

Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Diplomarbeit

Akustische und schwingungstechnische Untersuchung von chirurgischen Fräsern

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. F. Kameier

Prof. Dr.-Ing. G. Henning

Vorgelegt von :

Christian Hagemeyer

Matr. Nr. : 367196

Am 1.11.2004



FH Düsseldorf, Kameier, Josef -Gockeln-Str. 9, D-40474 Düsseldorf

Thema einer Diplomarbeit

für

Herrn Karl Christian Ernst Hagemeier

Matrikel-Nr. 367196

Prof. Dr.-Ing. Frank Kameier

Strömungstechnik und Akustik
Fachbereich 4
Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Josef-Gockeln-Str. 9
40474 Düsseldorf

Phone (0211) 4351-448
Fax (0211) 4351-468
E-Mail Frank.Kameier@fh-duesseldorf.de
<http://ifs.muv.fh-duesseldorf.de>

Düsseldorf, den 17.05.2004

Akustische und schwingungstechnische Untersuchung von chirurgischen Fräsern

Bei verschiedenen Operationen in der chirurgischen Medizin kommen unterschiedliche Arten von Fräsern zum Einsatz. Diese erzeugen, je nach Geometrie der Schneiden und Drehzahl unterschiedliche Schwingungen.

Diese Schwingungen sollen mit Hilfe von Versuchen aufgezeichnet und ausgewertet werden, um feststellen zu können, ob z.B. ein Tinnitus-Geräusch bei einer Felsenbein-Operation von einer Körperschallschwingung, einer Verletzung von Nerven oder durch die bei der Operation entstehende Lautstärke hervorgerufen wird.

Die Bearbeitung der Diplomarbeit soll in folgenden Schritten erfolgen:

- Erarbeitung eines Projektzeitplans,
- Einarbeitung in die Theorie
- Zusammenstellung von DASyLab-Schaltbildern zur Geräuschanalyse,
- Aufbau eines Versuchs zur Aufzeichnung von Schwingungen eines chirurgischen Fräasers
- Erstellung einer Dokumentation der Arbeit zur Präsentation im Internet.

Eidesstattliche Erklärung

Karl Christian Ernst Hagemeyer

Vogelheimer Straße 237

45356 Essen

Matrikel Nummer 367196

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorgelegte
Diplomarbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die
angegebenen Hilfsmittel und ausschließlich die im
Literaturverzeichnis angegebenen Schriften benutzt habe.

Ort, Datum

Unterschrift

Danksagung

Diese Diplomarbeit entstand am Labor für Strömungstechnik der Fachhochschule Düsseldorf.

Mein Dank richtet sich an Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Kameier und an Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Henning für ihre Unterstützung während der Diplomarbeit und der Studienzeit.

Auch den Mitarbeitern des LFS bin ich zu Dank verpflichtet.

Mein besonderer Dank gilt noch meiner Verlobten Bianca Gust, sowie Herrn Dipl. Phys. Michael Krämer und Herrn Jochen Heidsieck, die mich während meiner Studienzeit immer wieder ermuntert und unterstützt haben.

Ein letzter Dank gilt meiner Familie, die mir das Studium ermöglicht, und mich während der Studienzeit unterstützt hat.

Inhaltsangabe

Eidesstattliche Erklärung	3
Danksagung	4
Inhaltsangabe	5
Verwendete Formelzeichen	7
1. Einleitung	9
2 Theorie	10
2.1 Schwingungen.....	10
2.1.1 Arten von Schwingungen.....	12
2.1.2 Freie Schwingungen	12
2.1.3 Fremderregte Schwingungen.....	12
2.1.4 Selbsterregte Schwingungen	13
2.2 Systeme mit einem Freiheitsgrad.....	13
2.2.1 Freie Schwingungen in einem ungedämpften System mit einem Freiheitsgrad	14
2.2.2 Freie Schwingungen in einem gedämpften System mit einem Freiheitsgrad	15
2.3 Erzwungene Schwingungen (Fremderregung).....	19
2.3.1 Erzwungene Schwingungen in Systemen mit einem Freiheitsgrad ...	20
2.4 Systeme mit mehreren Freiheitsgraden	25
2.4.1 Freie Schwingungen in einem ungedämpften System mit mehreren Freiheitsgraden.....	25
2.4.2 Freie Schwingung in einem gedämpften System mit mehreren Freiheitsgraden.....	27
2.4.3 Erzwungene Schwingung in einem gedämpften System mit mehreren Freiheitsgraden.....	28
3 Töne (Akustische Schwingungen)	30
3.1 Entstehung von Schall	30
3.1.1 Die Wahrnehmung eines Tones.....	30
3.2 Messgrößen und Pegel.....	32
3.2.1 Messungen im Luftschall.....	32
3.2.2 Messungen von Körperschall	34
4. Das Laservibrometer als Messgerät für mechanische Schwingungen	36
4.1 Physikalische Vorbetrachtung für das Laservibrometer	36
4.2 Der Doppler-Effekt	37
4.3 Messprinzip des Laservibrometers	38

4.4	Technische Spezifikation des Polytec Laservibrometer	40
5.	Frequenzmessung und –bestimmung	44
5.1	Bestimmung der Eigenfrequenzen von Objekten.....	44
5.2	Eigenfrequenzen herausfiltern.....	48
5.3	Verarbeitung der Zeitdaten	49
5.4	Die Datenverarbeitung mit DASyLab	50
5.5	Datenverarbeitung mit PAK.....	53
6.	Spanender Abtrag von Material.....	55
6.1	Geometrisch bestimmte Schneiden.....	55
6.1.1	Winkel bei der Zerspanung	55
6.1.2	Positiver und negativer Spanwinkel.....	56
6.2	Geometrisch unbestimmte Schneiden:.....	57
7.	Versuchsaufbau und -durchführung.....	60
7.1	Verwendete Geräte.....	60
7.2	Versuchsaufbau der Vorversuche	61
7.3	Versuchsaufbau des Standardversuches.....	65
7.4	Versuchsdurchführung der Vorversuche.....	66
7.5	Versuchsdurchführung des Standardversuches.....	68
8	Versuchsauswertung.....	69
8.1	Auswertung der Vorversuche	69
8.2	Auswertung des Standardversuches.....	73
8.2.1	Darstellung der Versuchsergebnisse.....	74
8.2.2	Subjektive Bewertung der Messdaten (durch das menschliche Ohr)..	79
8.3	Zusammenfassung der Messergebnisse.....	80
9.	Zusammenfassung	81
10.	Fazit	82
	Bildnachweise:	83
	Literaturnachweis	86
	Anhang	88

Verwendete Formelzeichen

α_0	[°]	Freiwinkel
β_0	[°]	Keilwinkel
γ_0	[°]	Spanwinkel
d	[1/s]	Dämpfungskonstante
λ	[m]	Wellenlänge des Lichtes
J	[dimensionslos]	LEHR'sches Dämpfungsmaß
h	[dimensionslos]	Abstimmungsverhältnis zwischen Erreger- und Eigenfrequenz
φ, φ'	[°]	Nullphasenwinkel
Ψ_k		Auslenkung des Winkels im ge- koppelten System
ρ	[kg/m ³]	Dichte
ω	[Hz]	Kreisfrequenz
ω_1	[Hz]	Eigenfrequenz
ω_d	[Hz]	Eigenfrequenz eines gedämpften Systems
ω_{0k}		Koppelkreisfrequenz
A	[mm ²]	Querschnittsfläche
c	[N/m]	Federrate
c	[m/s]	Lichtgeschwindigkeit
C		Steifigkeitsmatrix (Federmatrix)
d	[Ns/m]	Dämpfung
D		Dämpfungsmatrix
E	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul
f	[Hz]	Frequenz
f_s	[Hz]	Frequenz, die der Sender aussen- det
f_e	[Hz]	Frequenz, die Empfänger Wahr- nimmt
f_E		Eigenfrequenz des Objektes
$f(t)$		Erregungsfunktion

$F(t)$		Erregungsmatrix
g	[N]	Gewichtskraft
I	[mm ⁴]	Flächenträgheitsmoment
L_p	[dB](*)	Schallpegel
L_i	[dB] (*)	Teilpegel
L_{ges}	[dB] (*)	Gesamtpegel
m	[kg]	Masse
M		Massenmatrix
n	[min ⁻¹]	Drehzahl
p_{eff}	[N/m ²]	Effektivdruck
p_0	[N/m ²]	Referenzdruck
q		Amplitudenwert
\bar{q}		Mittelwert der Amplitude
\hat{q}		Amplitudenwert
q_{eff}		Effektivwert
q_E		Gedämpft verlaufende Amplituden
q_p		Partikularer Anteil der Amplitude
T	[s]	Periode / Schwingungsdauer
T_D	[s]	Periode / Schwingungsdauer eines Gedämpften Systems
t_{ab}	[s]	Abklingzeit
v	[m/s]	Relativgeschwindigkeit des Objektes
W	[W]	Schalleistung
W_0	[W]	Referenzschalleistung

(*) [dB] ist keine wirkliche Einheit

1. Einleitung

Diese Diplomarbeit entstand aus einer Nachfrage des Felsenbeinlabors der Universitätsklinik Marburg an das Labor für Strömungstechnik der Fachhochschule Düsseldorf. Bei Operationen am Innenohr, die durch einen Zugang am Felsenbein gemacht werden, kam es bei Patienten zu einem dauerhaften, störenden Geräusch, einem sogenannten „Tinnitus“. Zu untersuchen ist nun, ob dieser „Tinnitus“ durch Luftschall oder Körperschall entstehen kann.

Hierzu werden verschiedene Versuche mit chirurgischen Fräsern (Kugelfräser mit Diamantbeschichtung und Kugelfräser mit einer bestimmten Schneidenanzahl) durchgeführt.

In Vorversuchen wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, mit dessen Hilfe die Einwirkung von Drehzahl, Klingenzahl des Fräasers (Geometrie des Fräasers), Bohrkraft und zu Fräsendes Material untersucht und analysiert werden kann. Als Bohrgerät diente eine Miniaturbohrmaschine der Firma Dremel mit einstellbarer Nenndrehzahl von 5.000 bis 33.000 min^{-1} . Die verwendeten Fräser der Vorversuche entstammten dem Lieferumfang der Miniaturbohrmaschine.

In den Versuchen wurden als Material Holz- und Kunststoffproben (Rechteckiger Querschnitt) sowie Metallproben (Messingröhrchen und Schweißdraht mit jeweils rundhohlem, bzw. rundem Querschnitt) verwendet.

2 Theorie

2.1 Schwingungen

„Unter einer Schwingung versteht man ganz allgemein einen Vorgang, bei dem sich eine physikalische Größe (Bewegungsausschlag, elektrischer Strom oder Spannung, Licht, Strömung, Druck, akustischer Ton usw.) mit der Zeit so ändert, dass sich gewisse Merkmale wiederholen.“¹

Betrachtet man über einen bestimmten Zeitraum eine Zustandsgröße einer periodischen Schwingung (oft mit $q(t)$ bezeichnet) und ihre zeitlichen Ableitungen, so stellt man fest, dass die Zustandsgröße zu den Zeiten t , $t+T$, $t+2T$, $t+3T$, usw. denselben Wert annimmt.

Deshalb gilt:

$$\boxed{q(t+n \cdot T) = q(t)}, \text{ wobei } n=1,2,3, \text{ usw. ist.} \quad (2.1)$$

Die Periode (auch Schwingungsdauer) ist der Zeitabschnitt, nach dem sich die Schwingung wiederholt, und wird mit $T[s]$ bezeichnet.

Die Frequenz (f) ist die Schwingungszahl, also die Zahl der Perioden in einer Sekunde.

$$\boxed{f = \frac{1}{T} [Hz]} \text{ wobei } 1 \text{ Hertz (Hz)} = \frac{1}{s} \text{ ist.} \quad (2.2)$$

Die Kreisfrequenz entspricht der Zahl der Perioden in 2π Sekunden:

$$\boxed{\omega = \frac{2\pi}{T}} \quad (2.3)$$

Hierbei schwankt jedoch die Größe q um einen Mittelwert \bar{q} , der über eine Schwingungsperiode T definiert ist, und zwar als zeitlicher Mittelwert des Augenblickswertes $q(t)$.

$$\boxed{\bar{q} = \int_t^{t+T} q(t) dt} \quad (2.4)$$

Der für die Auswertungen wesentlich wichtigere Mittelwert ist jedoch der quadratische Mittelwert, auch Effektivwert genannt.

¹ [TMI] S.363

Dieser errechnet sich wie folgt:

$$q_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} q^2(t) dt} \quad (2.5)$$

Der Effektivwert, bzw. die Berechnung des selben, wird bei einigen Messgeräten und auch bei Messsoftware bereits integriert oder als zuschaltbare Option (PAK, DASyLab) angeboten.

Die einfachste Art einer Schwingung ist die harmonische Schwingung, die durch eine Sinus- oder Kosinusfunktion dargestellt werden kann.

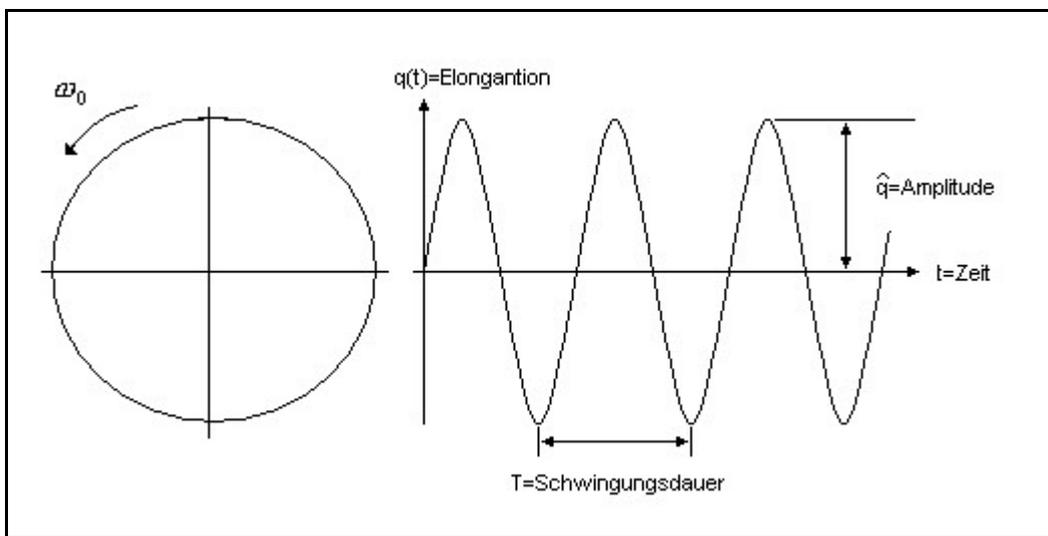


Bild 1: Harmonische Schwingung als Sinus dargestellt (vgl. [MAT])

$$q = \hat{q} \cdot \sin(\mathbf{w} \cdot t + \mathbf{j}) = \hat{q} \cdot \cos(\mathbf{w} \cdot t + \mathbf{j}')$$
(2.6)

wobei für f gilt:

$$\mathbf{j}' = \mathbf{j} - \frac{\mathbf{p}}{2}$$
(2.7)

f , bzw. f' wird als Nullphasenwinkel bezeichnet, also als der Winkel, der als Argument der Sinus- bzw. Kosinusfunktion bereits bei Beginn der Zeitählung ($t=0$) gesetzt ist.

2.1.1 Arten von Schwingungen

Man unterscheidet hier drei große Gruppen von Schwingungen, von denen im weiteren Verlauf zwei genauer besprochen werden:

- freie Schwingungen
- fremderregte Schwingungen
- selbsterregte Schwingungen

2.1.2 Freie Schwingungen

Freie Schwingungen werden durch kurzzeitige Anregung des Systems zum Schwingen ausgelöst. Dies geschieht zum Beispiel durch Anstoßen, Anschlagen oder einen kurzen Werkzeugeingriff bei einer Werkzeugmaschine.

Als Beispiel seien hier Vorgänge wie Hobeln oder Stoßen genannt, die jedoch im weiteren Verlauf dieser Arbeit keinen nennenswerten Einfluss haben, da bei den Versuchen mit kontinuierlichen Werkzeugeingriffen gearbeitet wird.

Jedoch werden die allgemeinen Grundlagen der Schwingungstheorie auf dem Hintergrund der freien Schwingungen aufgebaut.

2.1.3 Fremderregte Schwingungen

In dieser Arbeit werden in erster Linie die fremderregten Schwingungen besprochen, da sie für die Versuche entscheidend sind.

Die Voraussetzung für eine Fremderregung ist eine zeitabhängige Kraftanstrengung $F(t)$ oder eine Weganregung $u(t)$. Diese wäre zum Beispiel mit einem kontinuierlichen Werkzeugeingriff gegeben. Auch können Ursachen, wie zum Beispiel Unwuchten an rotierenden Teilen, Lagerfehler oder Ähnliches einen derartigen Effekt haben.

Zusätzlich entscheidend für fremderregte Schwingungen ist das Schwingungsverhalten der Struktur (Schwinggeschwindigkeit, Dämpfung).

Durch Fremderregung kann es zu Resonanzkatastrophen und zu selbsterregende Schwingungen kommen.

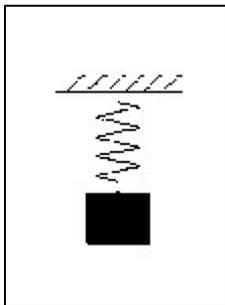
2.1.4 Selbsterregte Schwingungen

Auch bei selbsterregten Schwingungen wird die Energie der Schwingungen durch eine Maschine oder einen Prozess zugeführt. Jedoch „bestimmt“ der Schwingungsvorgang selber durch seine Frequenz den Takt der Energiezufuhr zur Aufrechterhaltung der Schwingungen.

Es ist jedoch nicht möglich, die Schwingungsursache zu unterbinden, ohne den Prozess zu stoppen. Solange also der Prozess läuft, wird es auch selbsterregte Schwingungen geben. Ein weiteres Problem ist, dass die Frequenz einer solchen selbsterregte Schwingung im Allgemeinen der Eigenfrequenz der Maschine entspricht. Sollte der Prozess nicht abgestellt und die Schwingungsursache, die zur Selbsterregung führte, unterbunden werden, kann es zu einer Zerstörung der Maschine kommen.

2.2 Systeme mit einem Freiheitsgrad

„Das Schwingungssystem mit einem Freiheitsgrad wird oft als Schlüssel zu fortgeschrittenen Untersuchungen von Schwingungen verwendet“.²



Die einfachste Darstellung eines Schwingensystems mit einem Freiheitsgrad ist ein einfaches Feder-Masse-System.

Lenkt man das Gewicht in eine Richtung (oben oder unten) um einen bestimmten Betrag aus, so schwingt das System um seine Ruhelage herum. Man spricht hierbei auch von einem linearen unge-

Bild 2. Ein Feder-Masse- dämpften Feder-Masse-System

System. (vgl.[GMI])

² [MVT] S.23, übersetzt

2.2.1 Freie Schwingungen in einem ungedämpften System mit einem Freiheitsgrad

Aus dem dynamischen Grundgesetz folgt mit der Auslenkung \bar{q} aus der Nulllage und der Federrate c :

$$F_G - c\bar{q} = m\ddot{\bar{q}} \quad \text{bzw.} \quad \ddot{\bar{q}} + \omega_1^2 \bar{q} = g \quad \text{bzw.} \quad (2.8, 2.9)$$

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{c}{m} \cdot q = \ddot{q} + \frac{c}{m} \cdot q = 0 \quad (2.10)$$

$$\text{mit } \omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (2.11)$$

wobei ω_0 die Eigenfrequenz des Systems, \bar{q} die Auslenkung aus der Nulllage, m die Masse des Systems und c die Federrate ist.

Mit Hilfe des Exponentialansatzes

$$q = K \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.12)$$

ergibt sich eine allgemeine Lösung³

$$q(t) = A \cdot \sin(\omega_0 t) + B \cdot \cos(\omega_0 t) \quad (2.13)$$

$$\text{mit } A = \frac{\dot{q}_0}{\omega_0} \quad \text{und} \quad B = q_0 \quad (2.14, 2.15)$$

$$\text{oder } q = C \cdot \sin(\omega_0 t + \mathbf{j}) \quad (2.16)$$

$$\text{mit } C = \sqrt{\left(\frac{\dot{q}_0}{\omega_0}\right)^2 + q_0^2} \quad (2.17)$$

$$\text{und } \mathbf{j} = \arctan \frac{q_0 \cdot \omega_0}{\dot{q}_0} \quad (2.18)$$

³ [TMI]

2.2.2 Freie Schwingungen in einem gedämpften System mit einem Freiheitsgrad

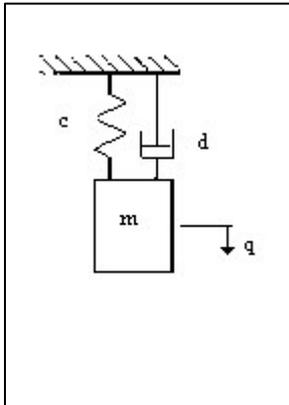


Bild 3: freie, gedämpfte Schwingung(vgl. [MAD])

In der Natur gibt es keine ungedämpften Systeme, da die Materie selbst durch ihren inneren Zusammenhalt eine Schwingung bremst (Werkstoffdämpfung). Zusätzlich kommen oftmals noch „Dämpfungselemente“, wie zum Beispiel zusätzliche Anbauten an Konstruktionen (erhöhte Masse), die Atmosphäre oder Flüssigkeit, und natürlich auch Dämpfungselemente, die gewollt in ein System eingebracht werden („Stoßdämpfer“ beim Fahrzeug, Schwingungsdämpfer im Motorenprüfstand) hinzu. Dämpfung kann auch durch Reibung und Spiel in Verbindungsstellen entstehen.

In **Bild 3** ist c die Federkonstante, d der Dämpfungskonstante, m die Masse des Systems und q die Auslenkung des Systems.

Die Bewegungsgleichung für die gedämpfte Schwingung mit einem Freiheitsgrad lautet:

$$\ddot{q} \cdot m + d \cdot \dot{q} + c \cdot q = 0 \quad (2.19)$$

Eine weitere Größe, die in diesem Zusammenhang wichtig erscheint, ist die Abklingzeit t_{ab} .

$$t_{ab} = \frac{1}{d} = \frac{2 \cdot m}{d} \quad (2.20)$$

wobei entsprechend $d = \frac{d}{2 \cdot m}$ die Dämpfungskonstante des Systems ist.

Die Abklingzeit wird kleiner, je kleiner m und je größer damit d wird.

Setzt man nun die Dämpfungskonstante in ein Verhältnis zur Eigenfrequenz, so erhält man das nach LEHR benannte LEHR'sche Dämpfungsmaß:

$$J = \frac{d}{w_0} = \frac{d}{2 \cdot w_0 \cdot m} = \frac{d}{2 \cdot \sqrt{m \cdot c}} \quad (2.21)$$

Eine weitere Größe, die im Verlauf dieser Arbeit noch Verwendung finden wird, ist das Abstimmungsverhältnis zwischen Erreger- und Eigenfrequenz, welches eine dimensionslose Größe darstellt.

$$\boxed{h = \frac{\Omega}{w_0}} \quad (2.22)$$

Mit Hilfe des Exponentialansatzes $q = e^{I t}$ kann die Bewegungsgleichung gelöst werden. Setzt man nun diese in die Differentialgleichung ein, und multipliziert sie mit $q = e^{-I t}$, so erhält man folgende Gleichung:

$$\boxed{I^2 + \frac{d}{m} \cdot I + \frac{c}{m} = 0} \quad (2.23)$$

Die Lösung dieser quadratischen Gleichung ergibt nun:

$$\boxed{I_{1,2} = -\frac{d}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{d}{2m}\right)^2 - \frac{c}{m}} = -d \pm \sqrt{d^2 - w_0^2} = -d \pm w_0 \cdot \sqrt{D^2 - 1}} \quad (2.24)$$

Zur Vereinfachung setzt man nun

$$\boxed{k^2 = d^2 - w_0^2} \quad (2.25)$$

ein, und erhält die Lösungen für I_1 und I_2 :

$$I_1 = -d + k \quad \text{und} \quad I_2 = -d - k$$

Wird dies in die DGL eingesetzt ergeben sich nun die Lösungen:

$$\boxed{q_1 = C_1 \cdot e^{I_1 t}} \quad \text{und} \quad \boxed{q_2 = C_2 \cdot e^{I_2 t}} \quad (2.26, 2.27)$$

Die allgemeine Lösung sämtlicher Differentialgleichungen ist die Summe der einzelnen Lösungen:

$$\boxed{q(t) = C_1 e^{I_1 t} + C_2 e^{I_2 t}} \quad (2.28)$$

Daraus ergeben sich dann drei Fälle der Dämpfung:

$J^2 - 1 > 0 \Rightarrow J > 0$, so spricht man von einer starken Dämpfung

$J^2 - 1 = 0 \Rightarrow J = 0$, so spricht man von einer kritischen Dämpfung

$J^2 - 1 < 0 \Rightarrow J < 0$, so spricht man von einer schwachen Dämpfung

Wenn $d > w_0$ wird, so wird $k < 0$. Somit sind dann die Lösungen für I_1 und I_2 reell und negativ, woraus dann

$$q(t) = C_1 \cdot e^{-(d-k)t} + C_2 \cdot e^{-(d+k)t} \quad (2.29)$$

durch Differenzierung und Einsetzen von $t=0$ ist $q(t) = q_0$ und $t=0$ ist $\dot{q}(t) = \dot{q}_0$.

Ergibt:

$$C_1 = \frac{q_0 \cdot (d+k) + \dot{q}_0}{2 \cdot k}; \quad C_2 = \frac{q_0 \cdot (d-k) + \dot{q}_0}{2 \cdot k} \quad (2.30, 2.31)$$

Durch Einsetzen in das Bewegungsgesetz erhält man dann letztendlich:

$$q(t) = \frac{1}{2 \cdot k} \cdot \left[[q_0 \cdot (d+k) + \dot{q}_0] \cdot e^{-(d-k)t} - [q_0 \cdot (d-k) + \dot{q}_0] \cdot e^{-(d+k)t} \right] \quad (2.32)$$

In solchen Vorgängen kommt es nicht zu Schwingungen. Statt dessen bewegt sich die ausgelenkte Masse langsam zurück zur Gleichgewichtslage, und nähert sich dieser asymptotisch.

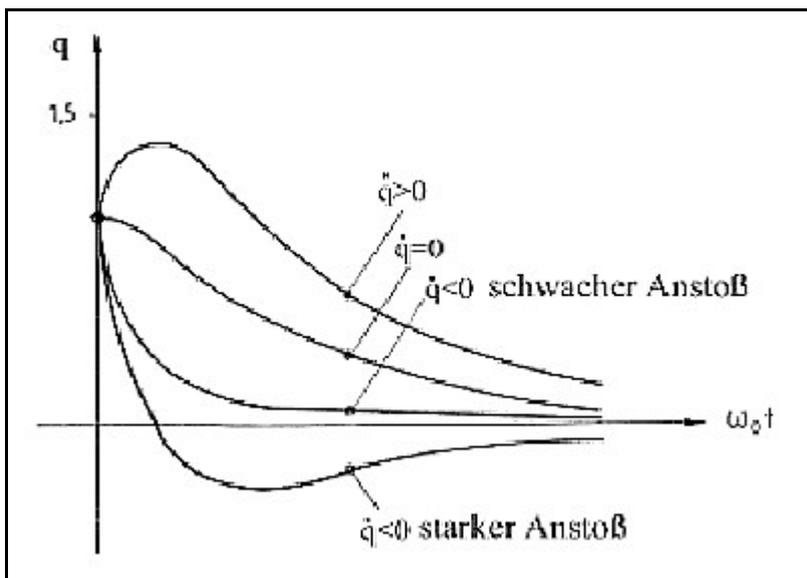


Bild 4: Schwingungsverlauf für starke Dämpfung in Abhängigkeit der Anfangsgeschwindigkeit (vgl. [TMI])

Falls gilt $d = w_0$, so wird $k = 0$ und daraus folgt dann

$$I_1 = I_2 = I = -d.$$

Setzt man dieses nun in die charakteristische Gleichung, so erhält man eine Differentialgleichung, die mit der Methode „Variation der Konstanten“ gelöst werden kann.

Die Allgemeine Lösung lautet dann:

$$q(t) = e^{-d \cdot t} (K_1 \cdot t + K_2) \quad (2.33)$$

Durch Differenzierung und Einsetzen der Randbedingungen ergibt sich für

$$K_1 = \mathbf{d} \cdot q_0 + \dot{q}_0 \quad \text{und} \quad K_2 = q_0 \quad (2.34, 2.35)$$

Setzt man diese nun ein, so lautet das Bewegungsgesetz wie folgt:

$$q(t) = e^{-d \cdot t} [q_0 \cdot (1 + \mathbf{d} \cdot t) + \dot{q}_0 \cdot t] \quad (2.36)$$

Wenn nun $J = 1$ ist, so wird die Schwingung von Kriechvorgängen getrennt.

Dies wird als kritische Dämpfung bezeichnet.

Für $d < w_0$ wird k imaginär.

Es wird gesetzt:

$$w_d^2 = -k^2 = w_0^2 - d^2 = w_0^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{w_0} \right)^2 \right] = w_0^2 \cdot (1 - J^2) \quad (2.37)$$

$$I_{1,2} = -d \pm j \cdot \sqrt{w_0^2 - d^2} = -d \pm j \cdot w_d \quad (2.38)$$

Damit lautet die allgemeine Lösung:

$$q(t) = e^{-d \cdot t} (C_1 \cdot e^{jw_d t} + C_2 \cdot e^{-jw_d t}) \quad (2.39)$$

Ein Umformen mit der Euler-Relation

$$e^{jw_d t} = \cos w_d \cdot t + j \sin w_d \cdot t \quad \text{und} \quad e^{-jw_d t} = \cos w_d \cdot t - j \sin w_d \cdot t \quad (2.40, 2.41)$$

ergibt dann

$$q(t) = A e^{-d \cdot t} \cdot \sin(w_d \cdot t + r) \quad (2.42)$$

$$\text{mit } A = \sqrt{q_0^2 + \frac{(q_0^2 + \mathbf{d} \cdot q_0)^2}{w_0^2}} \quad \text{und} \quad r = \arcsin \frac{q_0}{A} \quad (2.43, 2.44)$$

Die Amplitude der Schwingung wird dabei mit dem Faktor $e^{-d \cdot t}$ gedämpft.

