Piezoelektrische Beschleunigungs-aufnehmer und Vorverstärker

Theorie und Anwendung

Brüel & Kjær

PIEZOELEKTRISCHE BESCHLEUNIGUNGSAUFNEHMER UND VORVERSTÄRKER

von

Mark Serridge, BSc

und

Torben R. Licht, MSc

1990

Druck: K. Larsen & Søn A/S · DK-2600 Glostrup

INHALT

1. SCHWINGUNGSMESSUNG 1

1.1. EINFÜHRUNG 1
1.2. WARUM SCHWINGUNGSMESSUNG? 1
1.3. WAS IST SCHWINGUNG? 6
1.4. SCHWINGUNGSPARAMETER 6
1.5. DIE QUANTITATIVE BESCHREIBUNG VON SCHWINGUNGEN 8
Lineare Amplituden- und Frequenzskalen 10
Logarithmische Amplituden- und Frequenzskalen 10
1.6. DIE ANALYSE VON SCHWINGUNGEN 11

2. DER PIEZOELEKTRISCHE BESCHLEUNIGUNGSAUFNEHMER 13

2.1. EINFÜHRUNG 13
2.2. DIE ARBEITSWEISE EINES BESCHLEUNIGUNGSAUFNEHMERS 14
Analytische Beschreibung der Arbeitsweise
eines Beschleunigungsaufnehmers 15
2.3. FREQUENZBEREICH 20
Obere Grenzfrequenz 21
Untere Grenzfrequenz 22
2.4. PIEZOELEKTRISCHE MATERIALIEN 22
2.5. PRAKTISCHE AUFNEHMERKONSTRUKTIONEN 25
Beschleunigungsaufnehmer mit Ladungs-Strom-Wandler 27
Weitere Bauarten 28
2.6. ÜBERTRAGUNGSFAKTOR 28
Ladungs- und Spannungs-Übertragungsfaktor 28
Uni-Gain®-Übertragungsfaktor 30
Linearität und Dynamikbereich 31
Querempfindlichkeit 32
2.7. PHASENGANG 35
2.8. VERHALTEN BEI TRANSIENTEN SCHWINGUNGEN 36
Ladungsverlust 36
Nachklingen 39
Nullpunktverschiebung 40

3. VORVERSTÄRKER FÜR BESCHLEUNIGUNGSAUFNEHMER 42

3.1. AUSFÜHRUNG UND ARBEITSWEISE VON VORVERSTÄRKERN 43
3.2. LADUNGSVERSTÄRKER 43
Ladungs-Übertragungsfaktor 44
Untere Grenzfrequenz 48
Kapazitive Eingangslast durch Aufnehmerkabel 53
Ladungsabschwächung 54
Rauschen im Ladungsverstärker 55
3.3. SPANNUNGSVORVERSTÄRKER 60
Spannungs-Übertragungsfaktor 60
Untere Grenzfrequenz 62
Rauschen im Spannungs-Vorverstärker 63
3.4. AUSGANGSKABEL AM VORVERSTÄRKER 63
3.5. LADUNGS-STROM-WANDLER 64
Brüel & Kjær Beschleunigungsaufnehmer mit eingebautem Ladungs-Strom-Wandler und Strom-Spannungs-Wandler 67
Brüel & Kjær Ladungs-Strom-Wandler und Strom-Spannungs-Wandler 67
3.6. VERGLEICH DER EMPFINDLICHKEIT VERSCHIEDENER VORVERSTÄRKERSYSTEME GEGENÜBER EXTERNEN STÖRQUELLEN 68
Geerdeter Beschleunigungsaufnehmer und Ladungs-Vorverstärker 71
Geerdeter Beschleunigungsaufnehmer mit Ladungsverstärker (erdfreier Eingang) 72
Brüel & Kjær Ladungs-Strom-Wandler mit Strom-Spannungs-Wandler (geerdeter Eingang) 73
Brüel & Kjær Ladungs-Strom-Wandler mit Strom-Spannungs-Wandler (erdfreier Eingang) 74
Leitungstreiber mit Konstantstromversorgung 76
Symmetrische Beschleunigungsaufnehmer mit Differenz-Ladungsverstärker 77
Isolierte Montage des Beschleunigungsaufnehmers 78
3.7. SPEZIELLE AUSSTATTUNG VON VORVERSTÄRKERN 79
Integrationsnetzwerke 80
Filter 84
Übersteuerungsanzeige 85
Referenzoszillator 86
Stromversorgungen 86

