die Arbeit ist im Prüfungsamt abgegeben worden

am 15.08.12 CP

Die Arbeit ist aufgegeben mit Datum des Poststempels

vom

Bemerkungen:

Je 1 Ausfertigung dieses Formulars: Bachelor-Thesis, Prüfer, Co-Prüfer, Prüfungsamt.

Je 1 Exemplar der Arbeit: Prüfer, Co-Prüfer, Archiv (CD-ROM)

ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorgelegte Bachelor-Arbeit selbständig angefertigt und keine andere als im Schriftumsverzeichnis angegebene Literatur benutzt habe.

Ort, Datum: ..Oberhausen, 15.8.12.....

Unterschrift: ..S. Kock.....