Die Amplituden, die im Verlauf der Zeit abnehmen, werden mit dem Index **E** gekennzeichnet, und haben den Betrag:

$$q_E = \pm q_0 \cdot e^{\frac{d}{w_d} \cdot n} \quad \text{wobei } n \in N \text{ gilt.} \quad (2.45)$$

Das Ausklingen der Bewegung ist bei $d > 0$ für $t \rightarrow \infty$ genauso wie beim Kriechen oder bei der kritischen Dämpfung. Als einziger Unterschied sei bemerkt, dass sich in diesem Fall die Amplitude dem Nullpunkt oszillierend annähert.

Als logarithmisches Dämpfungsdekret wird der natürliche Logarithmus des Quotienten zweier aufeinanderfolgender Maxima der gedämpften Schwingungsfunktion $q(t)$ genommen.

$$A = \ln \frac{q(t)}{q(t+T)} = \frac{e^{-d \cdot t}}{e^{-d \cdot (t+T)}} = d \cdot T \quad (2.46)$$

t ist die zu einem Maximum gehörige Zeit

T ist die Schwingungsdauer

Soll nun das logarithmische Dekrement aus mehreren Perioden bestimmt werden, so gilt:

$$A = \frac{1}{n} \ln \frac{q(t)}{q(t+nT)} \quad \text{für } n \in \mathbb{N} \quad (2.47)$$

2.3 Erzwungene Schwingungen (Fremderregung)

In der Regel ist es so, dass ein System durch äußere Einflüsse zu Schwingungen ange-regt wird. Diese Schwingungen sind es dann auch, die bei ganz bestimmten Begebenheiten zur Zerstörung des Systems führen können. Nachfolgend einige Beispiele aus den alltäglichen Bereichen des Maschinenbaus die zu Schwingungen führen:

- Unwuchten an Wellen
- Unregelmäßigkeiten an Oberflächen, die überfahren werden
- Slip-Stick-Effekte bei gleitenden Bewegungen
- Lagerschäden bzw. Lagerfehler
- Getriebe (Sogenannte Zahneingriffstöße)
- schlecht entkoppelte Netzteile können auch eine Schwingung in ein Maschinensystem einbringen (zumeist mit Netzfrequenz)
- verschiedene weitere Möglichkeiten
- Schneideneingriff bei spanender Bearbeitung (hier von Interesse)

2.3.1 Erzwungene Schwingungen in Systemen mit einem Freiheitsgrad

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal in der Schwingungstechnik ist die Art der Schwingungserregung. Dieses gilt sowohl für die mathematische Grundlage der Berechnung, als auch für die Einwirkung der Erregung auf das Modell.

Bei erzwungenen Schwingungen wirken ständig periodische Kräfte oder Momente auf das schwingungsfähige System, so dass die Schwingungen solange andauern, wie die Erregung andauert. Die Erregung selber kann dabei auf verschiedene Arten wirken, bzw. an verschiedenen Punkten im System angreifen, wie zum Beispiel an der Feder, dem Dämpfer oder der Masse.

Die allgemeine Form der inhomogenen Differentialgleichung lautet:

$$m \cdot \ddot{q} + d \cdot \dot{q} + c \cdot q = f(t) \quad (2.48)$$

Hier nun die vier häufigsten Arten des Feder-Masse-Schwingers bei harmonischen Schwingungen:

Die Krafterregung (2.49):

$$f(t) = \hat{F} \cdot \sin(\Omega t) = \hat{u} \cdot w_0^2 \cdot \sin(\Omega t)$$

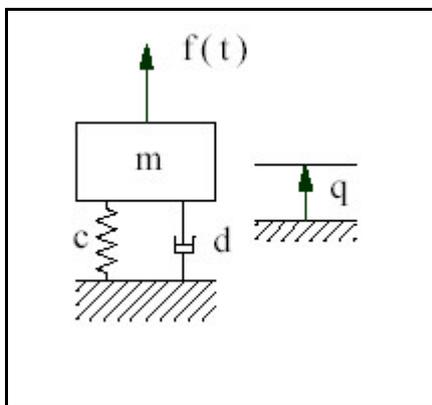


Bild 5: Krafterregung (vgl.[TMI])

Die Unwuchterregung (2.50):

$$f(t) = \frac{m_1}{m_2} r \cdot \Omega^2 \cdot \sin(\Omega t) = \hat{u} \cdot \Omega^2 \cdot \sin(\Omega t)$$

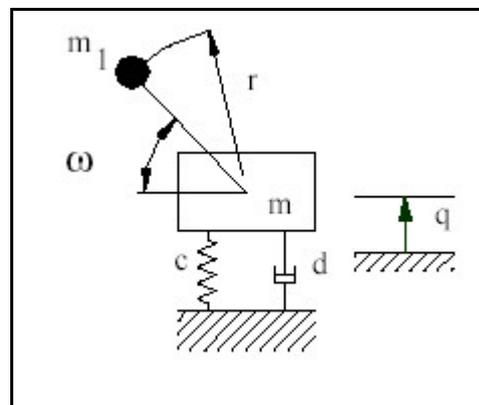


Bild 6: Unwuchterregung (vgl.[TMI])

$$\text{mit } \hat{u} = \frac{m_1}{m + m_1} \cdot r$$

Die Federkrafterregung (2.51):

$$f(t) = c_1 \cdot \hat{u} \cdot \sin(\Omega t)$$

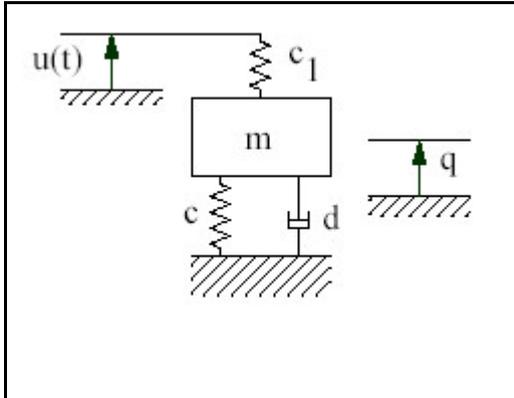


Bild 7: Federkrafterregung (vgl.[TMI])

Die Stützerregung (2.52):

$$f(t) = [c \cdot \sin(\Omega t) + d \cdot \cos(\Omega t)] \cdot \hat{u}$$

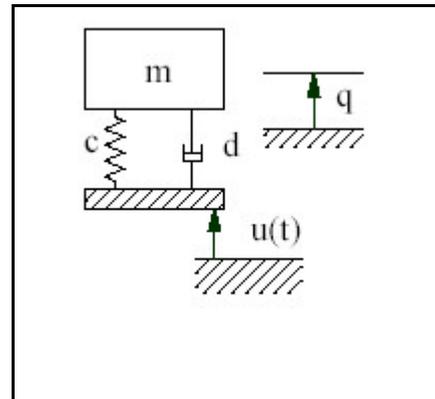


Bild 8: Stützerregung (vgl.[TMI])

Durch Umformen und Einsetzen des Dämpfungsgrades können die Differentialgleichungen auch wie im folgenden geschrieben werden.

Hier nun ein Beispiel für die Kräfteerregung:

$$\ddot{q} + 2 \cdot J \cdot w_0 \cdot \dot{q} + w_0^2 \cdot q = \frac{\hat{F}}{m} \sin(\Omega t) \quad (2.53)$$

mit $\frac{1}{m} = \frac{w_0^2}{c}$ und $q_k = \frac{\hat{F}}{c}$ folgt daraus:

$$\ddot{q} + 2 \cdot J \cdot w_0 \cdot \dot{q} + w_0^2 \cdot q = q_k \cdot w_0^2 \sin(\Omega t) \quad (2.54)$$

Der homogene Teil der Differentialgleichung, der nur die Einschwingzeit betrachtet, wurde bereits vorher gelöst. Da er verschwindet, ist nur der partikuläre Anteil von Interesse. Zur Lösung wird nun folgender Ansatz gewählt:

$$q_p = \hat{q}_0 \cdot e^{j(\Omega t - r)} \quad (2.55)$$

Nach Einsetzen in die Differentialgleichung und der exponentiellen Schreibweise der Störfunktion ergibt sich dann folgende Gleichung:

$$\hat{q} \cdot (1 + 2 \cdot J \cdot w_0 \cdot \Omega \cdot j - \Omega^2) \cdot e^{j(\Omega t - r)} \quad (2.56)$$

Durch Umformen erhalten wir

$$\hat{q} \cdot (1 + 2 \cdot J \cdot h \cdot j - h^2) = \hat{q}_k \cdot e^r = \hat{q}_k \cdot (\cos r + j \cdot \sin r) \quad (2.57)$$

Trennt man nun den Real- und den Imaginärteil, so erhält man:

für den Realanteil:

$$\boxed{(1 - \mathbf{h}^2) \cdot \hat{q} = \hat{q}_k \cdot \cos \mathbf{r}} \quad (2.58)$$

für den Imaginäranteil:

$$\boxed{2 \cdot \mathbf{J} \cdot \mathbf{h} \cdot \hat{q} = \hat{q}_k \cdot \sin \mathbf{r}} \quad (2.59)$$

Aus dem Betrag des Real- und Imaginäranteiles erhält man die sogenannte Vergrößerungsfunktion, die in der Literatur auch oft als Übertragungsfunktion bezeichnet wird.

Sie gibt an, wie stark sich die Schwingungsamplitude gegenüber der Erregungsamplitude in Abhängigkeit mit dem Abstimmungsverhältnis \mathbf{r} ändert.

$$\boxed{V = \frac{\hat{q}}{q_k} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \mathbf{h}^2)^2 + (2\mathbf{J}\mathbf{h})^2}}} \quad (2.60)$$

Für die Vergrößerung gilt:

$$\boxed{V = \frac{A}{\sqrt{(1 - \mathbf{h}^2)^2 + (2\mathbf{J}\mathbf{h})^2}}} \quad (2.61)$$

A ist hier die Erregungsart:

1	für Krafterregung
1	für Federerregung
\mathbf{h}^2	für Unwuchterregung
$\sqrt{1 + (2 \cdot \mathbf{J} \cdot \mathbf{h})^2}$	für Stützererregung

In nachfolgender Graphik ist die Vergrößerungsfunktion für Unwuchterregung bei verschiedenen Abstimmungsverhältnissen aufgetragen.

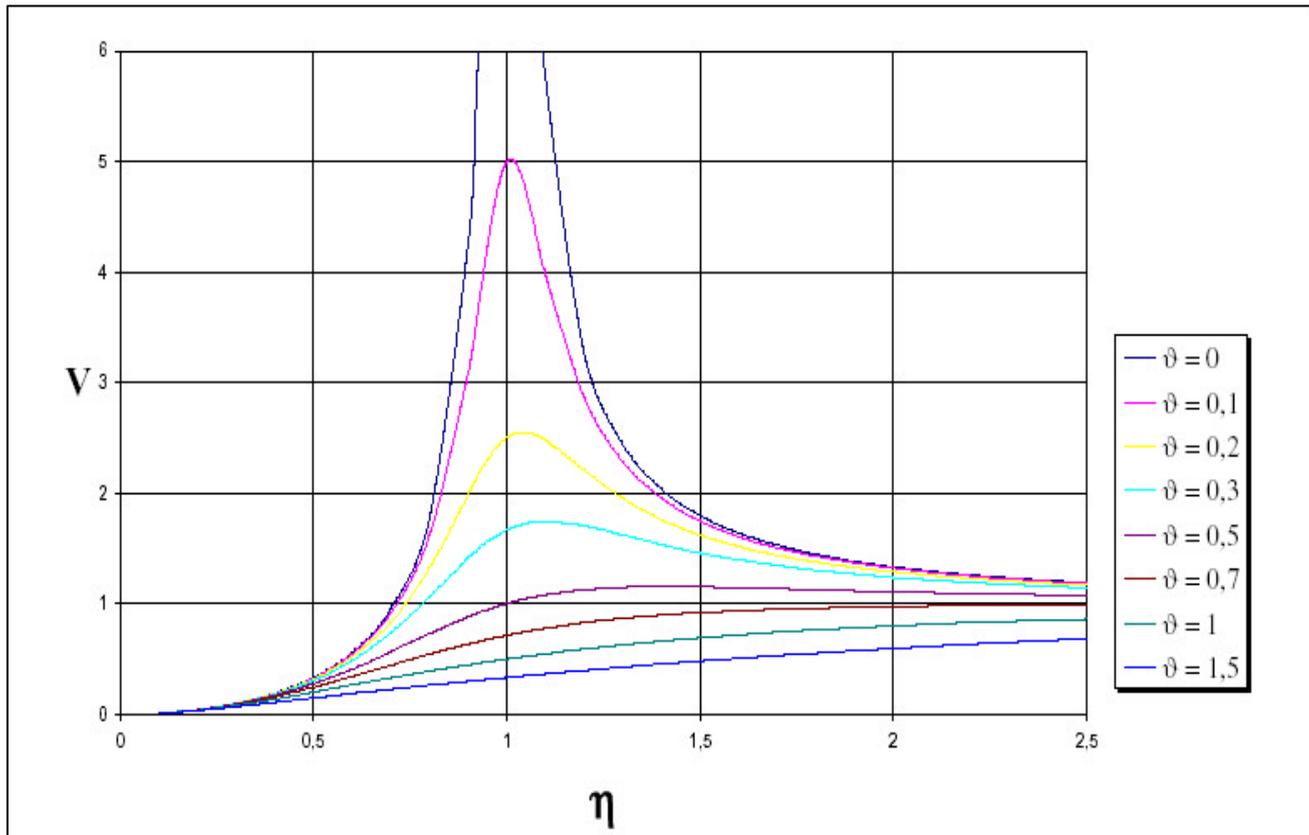


Bild 9: Vergrößerungsfunktion für Unwuchterregung (nach [TMI])

Für kleine Dämpfungen liegen die Maxima in der Nähe von $h = 1$ ($w_0 = \Omega$). Liegt dieses Abstimmungsverhältnis vor, so spricht man von Resonanz. Wird nun die Dämpfung immer kleiner, so werden die Amplituden immer größer bis zur Unendlichkeit.

Ist $h < 1$ so nennt man es unterkritische Erregung oder man spricht von einem hochabgestimmten Schwinger. Ist $h > 1$ so nennt man es überkritische Erregung, oder einen tiefabgestimmten Schwinger.

Stimmt die Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz überein, und die Dämpfung tendiert gegen null, so spricht man auch von einer Resonanzkatastrophe. Hierbei wird der Resonator in jeder Periode so mit Energie versorgt, dass die Amplitude immer weiter steigt.

Es wird dann ein Punkt erreicht, an dem sich der innere Zusammenhalt des Systems vollkommen auflöst.

Ein Beispiel für solch eine Resonanzkatastrophe ist die Tacoma Narrows Bridge in der Nähe der US-amerikanischen Stadt Washington, die im Jahre 1940 zerstört wurde.

Dieser Brücke wurde von Wind derart umströmt, dass sich eine Kármán'sche Wirbelstrasse bildete. Die Frequenz der Strömungsablösungen stimmte unglücklicherweise mit der Eigenfrequenz der Brücke überein, so dass sich diese „aufschaukelte“ und dadurch

zerstört wurde..

Die Nachrichten berichteten damals von „der Brücke, die sich selber in den Tod tanzte“
, von „The bridge that danced itself to death“.

Nachfolgend noch einige Bilder dieser Resonanzkatastrophe (Die Pfeile markieren die sichtbaren Schwingungen der Brücke.)

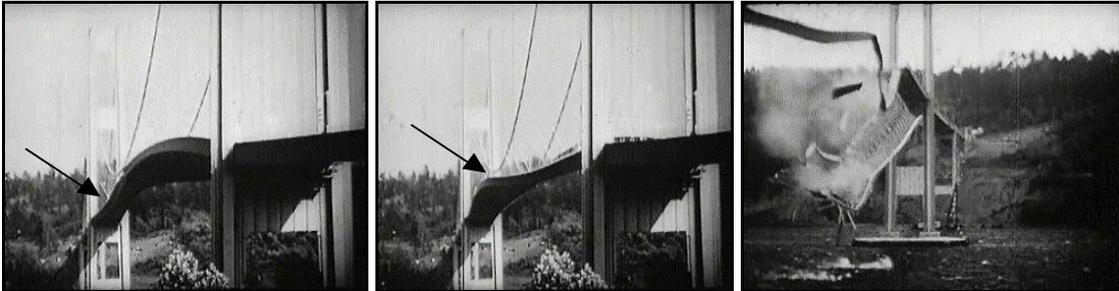


Bild 10: Einsturz der „Tacoma Narrow Bridge“ aufgrund einer Resonanzkatastrophe (vgl. [STA])

Doch auch wenn die Dämpfung nicht gleich null ist, so sollte nach Möglichkeit der Bereich (Erregerfrequenz = Eigenfrequenz) umgangen werden, da hier eine erhöhte Beanspruchung der Materialien zu vorzeitigen Abnutzungserscheinungen führen kann.

Der Phasenwinkel kann mit Hilfe von Real- und Imaginärteil bestimmt werden:

$$\boxed{\tan r = \frac{\text{Im}}{\text{Re}}} \quad (2.62)$$

Erregungsart	?
Krafterregung	$\arctan \frac{2 \cdot J \cdot h}{1 - h^2}$
Unwuchterregung	$\arctan \frac{2 \cdot J \cdot h}{1 - h^2}$
Federerregung	$\arctan \frac{2 \cdot J \cdot h}{1 - h^2}$
Stützererregung	$\arctan \frac{2 \cdot J \cdot h^3}{1 - h^2 + 4 \cdot J \cdot h^2}$

Abschließend noch die markanten Fälle:

$$1. \Omega \ll \omega_0; \mathbf{h} \approx 0; V = 1; \tan \mathbf{j} \approx 0; \mathbf{j} \approx 0^\circ$$

Die Masse schwingt mit der Eigenfrequenz in Phase und hat die gleiche Amplitude

$$2. \Omega = \omega_0; \mathbf{h} = 1; V = \frac{1}{2\mathbf{J}}; \tan \mathbf{j} \rightarrow \pm\infty; \mathbf{j} = 90^\circ$$

Je kleiner die Dämpfung wird, desto größer wird die Vergrößerung. Es kommt zur Resonanzkatastrophe bei einer Phasenverschiebung von 90°

$$3. \Omega \gg \omega_0; \mathbf{h} \rightarrow \infty; \lim_{h \rightarrow \infty} V = 0; \tan \mathbf{j} = \lim_{h \rightarrow \infty} \frac{2\mathbf{J}}{1 - \mathbf{h}^2}; \mathbf{j} = 180^\circ$$

Dies ist wichtig für Systeme, die gedämpft werden sollen. Ist die Erregung sehr viel größer als die Eigenfrequenz, so strebt die Vergrößerungsfunktion gegen Null; das heißt, dass das System nicht mehr weiter stimuliert wird und die Ausschläge wieder geringer werden. Erstrebenswert ist demzufolge eine Phasenverschiebung von 180° .

Wenn nun die betrachteten Vorgänge nicht linear sondern Torsionsvorgänge sind, so müssen Schwingungswege (q) durch Schwingungswinkel, Massen durch Massenträgheitsmomente, Dämpferkonstanten durch Drehdämpferkonstanten, Federsteifigkeiten durch Drehfedersteifigkeiten und Erregerkräfte durch Erregermomente ausgetauscht werden. Ansonsten ist aber keine Veränderung in den Differentialgleichungen durchzuführen, und so dass sie ihre Gültigkeit behalten.

2.4 Systeme mit mehreren Freiheitsgraden

2.4.1 Freie Schwingungen in einem ungedämpften System mit mehreren Freiheitsgraden

Von einem System mit mehreren Freiheitsgraden spricht man, wenn mehrere Bewegungsgleichungen nötig sind, um das System zu bestimmen.

Das bedeutet, dass für jeden Freiheitsgrad eine Schwingungsgleichung benötigt wird. Als Beispiel eines einfachen Schwingensystems mit mehreren Freiheitsgraden ist in **Bild 12** ein Zwei-Massen-System abgebildet.

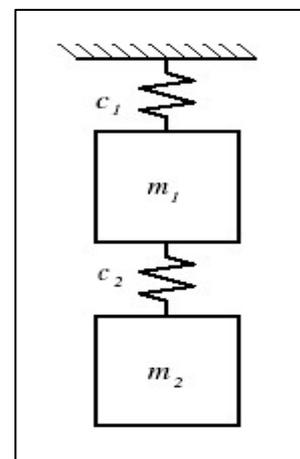


Bild 12: Zwei-Massen-Schwinger (vgl. [MAD])

Bei dieser Art der Schwingung spricht man auch von gekoppelten Schwingungen, da die Schwingungen sich gegenseitig beeinflussen.

$$\sum_{k=1}^i m_{ik} \cdot \ddot{q}_k + \sum_{k=1}^i c_{ik} \cdot q_k = 0 \quad (2.63)$$

oder in Matrixschreibweise:

$$M \cdot \ddot{q} + C \cdot q = 0 \quad (2.64)$$

M steht hierbei für die Massenmatrix und C für die Steifigkeitsmatrix

Mit Hilfe des Lösungsansatzes

$$q_i(t) = \sum_{k=1}^i \vec{X}_{ki} \cdot e^{I t} \quad (2.65)$$

können die Differentialgleichungen gelöst werden.

Nach dem Differenzieren und Einsetzen ergibt sich dann:

$$\left(C - \omega_0^2 \cdot M \right) \cdot \vec{X} \quad \text{mit} \quad \omega_0^2 = I \quad (2.66)$$

Da die Amplitude $\vec{X} \neq 0$ ist, muss die Determinante = 0 sein.

$$\det(C - \omega_0^2 \cdot M) = 0 \quad (2.67)$$

Daraus erhält man ein Polynom n-ten Grades, welches sowohl reelle, als auch komplexe Lösungen enthält. Die Koppelkreisfrequenzen lauten dann:

$$\omega_{0k} = \sqrt{I_k} \quad (2.68)$$

Die allgemeine Differentialgleichung, die sich aus den einzelnen DGL zusammensetzt lautet somit:

$$q(t) = \sum_{k=1}^i C_k \cdot \vec{X} \cdot \sin(\omega_{0k} \cdot t - \Psi_k) \quad (2.69)$$

Wobei hier Ψ_k die Auslenkung des Winkels ist.

2.4.2 Freie Schwingung in einem gedämpften System mit mehreren Freiheitsgraden

Genau wie bei den ungedämpften Systemen mit mehreren Freiheitsgraden benötigt man auch hier eine Anzahl von Gleichungen, die gleich groß ist der Anzahl der Freiheitsgrade.

Ergänzt werden muss bei diesen Differentialgleichungen noch die Dämpfung, so dass sich folgende Gleichung ergibt:

$$\sum_{k=1}^i m_{ik} \cdot \ddot{q}_k + \sum_{k=i}^i d_{ik} \cdot \dot{q}_k + \sum_{k=1}^i c_{ik} \cdot q_k = 0 \quad (2.70)$$

oder in Matrixschreibweise:

$$M \cdot \ddot{q} + D \cdot \dot{q} + C \cdot q = 0 \quad (2.71)$$

M steht für die Massenmatrix

D steht für die Dämpfungsmatrix

C steht für die Steifigkeitsmatrix

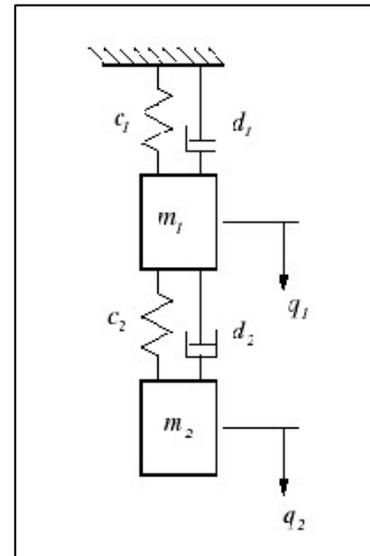


Bild 12: Gedämpftes Zwei-Massen

Schwingsystem (vgl. [MAD])

Mit Hilfe des Lösungsansatzes

$$q(t) = \vec{X} \cdot e^{j\omega t} \quad \text{mit} \quad \vec{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^T \quad (2.72)$$

können diese Differentialgleichungen gelöst werden.

Durch Differenzieren und Einsetzen folgt daraus

$$(M\omega^2 + D\omega + C) \cdot \vec{X} = 0 \quad (2.73)$$

Wie bei den ungedämpften Schwingungen muss auch hier die Determinante gleich Null sein.

$$\det(M\omega^2 + D\omega + C) = 0 \quad (2.74)$$

Durch Auflösen der Determinante erhält man ein Gleichungssystem, mit dessen Hilfe dann die Eigenwerte, bzw. die Koppelkreisfrequenzen berechnet werden können.

Hierbei kommt es sowohl zu reellen als auch zu komplexen Ergebnissen.

Die allgemeine Lösung lautet:

$$1. \text{ Reell} \quad q(t) = \sum_{k=1}^{2n} C_k \cdot A^k \cdot e^{I_k t} \quad \text{mit} \quad C_k = \text{konstant} \quad (2.75)$$

$$\text{2.komplex: } \boxed{q(t) = \sum_{k=1}^{2n} \bar{C}_k \cdot A^k \cdot e^{I_k t} + C_k \cdot \bar{A}^k \cdot e^{\bar{I}_k t}} \quad (2.76)$$

mit \bar{C}_k und C_k als konjugiert komplexe Konstanten.

2.4.3 Erzwungene Schwingung in einem gedämpften System mit mehreren Freiheitsgraden

Wird das System aus 2.4.2 zusätzlich um ein Störglied $f(t)$ erweitert, so erhält man folgende Differentialgleichung:

$$\boxed{\sum_{k=1}^i m_{ik} \cdot \ddot{q}_k + \sum_{k=1}^i d_{ik} \cdot \dot{q}_k + \sum_{k=1}^i c_{ik} \cdot q_k = \sum_{k=1}^i f_k(t)} \quad (2.77)$$

In Matrixschreibweise sieht die Formel entsprechend so aus:

$$\boxed{M \cdot \ddot{q} + C \cdot \dot{q} = F(t)} \quad (2.78)$$

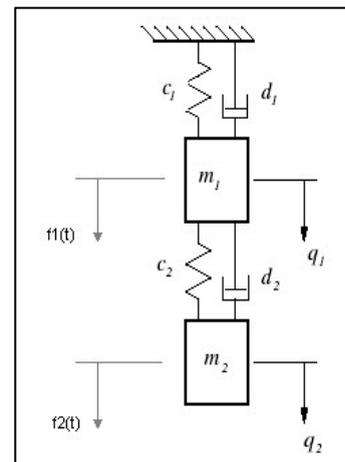


Bild 13: Gedämpftes Zwei-Massen Schwingsystem (vgl. [MAD])

Mit $F(t) = [F_1, F_2, F_3, \dots, F_n]^T$

Die Lösung dieser inhomogenen Differentialgleichung setzt sich aus einem homogenen Teil und der Partikularlösung der inhomogenen Differentialgleichung zusammen:

$$\vec{q}(t) = \vec{q}_h(t) + \vec{q}_n(t)$$

Die Lösung der homogenen Differentialgleichung wurde bereits in einem vorherigen Kapitel besprochen.

Für die Störfunktion gibt es sowohl eine reelle als auch eine komplexe Schreibweise:

Die komplexe Schreibweise:

$$\boxed{\vec{F}(t) = \vec{g} \cdot e^{j\omega t}} \quad (2.79)$$

Die partikuläre Lösung:

$$\boxed{\vec{q}(t) = \vec{a} \cdot e^{j\Omega t}} \quad (2.80)$$

Durch Differenzieren und Einsetzen erhält man:

$$(-\Omega \cdot M + j\Omega D + C) \cdot \vec{a} = \vec{g}$$

Die Lösung der Differentialgleichung lautet also:

$$\boxed{\vec{q}(t) = \vec{a} \cdot e^{j\Omega t} = (-\Omega \cdot M + j\Omega D + C)^{-1} \cdot \vec{g} \cdot e^{j\Omega t}} \quad (2.81)$$

3 Töne (Akustische Schwingungen)

3.1 Entstehung von Schall

Schall ist im Prinzip nichts anderes, als die Dichte- oder Druckschwankung eines Mediums (zumeist ein Gas oder ein Fluid).

Erzeugt werden solche Schwingungen auf vielfältige Weise.

Wie zum Beispiel:

- in Musikinstrumenten werden oft Luftsäulen (z.B. bei Kirchenorgeln) zu Schwingungen angeregt, die durch Öffnungen aus dem Musikinstrument austreten können, und sich dort dann in der Luft ausbreiten. Diese Schwingungen nehmen die Menschen als einzelne Töne wahr.
- Maschinen fangen an, zu schwingen, wenn sie in Betrieb sind. Diese Schwingungen der Maschinen übertragen sich auf die Luftmoleküle, die ebenfalls zu schwingen anfangen, und dann als Schall an unsere Ohren gelangen.
- ein Lautsprecher beruht auf dem Prinzip, dass eine Membran durch elektrische Impulse in Schwingungen versetzt wird, und diese dann an die Luftmoleküle übertragen wird, so dass der Mensch sie wahrnehmen kann.

Wie auch immer Schall erzeugt wird, so ist es doch fast immer die Luft, welche die Schwingungen an das Ohr überträgt.

3.1.1 Die Wahrnehmung eines Tones

Geraten nun diese Luftschwingungen an ein funktionierendes, menschliches Ohr, so nimmt der dazugehörige Mensch diese Schwingungen als Schall wahr.

Bis es soweit kommt, legen die Schwingungen allerdings noch eine gewisse Strecke durch verschiedene Stationen im Ohr zurück.