4. BESCHLEUNIGUNGSAUFNEHMER IN DER PRAXIS 87

4.1. EINFÜHRUNG 87
4.2. UMGEBUNGSEINFLÜSSE 88
Temperaturbereich 88

Temperatursprünge 91
Luftschall 93
Basisdehnung 93
Feuchtigkeit 94
Magnetfelder 94
Strahlung 95
4.3. DER EINFLUSS DER MASSE DES BESCHLEUNIGUNGS-AUFNEHMERS 95
4.4. MONTAGE DES BESCHLEUNIGUNGSAUFNEHMERS 97
Anforderungen an die Oberfläche des Meßobjektes an der Meßstelle 98
Montagestelle 98
Bestimmung des Frequenzganges eines Beschleunigungs-aufnehmers für verschiedene Montagetechniken 99
Stiftschraube 100
Klebewachs 103
Haftmagnet 104
Doppelseitig klebende Haftscheibe 107
Kleber 109
Tastsonden 113
4.5. MECHANISCHE FILTER 116
Beschreibung 116
Wirkungsweise 117
4.6. AUFNEHMERKABEL 118
4.7. ERDUNGSMASSNAHMEN 120

5. KALIBRIEREN UND TESTEN DES BESCHLEUNIGUNGS-AUFNEHMERS 122

5.1. EINFÜHRUNG 122
Warum Beschleunigungsaufnehmer kalibrieren? 124
5.2. DIE HIERARCHIE DER KALIBRIERSTANDARDS 125
Die allgemeine Hierarchie 125
Die Hierarchie bei Brüel & Kjær 127
Die Genauigkeit einer Kalibriertechnik 129
5.3. METHODEN DER KALIBRIERUNG 130
Laser-Interferometrie 130
Andere Absolutmethoden 132
Vergleichskalibrierung mit der „Rücken-an-Rücken"-Methode 133
FFT-gestützte Rücken-an-Rücken-Kalibrierung 135
Die Prüfung des Übertragungsfaktors mit kalibrierten Schwingerregern 136

5.4. DIE MESSUNG ANDERER PARAMETER VON BESCHLEUNIGUNGSAUFNEHMERN 137
Querempfindlichkeit 137
Frequenzgang 138
Ungedämpfte Eigenfrequenz 140
Kapazität 141
5.5. BESTIMMUNG DER UMGEBUNGSEINFLÜSSE AUF DIE SPEZIFIKATIONEN EINES BESCHLEUNIGUNGSAUFNEHMERS 142
Temperatursprungempfindlichkeit 142
Temperaturempfindlichkeit 142
Empfindlichkeit gegen Basisdehnungen 143
Luftschallempfindlichkeit 143
Empfindlichkeit gegen Magnetfelder 144
Temperaturgrenzen 145
Schockgrenzen 145
5.6. WERKSEITIGE PRÜFUNG VON AUFNEHMERKABELN 145
5.7. KALIBRIEREINRICHTUNGEN 147
Kalibriersystem Typ 9559 147
Individuelle Kalibriereinrichtungen 148
5.8. STANDARDS BETREFFEND DIE KALIBRIERUNG VON BESCHLEUNIGUNGSAUFNEHMERN 148

6. ANHANG 151

ANHANG A. Umrechnungstabellen 152
ANHANG B. Schwingungsnomogramm 155
ANHANG C. Schwingungsstandards 156
ANHANG D. Brüel & Kjær Schwingungsliteratur 157
ANHANG E. Zusammenstellung der Brüel & Kjær-Vorverstärker 158
ANHANG F. Zusammenstellung von Brüel & Kjær-Geräten mit eingebautem Vorverstärker 160
ANHANG G. Frequenz- und Dynamikbereich von Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmern 162
ANHANG H. Zusammenstellung von Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmern 163

SYMBOLTABELLE

Allgemeine Größen

t = Zeit

f = Frequenz

ω = Kreisfrequenz

j = $\sqrt{-1}$

e = Basis des natürlichen Logarithmus

Allgemeine dynamische Größen

x = Weg

v = Geschwindigkeit

a = Beschleunigung

F = Kraft

T = Schwingungsdauer

τ = Zeitkonstante

Dynamische Beschleunigungsaufnehmerparameter

m_s = seismische Masse

m_b = Masse der Aufnehmerbasis

x_s = Schwingweg der seismischen Masse

x_b = Schwingweg der Basis

F_e = Erregungskraft

ω_n = freie Resonanzfrequenz (rads/sec)