Eingeteilt wird das Ohr in drei Teile:

- das Außenohr
- das Mittelohr
- das Innenohr

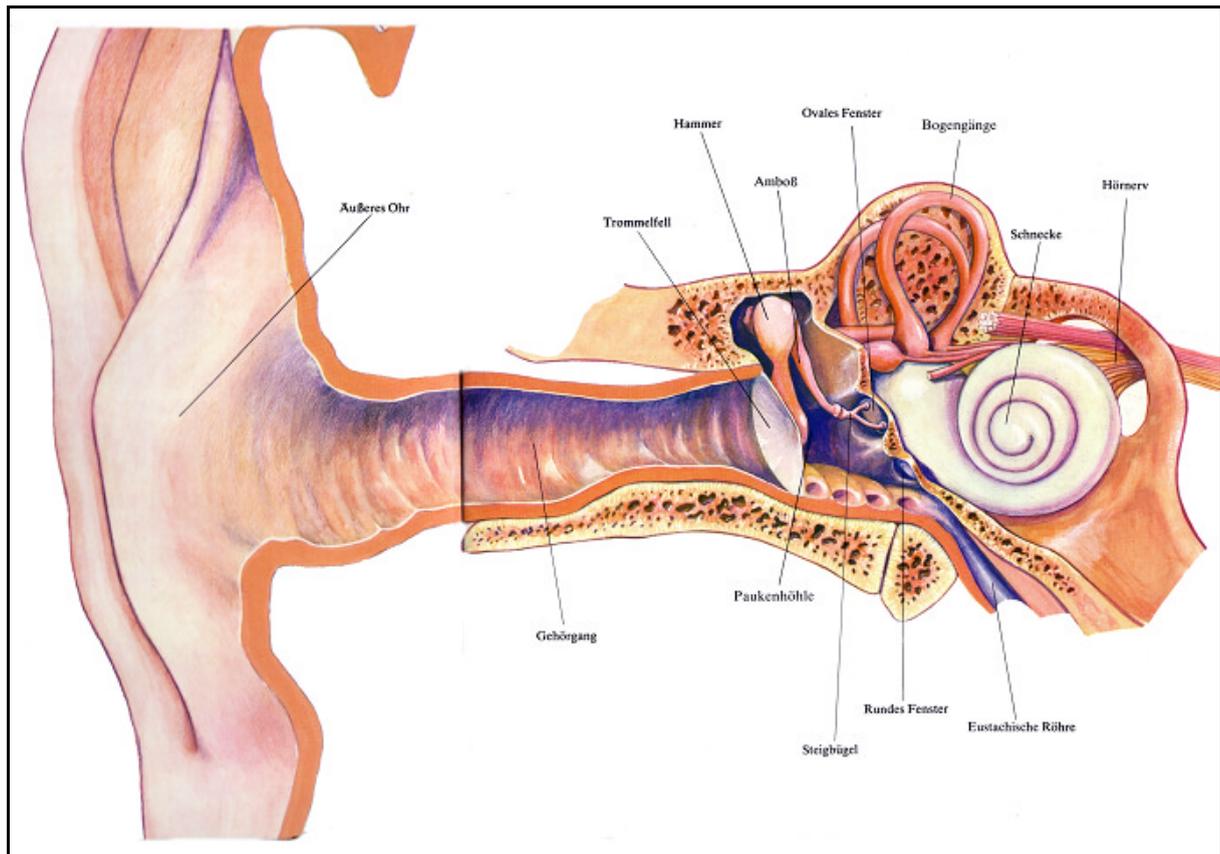


Bild 14: Aufbau des menschlichen Ohres (vgl. [BIL])

Das Außenohr umfasst den Bereich der Ohrmuschel und des Gehörganges, während das anschließende Trommelfell das Außen- vom Mittelohr trennt. Die Luftschwingungen werden von der Ohrmuschel in den Gehörgang geleitet. Dort treffen sie auf das Trommelfell (Membrana tympani), welches dadurch in Schwingung versetzt wird.

An das Trommelfell schließt sich auf der Innenseite ein Hohlraum an, der mit Luft gefüllt ist, und Paukenhöhle (Cavum tympani) genannt wird. Diese Paukenhöhle besitzt zum Druckausgleich eine Verbindung zur Rachenhöhle (Eustachische Röhre).

Direkt an das Trommelfell angewachsen befindet sich ein Knochen, der sogenannte Hammer (malleus). Dieser ist mit einem weiteren Knochen verbunden, dem Amboss (Incus). Der Amboss ist mit dem sogenannten Steigbügel (Stapes) verbunden, der auf der anderen Seite an das eigentliche Hörorgan angewachsen ist. Diese Knochen sind jedoch im Mittelohr frei beweglich an Muskeln aufgehängt, um die Übertragung von zu starken Schwingungen in einem bestimmten Rahmen zu dämpfen.

Über die Hörknöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel werden die Schwingungen an das Hörorgan im Innenohr übertragen.

Im Hörorgan, das aus der sogenannten Schnecke (Cochlea, dem eigentlichen Hörorgan) und drei sogenannten Bogengängen (canalis semicircularis, horizontaler Bogengang, oberer Bogengang und hinterer Bogengang), die für den Gleichgewichtssinn des Menschen zuständig sind, werden die Schwingungen vom „Steigbügel“ an einen Bereich des Hörorgans, das „ovale Fenster“ genannt wird, übertragen.

Das Hörorgan ist mit Lymphflüssigkeit gefüllt, die durch das „ovale Fenster“ in Schwingungen versetzt werden kann.

Diese schwingende Flüssigkeit bewegt sich nun in der Schnecke des Hörorgans, wo feinste Härchen durch die Bewegung gereizt werden, und dadurch elektrische Reize über den Hörnerv an das Gehirn senden, welches wiederum aus diesen Signale „Töne“ macht, bzw. eine Wahrnehmung ermöglicht.

Der Frequenzgang eines gesunden, menschlichen Gehörs liegt bei etwa 20-16.000 Hertz (Hz). Den Bereich unterhalb dieser Frequenzen nennt man „Infraschall“ („infra“ = unterhalb von), den darüber „Ultraschall“ („ultra“ = oberhalb von)

Überträgt man Schwingungen direkt über den Schädelknochen an das Hörorgan, so nimmt dieses die Schwingungen ebenfalls wahr, als seien sie durch den Weg Außenohr-Mittelohr ans Innenohr übertragen worden

3.2 Messgrößen und Pegel

3.2.1 Messungen im Luftschall

Wenn der Luftschall gemessen werden soll, so werden hierfür Mikrofone verwendet, mit deren Hilfe man den Schalldruck misst.

Allerdings werden für gewöhnlich nicht die reinen physikalischen Größen des Schalls selber sondern ein Pegel gemessen, da nach dem Weber-Fechner-Gesetz die menschliche Wahrnehmung in bezug auf den Schall logarithmisch ist.

Der Schalldruckpegel ist definiert als:

$$L_p = 10 \cdot \lg \frac{p_{eff}^2}{p_0^2} = 20 \cdot \lg \frac{p_{eff}}{p_0} \quad (3.1)$$

L_p ist hier der Schalldruckpegel

p_{eff} ist der Effektivwert des Druckes

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T p^2(t) dt} \quad (3.2)$$

$$p_0 \text{ ist der Referenzdruck } p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \frac{N}{m^2} \quad (3.3)$$

Dieser Referenzdruck ist international genormt.

Vom Menschen können in etwa Schalldrücke von $p_{eff} = p_0$ (Hörschwelle) bis zu einem

p_{eff} von etwa $p_{eff} = 200 \frac{N}{m^2}$ (Schmerzgrenze) wahrgenommen werden.

Die „Einheit“ für die Pegel wird mit „Dezibel“ [dB] angegeben, wobei die Bezeichnung „Einheit“ irreführend ist, handelt es sich doch nicht wirklich um eine Einheit, sondern um eine dimensionslose Größe.

Dabei ist es jedoch egal, ob der Pegel nun aus Schalldrücken (Schalldruckpegel) oder der Schallleistung (Schallleistungspegel) gebildet wird.

Der Schallleistungspegel errechnet sich in ähnlicher Form, wie der Schalldruckpegel:

$$L_w = 10 \cdot \lg \frac{W}{W_0} \quad (3.4)$$

W ist die Schallleistung

W_0 ist der Referenzschallleistung

Möchte man die Pegel mehrerer, unzusammenhängender Schallquellen, deren Teilpegel bekannt sind, aufaddieren, um einen Gesamtpegel zu erhalten, so muss man zuerst die Teileffektivwerte zurückrechnen.

$$\frac{P_{eff}^2}{P_0^2} = 10^{\frac{L_p}{10}} \quad (3.5)$$

Nun kann man mit der folgenden Formel die Teileffektivwerte zu einem Gesamtpegel aufaddieren:

$$L_{ges} = 10 \cdot \lg \left\{ \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \right\} \quad (3.6)$$

L_{ges} ist der Gesamtpegel

L_i ist ein Teilpegel

Das nachfolgende Bild zeigt ein Diagramm, welches den Hörbereich eines durchschnittlichen Menschen darstellt. Angegeben sind in diesem Diagramm der Schalldruck, die Schallintensität, die Schallschnelle, sowie die Lautstärke in der nicht mehr gebräuchlichen Einheit Phon.

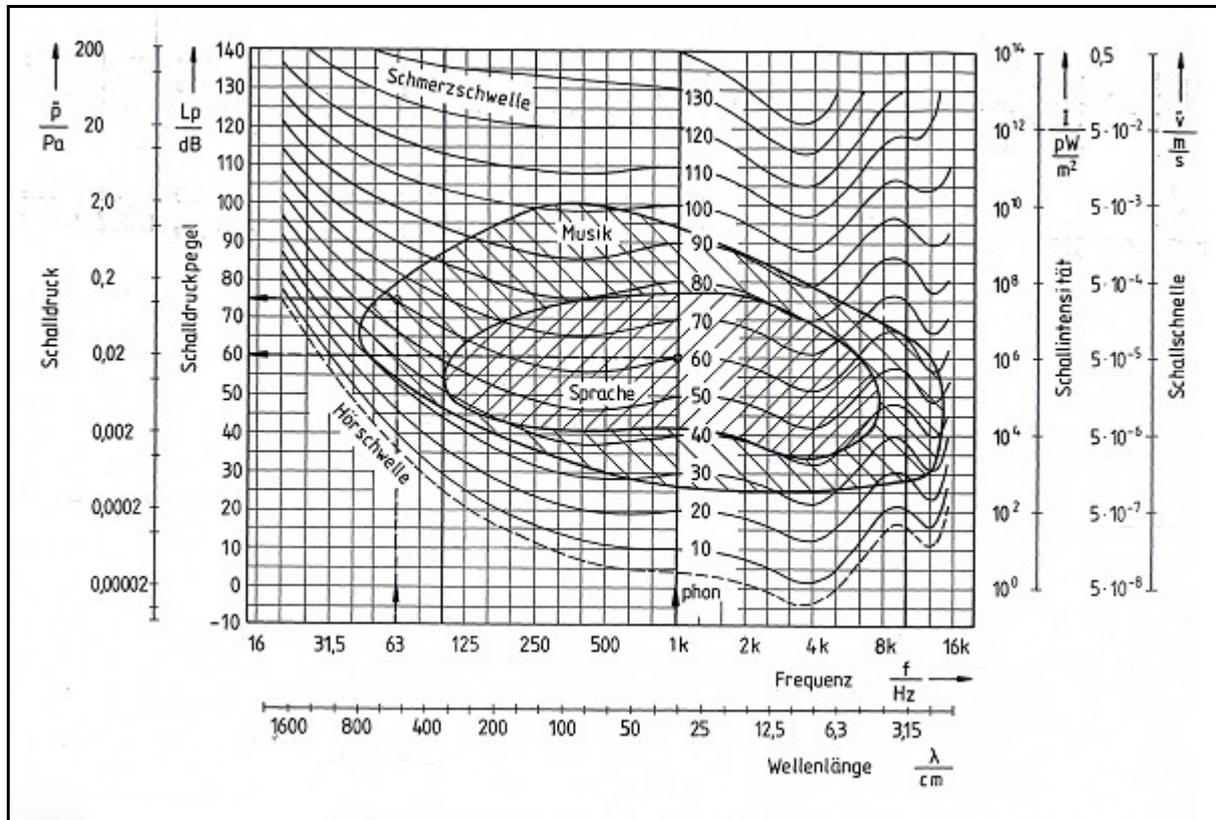


Bild 15: Normalkurve gleicher Lautstärke und Hörschwelle für Sinustöne im freien Schallfeld bei binauralen (beid-ohriges) Hören (nach Robinson und Dadson [RUD])

3.2.2 Messungen von Körperschall

Es gibt verschiedene Methoden, die mechanischen Schwingungen (Körperschall) an einem Objekt abzutasten.

Dabei unterscheidet man im groben zwei Arten der Messung:

- die Messung mit Berührung
- die berührungslose Messung

Bei der Messung mit Berührung werden zum Beispiel eine Reihe von Beschleunigungsaufnehmern am zu vermessenden Objekt angebracht. Auch Dehnmessstreifen finden hierfür Verwendung. Die Daten werden dann mit Hilfe von Messgeräten aufgezeichnet und dann ausgewertet.

Vorteil dieser Methode ist der recht günstige Preis der Messtechnik. Außerdem ist bei einem dauerhaften Einbau der Messtechnik in eine Anlage diese Technik sinnvoller.

Nachteil dabei ist allerdings, dass die Messaufnehmer verdrahtet sein müssen, um die Messdaten zur Abspeicherung und zur Auswertung zu transportieren.

Diese Methode wird daher eher bei größeren Objekten empfohlen, bei denen die Massen der Messwertaufnehmer nicht so stark die Schwingungen beeinflussen. Allerdings können mit Hilfe dieser Technik nur Messungen in einem bestimmten Rahmen der Objektgeometrie durchgeführt werden.

Eine der berührungslosen Methoden ist die Abtastung mit einem Laservibrometer.

Hierbei wird eine Reflektormarke auf den zu untersuchenden Gegenstand geklebt, und in den Fokus des Laserstrahls gebracht. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass die Masse des Objektes nur minimal verändert wird (nämlich um die Masse der Reflektormarke). Es kann jedoch bei einer entsprechend glänzenden Oberfläche sogar auf die Reflektormarke verzichtet werden.

Des Weiteren ist es möglich, auch an schwerer erreichbaren Stellen zu messen, solange ein Bereich (der nur recht klein sein muss) für den Laserstrahl freigehalten wird.

Schwingt nun der Gegenstand, so wird mittels des Laserstrahls, bzw. des Zeitunterschieds, den der gepulste Strahl für Hin- und Rückweg benötigt, ermittelt (siehe auch Kapitel 4), in wiefern der Gegenstand schwingt (Schwinggeschwindigkeit, Amplitude der Schwingung, Frequenzen der Schwingung).

Diese Schwingung wird dann als Wechselspannung am Ausgang des Laservibrometers abgegriffen und kann entsprechend (sowohl optisch, wie auch akustisch) am Computer ausgewertet werden.

In dieser Arbeit wird nach Möglichkeit eine berührungslose Abtastung angestrebt, da die Reflektormarken die Masse, und damit auch das Schwingverhalten des zu messenden Objektes, nur minimal beeinflusst, während Beschleunigungsaufnehmer oft an das Objekt angebaut werden müssen, was einen großen Einfluss auf das Schwingverhalten haben kann, und die Messelektronik nicht immer die schnellen Schwingungen aufnehmen kann.

4. Das Laservibrometer als Messgerät für mechanische Schwingungen⁴

4.1 Physikalische Vorbetrachtung für das Laservibrometer

In einem Wellenfeld, das von mehreren Wellen durchdrungen wird, kann an jedem Beobachtungspunkt P durch vektorielle Addition (entweder Überlagerung oder Superposition) der einzelnen Wellen eine resultierende Welle gebildet werden.

Hierbei wird von Interferenz gesprochen, sobald es sich bei der Überlagerung von Wellen mit der gleichen Frequenz handelt. Die Amplituden können dabei jedoch von unterschiedlicher Größe sein.

Um Interferenzerscheinungen zu erklären, werden zunächst erst einmal Schallwellen betrachtet. Am anschaulichsten ist dieses Phänomen mit Hilfe des Interferenzrohres zu erläutern. Hierbei handelt es sich um zwei posaunenartige Rohre, wovon eines

ausziehbar ist. Tritt nun eine Schallwelle bei A in das Rohr ein, so hat die Welle zwei mögliche Wege dieses zu durchlaufen.

Sind die durchlaufenden Strecken gleich lang, so haben die Wellenzüge, die am Punkt B ankommen, die gleiche Phase und verstärken sich. Wird allerdings der Weg des einen Rohres verlängert, so treffen die beiden Schallwellen mit einer Phasenverschiebung in B ein. Unter Umständen besteht sogar die Möglichkeit das sich die Schallwellen auslöschen.⁵

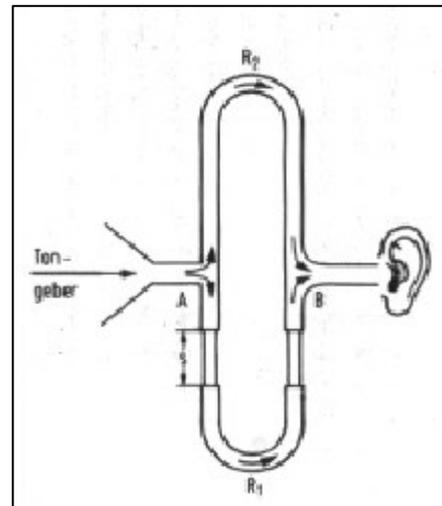


Bild 16: Interferenzrohr (vgl. [HÖF])

Diese Erkenntnisse können nun auf das Licht übertragen werden. Damit beim Licht jedoch überhaupt Interferenzerscheinungen auftreten können, müssen die beiden zur Interferenz kommenden Wellen zum einen von gleicher Frequenz und zum anderen von dem gleichen Punkt der Lichtquelle gleichzeitig ausgegangen sein. Des Weiteren darf der

⁴ [DIPf] Kapitel 2

⁵ [HÖF]

Weg, den die Wellen zurückgelegt haben, sich höchstens um die Länge eines Wellenzuges, die so genannte Kohärenzlänge, unterscheiden. ⁶

Werden nun diese Wellen überlagert, so kommt es je nach Phasenlage zu einer Verstärkung oder einer Auslöschung des Lichtes.

4.2 Der Doppler-Effekt

Bei dem Doppler-Effekt handelt es sich um eine Erscheinung, die bei jeder Art von Welle eine Änderung der Frequenz hervorruft, sobald sich Beobachter und Wellenerreger relativ zueinander bewegen. Ein Beobachter zum Beispiel, der an einer in gleichmäßiger Folge von Meereswellen überspülten Küste steht, wird bei unverändertem Standort in einer bestimmten Zeit von immer der gleichen Anzahl getroffen. Schwimmt der Beobachter den Wellen entgegen, so wird die Anzahl der ihn in der gleichen Zeit erreichenden Wellen größer. Dabei steigt die Anzahl je schneller er den Wellen entgegenschwimmt.

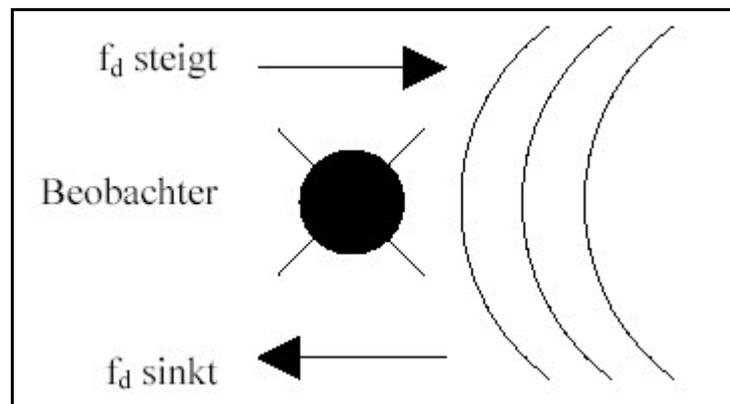


Bild 17: Das Prinzip des Doppler-Effektes (vgl. [DIPfr])

In der Akustik macht sich dieser Effekt zum Beispiel sehr deutlich bei Einsatzfahrzeugen („Martinshorn“ von Krankenwagen, Feuerwehrfahrzeugen oder Polizeiwagen) bemerkbar. Die Tonhöhen verändern sich, wenn ein Einsatzfahrzeug mit eingeschaltetem „Martinshorn“ auf uns zufährt. In dem Moment, wo das Fahrzeug sich wieder von uns entfernt, sinkt die Frequenz des Tones um einen bestimmten Betrag, der von der Geschwindigkeit des Fahrzeuges abhängig ist.

⁶ [HÖF]

Der Dopplereffekt für das Licht hängt von der Relativgeschwindigkeit v zwischen Sender und Empfänger ab. Mit der folgenden Gleichung kann die Frequenz, die der Empfänger beobachtet, ermittelt werden:

$$f_e = f_s \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} \quad (4.1)$$

mit f_s = Frequenz, die der Sender aussendet

f_e = Frequenz, die der Empfänger wahrnimmt

v = Relativgeschwindigkeit des Objektes

c = Lichtgeschwindigkeit

Ist $v > 0$, dann nähern sich Sender und Empfänger. Ist $v < 0$, dann entfernen sie sich voneinander.

Falls $v \ll c$ gilt durch eine Reihenentwicklung entstehende Näherung:

$$f_e \cong f_s \left(1 + \frac{v}{c} \right) \quad (4.2)$$

In der Astronomie wird dieser Effekt auch „Rot-“ bzw. „Blauverschiebung“ genannt, weil die Farbe des sichtbaren Lichtes sich in den roten oder blauen Bereich verschiebt, je nachdem, ob das astronomische Objekt sich auf den Beobachter zu, oder vom Beobachter wegbewegt. Das Verfahren wird verwendet, um die Bewegungsrichtung und –geschwindigkeit interstellarer Objekte in einem bestimmten Rahmen zu bestimmen.

4.3 Messprinzip des Laservibrometers

Das Messprinzip des Laservibrometers begründet sich im weitesten Sinn auf den Versuch von Michelson, mit dem dieser bewies, dass die Lichtgeschwindigkeit in einem ruhenden und in einem gleichförmig bewegten Bezugssystem nach allen Richtungen gleich ist.

Der Versuchsaufbau des Michelson-Interferometers sieht wie folgt aus:

Eine Lichtquelle erzeugt eine kohärente Welle, die an einem Strahlteiler in zwei Teilstrahlen zerlegt wird, von denen der Objektstrahl auf einen Punkt der bewegten Oberfläche trifft. Das von diesem Punkt zurückgestrahlte Licht passiert erneut den Strahlteiler und interferiert mit dem Referenzstrahl, welcher über einen Spiegel zurück zum Strahlteiler gebracht wurde. Wird nun das Messobjekt bewegt, kommt es auf Grund des Dopp-

lerefektes zu einer Modulation der Lichtintensität, die proportional der Schwinggeschwindigkeit ist.

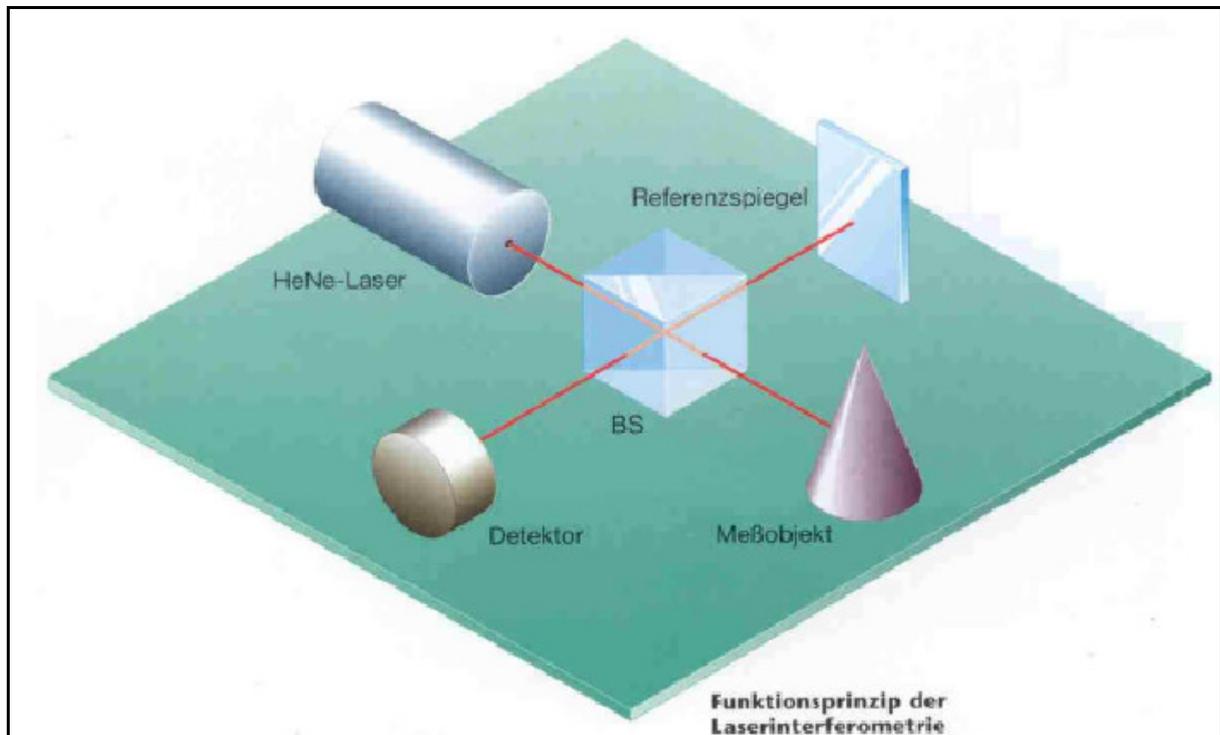


Bild 18: Prinzip des Interferometers nach Michelson (vgl. [POL])

Immer dann, wenn sich das Messobjekt um die halbe Lichtwellenlänge bewegt, durchläuft die Intensität am Detektor einen Hell-Dunkel-Zyklus. Die Änderung dieser Intensitätsschwankungen wird mit einem lichtempfindlichen Detektor in ein elektronisches Signal umgewandelt. Die Frequenz dieser Zyklen ist proportional der Geschwindigkeit v des Messobjektes und folgt der Gesetzmäßigkeit⁷:

$$f = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \quad (4.3)$$

? ist hier die Wellenlänge der Schwingung

⁷ [POL]

4.4 Technische Spezifikation des Polytec Laservibrometer

Bei dem für die Messungen benutzten Laservibrometer handelt es sich um einen Helium-Neon Laser der Firma Polytec, mit einer Wellenlänge von 633 nm und einer maximalen

Ausgangsleistung die kleiner als 1 mW ist.

Der Abstand des Vibrometers zum Messobjekt darf nicht kleiner als 266 mm und sollte nicht größer als 10 m sein (optimaler Abstand: $316 \text{ mm} + n \times 205 \text{ mm}$; $n=0,1,2\dots$). Ist das zurückgestrahlte Licht nicht ausreichend, so ist das zu messende Objekt mit einer Reflektormarke zu bekleben, um eine höhere Lichtintensität beim zurücklaufenden Strahl zu erreichen.

Das Vibrometer verfügt über einen Messkopf mit einem variablen Focus, mit dessen Hilfe es möglich ist, den Laserstrahl optimal auf das Messobjekt zu fixieren. Die Einstellung erfolgt mit Hilfe der Signalpegelanzeige am Messkopf, wobei die Länge des Balkens ein Maß für das vom Messobjekt zurückgestreute Licht ist. Am Controller befindet sich eine zweite Signalpegelanzeige (LED-Balken mit 20 Dots) wobei ein Dot ca. 1,5 dB entspricht.

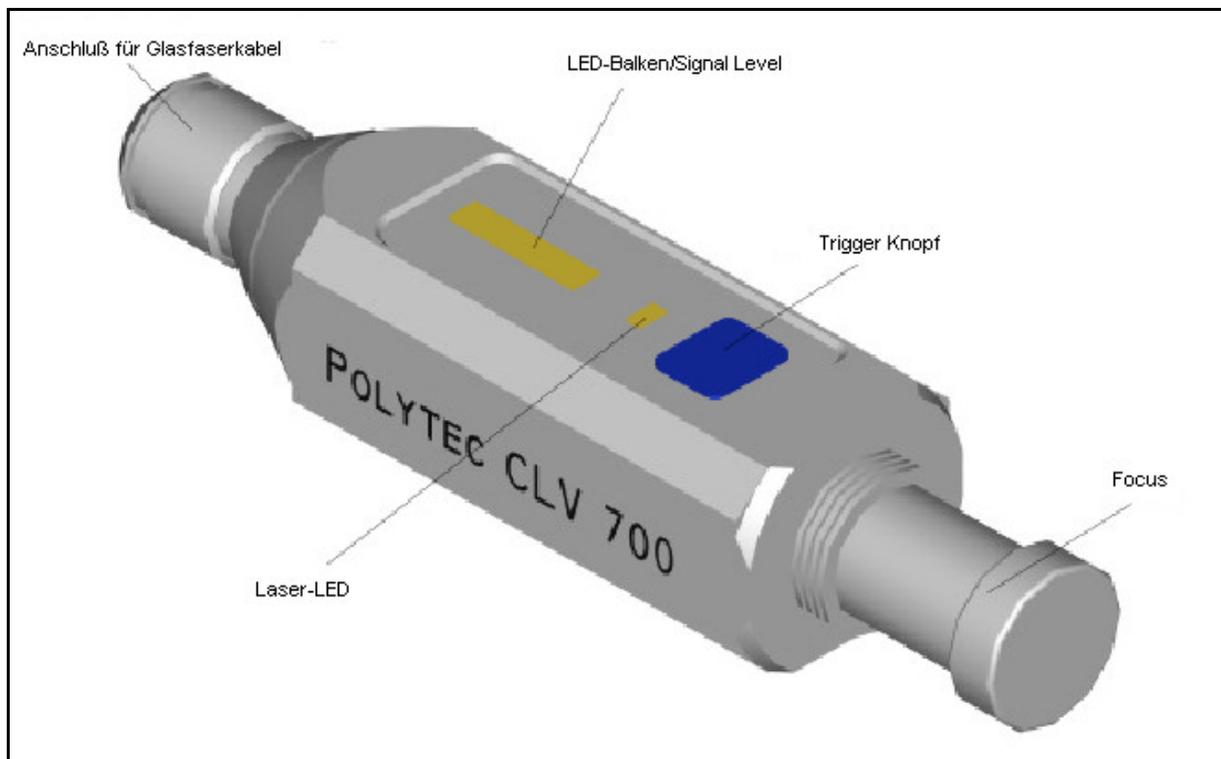


Bild 19: Laserkopf des Polytec-Laservibrometers CLV 700 (vgl. [POL])

Das Messgerät verfügt über zwei Messbereiche für mittlere Schwingungsamplituden bei einer Grenzfrequenz von 50kHz. Der Messbereich 5 mm/s V bei einer maximalen Beschleunigung von 1600 g ist besonders geeignet für kleine Signale, die von größeren Störvibrationen überlagert werden. Der Messbereich 25 mm/s V mit einer maximalen Beschleunigung von 8000 g und bei einer Spitzengeschwindigkeit von 500 mm/s eignet sich für Messungen im akustischen Bereich. Am Drehschalter für den Messbereich ist eine weitere Schalterstellung R ("remote") möglich, die es erlaubt den Messbereich mit Hilfe einer Fernsteuerung einzustellen.

Die Messsignalausgabe des Lasers kann an der BNC-Buchse OUT an der Frontplatte des Output-Moduls als analoges Spannungssignal abgegriffen werden. Eine weitere Möglichkeit zur Erfassung des Ausgangssignals ist das Control-Interface. Hierbei handelt es sich um eine 25 polige Sub-D-Buchse an der Rückplatte des Controllers, mit der sämtliche Signale des Vibrometers erfasst werden können.

Weiterhin verfügt das Gerät über einen Triggerausgang. Sobald die Taste „Trigger“ am Messkopf gedrückt wird, entsteht eine fallende Signalflanke +5V \rightarrow 0 V an der BNC-Buchse Trigger an der Rückplatte des Controllers. Mit diesem Signal ist es möglich, die externe Signalerfassung zu starten.

Außerdem befindet sich am Output Modul die Möglichkeit Filter vom Typ Butterworth zweiter Ordnung einzusetzen. Hierbei handelt es sich um einen Tiefpassfilter (Low-pass), mit der die Bandbreite des Messsignals zu begrenzen ist. Mit den drei wählbaren Eckfrequenzen ($f_c = 5 \text{ kHz}; 20 \text{ kHz}; 50 \text{ kHz}$) können höherfrequente Rauschanteile im akustischen und nahen Ultraschallbereich unterdrückt werden. Wird das Messsignal im Zeitbereich dargestellt, so kann damit das Signal-Rausch Verhältnis verbessert und unerwünschte Komponenten unterdrückt werden. Bei der Analyse im Frequenzbereich spielen die Filter nur eine untergeordnete Rolle. Hier können sie verhindern, dass Rauscheffekte den FFT-Analysator übersteuern. Diese Filter weisen eine hohe Amplitudengenauigkeit im größten Teil des Durchlassbereiches auf und haben dabei einen weitgehend linearen Phasengang. In **Bild 20** ist der Amplitudenfrequenzgang eines Butterworth Tiefpassfilters 3.Ordnung dargestellt. Der vom Filter verursachte Amplitudenfehler kann in der nächsten Darstellung (**Bild 21**) betrachtet werden.

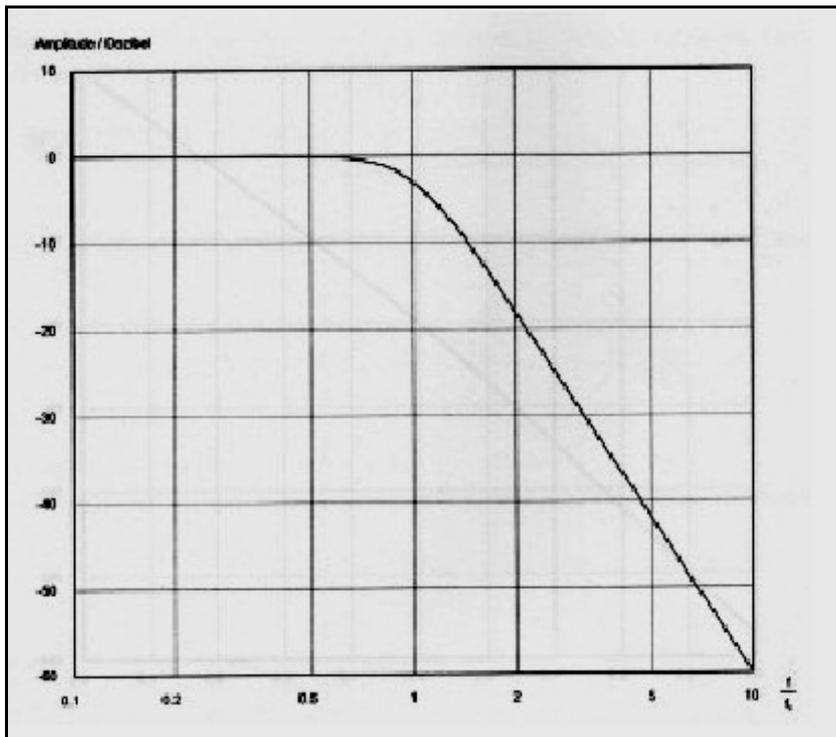


Bild 20: Normierter Amplitudenfrequenzgang (vgl. [POL])

Der Filter beginnt ca. bei 60% der Eckfrequenz an, das Signal zu filtern bzw. zu dämpfen. In **Bild 21** ist noch der vom Filter verursachte Amplitudenfehler dargestellt.

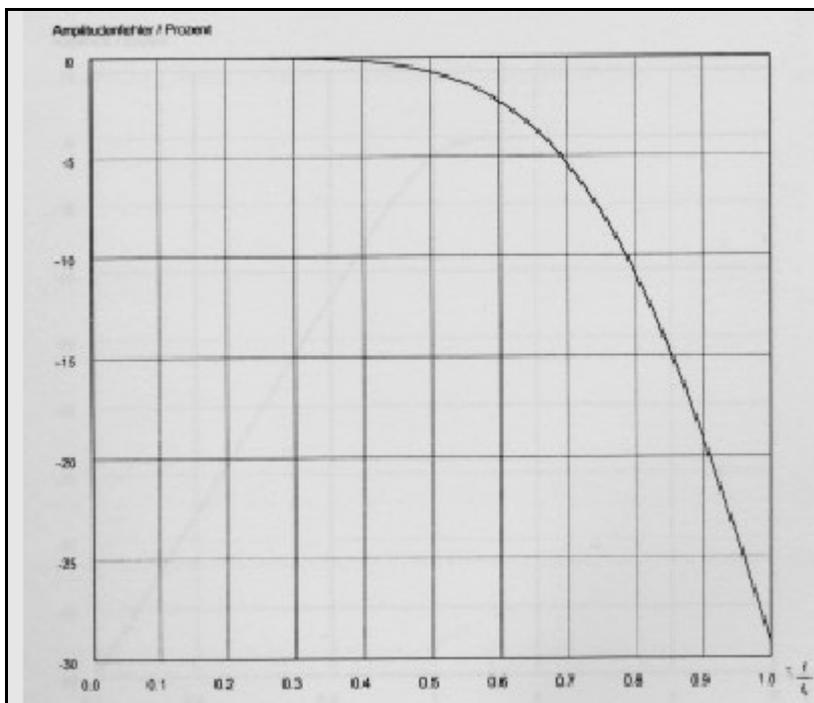


Bild 21: Amplitudenfehler im Durchlassbereich (vgl. [POL])

Bis ca. 30% der Eckfrequenz tritt praktisch kein Fehler durch den Filter auf. Bei ca. 70% wird die Amplitudengenauigkeit um ca. 5 Prozent gesenkt, welches durchaus noch im

akzeptablen Bereich liegt.

Doch nicht nur die Amplitude, sondern auch die Phase wird durch den Filter beeinflusst, welches in folgender Graphik (**Bild 22**) grafisch dargestellt ist.

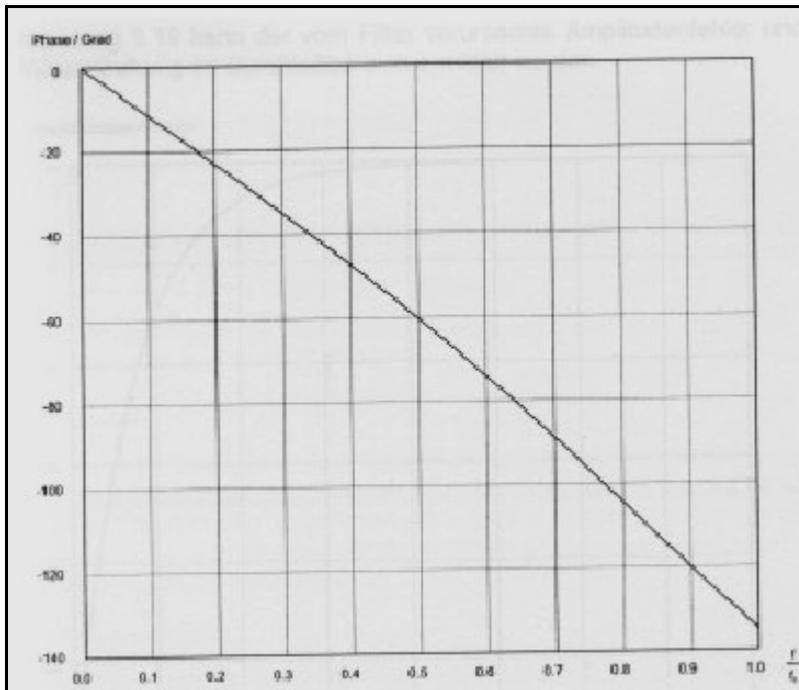


Bild 22: Phasendrehung im Durchlassbereich (vgl. [POL])

Zu erwähnen ist hier besonders, dass bei 70% der Eckfrequenz die Phasendrehung nur – 90° beträgt. Aus diesen Werten wurde die so genannte 70%-Regel festgelegt, welche besagt, dass bei 70% Prozent der Eckfrequenz der Amplitudenfehler –5% beträgt und die Phase um 90° dem tatsächlichen Signal nachläuft. In diesem Bereich ist ein exaktes Messen mit akzeptablen Toleranzen möglich.



Bild 23: Das Laservibrometer CLV 700 (vgl. [POLhp])

5. Frequenzmessung und –bestimmung

5.1 Bestimmung der Eigenfrequenzen von Objekten

Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Eigenfrequenz eines Objektes zu bestimmen.

Hat man ein Objekt einfacher Geometrie (zum Beispiel einen Stab) so kann man die Eigenfrequenzen errechnen, wenn die Werkstoffdaten des Objektes bekannt sind.

Mit Hilfe der nachfolgenden Formel kann man bei einem z.B. bei einem einseitig eingespannten Stab die Eigenfrequenzen ausrechnen.

$$f_E = \frac{k_B}{l_h} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{A \cdot r}} \quad (5.1)$$

k_B ist dabei der Beiwert für den jeweiligen Mode der Frequenz (1.Mode : $k_B = 0,5596$,

2.Mode: $k_B = 3,506$, 3. Mode : $k_B = 9,819$)

l_h ist die schwingende Länge des Objektes

E ist der Elastizitätsmodul

I ist das Flächenmoment

A ist die Querschnittsfläche

r ist die Dichte des Materials

Ausgehend von der Schwingungsgleichung des einseitig eingespannten Prismas

$$dM_t = -d\Theta \cdot j = -c_t \cdot j \quad (5.2)$$

können zusätzlich auch Torsionseigenfrequenzen mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$f_T = \frac{n - \frac{1}{2}}{b \cdot 2} \cdot \sqrt{\frac{G \cdot I}{r \cdot I_p}} \quad (5.3)$$

mit:

b ist die radiale Prismenlänge

$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + m)}$ ist der Gleitmodul

E ist der Elastizitätsmodul

n ist die Ordnungsnummer (n=1,2,3,4...)

? ist die Dichte des Materials

μ ist die Quer- oder Poissonzahl

f_T ist die Torsionseigenfrequenz

$I = c \cdot b \cdot d^3$ ist der Drillungswiderstand

c ist der Beiwert nach Bild 23

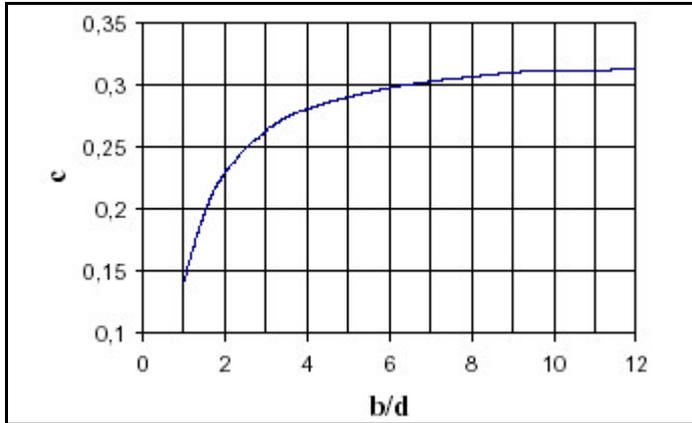


Bild 24: Beiwert für Torsion (vgl. [DIPfr])

I_p ist das polare Flächenträgheitsmoment

Sind jedoch einer oder mehrere dieser Werte nicht bekannt, bzw. handelt es sich bei dem Objekt um eines mit einer komplizierten Geometrie kann man die Formel nicht verwenden. Hier muss man dann zur experimentellen Bestimmung der Eigenfrequenz greifen.

Dies kann durch unterschiedliche Arten erfolgen.

1. Das Anschlagen des Gegenstandes
2. „Beschallung“ des Gegenstandes mit einer Vielzahl von Schwingungen („Rauschen“)

1. Das Anschlagen des Gegenstandes

Schlägt man einen Gegenstand mit einem anderen, harten Gegenstand an, so schwingt er mit seiner Eigenfrequenz. Jedoch ist dieser Schwingungsvorgang nicht von langer Dauer, da bedingt durch die Dämpfung des Materials der Probe, die Schwingzeit verkürzt wird.

Schlägt man einen Gegenstand z.B. mit 1 Schlag pro Sekunde (was 1 Hz entspräche) an, so schwingt der Gegenstand nicht etwa mit 1 Hertz, sondern mit seiner Eigenfrequenz (es sei denn, die Eigenfrequenz betrüge nun gerade 1 Hertz).

Man spricht hierbei auch von Impulsanregung. Diese Methode ist geeignet, wenn man die Zeitdaten direkt graphisch darstellen kann, und die Möglichkeit hat, die Abstände der Schwingungen zu vermessen. (Z.B. bei DASYLab möglich)

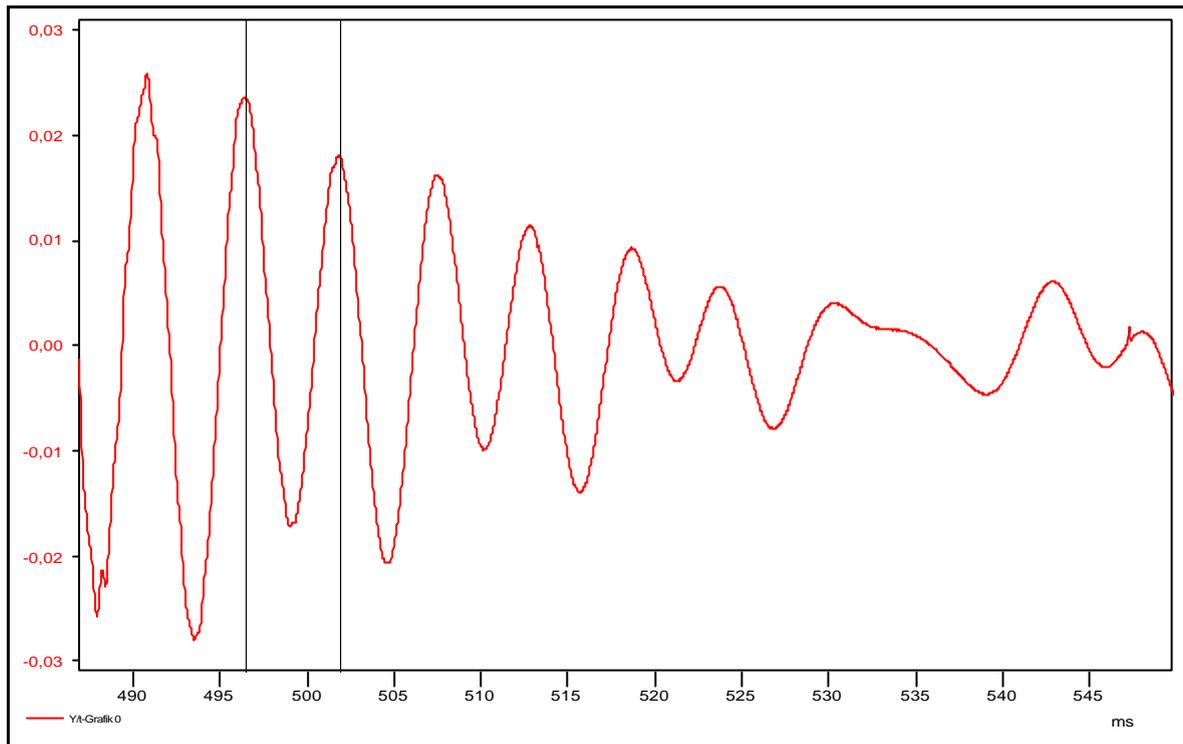


Bild 25: Zeit datendarstellung der Schwingung, Probe B, mit Schraubendreher angeschlagen

In der Regel ist es so, dass homogene Stoffe stärker schwingen und eine kleinere Dämpfung haben als inhomogene⁸.

Der Nachteil dieser Methode ist, dass man in der Regel nur die erste Eigenschwingung feststellen kann, während weitere Schwingungen nur in Ausnahmefällen erkennbar sind. Deshalb sollte stattdessen die zweite Methode Verwendung finden:

2. „Beschallung“ des Gegenstandes mit einer Vielzahl von Schwingungen („Rauschen“) oder Sinus-Schwingungen

Bei dieser Methode wird der zu vermessende Gegenstand mit Hilfe eines Shakers und eines Schwingungsgenerators in Schwingungen versetzt.



Bild 26: Shaker von Bruel & Kjaer (vgl. [BUK])

Es ist üblich, als Schwingungen ein sogenanntes „weißes Rauschen“ zu verwenden, eine Mischung aus Schwingungen aller möglichen Frequenzen, die sich kontinuierlich über ein bestimmtes Frequenzband erstrecken (also z.B. von 1-30.000 Hz). Durch diese Vorgehensweise kann sichergestellt werden, dass sämtliche Frequenzen auf das

Objekt abgestrahlt werden.

⁸ [DIPfr]

Tastet man nun die Frequenzen, die das zu vermessende Objekt zurückstrahlt, ab, so erhält man die „Antwortfrequenzen“, mit denen das Objekt reagiert.

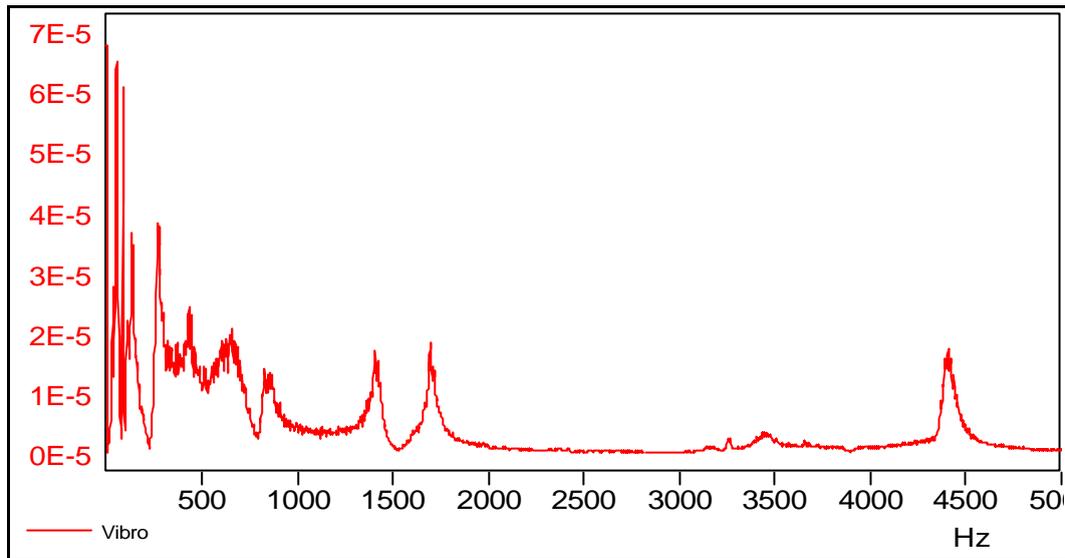


Bild 27: Antwortsignal einer Probe nach „Beschallung“ mit weißem Rauschen

Diese Antwortfrequenzen entsprechen dann den Eigenfrequenzen des Objektes, bzw. des Aufbaus, der mit dem Objekt verbunden ist (Halter, Stative, etc.)

Eine Anregung mit einem Sinus Signal brachte nur wenig Informationen, da auf der Abbildung des Spektrums nur die Frequenz des Sinus-Signals zu erkennen war.

Benutzte man jedoch einen „Sinus-Sweep“ (ein Frequenzbereich, in dem die Frequenz des Sinus entweder ansteigen oder abfallen soll; kann am Generator eingestellt werden), so war festzustellen, dass die Amplitude im Bereich der Eigenfrequenzen zunahm, ohne dass an der Ausgangsspannung des Verstärkers etwas geändert wurde.

Dieses Verfahren ist jedoch recht zeitaufwendig und unter Umständen komplizierter durchzuführen.

Deshalb ist die Eigenfrequenzbestimmung mit dem Rauschen zu bevorzugen.

5.2 Eigenfrequenzen herausfiltern

Hat man ein Objekt, welches vermessen werden soll, in einen Halter eingespannt, so ist es notwendig, die Eigenfrequenzen des Halters von denen des Objektes zu trennen.

Dies kann man erreichen, indem man zuerst den Halter vermisst, und dann bei der Messung des Objektes die entsprechenden Frequenzen aus dem gemessenen Spektrum „herausstreicht“.

Der Versuch, diese Vorgehensweise bei dem Programm „DASYLab“ zu automatisieren schlug leider fehl, da das Spektrum in der Darstellung sehr stark verzerrt und nicht mehr zu gebrauchen war.

Dies lag auch daran, dass die Antwortsignale des Halters und der Probe im Halter zum Teil sehr unterschiedliche Ausschläge besaßen, und daher das Spektrum stark verzerrt wurde.

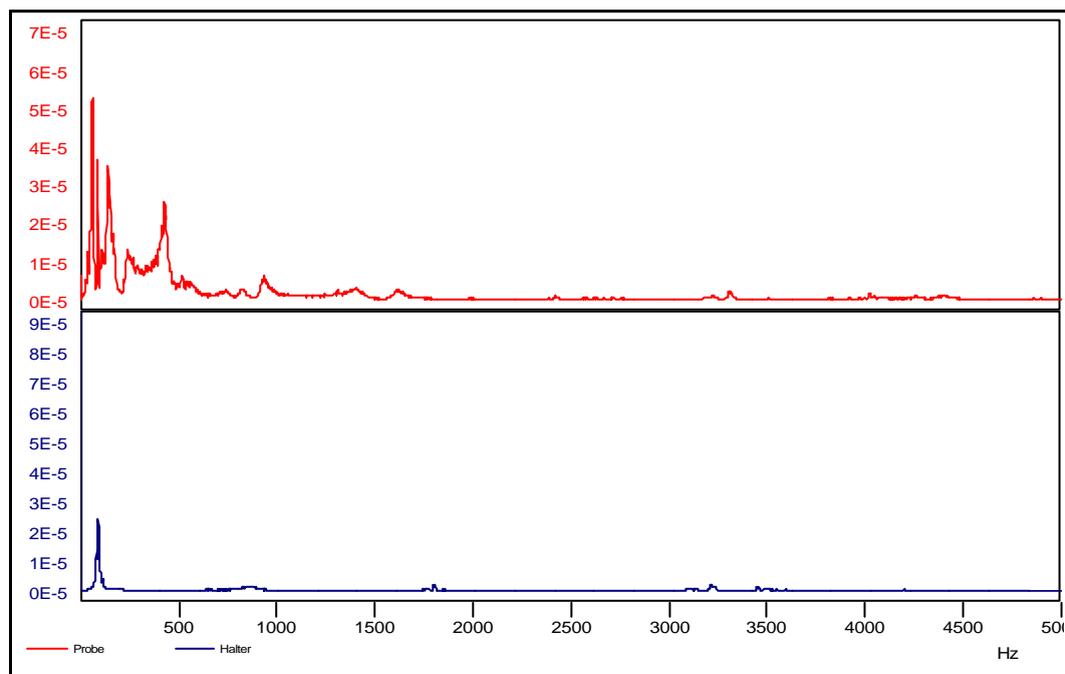


Bild 28: „Per Hand“ Auswertung, oben: beschallte Probe im Halter, unten beschallter Halter alleine

So bleibt nur die Möglichkeit, einen optischen Vergleich „per Hand“ durchzuführen. Dazu müssen die Frequenzen notiert, und dann aus dem Gesamtbild (Objekt und Halter) „weggestrichen“ werden, so dass nur noch die Frequenzen des Objektes übrig bleibt. Der Begriff „wegstreichen“ ist hier allerdings nur im übertragenen Sinne gemeint, da die Amplituden im Spektrum lediglich als haltereigene Frequenzen identifiziert werden.

5.3 Verarbeitung der Zeitdaten

Um die gewonnenen Daten auswerten zu können, müssen diese erst einmal aufbereitet werden. Dazu bedient man sich im Allgemeinen eines Verfahrens, das nach dem französischen Wissenschaftler Jean Baptiste Joseph Fourier benannt wurde, der sogenannten „Fourier-Transformation“.

Sie dient dazu, Funktionen in den Frequenzraum zu transformieren.⁹

Beschrieben wird diese Signal-Transformation durch die Gleichung:

$$f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{j\omega t} dt \quad (5.1)$$

Für einen bestimmten Zeitraum folgt dann:

$$f(\omega) = \int_{-T}^T f(t) \cdot e^{j\omega t} dt \quad (5.2)$$

Aus der Formel 5.2 erhält man einen Real- und einen Imaginärteil. Multipliziert man nun die fouriertransformierte Zeitfunktion mit ihrer konjugiert komplexen Fouriertransformierten, so erhält man das sogenannte „Autopowerspektrum“ (kurz APS genannt), zu deutsch Autoleistungsspektrum. Dieses wird weithin zur Darstellung von Frequenzen genutzt.

Die Gleichung dafür lautet:

$$F(\omega) = f_1(\omega) \cdot \overline{f_1(\omega)} \quad (5.3)$$

⁹ [WIKfo]

5.4 Die Datenverarbeitung mit DASYSLab

Eines der beiden Programme, mit denen die gewonnenen Messdaten ausgewertet werden konnten ist das Programm „DASYLab“ der Firma National Instruments.

Dieses Programm erlaubt mit Hilfe des „Drag & Drop“ - Prinzips ein Schaltbild aufzubauen, mit dessen Hilfe die Daten verarbeitet werden können. Dazu werden in Programm-Menüs Module ausgesucht, welche dann die Aufgaben der Berechnung übernehmen. Mit Hilfe dieser Module können sowohl FFT (Fast-Fourier-Transformation, die rechnergestützte Variante der Fourier-Transformation) als auch Frequenzfilter dargestellt werden. Die Ergebnisse können dann mit Hilfe von Diagramm-Modulen auf dem Bildschirm sichtbar gemacht werden.

Nachfolgend ein Beispiel für ein Schaltbild unter DASYSLab.

Dieses Schaltbild wurde verwendet, um einen Überblick der gewonnenen Daten zu bekommen, und diese Auszuwerten.

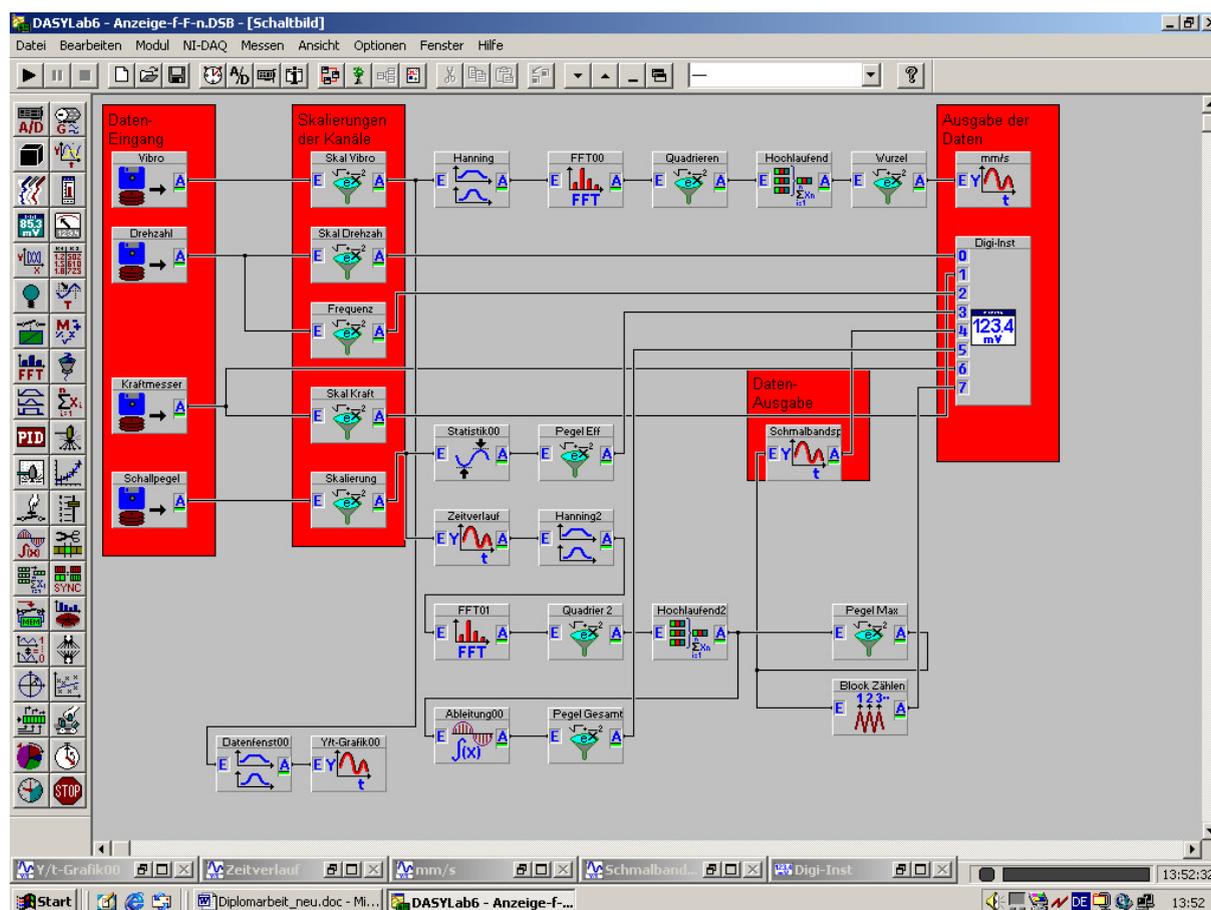


Bild 29: DASYSLab Schaltbild zur Ansicht und Auswertung der gewonnenen Daten

Die Module im Bereich „Dateneingang“ sind Module, die gespeicherte Daten wieder in den Arbeitsspeicher des Rechners laden.