ω_m = Resonanzfrequenz in montiertem Zustand (rads/sec)

f_m = Resonanzfrequenz in montiertem Zustand (Hz)

A = Verstärkungsfaktor

Z_s = mechanische Impedanz der Struktur

Z_a = mechanische Impedanz des Beschleunigungsaufnehmers

Allgemeine elektrische Größen

I = Strom

V = Spannung

Q = Ladung

C = Kapazität

R = Widerstand

Z = Impedanz

Elektrische Beschleunigungsaufnehmerparameter

V_a = Leerlaufspannung des Beschleunigungsaufnehmers

Q_a = von den piezoelektrischen Elementen erzeugte Ladung

C_a = Kapazität des Beschleunigungsaufnehmers

R_a = Widerstand des Beschleunigungsaufnehmers

S_{qa} = Ladungs-Übertragungsfaktor des Beschleunigungsaufnehmers

S_{va} = Spannungs-Übertragungsfaktor des Beschleunigungsaufnehmers (mit Ausgangslast)

SYMBOLTABELLE

S_{vao} = Spannungs-Übertragungsfaktor des Beschleunigungsaufnehmers (unbelastet)

C_h = Kapazität zwischen Anschlüssen und Gehäuse eines symmetrischen Beschleunigungsaufnehmers

Elektrische Kabelparameter

C_c = Kabelkapazität

R_c = Längswiderstand des Kabels

R_b = Widerstand zwischen Innenleiter und Schirm

C_s = Kapazität zwischen Schirm und Innenleitern im symmetrischen Aufnehmerkabel

C_d = Kapazität des Dielektrikums im symmetrischen Aufnehmerkabel

q_n = Triboelektrische Ladung

Elektrische Vorverstärkerparameter

R_p = Eingangswiderstand des Vorverstärkers

C_p = Eingangskapazität des Vorverstärkers

C_f = Gegenkopplungskapazität

R_f = Gegenkopplungswiderstand

A = Verstärkungsfaktor eines Operationsverstärkers

V_i = Eingangsspannung am Vorverstärker

V_o = Ausgangsspannung des Vorverstärkers

Z_f = Gegenkopplungsimpedanz

Z_t = Gesamtimpedanz von Beschleunigungsaufnehmer, Kabel und Vorverstärkereingang

I_i = Strom durch C_t

I_c = Strom durch den Gegenkopplungskondensator

V_c = Spannung am Gegenkopplungskondensator

C_t = Gesamtkapazität von Beschleunigungsaufnehmer, Kabel und Vorverstärkereingang

R_t = Gesamtwiderstand von Beschleunigungsaufnehmer, Kabel und Vorverstärkereingang

R_{gl} = Gleichtaktwiderstand des erdfreien Vorverstärkers

$CMRR$ = Gleichtaktunterdrückung des erdfreien Operationsverstärkers

e_n = Störspannung

I_n = Störstrom

R_o = Ausgangswiderstand des Ladungs-Strom-Wandlers

1. SCHWINGUNGSMESSUNG

1.1. EINFÜHRUNG

In den letzten Jahren war ein ständiges Ansteigen von Schwingungsproblemen zu beobachten, zusammenhängend mit immer komplizierteren und empfindlicheren Strukturen, mit schnelleren und immer komplexeren Maschinen. Diesen Problemen stehen Anforderungen nach niedrigen Betriebskosten und immer höherer Effektivität gegenüber. Zunehmend war noch dem Einfluß von Schwingungen und Lärm auf den Menschen, aber auch auf die Qualität der hergestellten Produkte Beachtung zu schenken. Als logische Folge ergaben sich erhöhte Anforderungen hinsichtlich des Verständnisses von Schwingungsursachen sowie der Reaktion von Strukturen auf Belastung durch dynamische Kräfte. Grundlegende Voraussetzung, ein solches Verständnis überhaupt zu erhalten, ist ein genauer, zuverlässiger und vielfältig einsetzbarer Schwingungsaufnehmer. Natürlich wird dahinter meist noch ein hochentwickeltes Meß- und Analysesystem stehen. Aber Vielfältigkeit und Leistungsfähigkeit stehen und fallen mit einem präzisen Schwingungssignal, geliefert von einem zuverlässigen Schwingungsaufnehmer.