Um Zeitdaten einfach wegzuschreiben bedient man sich am besten eines einfachen Schaltbildes (**Bild 30**).

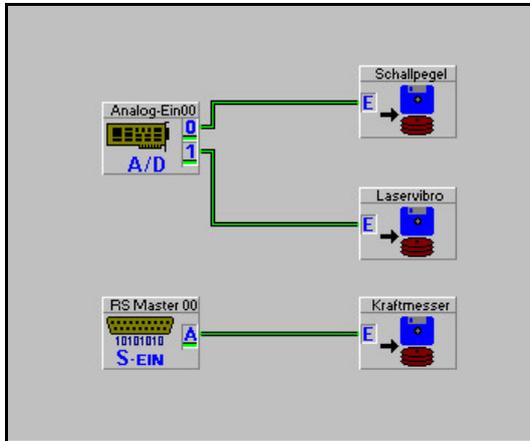


Bild 30: Schaltbild unter DASyLab zum Speichern von Zeitdaten

Von dort werden die Daten dann in die Module zur „Skalierung der Kanäle“ geschickt, wo sie aufbereitet werden.

Danach gelangen die Daten in die verschiedenen Module zur Berechnung.

In diesem Fall werden die unterschiedlichen Eingangsdaten in die Module zur Schallpegelbestimmung, zur Drehzahlberechnung, zur Kraftberechnung und zur Berechnung der Schwinggeschwindigkeit gesendet.

Die Ausgabe erfolgt dann in den entsprechend gekennzeichneten Modulen („Datenausgabe“), die in zwei unterschiedlichen Formaten erfolgt. Eine Ausgabe der Daten kann dann zum Beispiel wie folgt aussehen:

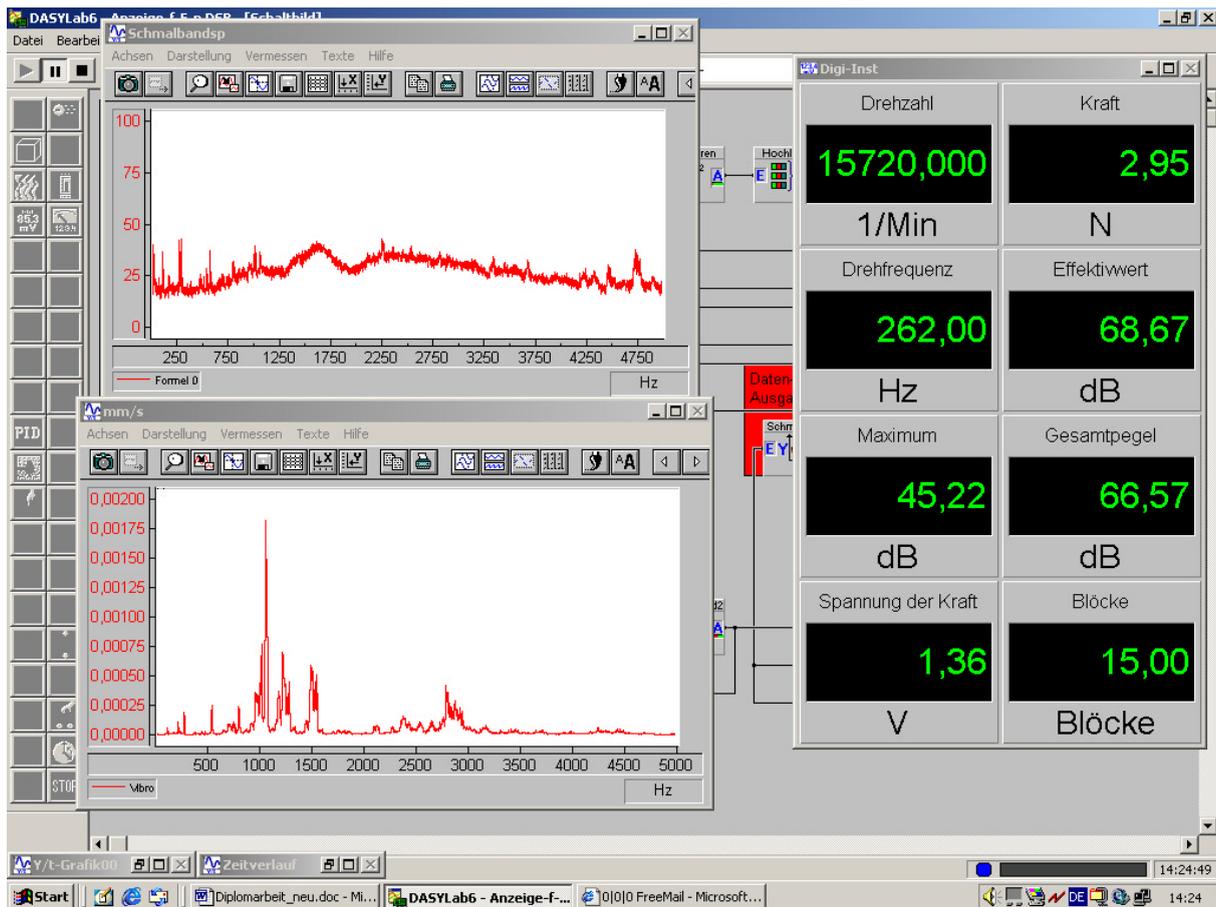


Bild 31: Darstellung der Messdaten über DASyLab

Die obere Anzeige gibt den Schallpegel an, die untere Anzeige die Schwinggeschwindigkeit. Rechts ist ein Block mit verschiedenen Messinstrumenten zu sehen.

Die Auswertung der Daten erfolgt dann mit Hilfe von Vergrößerungen der oberen und unteren Bilder, sowie der Option „Vermessen“ der Diagramm-Module.

5.5 Datenverarbeitung mit PAK

Die Datenverarbeitung von PAK funktioniert etwas anders. Bei diesem Programm werden keine Schaltbilder mit Modulen erstellt, sondern die Eingaben in Bildschirmmasken getätigt. Bei diesem Messsystem muss vorher eingestellt werden, wie viele Kanäle angeschlossen werden und welche Arten von Daten über die Kanäle eingelesen werden.

Es gibt verschiedene Arten, die Datenanzeigen zu verwenden. Zum Einen können die Daten online (das heißt, während der Datenerfassung) ausgewertet werden. Dabei muss vorher eingestellt werden, ob die Daten auf die Festplatte weggeschrieben werden sollen oder nicht.

In Rahmen dieser Arbeit wurden die Zeitdaten bei jeder Messung weggeschrieben, um sie später wieder zu einer weiteren Verarbeitung zur Verfügung zu haben. So war eine Nachbearbeitung der Zeitdaten ohne Weiteres möglich.

Des Weiteren muss für das Pak-System eine graphische Ausgabe erstellt werden.

Ohne diese Ausgabe können die Daten nicht optisch dargestellt, und damit auch nicht ausgewertet werden.

Eine solche graphische Ausgabeseite sieht zum Beispiel folgendermaßen aus:

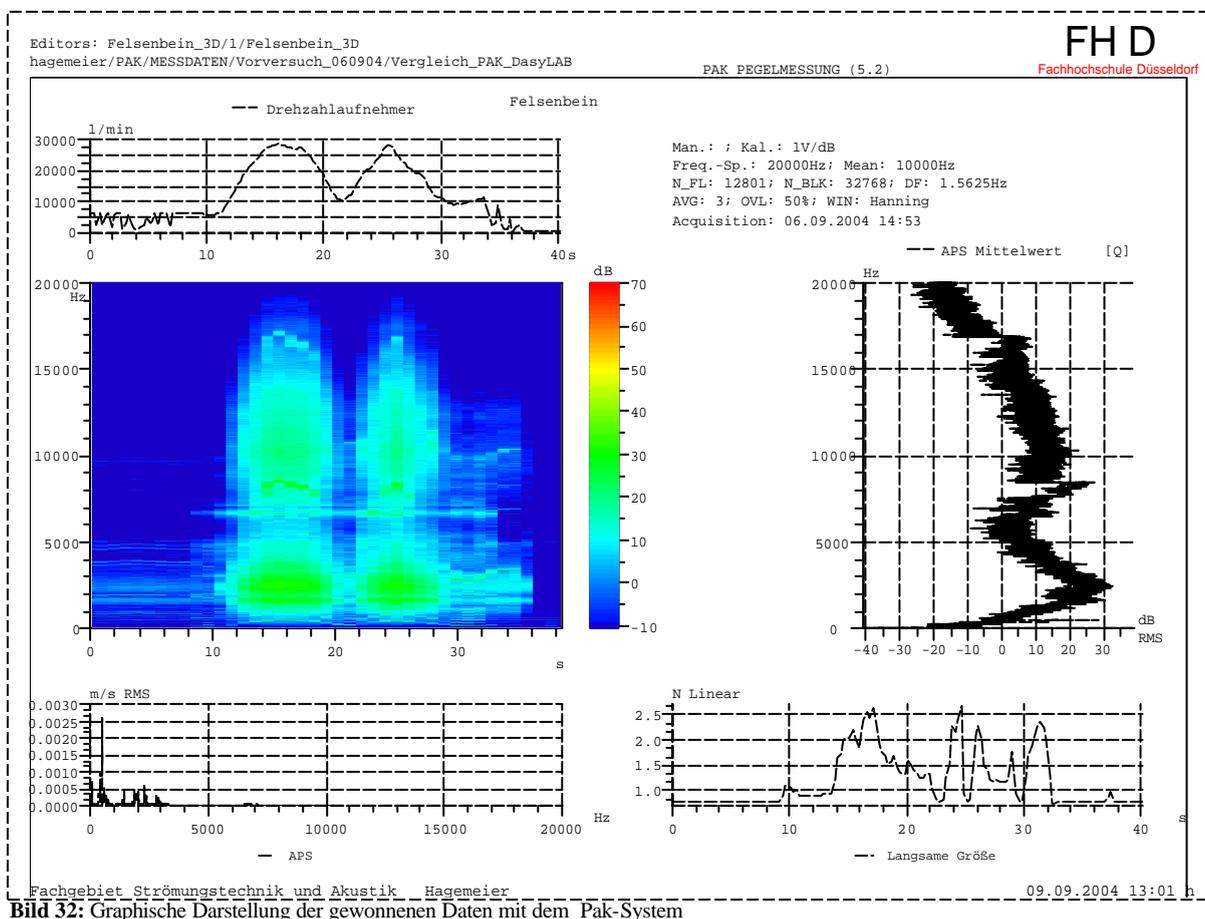


Bild 32: Graphische Darstellung der gewonnenen Daten mit dem Pak-System

Auf dieser graphischen Darstellung sind alle gewonnenen Daten zu sehen.

Oben links befinden sich die gemessenen Drehzahlen, in der Mitte links ist eine dreidimensionale Darstellung der Schallpegel zu sehen. Das Schnittbild dieser dreidimensionalen Darstellung ist rechts daneben zu erkennen. Unten links ist ein mit dem Laser-vibrometer gewonnenes Spektrum zu sehen, während unten links der lineare Kraftverlauf zu sehen ist.

Mit Hilfe dieser Daten kann man sich einen ersten Überblick über den Verlauf des Versuches verschaffen, auch einige erste Schlüsse lassen sich ziehen.

6. Spanender Abtrag von Material

In den Versuchen dieser Arbeit wurden verschiedene Materialien mit Hilfe von Fräsern spanend abgetragen. Hierzu wurde in die Miniaturbohrmaschine der Firma Dremel ein kugelförmiger Fräser eingespannt, der entweder eine bestimmte Anzahl an Schneiden („Rosenbohrer“) oder eine mit Diamanten beschichtete Kugeloberfläche („Diamantbohrer“) besaß.

Versucht man nun mit Hilfe von Werkzeug Material an einem Objekt abzutragen, so geschieht dies im Allgemeinen mit Hilfe von Schneiden (auch die Diamantkörner sind hier als eine Art von Schneiden zu betrachten)

6.1 Geometrisch bestimmte Schneiden

Bei den Medizinern wird ein Werkzeug oft als Bohrer bezeichnet, wenn mit ihm in Richtung der Rotationsachse Material abgetragen werden kann. Technisch gesehen handelt sich dabei jedoch um einen Fräser, dessen Geometrie einen entsprechenden Materialabtrag zulässt.

Im Maschinenbau spricht man allgemein von geometrisch bestimmten Schneiden, wenn die Anzahl und die Form der Schneiden an einem Spanwerkzeug bekannt ist.

Ist dies nicht der Fall, so spricht man von geometrisch unbestimmten Schneiden.

Ob die Geometrie der Schneiden bestimmt oder unbestimmt ist, hat auch Einfluss auf den Vorgang des Spanens.

6.1.1 Winkel bei der Zerspanung

Bei der Zerspanung gibt es drei wichtige Winkel am Werkzeug:

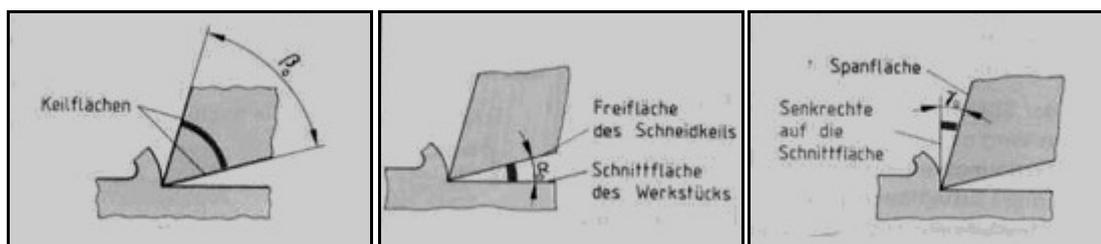


Bild 33: Winkel am Werkzeug: Keilwinkel, Freiwinkel, Spanwinkel (vgl. [IMC])

Diese Winkel heißen im Einzelnen (gekennzeichnet nach DIN 6581):

Der sogenannte Freiwinkel der Schneide wird mit α gekennzeichnet.

Der Keilwinkel wird mit β gekennzeichnet und der Spanwinkel mit γ .

Der Keilwinkel ist derjenige Winkel, der angibt, wie scharf ein Werkzeug ist, da er zwischen den beiden Keilflächen der Schneide liegt.

Der Freiwinkel ist der Winkel, der von der Schnittfläche des Werkstückes und der Freifläche des Werkzeuges eingeschlossen wird.

Der Spanwinkel schließlich ist der Winkel, der von der Senkrechten auf die Schnittfläche und der Spanfläche des Schneidkeiles eingeschlossen wird.

Die Größe von Keil- und Spanwinkel wird hauptsächlich nach dem zu bearbeitenden Werkstoff festgelegt. Der Freiwinkel bleibt bei allen Werkstoffen nahezu unverändert.¹⁰

Frei-, Keil- und Spanwinkel ergeben zusammen 90° .

6.1.2 Positiver und negativer Spanwinkel

Ist die Summe aus Keilwinkel und Freiwinkel kleiner als 90° , so wird der Spanwinkel positiv. Ist die Summe von Keil- und Freiwinkel jedoch größer als 90° , so spricht man von einem negativen Spanwinkel.

Ob ein Spanwinkel positiv oder negativ ist, beeinflusst die Abtragleistung des Werkzeuges und auch die Kraft, die für die Zerspanung benötigt wird.

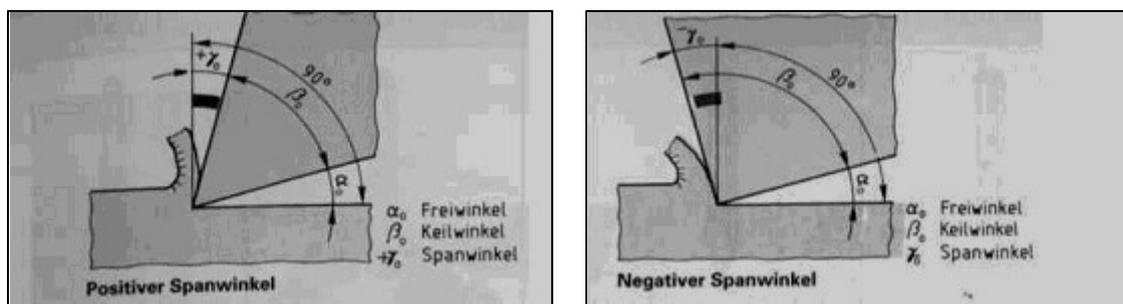


Bild 34: Positiver und negativer Spanwinkel beim Zerspanen (vgl. [IMC])

Bei einem negativen Spanwinkel ist die Kraft, die zum Zerspanen benötigt wird um einen Betrag größer, der von dem zu bearbeitenden Werkstoff, der Schnittgeschwindigkeit und noch einigen weiteren Faktoren abhängt.

¹⁰ [IMC], S.70

Je nach Material und Bearbeitungsart (Grob- oder Feinbearbeitung) wird auch der Spanwinkel der Werkzeuge ausgewählt, um eine möglichst ergonomische Bearbeitungsweise des Werkstoffes und eine möglichst lange Haltbarkeit der Schneidwerkzeuge zu erzielen.

Die negativen Spanwinkel erregen durch die größere benötigte Schnittkraft jedoch auch die bei der Zerspanung entstehenden Schwingungen stärker als positive.

Des Weiteren nimmt die Drehzahl ab, wenn die Zerspankräfte größer werden, was dann wiederum zu einem größeren Verschleiß bei den Maschinen führt.

6.2 Geometrisch unbestimmte Schneiden:

Die in Kapitel 6.1 bezeichneten Schneiden fallen unter die Kategorie der geometrisch bestimmten Schneiden. Bei ihnen ist bekannt, wie die Schneiden aussehen, welche Geometrie sie haben und wie viel Schneiden ein Werkzeug besitzt.

Bei anderen Zerspanungswerkzeugen ist dies nicht der Fall. Bei diesen Werkzeugen handelt es sich meist um Schleifscheiben oder –papier, Schleifköpfe oder auch um Fräser mit kugelförmigem Kopf, bei denen man keine Klinge angebracht hat, sondern deren Oberflächen mit einem Schleifmedium (zum Beispiel Diamant- oder Korundkörner) beschichtet sind.

Diese Beschichtung macht die Oberfläche unregelmäßig, und die Form der Körner (welche hier eine Art Schneide darstellen) ist nicht eindeutig bekannt (geometrisch unbestimmt)

Bei der dieser Diplomarbeit zugrunde liegenden Versuchen wurde ein Kugelfräser mit Diamantbeschichtung verwendet, der von den Medizinern auch als Diamantbohrer bezeichnet wird, da mit ihm auch in Richtung der Rotationsachse Material abgetragen werden kann. (Siehe auch Kapitel 6.1)

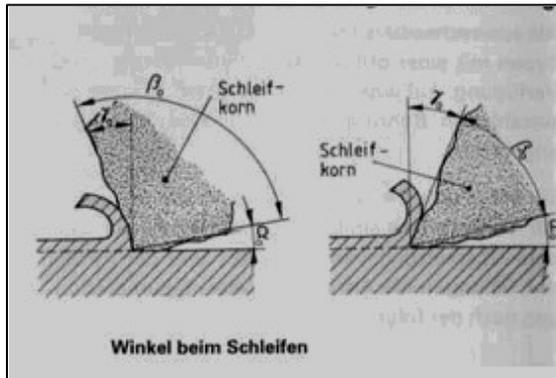


Bild 35: Geometrisch unbestimmte Schneiden (vgl. [IMC])

Wie auch in **Bild 35** und **36** zu erkennen, sind die Oberflächen der abtragenden Körner ungleichmäßig geformt. Außerdem liegen die Körner nicht gleichmäßig über die Oberfläche des Kugelfräasers verteilt. Da die Körner aber sehr klein sind, behindern sie den Abtrag nicht so stark (d.h. die Schnittkraft wird nicht so groß), wie es das Bild vielleicht vermuten lässt.

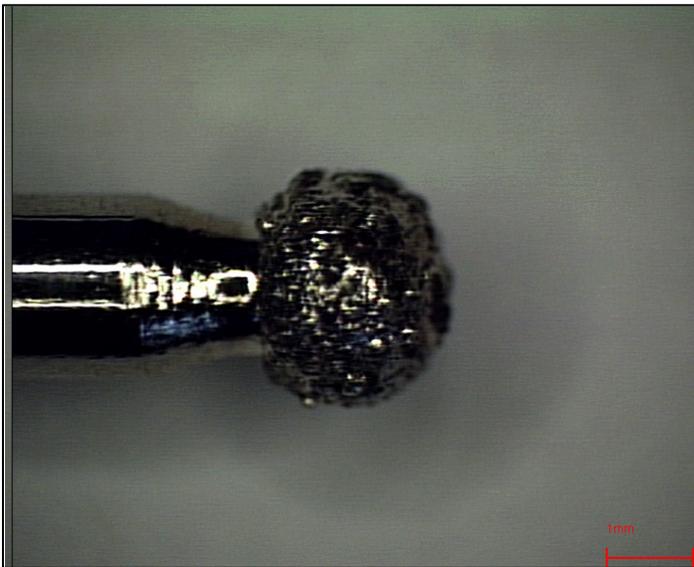


Bild 36: Vergrößerte Darstellung des Diamantbeschichteten Kugelfräasers, 16-fache Vergrößerung

Die Unregelmäßigkeiten auf der Oberfläche des Fräasers sind die Diamantkörner. Allerdings sind sie in dieser Darstellung nicht deutlich zu erkennen.

Nachfolgend noch ein Bild eines der Schneidenfräser, ebenfalls aus dem Lieferumfang der Miniaturbohrmaschine „Dremel Multi Pro“.

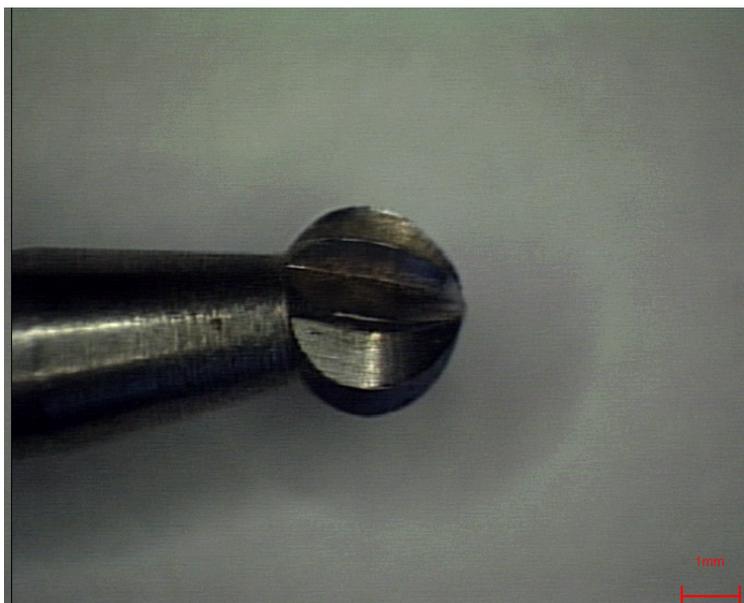


Bild 37: Vergrößerte Darstellung des Kugelfräasers mit 8 Schneiden, 10-fache Vergrößerung

7. Versuchsaufbau und -durchführung

7.1 Verwendete Geräte

Für die Versuche wurden folgende Geräte benutzt:

- Mobiler Computer mit 450 Mhz „Laptitude“ der Firma Gericom mit Messsoftware „DASYLab“
- Mobiler Computer mit 1333 Mhz „TravelMate“ der Firma ACER, mit Messsoftware „DASYLab“
- Mobiler Computer „Thinkpad“ der Firma IBM mit Messsoftware „PAK“ der Firma Müller BBM
- Pak-Meßsystem der Firma Müller-BBM mit integrierter A/D-Wandlerkarte mit 16 Kanälen
- A/D Wandlerkarte PCMCIA DAQ 1200 12 bit Multifunktion I/O
- Miniaturbohrmaschine der Firma „Dremel“, Typ „Dremel Multi Pro“ mit Vorwählbarem Drehzahlbereich von 5.000 min^{-1} bis 33.000 min^{-1}
- Bohrstände der Firma „Dremel“
- Fräser mit Kugelkopf aus dem Lieferumfang der Miniaturbohrmaschine „Dremel Multi Pro“
- Kraftaufnehmer der Firma HBM, Typ S2 mit Messverstärker
- Laservibrometer der Firma Polytec, Typ CLV 700
- Kondensatormikrofon der Firma McCrypt, Typ GH-183
- Multimeter der Firma „Voltcraft“, Typ 4660 mit Anschluss für ein serielles Kabel zur Vernetzung mit einem Computer
- HiFi - Verstärker
- Shaker der Firma Brüel und Kjær
- Frequenzgenerator der Firma Brüel und Kjær Typ 1027
- Proben aus verschiedenen Materialien (Holz, diverse Kunststoffe, Messingröhrchen, Schweißdraht)
- Drehzahlmesser der Firma „Shimpo“, Typ DT-201
- Bosch Geradschleifer GGS 27LC, Nenndrehzahl einstellbar von 12.000 min^{-1} – 27.000 min^{-1}

7.2 Versuchsaufbau der Vorversuche

Bei den Vorversuchen wurden mehrere Aufbauten und Versuchsanordnungen ausprobiert, um eine Versuchsaufbau zu entwickeln, bei dem die Versuchsparameter möglichst gleich bleibend sind. Dies geschah, um eine Auswertung der Versuche zu vereinfachen. Sind die Parameter der Versuche zu unterschiedlich, so lassen sich unter Umständen die Versuche nicht miteinander vergleichen.

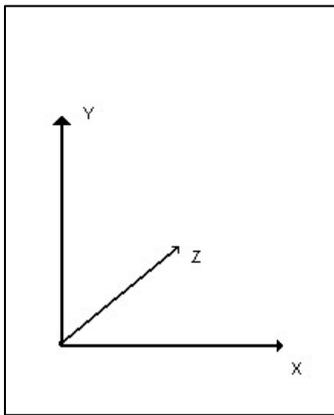


Bild 38: Bezeichnung der Achsen

Die Einteilung der Achsen wird im Verlauf dieser Arbeit wie folgt sein:

Die Rotationsachse der Fräser wird mit Y bezeichnet, die Ausrichtung der Proben wird mit X bezeichnet und die Z Achse wird die Senkrechte zur Probenausrichtung sein.

Die ersten Versuche wurden mit DASyLab an einem Gericom-Rechner durchgeführt, bei dem sich leider erst nach einiger Zeit erst herausstellte, dass die A/D-Wandlerkarte nicht richtig mit dem Rechner zusammenarbeitete, und die gewonnenen Daten so nicht zu gebrauchen waren.



Bild 39: Entkoppelter Versuchsaufbau

Weitere Versuche folgten, bei denen der Aufbau der Versuche verändert wurde. Bohrmaschinenständer und Probenhalter wurden entkoppelt und auf verschiedenen Tischen aufgebaut, ein Mikrofon wurde zusätzlich installiert und die Zeitdaten wurden, an Stelle des fertigen Spektrums, weggeschrieben.

Der Kraftmesser wurde einstweilen nicht benutzt, da eine Entkoppelung vom Tisch sonst nicht möglich war.

Weiterhin wurden die Aufzeichnungen der Daten mit dem Rechner vorgenommen.

Der Pfeil kennzeichnet in **Bild 39** die Position des Mikrofons.

Das Mikrofon wurde mit einem Klebestreifen befestigt, und auf die Bohrstelle gerichtet, um die Bohrgeräusche aufzeichnen zu können.

Diese wurden dann später zu Vergleichen herangezogen.

Nachdem entdeckt wurde, dass die A/D-Wandlerkarte nicht richtig mit dem Rechner zusammenarbeitet, wurde dieser gegen einen Rechner der Firma „ACER“ vom Typ „Travelmate 220“ ausgetauscht.

Mit diesem Rechner funktionierte die Karte einwandfrei, und es konnten neue Messungen angestellt werden.

Zum Vergleich nachfolgend noch einmal ein Vergleich der Spektren, wie sie von den unterschiedlichen Rechnern aufgezeichnet wurden.

Deutlich zu erkennen ist, dass am Gericom Computer die Amplituden zwar deutlicher hervortreten, jedoch über das gesamte Spektrum weniger Frequenzen dargestellt werden.

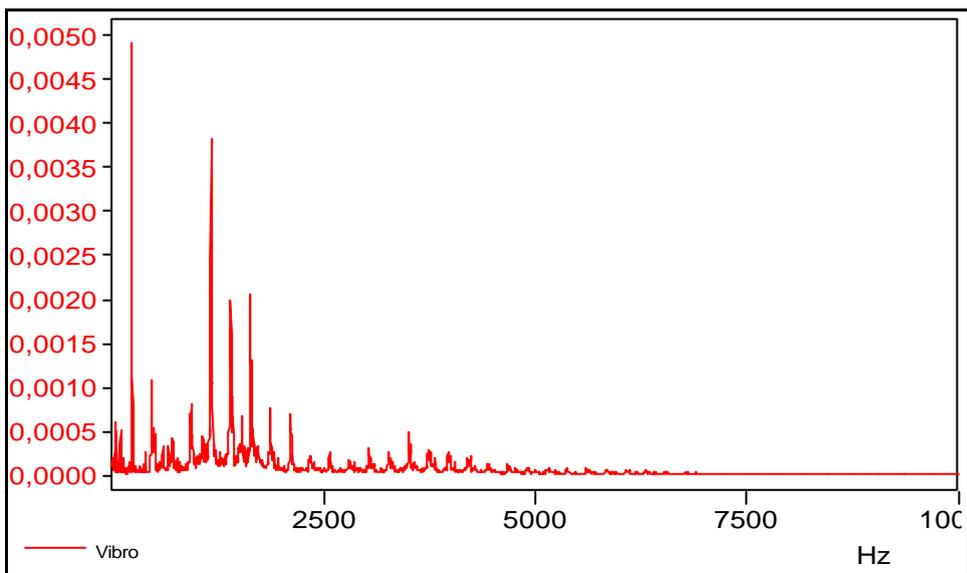


Bild 40: Aufnahme am DELL Laptop durchgeführt :

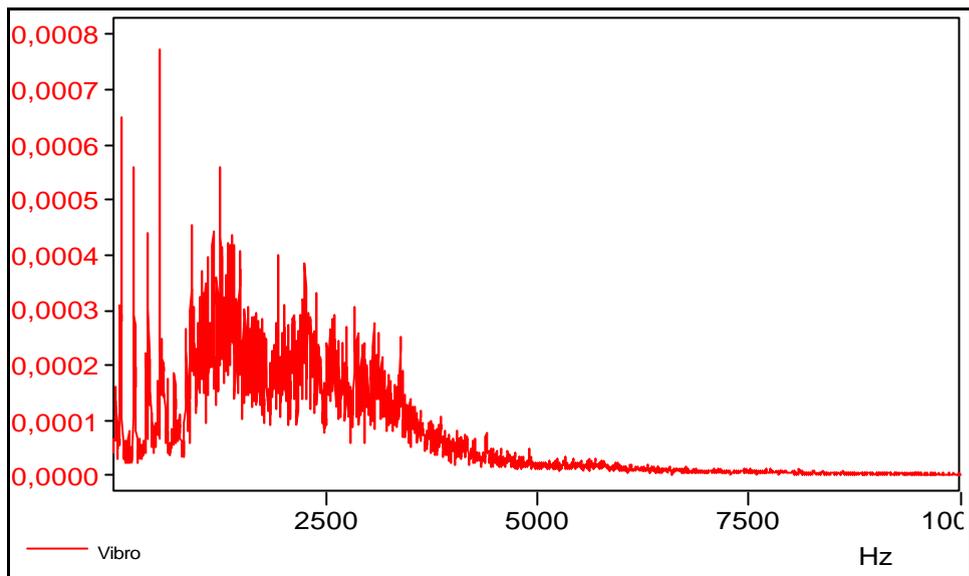


Bild 41: Aufnahme am ACER Laptop durchgeführt

Anschließend wurde außerdem der Versuchsaufbau in den Motorenprüfstand des Labors für Strömungsmaschinen verlegt, um auf der einen Seite einen von der Umgebung entkoppelten Versuchsaufbau zu erhalten (der Aufbau wurde auf eine der Aufspannplatten aufgebaut), auf der anderen Seite konnten so eventuelle Störgeräusche ausgeschaltet werden, da im Motorenprüfstand ein durchschnittlicher Gesamtpegel von etwa 30 dB herrscht, und dieser zusätzlich in einem gewissen Maße reflexionsarm ist.



Bild 42: Versuchsaufbau im Motorenprüfstand

In **Bild 42** ist der Versuchsaufbau zu sehen, der für die späteren Versuche genutzt wurde. Im Bild zu sehen sind der Drehzahlmesser, das Schallpegelmessgerät (welches das Mikrofon ersetzt), die Miniaturbohrmaschine „Dremel“ im Bohrständer, sowie die Haltevorrichtung für die Proben.

Oben im Bild ist der Tastkopf des Laservibrometers zu erkennen, der nun von der Y-Richtung aus die Proben abtastet (In den vorherigen Versuchen wurden die Proben von der Z-Richtung aus abgetastet). Zusätzlich sind die Proben nur noch einseitig im Halter eingespannt, um besser das Schwingverhalten beobachten zu können.

Auch ließen sich in einem bestimmten Rahmen die Eigenschwingungen bereits vorausberechnen.

Zum Vergleich wurde auch die Bohrmaschine variiert.

Hierzu stand allerdings nur ein Geradschleifer der Firma Bosch zur Verfügung. Dieser wurde an den vorhandenen Aufbau montiert, und anschließend wurde ein Bohrversuch mit diesem Aufbau durchgeführt.

7.3 Versuchsaufbau des Standardversuches

Der Versuchsaufbau des Standardversuches entspricht dem Aufbau in **Bild 42**.

Die Bedingungen der Versuchsreihen wurden möglichst gleich gehalten, damit ein Vergleich der Versuchsergebnisse ohne größeren Aufwand möglich wurde.

Aus dem Bohrständer wurde die Rückstellfeder entfernt, damit die Miniaturbohrmaschine immer mit gleichem Druck auf der Probe anliegen konnte. Dieser wurde durch das Eigengewicht der Bohrmaschine vorgegeben, das fast ohne Behinderung auf die Probe wirkte.

Da das Gewicht bis auf einen Bruchteil (Größenunterschied der Fräser) konstant blieb, lassen sich die Ergebnisse gut miteinander vergleichen.

Der Schallpegelmesser wurde Anstelle des Mikrofons eingesetzt, da die Daten besser aufgezeichnet werden konnten. Auch die Kalibrierung des Gerätes war einfacher.

Die Messhardware wurde ebenfalls ausgetauscht. Mit dem Pak-System der Firma Müller-BBM ließen sich bessere und genauere Messungen durchführen, was dann wiederum zu besseren Ergebnissen führte.

Des Weiteren war es möglich, mit dem Pak-System mehrere Kanäle (Bis zu 16 in der vorhandenen Konfiguration) unter gleichen Bedingungen zu überwachen (gleiche Abtastrate). Auch ist es Pak-System möglich, eine größere Auflösung zu erzielen. Zusätzlich ist die Nachbearbeitung im Pak-System komfortabler und erlaubt auch eine spätere Eingrenzung der Abtastrate zur Datenreduktion, was mit dem Programm DASYLab nicht möglich war.

Bei DASYLab kam es außerdem des Öfteren zu unangenehmen Begleiterscheinungen, wenn der Rechner nicht mehr in der Lage war, die Daten durch die Module zu führen.

Unterschiedliche Datenlaufzeiten bei DASYLab führten oft zu „Datenstaus“, so dass die Nachverarbeitung der Daten behindert wurde. Nichtsdestotrotz ist eine Datenverarbeitung mit DASYLab möglich, wenn die Anzahl der abgetasteten Kanäle relativ gering

gehalten wird, und nicht zu viele Datentypen (A/D-Wandlerkarte, Serielle Schnittstelle, etc.) auf einmal Verwendung finden.

7.4 Versuchsdurchführung der Vorversuche

Die Vorversuche wurden durchgeführt, um die Messtechnik zu erproben und ein Konzept für einen Standardversuch zu finden. Durch die Vielzahl an Versuchen und Versuchsaufbauten konnte ein Standardversuch ermittelt werden, mit dessen Hilfe die Auswirkungen der Fräser auf die unterschiedlichen Materialien untersucht werden konnte.

Anfangs wurden die Versuche einfach gehalten, um eine Basis zu schaffen, mit der dann weitergearbeitet werden konnte.

Sie beschränkten sich auf Messungen mit Kraftaufnehmer und Laservibrometer.

So wurde zum Beispiel das anfänglich verwendete Verfahren, Spektren nur zu einem bestimmten Zeitpunkt aufzuzeichnen, schnell verworfen, da die Ergebnisse nicht reproduzierbar waren.

Später wurden die Zeitdaten mit Hilfe von DASyLab weggeschrieben, um dann eine Auswertung durchführen zu können, welche dann auch reproduzierbar war.

Grundsätzlich wurden die Messungen so durchgeführt, dass am Rechner einige Parameter vorweg eingestellt werden mussten (Dateinamen zur Speicherung der Daten, Abtastrate, Kraft, bei der die Speicherung erfolgen sollte). Die Aufzeichnung der Daten wurde gestartet und anschließend wurde die laufende Miniaturbohrmaschine mit Hilfe des Führhebels in Richtung der Y-Achse auf die Probe hin bewegt. Die Krafteinleitung erfolgte unregelmäßig von Hand, so dass keine gleichbleibenden Ergebnisse erwartet werden konnten.

Auch die Länge der Messung war individuell verschieden, da eine Funktion, die es erlaubte, über einen Zeitraum zu messen, nicht voreingestellt werden konnte.

Nach der Messung mussten in einem anderen Schaltbild unter DASyLab (siehe auch Bild 29 und 31) die weggeschriebenen Zeitdaten neu geladen werden, und standen nur während des Ladens zur Verfügung.

Die Daten konnten also lediglich „online“ ausgewertet werden, was die Arbeit erschwerte, musste doch zur erneuten Darstellung eines bestimmten Blockes das Schaltbild unter DASyLab neu gestartet werden.

Bei den Versuchen mit dem anmontierten Geradschleifer wurde genauso verfahren.

Die Proben wurden zusätzlich vor den eigentlichen Messungen schwingungstechnisch vermessen, um die Eigenfrequenzen zu ermitteln.

Hierzu wurde zuerst der Halter unter verschiedenen Gesichtspunkten zum Schwingen angeregt (Anschlagen des Halters, Anregung mit Hilfe des Schwingungsgenerators und des Shakers).

Danach wurde eine Probe in den Halter eingespannt, und ebenfalls mit Hilfe des Shakers bzw. durch Anschlagen.

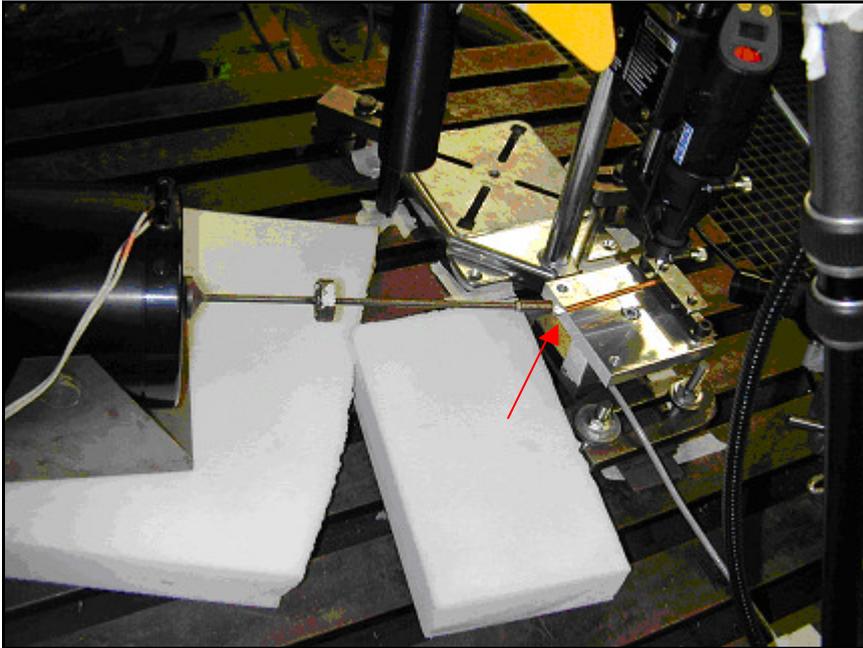


Bild 43: Schwingungsanregung des Halters mit Hilfe eines Shakers

In **Bild 43** ist eine solche Vermessung zu erkennen. Der Shaker (links im Bild) wird vom Frequenzgenerator über einen HiFi-Verstärker mit einem Signal versorgt. Dieses Signal wird über den Stößel (Bildmitte) auf den Halter übertragen. (Was in diesem Bildausschnitt leider schlecht zu erkennen ist.)

Die Abtastung erfolgt dabei über das Laservibrometer und die Reflektormarke (Pfeil). In diesem Bild wird die Probe abgetastet, während der Halter angeregt wird.

Zur Vermessung des Halters ohne Probe wurde auf die Oberfläche des Halters ebenfalls eine Reflektormarke geklebt (im Bild nicht erkennbar, da sie sich unter der Probe befindet), um eine Abtastung durch den Laser zu gewährleisten.

Diese Daten können dann später genutzt werden, um die Eigenfrequenzen des Aufbaus von denen der Probe zu unterscheiden.

Außerdem kann man in **Bild 43** erkennen, dass der Shaker auf einer Dämmschicht aus einem speziellen Kunststoffschaum steht, welche eine Übertragung der Schwingungen an die Aufspannplatte verhindern soll.

7.5 Versuchsdurchführung des Standardversuches

Der Standardversuch wurde in einer ähnlichen Art und Weise wie die Vorversuche durchgeführt.

Das Pak-System wurde vor den Versuchen für die entsprechenden Messungen eingerichtet (Abtastrate, Dateinamen, etc.).

Eine Unwägbarkeit des Versuchsaufbaus war das ungleichmäßige Laufverhalten der Miniaturbohrmaschine, die laut Herstellerangaben elektronisch nachgeregelt ist.

Diese Nachregelung sorgte jedoch für den unruhigen Lauf der Bohrmaschine: Die Drehzahl schwankte um die Nenndrehzahl von 8.000 min^{-1} mit einem (gemessenen) Wert von durchschnittlich $\pm 300 \text{ min}^{-1}$. Teilweise schwankten die Drehzahlen jedoch noch stärker. Dies ist in der Auswertung mit PAK, welches die Drehzahlen kontinuierlich aufzeichnete jedoch gut zu erkennen.

8 Versuchsauswertung

8.1 Auswertung der Vorversuche

Um einen Überblick zu bekommen, wie sich die Geometrie der Fräser auswirkt, müssen die Proben mit unterschiedlichen Fräsern bearbeitet werden. Die entstehenden Spektren können dann miteinander verglichen werden.

Sowohl bei akustischen als auch bei mechanischen Schwingungen ist dieses Verfahren anwendbar.

Ein Beispiel für den Vergleich von Spektren des Laservibrometer und des Schallpegelmessers folgt in **Bild 44**, bei dem ein Kugelfräser mit Diamantbeschichtung („Diamantbohrer“) benutzt wurde.

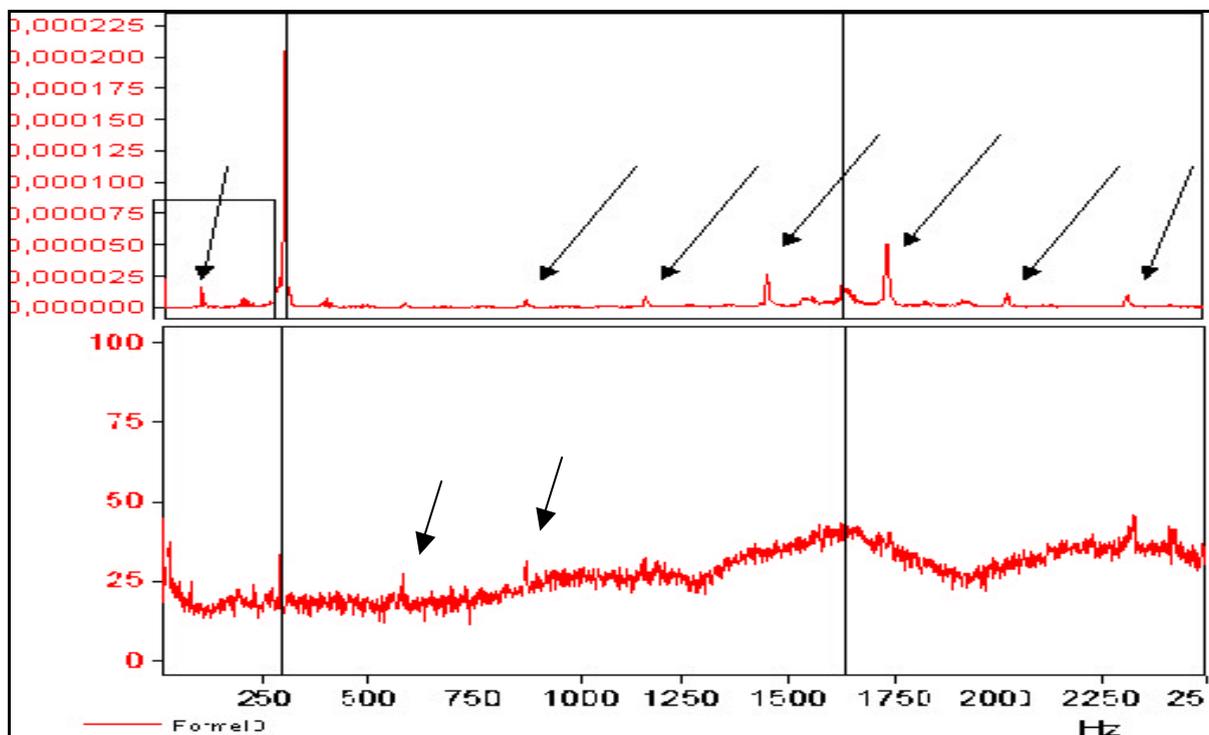


Bild 44: Vergleich von Spektren, oben Laservibrometer, unten Schallpegelmessers, Darstellung mit DASyLab

Die obere Abszisse ist in mm/s (Schwinggeschwindigkeit), während die untere in dB (Schallpegel) angegeben ist.

Vergleicht man die Frequenzen der beiden Spektren miteinander, so stellt man fest, dass einige übereinstimmen. Bei diesen Frequenzen kann davon ausgegangen werden, dass die mechanische Schwingung eine akustische Abstrahlung zur Folge hat.

Deutlich sind hier die Frequenzen der Drehzahl (die Nenndrehzahl betrug in diesem Versuch ca. 17.000 min^{-1} , die entsprechende Frequenz liegt bei etwa 290 Hz und ist mit dem Liniencursor markiert).

Bei der Darstellung des Schallpegelmessers, der zu Versuchszwecken auf A-Bewertung geschaltet war, fällt außerdem auf, dass das Doppelte (580 Hz), bzw. Dreifache (870 Hz) der Drehfrequenz zu erkennen ist. Eine A-Bewertung wird verwendet, um die Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs zu simulieren (bestimmte Frequenzen werden lauter, andere leiser wahrgenommen).

Die im Spektrum des Vibrometers gekennzeichneten Ausschläge sind die 3-, 4-, 5-, 6-, 7- und 8-fachen der Drehfrequenz. Besonders gut zu erkennen sind hierbei jeweils das 5- und 6-fache, die beide im unteren Spektrum jedoch in der Zone von etwa 1300 Hz bis 1900 Hz verschwinden und keine einzelnen Peaks aufweisen.

Im eingerahmten Bereich ist auch die Eigenfrequenz des Halters hier mit 89,5 Hz wiederzufinden, die vorher im Versuch ermittelt wurde (siehe auch Kapitel 7.4)

Da allerdings die errechnete Eigenfrequenz der Probe im Bereich von ca. 285 Hz liegt, kann diese hier nicht entdeckt werden, da sie von der Drehfrequenz überlagert wird.

In der nächsten Abbildung (**Bild 45**) ist ein Spektrum zu sehen, bei dem die Bohrmaschine gegen den Geradschleifer der Firma Bosch ausgetauscht wurde.

Da für dieses Gerät kein Bohrständer zur Verfügung stand, musste es an dem bisherigen Aufbau befestigt werden. Dies beeinträchtigte die Stabilität des Ganzen so stark, dass nur unzureichende Ergebnisse erzielt werden konnten.

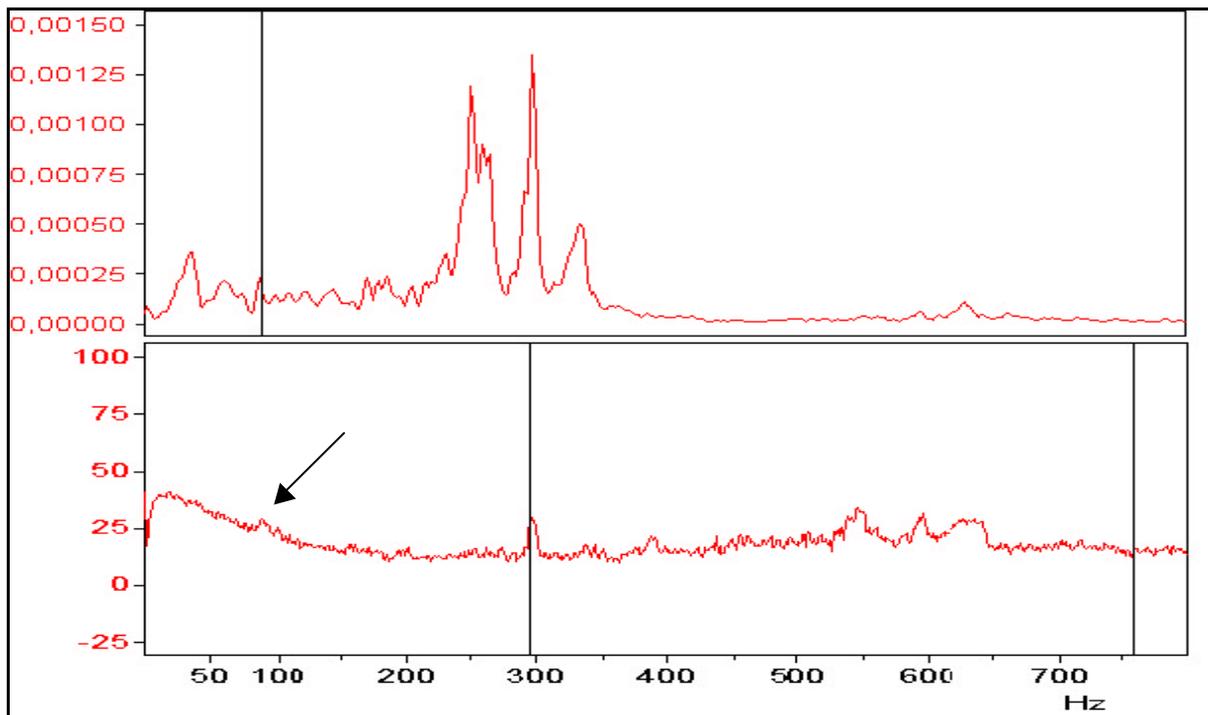


Bild 45: Vergleich von Spektren, oben Laservibrometer, unten Schallpegelmesser, Darstellung mit DASyLab, Kugelfräser mit Klingen im Bosch Geradschleifer

Dennoch werden die Ergebnisse kurz erläutert:

Die Drehfrequenz beträgt in diesem Fall 295 Hz, und ist in beiden Darstellungen deutlich zu sehen (unten durch den ersten Liniencursor hervorgehoben). Vergleicht man beide Spektren, so fällt auf, dass akustisch die Drehfrequenz, (295 Hz) und eine Spitze bei ca. 630 Hz zu erkennen sind, die sich auch im Spektrum wiederfinden, welches mit dem Laservibrometer aufgezeichnet wurde). In beiden Spektren ist außerdem die Halterfrequenz von 89,5 Hz markiert.

Zusätzlich dazu sind im Spektrum des Vibrometers noch Ausschläge bei ca. 250 und 340 Hz zu verzeichnen. Eine Zuordnung der Frequenzen lässt sich jedoch auf Grund des Versuchsverlaufes nicht herstellen, da die Vibrationen des Aufbaus zu stark waren.

Zu erwarten wären in der Vibrometerdarstellung noch die Vielfachen der Drehfrequenz, die auf Grund der Schneidenzahl des Fräasers zustande kommen müssten. Auch dieses ist auf Grund der Umstände während der Messung nicht erkennbar.

Bei den Messungen mit PAK ließen sich die Daten übersichtlicher darstellen.

Es war möglich, ein Gesamtbild in 3D zu plotten, dass den Zeitverlauf der Messung darstellt. Eine Solche Darstellung findet sich in der folgenden Abbildung:

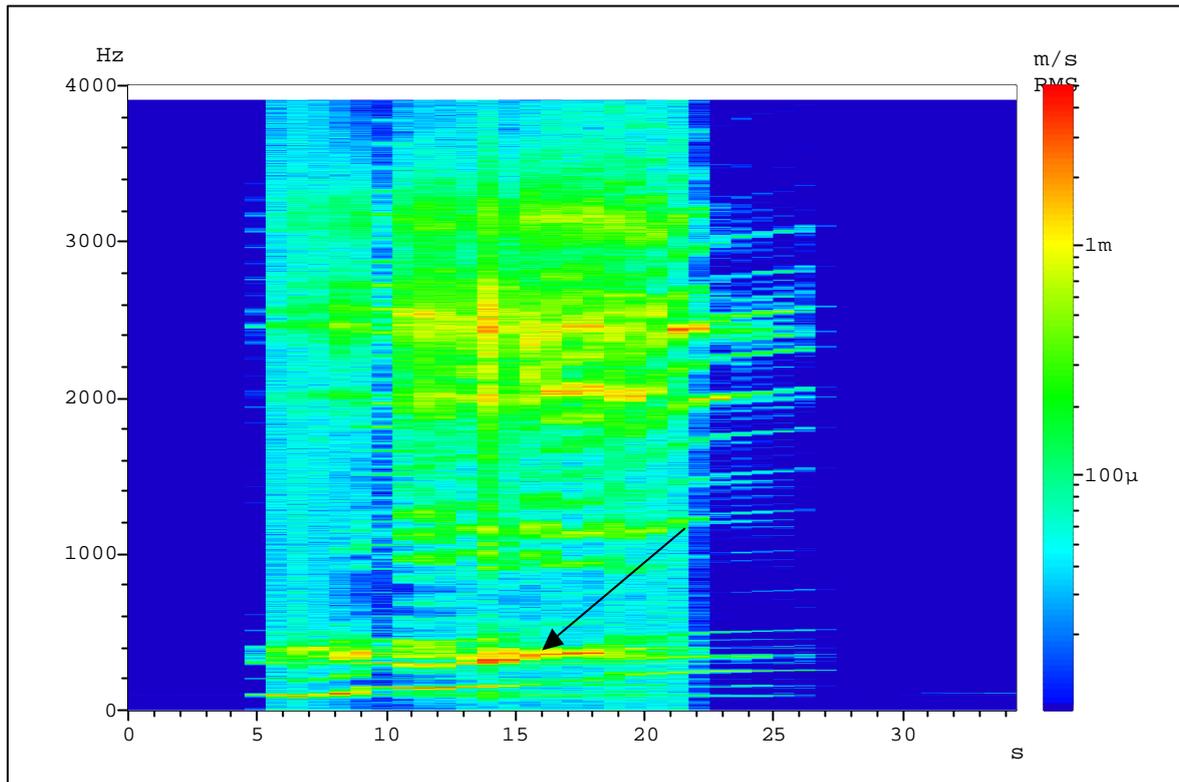


Bild 46: Zeitliche Darstellung der Spektren, Schneidenfräser an Holzklotz (Probe D)

Bild 46 stellt eine Aufnahme des Laservibrometers dar. Diese wurde über einen Zeitraum von 35 Sekunden aufgezeichnet und umfasst den Frequenzbereich von 0 Hz - ca. 4.000 Hz.

Die Aufzeichnung erfolgte ursprünglich mit einem Frequenzgang von bis zu 20.000 Hz, jedoch wurde festgestellt, dass sich die relevanten Schwingungen lediglich in einen Bereich bis ca. 3.500 Hz befanden.

Um Platz auf der Festplatte des Auswertungsrechners zu sparen fand dann eine Datenreduktion statt. Übrig blieb daraufhin ein Frequenzbereich, wie er im Bild zu erkennen ist.

Auch aus dieser Graphik kann man schon Rückschlüsse über die Schwingungserzeugung des Fräasers ziehen. Die leicht schräg stehenden Linien in Gelb- und Rottönen stellen die Bereiche dar, in denen die Schwingungen stärker sind, bzw. in denen die Probe stärker zum Schwingen angeregt wird.

Möchte man jedoch das Spektrum an einem bestimmten Zeitpunkt betrachten (um zum Beispiel eine genauere Analyse der Frequenzen durchzuführen), so kann man dies anhand eines Schnittes in der 3D- Ansicht durchführen.

Das Ergebnis eines solchen Schnittes sieht dann wie folgt aus:

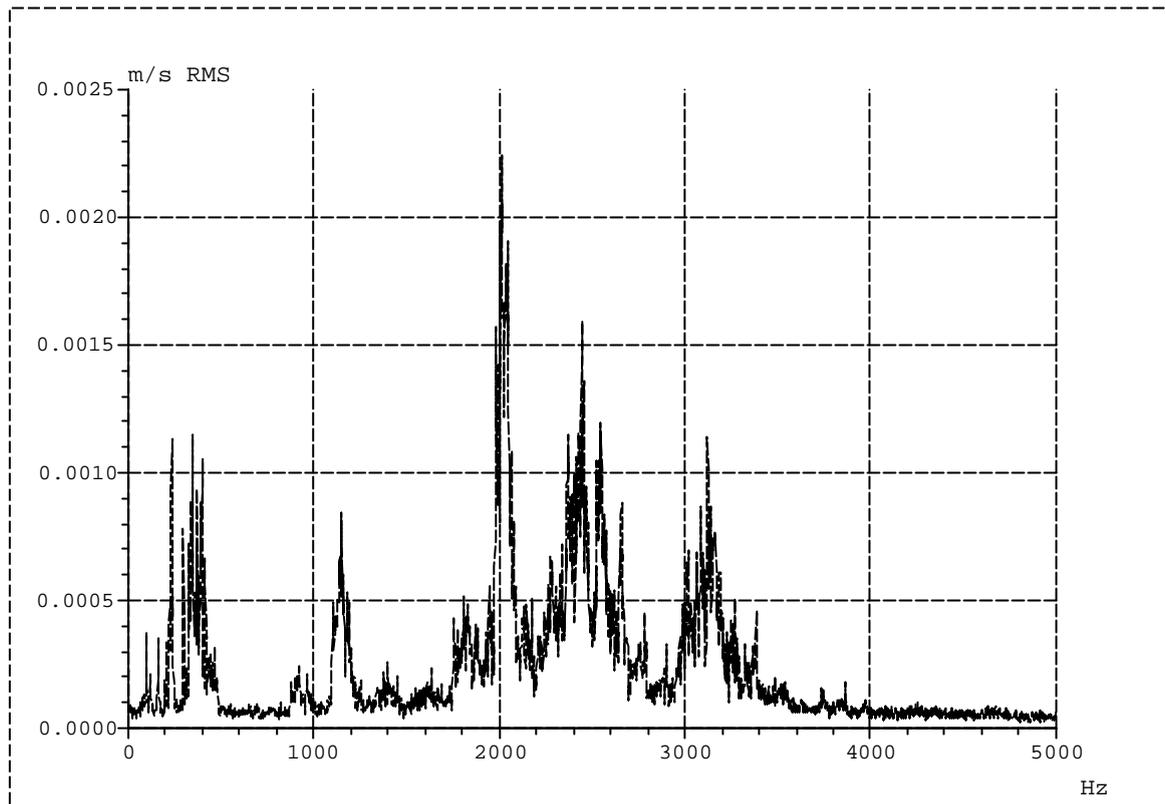


Bild 47: Darstellung des Laservibrometer-Spektrums, Schnitt bei Sekunde 20 aus Bild 44

In dieser Darstellung kann man nun im Pak-System mit Hilfe eines Cursors die einzelnen Frequenzen abtasten und abfragen. Das Programm zeigt dann unter dem Bild in einer Leiste die Werte an (Frequenz, Größe des Ausschlages, etc.)

8.2 Auswertung des Standardversuches

Um nun Messungen mit aussagekräftigen Ergebnissen zu erhalten, ist es notwendig, die Versuchsdurchführung zu standardisieren.

Das bedeutet, dass möglichst wenige Parameter bei der Messung geändert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden in den Standardmessungen lediglich die Variablen „Probe“ und „Fräser“ geändert.

Die Proben waren in diesem Fall Messing-Rohre und Schweißdrahtstücke, während als Fräser die Kugelfräser mit Schneiden und Diamantbeschichtung Verwendung fanden.

Sie besaßen unterschiedliche Längen, die zum Schwingen angeregt werden konnten. Dadurch konnten sich Änderungen in den Eigenfrequenzen ergeben.

Auch waren die Proben, die zum Vergleich Vollprobe zu Hohlprobe herangezogen wurden, nicht aus dem gleichen Material (Messingrohr, Schweißdraht), so dass sich auch hier unterschiedliche Eigenfrequenzen ergeben konnten.

Zur allgemeinen Übersicht können die Proben jedoch miteinander verglichen werden. Die Eigenfrequenzen der Proben wurden in einer Excel-Tabelle ausgerechnet, weil diese es ermöglichte, die Daten sämtlicher Probekörper zu erfassen, und die Berechnung entsprechend sofort durchzuführen.

Hierzu wurde Formel 5.1 zur Berechnung der Eigenfrequenz benutzt.

Diese errechneten Frequenzen halfen dann später bei der Unterscheidung von Eigenfrequenzen, Drehfrequenzen und Vielfachen davon.

8.2.1 Darstellung der Versuchsergebnisse

Möchte man nun herausfinden, wie die einzelnen Fräser auf die verschiedenen Materialien und Formen der Proben wirken, so muss man diese direkt vergleichen.

Am einfachsten geht dies, wenn man zum Beispiel die Frequenzspektren zweier unterschiedlicher Messreihen in ein Diagramm schreibt.

Ein solcher Vergleich findet sich in **Bild 48**:

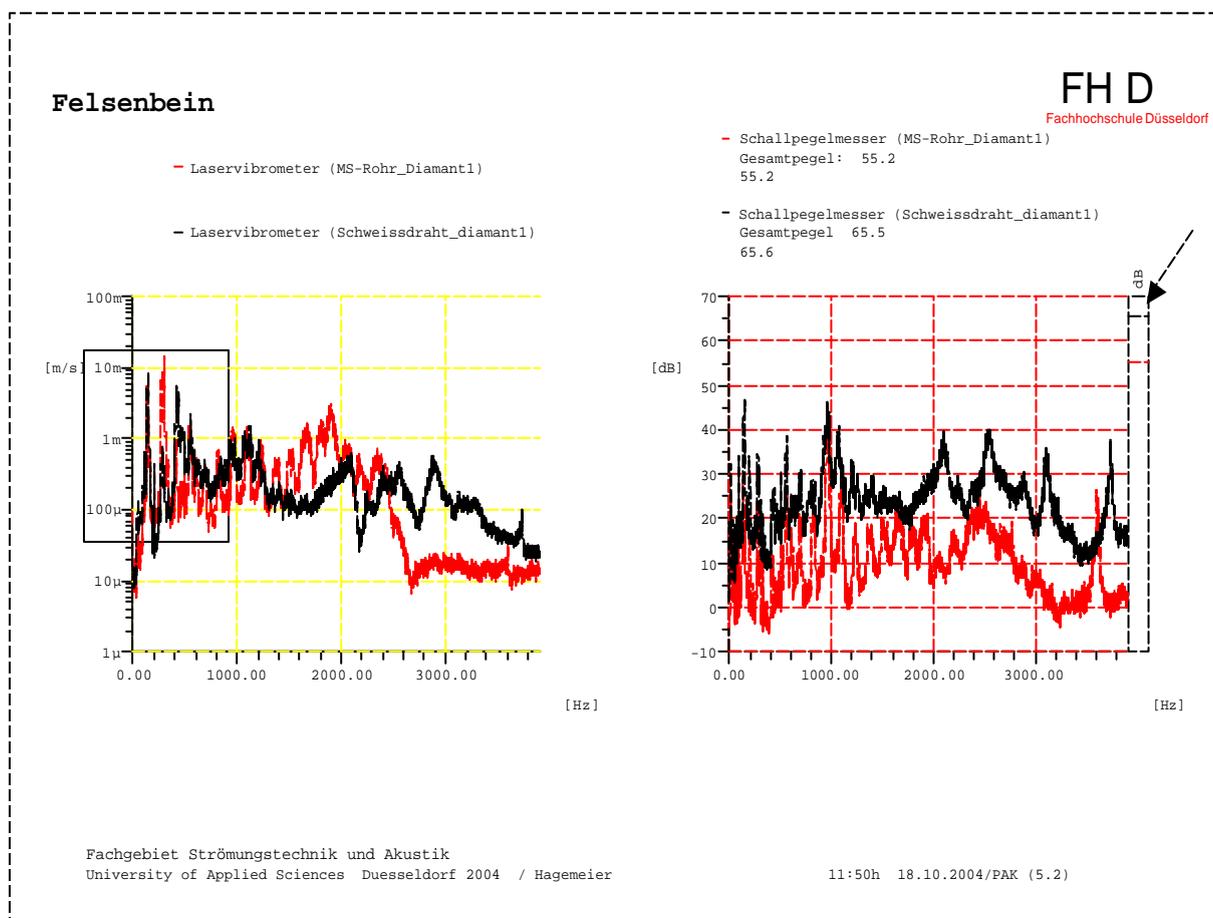


Bild 48: Vergleich von zwei Bohrungen (Hohlmaterial, Vollmaterial), Darstellung mit Laservibrometer und Schallpegelmesser, Spektren gemittelt über einen Zeitraum von 0-25 Sekunden

Beide Messreihen wurden mit dem mit Diamanten beschichteten Fräser durchgeführt. Die äußeren Rahmenbedingungen wurden nach Möglichkeit gleich gehalten, um einen optimalen Vergleich zu ermöglichen.

Die geänderten Parameter waren in diesem Fall:

- das Material der Proben unterschied sich (Schweißdraht, Messingrohr)
- die Längen der Proben unterschieden sich (es wurde jedoch versucht, zwei Proben zu vergleichen, die möglichst eine ähnliche Länge aufwiesen)

Geändert zu den vorherigen Spektren wurde auch die Art der Darstellung der Abszisse auf der linken Seite der Abbildung (Laservibrometer). Sie wurde nun ebenfalls logarithmisch aufgetragen.

Auf der rechten Seite (Schallpegelmesser) ist zusätzlich zum Spektrum noch der Gesamtpegel aufgetragen, zum Einen als Balkendiagramm (Pfeil) zum Anderen als Zahlenwert bei der Legende.

Zu beobachten ist bei dieser Darstellung, dass der Schallpegel des Fräsvorgangs bei der Hohlprobe um ca. 10 dB geringer ist als beim Schweißdraht.

Der Bereich, der mit einem Kasten (**Bild 48**) bezeichnet ist, zeigt einige Frequenzen, die (wenn auch mit unterschiedlicher Amplitude) übereinstimmen.

Diese Übereinstimmungen sind in diesem Fall die Drehfrequenz bzw. das Doppelte der Drehfrequenz, sowie die Eigenfrequenz des Halters.

Vergleicht man das Verhalten der beiden Proben unter Einfluss eines Schneidenfräasers, so erhält man das nachfolgende Bild:

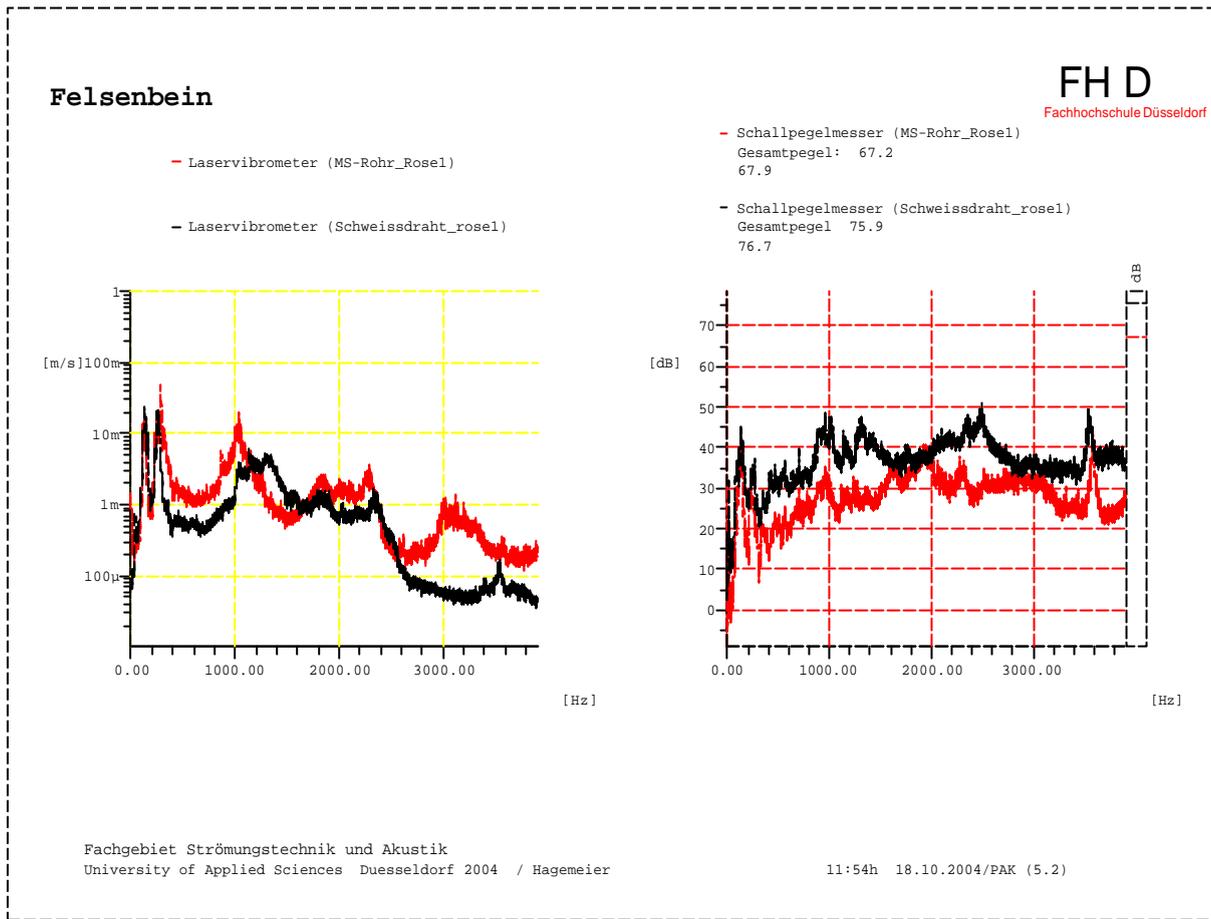


Bild 49: Vergleich von Voll- und Hohlmaterial unter Einfluss eines Schneidenfräasers, Darstellung mit Laservibrometer und Schallpegelmesser, gemittelt über einen Zeitraum von 0-25 Sekunden

Die Schallpegel betragen hier 67,2 dB (Hohlmaterial) und 75,9 dB (Vollmaterial).

Grundsätzlich scheint also der Schallpegel beim Fräsen des Vollmaterials größer zu sein.

Vergleicht man nun die Hohlproben unter Einwirkung von verschiedenen Fräsern (Schneidenfräser, Diamantfräser), so ergibt sich folgendes Bild:

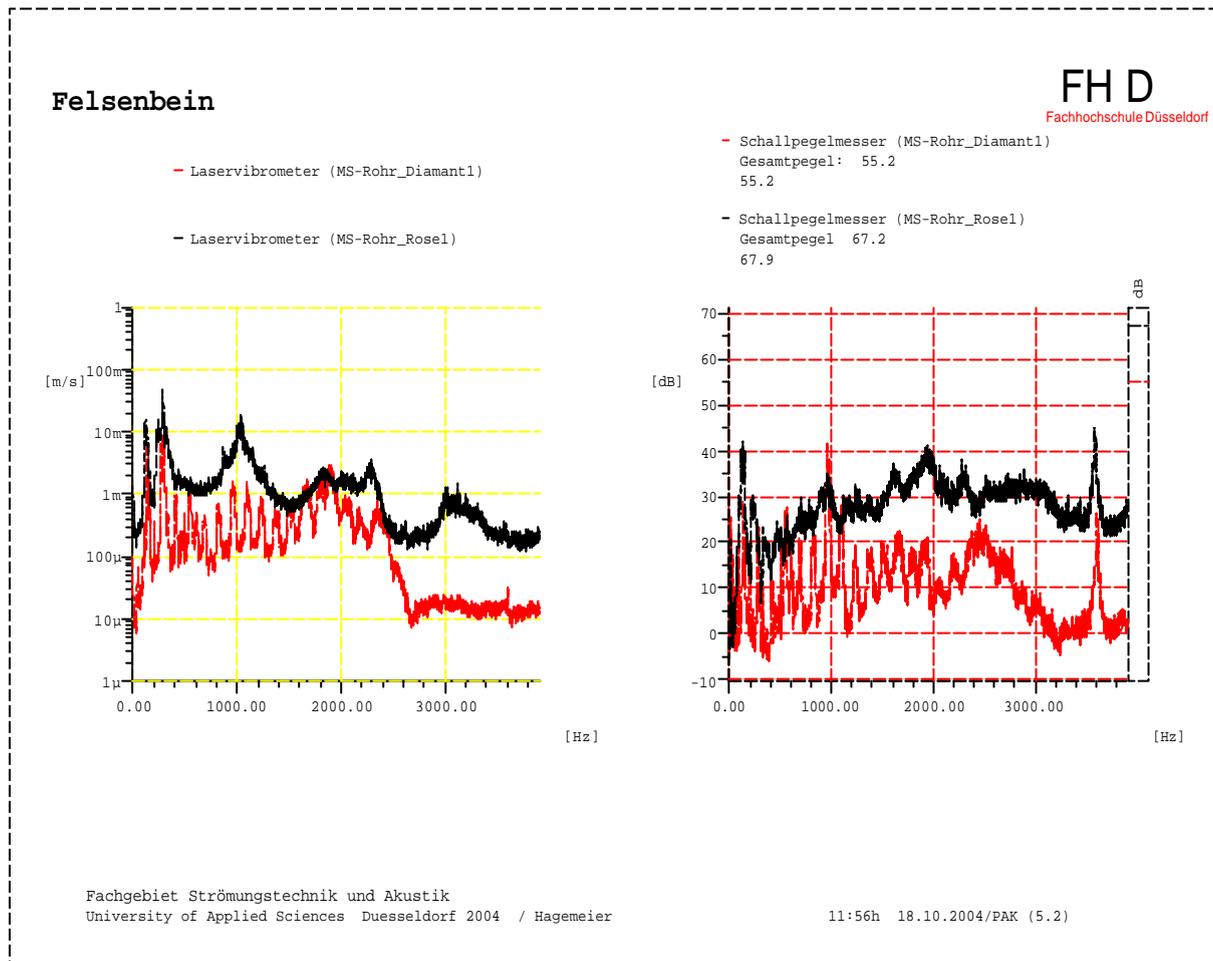


Bild 50: Vergleich von Diamant- und Schneidenfräser, Messingrohr, Darstellung von Laservibrometer und Schallpegelmesser, Zeitbereich von 0-25 Sekunden gemittelt.

Hier kann man feststellen, dass der Pegel beim Fräsen mit dem Schneidenfräser größer ist als der vom Diamantfräser (Schneidenfräser: 61,2 dB, Diamantfräser: 55,2 dB).

Dies lässt sich durch den erhöhten Kraftaufwand erklären, der beim Fräsen mit einem Schneidenfräser entsteht. Die Schneiden sind größer und dringen daher tiefer in das Material ein, was gleichzeitig einen größeren Widerstand bedeutet, und das Material dadurch stärker zum Schwingen angeregt wird.

Sieht man sich in allen Darstellungen die Amplituden genauer an, so stellt man fest, dass im niederfrequenten Bereich bis etwa 1100 Hz einige Übereinstimmungen zwischen den Kurven von Hohl- und Vollmaterial gibt. Dies deutet darauf hin, dass diese Frequenzen unabhängig vom Material und der Struktur der Körper (voll oder hohl) sind, und deshalb durch den Fräser hervorgerufen werden müssen. Hierbei handelt es sich im Allgemeinen um Eigenfrequenzen des Aufbaus (ca. 98 Hz), die Drehfrequenz (ca. 130-

140 Hz, je nach Drehzahl der Bohrmaschine) und den vielfachen der Drehfrequenz (bis zum Achtfachen). Die höheren Frequenzen bei etwa 2.400 Hz bzw. 3.600 Hz dürften hingegen Materialabhängige Frequenzen sein, da sie mit der herausragenden Länge der Probe variieren (längere Probe bedeutet niedrigere Frequenz, kürzere Probe eine höhere Frequenz).

Eine Methode um festzustellen, ob eine mechanische Schwingung auch als akustische Schwingung abgestrahlt wird, ist die Darstellung der Kohärenz.

Hierzu bringt man beide Spektren in ein ähnliches Format (Abszisse in logarithmischer Teilung) und benutzt eine entsprechende Funktion.

Diese Funktion stellt zum Beispiel das Pak-System zur Verfügung.

Hat man diese Kohärenzauswertung durchgeführt, so erhält man ein solches Bild:

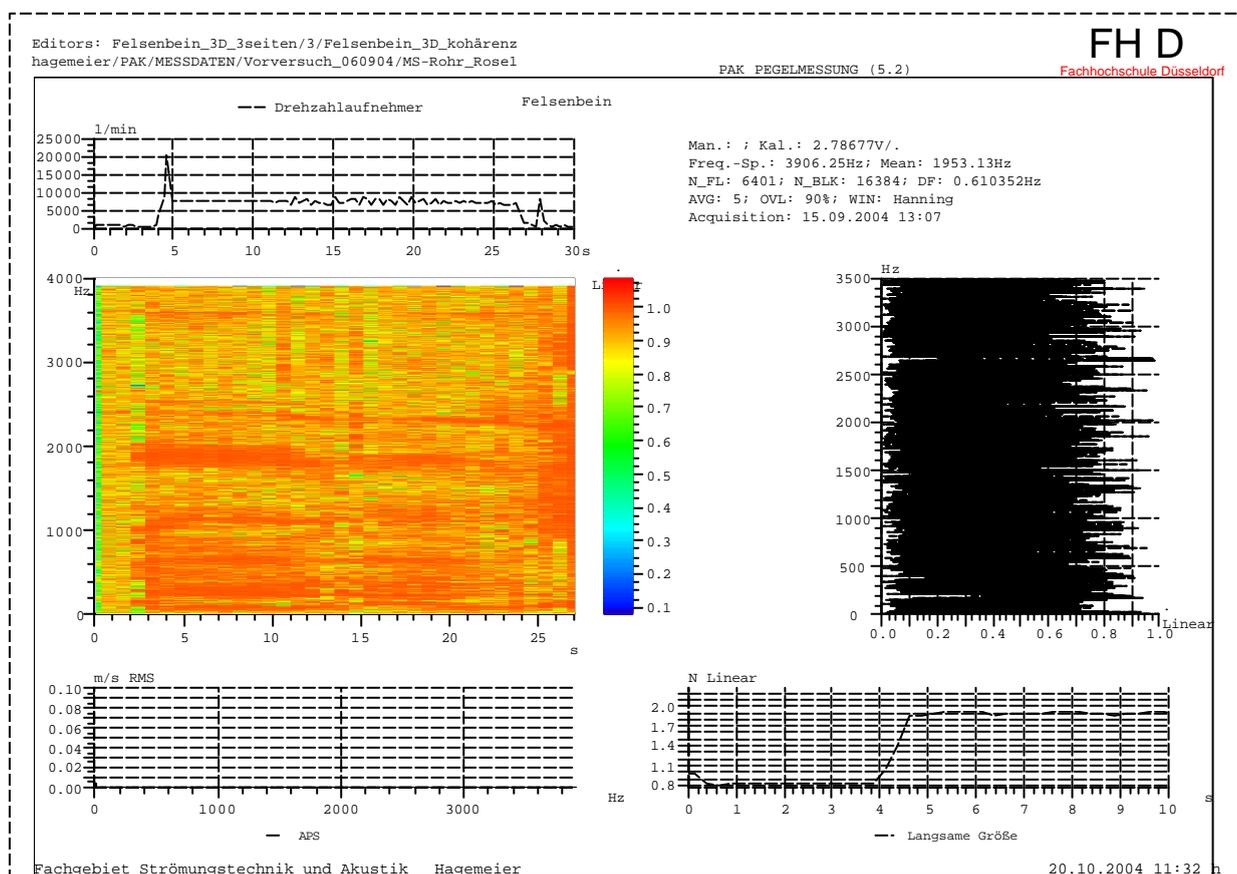


Bild 51: Kohärenzdarstellung der APS (Laservibrometer und Schallpegelmesser) von Bild 47

Die dunkleren Rottöne geben einen höheren Grad an Kohärenz an. Kohärenz bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Frequenzen der beiden Spektren (Schallpegelmesser und Laservibrometer) miteinander verglichen werden, und dann die Übereinstimmungen in einem weiteren Bild (linke Mitte von **Bild 51**) mit Werten von 0 bis 1 (oder 0% bis 100 %) dargestellt werden.

Anhand dieser Darstellung lässt sich nun feststellen, dass bei den mechanischen Schwingungen, die deutlich im Spektrum sichtbar sind (große Amplitude), auch akustische Schwingungen auftreten.

Das wiederum lässt den Schluss zu, dass die Frequenzen der mechanischen Schwingungen als akustische Schwingungen abgestrahlt werden.

8.2.2 Subjektive Bewertung der Messdaten (durch das menschliche Ohr)

Die letzte hier vorgestellte Möglichkeit, Messdaten zu bewerten ist die Bewertung durch das menschliche Ohr.

PAK bietet auch die Möglichkeit, die Zeitdaten akustisch wiederzugeben.

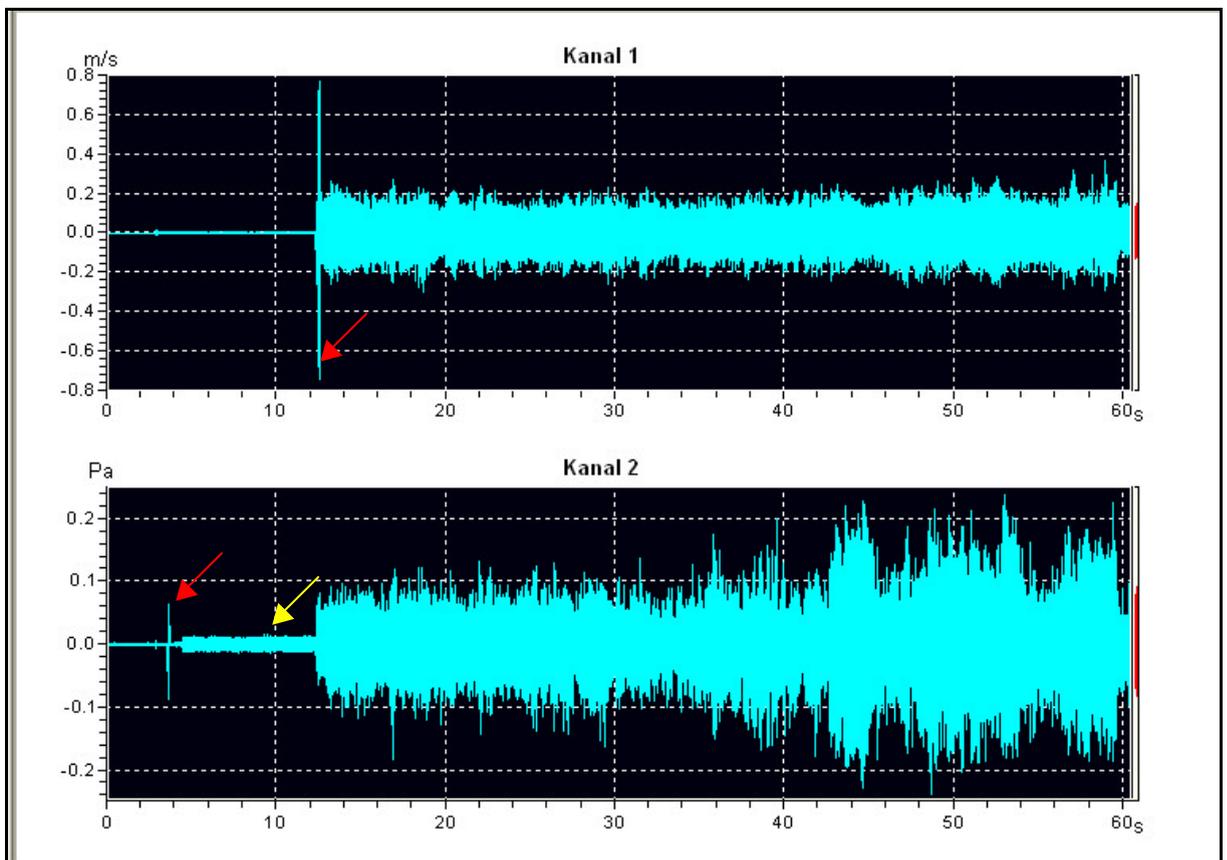


Bild 52: Darstellung der Zeitdaten im Audio-Wiedergabe-Modus, Diamantfräser am Messing-Rohr

Eine Bewertung mit dem menschlichen Ohr kann weder einen diskreten Pegel noch genaue Frequenzen bestimmen, sondern bietet alleine die Möglichkeit, festzustellen, ob und wie die Aufzeichnung „klingt“.

Dies kann eine subjektive Bewertung der Lautstärke sein, oder auch der Versuch, bestimmte Töne herauszuhören.

Bei der Auswertung der Versuche wurden auch die Audiodaten durchgehört.

Dabei entstand der Eindruck, dass die Laservibrometeraufzeichnung „dumpfer“ klang. Dies ist auf die Schallleitung durch das Material der Probe zurückzuführen. Der Körperschall wird durch das Material der Proben stärker gedämpft, als durch Luft.

In **Bild 52** ist oben eine Aufzeichnung zu sehen, die mit dem Laservibrometer gemacht wurde. Die Untere wurde hingegen mit dem Schallpegelmesser aufgezeichnet..

Die roten Pfeile markieren jeweils den Punkt in der Aufzeichnung, an dem diese anfängt. Das bedeutet im Falle der Vibrometerdarstellung, dass am markierten Zeitpunkt der Fräser auf das Material setzte und begann, dieses abzutragen. Im Falle des Schallpegelmessers bedeutet es, dass dort das Gerät eingeschaltet wurde.

Der gelbe Pfeil zeigt einen Bereich, in dem die Aufzeichnung schon läuft, aber noch kein Kontakt zwischen Fräser und Material stattfindet. Hier ist lediglich das Geräusch der Bohrerwelle zu hören.

8.3 Zusammenfassung der Messergebnisse

Es wurde festgestellt, dass ein Vollkörper stärker schwingt, und einen stärkeren Schallpegel abstrahlt, als ein Hohlkörper. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass homogene Stoffe eine geringere Dämpfung besitzen als inhomogene.

Des Weiteren werden die Schwingungen stärker angeregt, wenn ein Fräser mit klingenförmigen Schneiden Verwendung findet. Der diamantbeschichtete Fräser hat zwar eine unregelmäßige Schneidenverteilung auf der Oberfläche und auch die Form der Schneiden ist nicht gleichmäßig, jedoch greifen hier die Schneiden auch nicht so tief in das Material, wie beim Klingenfräser (von den Medizinern „Rosenbohrer“ genannt).

Es wurde außerdem festgestellt, dass beim Spektrum des Diamantfräasers sehr regelmäßig Amplituden auftauchen. Dieses wurde allerdings in erster Linie beim Schneidenfräser erwartet, da hier eine genau bekannte Anzahl von Klingen in regelmäßigen Abständen in das Material greift, und deshalb regelmäßige Schwingungen verursachen sollte.

Das war jedoch nicht der Fall, sondern es entstanden im Spektrum wenige diskrete Peaks, ansonsten waren eher Zonen zu sehen, aus denen sich nur eine Spitze erhob. Vielfache der Drehfrequenz (es hätten bis zu acht sein müssen, da der Fräser acht Schneiden besitzt) waren kaum auszumachen.

Beim Diamantfräser hingegen waren Vielfache der Drehfrequenz bis zum acht oder neunfachen zu erkennen.

9. Zusammenfassung

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der akustischen und schwingungstechnischen Vermessung von chirurgischen Fräsern.

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, sollten einige feste Einstellungen gemacht werden, die dann bei den Versuchsdurchführungen jeweils übernommen werden. (Kraft, mit der die Fräser auf die Proben wirken, Drehzahl der Bohrmaschine, Art der Einspannung)

Für die Messungen an kleinen Versuchskörpern ist die berührungslose Messung mit dem Laservibrometer vorzuziehen.

Zum Vermessen der Proben sollte ein zufälliges Rauschen aus dem Signalgenerator verwendet werden, da hierdurch sofort eine Auswertung mit einer entsprechenden Software möglich ist.

Außerdem sollten die Zeitdaten zur Weiterverwendung aufgezeichnet werden, um die Reproduzierbarkeit innerhalb einer Messung zu gewährleisten.

Homogene Werkstoffe schwingen stärker, da sie weniger Dämpfung besitzen.

Klingenfräser verursachen eher „Schwingzonen“ mit einem Peak während die Diamantfräser regelmäßige Amplituden hervorrufen, die den Vielfachen der Drehfrequenz entsprechen.

Einem mit Klingen- oder Diamantfräsern behandelten Patienten Gehörschutz in die Ohren zu stopfen würde allerdings nur wenig bringen, da Schwingungen, die über den Knochen an das Hörorgan geleitet werden, von diesem wahrgenommen werden. Auch dadurch kann eine Reizüberflutung des Hörorgans zustande kommen, die dann einen „Tinnitus“ nach sich zieht.

Die Bohrmaschine sollte in einem möglichst steifen Bohrständer oder Rahmen montiert werden, um zusätzliche Schwingungen, die durch den Aufbau entstehen, vorzubeugen.

Auch sollten mehrere Halterungen vorhanden sein, um verschiedene Proben und Werkzeugmaschinen aufnehmen zu können.

Die Versuche haben gezeigt, dass die Vermessung von unterschiedlichen Fräsern auch mit Hilfe von verhältnismäßig einfacher Technik möglich ist, diese jedoch die Auswertung erschweren kann.

10. Fazit

Die durchgeführten Versuche konnten erste Aufschlüsse über das Schwingungsverhalten von Vollmaterial und Hohlkörpern geben. Um Aussagen über die Schwingungsanregung von Knochen im Allgemeinen und Felsenbeinen im Besonderen treffen zu können, bedarf es jedoch weiterer Versuche.

Hierzu sollte ein fester Versuchsstand konzipiert werden, der die Möglichkeit bietet, verschiedene Bohrmaschinen aufzunehmen. Dieser Versuchsstand sollte aus einem starren Rahmen bestehen, in dem die Messtechnik und die Versuchsgeräte eingebaut werden können.

Die Proben sollten komplexere Formen erhalten, und als Material sollte später auch Knochen Verwendung finden.

Die Ergebnisse müssten anschließend miteinander verglichen werden, um die Verwertbarkeit der im Rahmen dieser Diplomarbeit gewonnenen Daten einzuschätzen.

Durch weitere Untersuchungen lassen sich dann diese gewonnenen Daten in einen direkten Zusammenhang mit den medizinischen Aspekten des „Tinnitus“ - Problems bringen und könnten möglicherweise Aufschlüsse über eine Verbesserung der Operationsmethode bringen. Somit wäre eine Verminderung der durch diese Operationsmethode auftretenden „Tinnitus“ – Patienten denkbar.

Bildnachweise:

Bild 1: [MAT] http://www.matheboard.de/lexikon/Harmonische_Schwingung_definition.htm

Bild 2: [GMI] www.gmi.edu

Bild 3: [MAD] Dr. Ing. A. Meyers, Script „Maschinendynamik“, S.25, <http://www.tm.bi.ruhr-uni-bochum.de/profil/mitarbeiter/meyers/maschd1.pdf>

Bild 4: [TMI] J. Berger, Technische Mechanik für Ingenieure, Band 3, Vihweg Verlag 1998

Bild 5: [TMI] J. Berger, Technische Mechanik für Ingenieure, Band 3, Vihweg Verlag 1998

Bild 6: [TMI] J. Berger, Technische Mechanik für Ingenieure, Band 3, Vihweg Verlag 1998

Bild 7: [TMI] J. Berger, Technische Mechanik für Ingenieure, Band 3, Vihweg Verlag 1998

Bild 8: [TMI] J. Berger, Technische Mechanik für Ingenieure, Band 3, Vihweg Verlag 1998

Bild 9: [TMI] J. Berger, Technische Mechanik für Ingenieure, Band 3, Vihweg Verlag 1998

Bild 10: [STA] Kameier, Reinartz, Script: „Strömungsakustik“, FH-Düsseldorf, 2000

Bild 11: [MAD] Dr. Ing. A. Meyers, Script „Maschinendynamik“, S.49,

<http://www.tm.bi.ruhr-uni-bochum.de/profil/mitarbeiter/meyers/maschd1.pdf>

Bild 12: [MAD] Dr. Ing. A. Meyers, Script „Maschinendynamik“, S.15,

<http://www.tm.bi.ruhr-uni-bochum.de/profil/mitarbeiter/meyers/maschd1.pdf>

Bild 13: [MAD] Dr. Ing. A. Meyers, Script „Maschinendynamik“, S.15,

<http://www.tm.bi.ruhr-uni-bochum.de/profil/mitarbeiter/meyers/maschd1.pdf>

Bild 14: [BIL] Bilsom International GmbH

Bild 15: [RUD] Reinartz, Vortrag Haus der Technik, Diagramm nach Robinson und Dadson

Bild 16: [HÖF] Höfling, „Physik“, Dümmler Verlag 1985, 14. Auflage

Bild 17: [DIPfr] Thorsten Frey, Diplomarbeit: „Einsatz eines Laservibrometers zur Messung an stehenden und rotierenden Strukturen“, FH-Düsseldorf 2000

Bild 18: [POL] Polytec Informationsbroschüre, 1999

Bild 19: Thorsten Frey, Diplomarbeit: „Einsatz eines Laservibrometers zur Messung an stehenden und rotierenden Strukturen“, FH-Düsseldorf 2000

Bild 20: [POL] Polytec Informationsbroschüre, 1999

Bild 21: [POL] Polytec Informationsbroschüre, 1999

Bild 22: [POL] Polytec Informationsbroschüre, 1999

Bild 23: [POL] Polytec Homepage,

http://www.polytec.com/ger/158_421.asp?highlightSubMenu=Vibrometer-%20Typen&highlightPopupMenu=Einpunkt-Vibrometer

-
- Bild 24: [DIPfr] Thorsten Frey, Diplomarbeit: „Einsatz eines Laservibrometers zur Messung an stehenden und rotierenden Strukturen“, FH-Düsseldorf 2000
- Bild 25: Hagemeyer, Darstellung mit DASYSLab
- Bild 26: [BUK] Brüel und Kjær, Datenblatt für den Exiter Nr.4809
- Bild 27: Hagemeyer, Darstellung mit DASYSLab
- Bild 28: Hagemeyer, Darstellung mit DASYSLab
- Bild 29: Hagemeyer, DASYSLab-Schaltbild, Schaltbild zur Darstellung der Daten
- Bild 30: Hagemeyer, DASYSLab-Schaltbild, Speichern der Zeitdaten
- Bild 31: Hagemeyer, DASYSLab-Schaltbild, Darstellung der Daten
- Bild 32: Hagemeyer, Pak-Darstellung der Daten
- Bild 33: [IMC] Hille, Koch, Lehberger, Industriemechanik, Stam-Verlag Köln 1995, 1.durchgesehene Auflage
- Bild 34: [IMC] Hille, Koch, Lehberger, Industriemechanik, Stam-Verlag Köln 1995, 1.durchgesehene Auflage
- Bild 35: [IMC] Hille, Koch, Lehberger, Industriemechanik, Stam-Verlag Köln 1995, 1.durchgesehene Auflage
- Bild 36: Hagemeyer, Vergrößerte Darstellung des Diamantbeschichteten Kugelfräasers, 16-fache Vergrößerung
- Bild 37: Hagemeyer, Vergrößerte Darstellung des Kugelfräasers mit 8 Schneiden, 10-fache Vergrößerung
- Bild 38: Hagemeyer, Achsdefinition
- Bild 39: Hagemeyer, Versuchsaufbau
- Bild 40: Hagemeyer, Darstellung eines Schwingungsspektrum, DASYSLab am DELL-Laptop
- Bild 41: Hagemeyer, Darstellung eines Schwingungsspektrums, DASYSLab am ACER-Laptop
- Bild 42: Hagemeyer, Versuchsaufbau im Motorenprüfstand
- Bild 43: Hagemeyer, Schwingungsanregung des Halters mit Hilfe eines Shakers
- Bild 44: Hagemeyer, Vergleich von Spektren (Laservibrometer und Schallpegelmesser) Darstellung mit DASYSLab
- Bild 45: Hagemeyer, Vergleich von Spektren, oben Laservibrometer, unten Schallpegelmesser, Darstellung mit DASYSLab, Kugelfräser mit Klingen im Bosch Geradschleifer
- Bild 46: Hagemeyer, Zeitliche Darstellung der Spektren mit dem Pak-System, Schneidenfräser an Holzklötzchen,
- Bild 47: Hagemeyer, Darstellung des Laservibrometer-Spektrums mit dem Pak-System, Schnitt bei Sekunde 20 aus Bild 45,

Bild 48: Hagemeyer, Vergleich von zwei Bohrungen (Hohlmaterial, Vollmaterial), Darstellung mit Laservibrometer und Schallpegelmesser, Spektren gemittelt über einen Zeitraum von 0-25 Sekunden

Bild 49: Hagemeyer, Vergleich von Voll- und Hohlmaterial unter Einfluss eines Schneidenfräasers, Darstellung mit Laservibrometer und Schallpegelmesser, gemittelt über einen Zeitraum von 0-25 Sekunden

Bild 50: Hagemeyer, Vergleich von Diamant- und Schneidenfräser, Messingrohr, Darstellung von Laservibrometer und Schallpegelmesser, Zeitbereich von 0-25 Sekunden gemittelt

Bild 51: Hagemeyer, Kohärenzdarstellung der APS (Laservibrometer und Schallpegelmesser) von Bild 46

Bild 52: Hagemeyer, Darstellung der Zeitdaten im Audio-Wiedergabe-Modus, Diamantfräser am Messing-Rohr

Literaturnachweis

- [ANA] Nickel, Schummer, Seiferle, Lehrbuch der Anatomie der Haustiere, Band 4, Verlag Paul Parey, 1975
- [BUK] Brüel und Kjær, Datenblatt für den Schwingerreger Nr.4809
- [DIPfr] Frey, Diplomarbeit: „Einsatz eines Laservibrometers zur Messung an stehenden und rotierenden Strukturen“, FH-Düsseldorf 2000
- [DUB] Dubbel, „Taschenbuch für den Maschinenbau“, Springer Verlag, 19. Auflage, 1999
- [EEN] Wirth, „Condition Monitoring ist kein Allheilmittel“, Erneuerbare Energien, Ausgabe 8/ 2004
- [GMI] „Vibration and waves“, www.gmi.edu,
- [HÖF] Höfling, „Physik“, Dümmler Verlag 1985, 14. Auflage
- [IEE] Narayanan, Fang, Bernard, Atlas, „Feature representations for monitoring of tool wear“, IEEE, 1994
- [IMC] Hille, Koch, Lehberger, „Industriemechanik“, Stam- Verlag Köln 1995, 1.durchgesehene Auflage
- [KAR] Karrenberg, „Signale, Prozesse, Systeme“, Springer-Verlag, 2002
- [MAD] Dr. Ing. A. Meyers, Script „Maschinendynamik“, S.25, <http://www.tm.bi.ruhr-uni-bochum.de/profil/mitarbeiter/meyers/maschd1.pdf>, 2004
- [MAT] http://www.matheboard.de/lexikon/Harmonische_Schwingung_definition.htm, 28.09.2004
- [MER] Merkel, Thomas, „Taschenbuch der Werkstoffe“, Fachbuchverlag Leipzig, 2000
- [MVT] Tse, Morse, Hinkel, Allyn and Bacon, „Mechanical vibration, theory and applications“, 2nd Edition, Inc. 1986
- [POL] Polytec Informationsbroschüre, 1999
- [PSY] Pschyrembel, Medizinisches Wörterbuch, 257. Auflage, Nikol Verlagsgesellschaft mbH, 1993
- [RUD] Reinartz, Vortrag Haus der Technik, Diagramm nach Robinson und Dadson
- [STA] Kameier, Reinartz, Script: „Strömungsakustik“, FH-Düsseldorf, 2000
- [TAK] Veit, „Technische Akustik“, Vogel-Verlag, 1996
- [TMI] Berger, „Technische Mechanik für Ingenieure“, Band 3, Vohwinkel Verlag 1998
- [TTA] Müller, Möser (Hrsg.), „Taschenbuch der Technischen Akustik“, Springer Verlag 2004, 3. erweiterte und überarbeitete Auflage
- [WEK] Weck, „Werkzeugmaschinen und Fertigungssysteme Bd.4“, VDI-Verlag

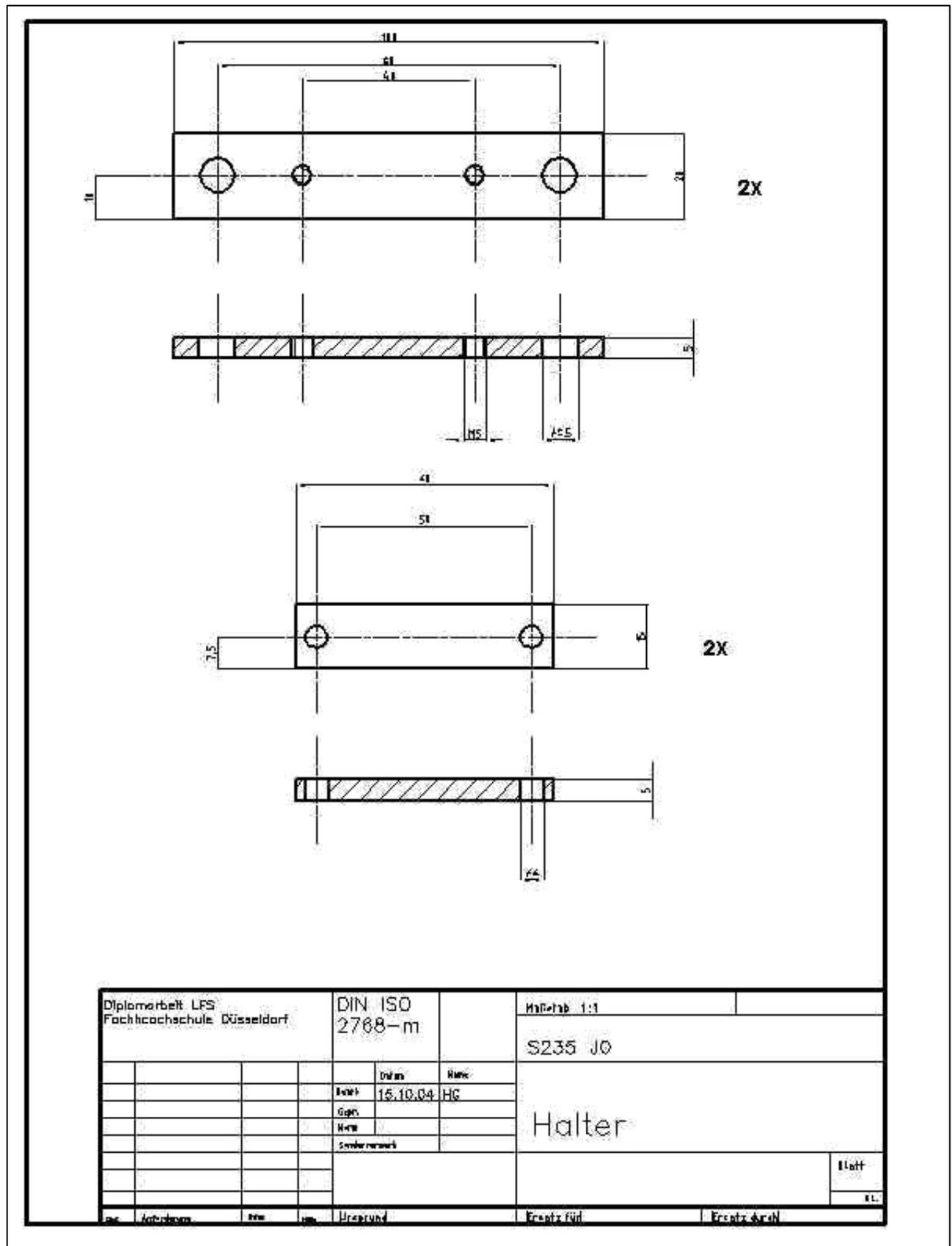
[WIKfo] Online-Lexikon Wikipedia,

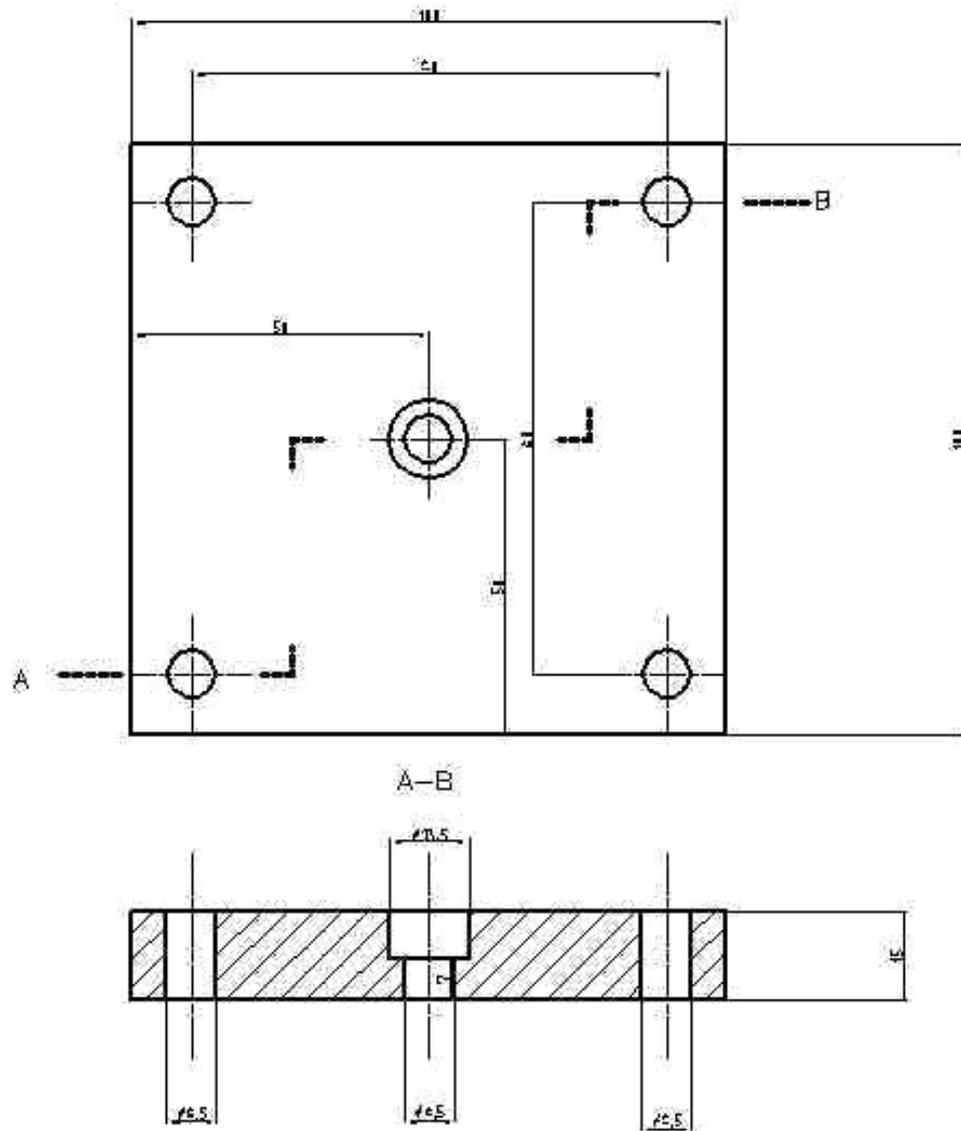
http://de.wikipedia.org/wiki/Jean_Baptiste_Joseph_Fourier,

[ZST] Pauksch, Preger, „Zerspantechnik“, Viehweg Verlag

Anhang

CAD-Zeichnungen der Halter, bzw. der Halter-Platte





Diplomarbeit LFS Fachhochschule Düsseldorf			DIN ISO 2768-m		Maßstab 1:1	
					AlMgSi 5	
					Halter Platte	
					Blatt	
					IL	
Appr.	Abzeichnung	Rev.	Werk	Datum	Ersatz von	Ersatz durch
			15.10.04	HG		
			Gepr.			
			Norm			
			=Mittelwert			

Darstellung der Vergleiche Vollmaterial zu Hohlmaterial sowie Schneidenfräser und Diamantfräser, jeweils Darstellung von Schallpegelmessern und Laservibrometern

Blatt 1: Messingrohr zu Schweißdraht, Diamant-Fräser (Bild 49)

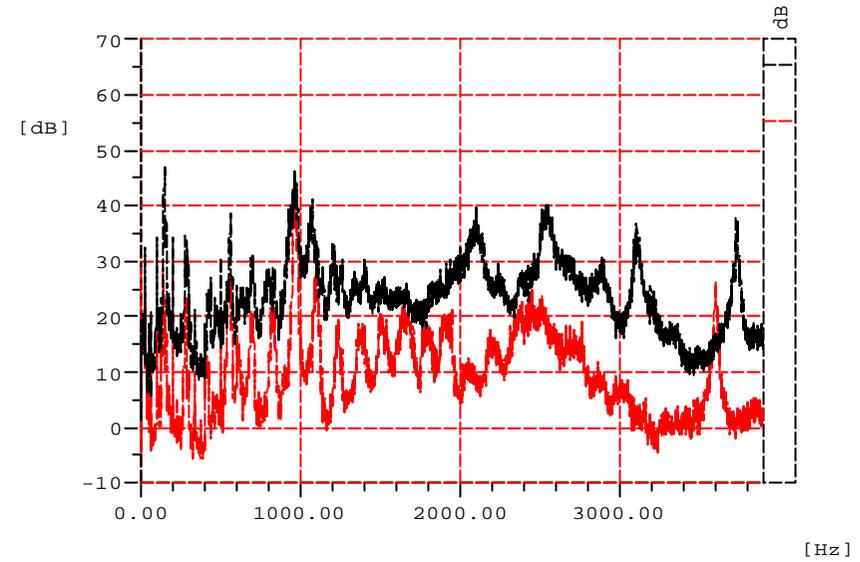
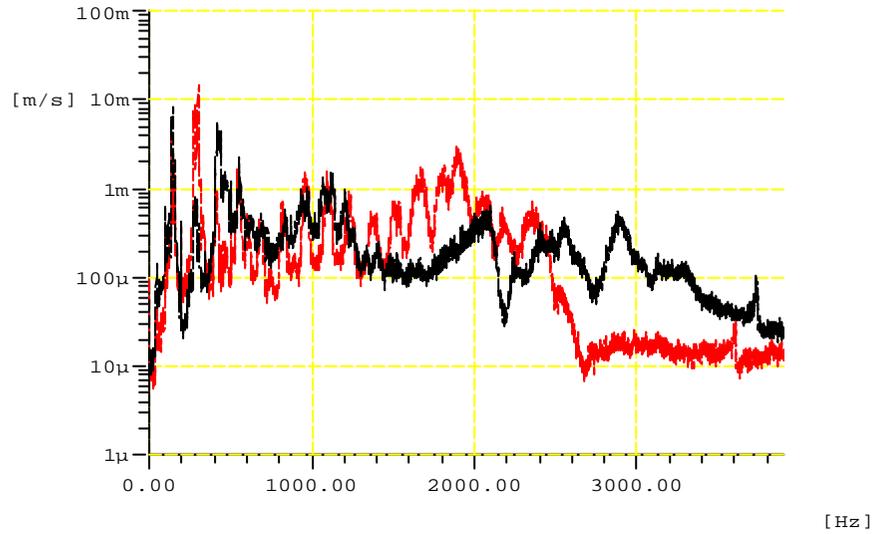
Blatt 2: Messingrohr zu Schweißdraht, Schneidenfräser (Bild 50)

Blatt 3: Messingrohr zu Messingrohr, Diamantfräser zu Schneidenfräser (Bild 51)

Felsenbein

- Laservibrometer (MS-Rohr_Diamant1)
- Laservibrometer (Schweissdraht_diamant1)

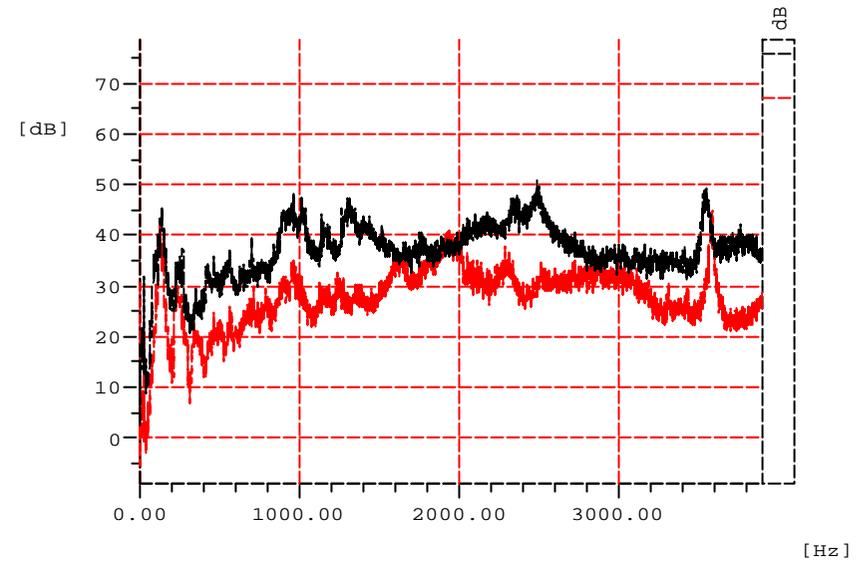
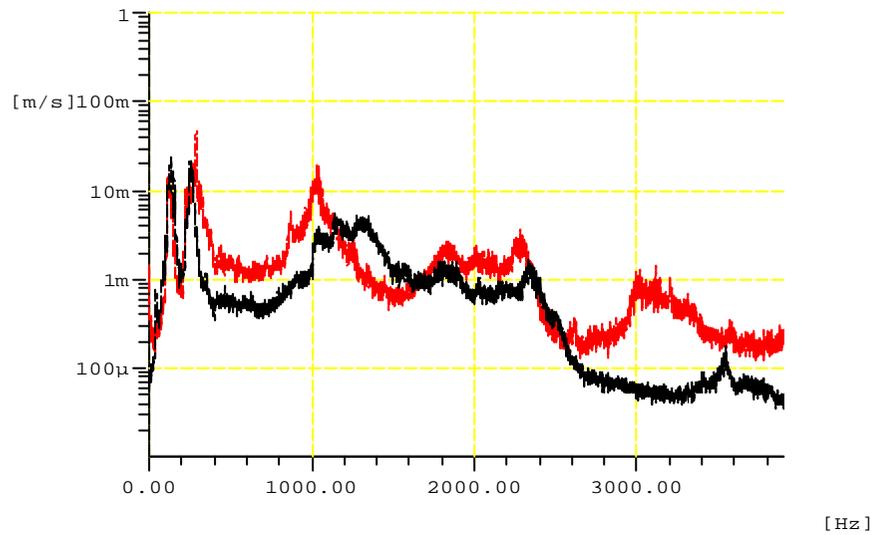
- Schallpegelmesser (MS-Rohr_Diamant1)
Gesamtpegel: 55.2
55.2
- Schallpegelmesser (Schweissdraht_diamant1)
Gesamtpegel 65.5
65.6



Felsenbein

- Laservibrometer (MS-Rohr_Rosel)
- Laservibrometer (Schweissdraht_rose1)

- Schallpegelmesser (MS-Rohr_Rosel)
 Gesamtpegel: 67.2
 67.9
- Schallpegelmesser (Schweissdraht_rose1)
 Gesamtpegel 75.9
 76.7



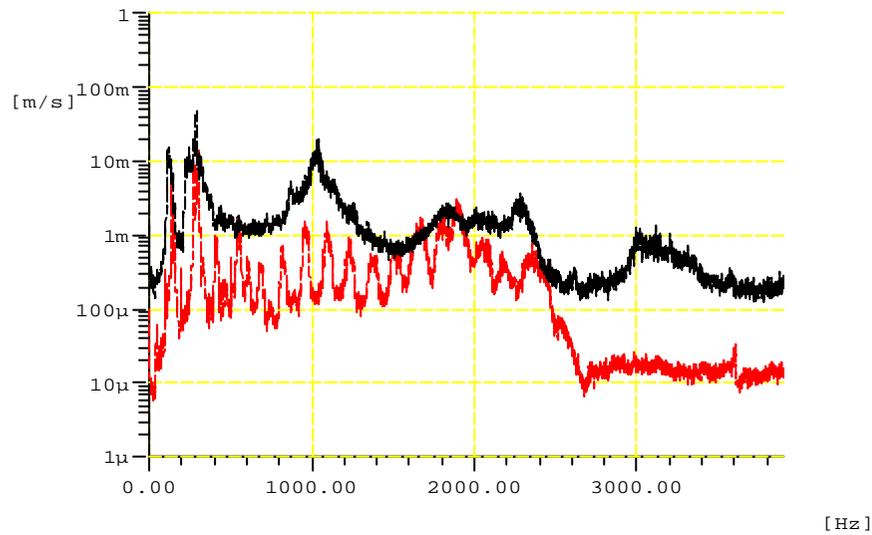
Felsenbein

FH D

Fachhochschule Düsseldorf

- Laservibrometer (MS-Rohr_Diamant1)

- Laservibrometer (MS-Rohr_Rosel)



- Schallpegelmessner (MS-Rohr_Diamant1)
Gesamtpegel: 55.2
55.2

- Schallpegelmessner (MS-Rohr_Rosel)
Gesamtpegel 67.2
67.9