Als optimale Wahl eines Schwingungsaufnehmers ist nach heutigen Erkenntnissen der piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer anzusehen. Der weite Meßbereich und die hohe Leistungsfähigkeit moderner Meßeinrichtungen können durch den von diesem Aufnehmertyp angebotenen, außerordentlich großen Dynamik- und Frequenzbereich voll ausgeschöpft werden.

Dieses Handbuch ist in erster Linie als praktische Anleitung gedacht, mit piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern von Brüel & Kjær präzise Meßergebnisse zu erzielen.

1.2. WARUM SCHWINGUNGSMESSUNG?

Schwingungen werden an und für sich aus den verschiedensten Gründen gemessen. Allgemein kann man sagen, daß jede unkontrollierte Schwingung ein unerwünschtes Phänomen darstellt, das Lärmbelästigung nach sich zieht, me-

chanische Beanspruchung bedeutet — vielleicht die Ursache für das Versagen einer Struktur. Das Gebiet der Schwingungsmessung läßt sich grob in vier Anwendungsbereiche gliedern:

1. **Schwingprüfung:** Sei es als Teilprüfung im Zuge allgemeiner Umwelttests, sei es im Zuge von Konstruktion und Entwicklung — die Schwingprüfung spielt eine vielleicht lebenswichtige Rolle, um herauszufinden, wie gut eine

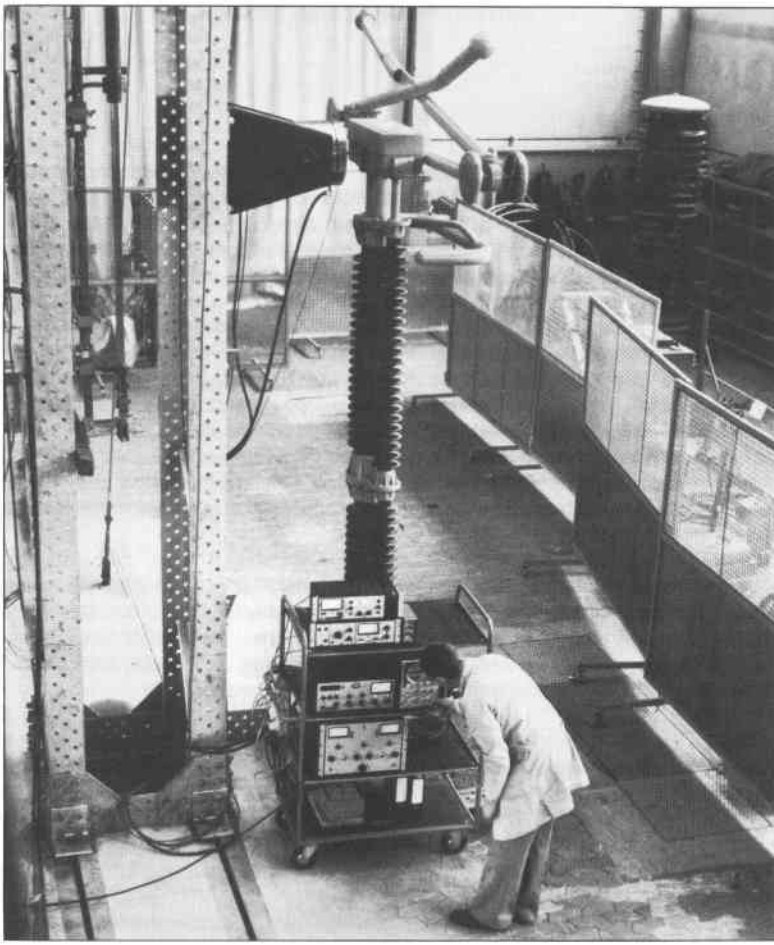


Abb. 1.1. Schwingprüfung eines Isolators für einen Hochspannungsmast

Einzelkomponente das Schwingungsumfeld ertragen kann, dem sie letztendlich in der Realität ausgesetzt sein wird.

Während des Schwingungstests wird die zu prüfende Struktur — z.B. eine Komponente eines Flugzeuges — über einen Schwingerreger einem hohen Schwingungspegel ausgesetzt. Der Schwingungspegel wird dabei über bestimmte Frequenzbereiche konstant gehalten, die Frequenz wird während der Prüfung durchgestimmt. Zu diesem Zweck wird ein Regelgenerator in Verbindung mit einem Beschleunigungsaufnehmer in einer Rückkopplungsschleife eingesetzt, über den die Amplitude der Erregung auf einen vorgege-

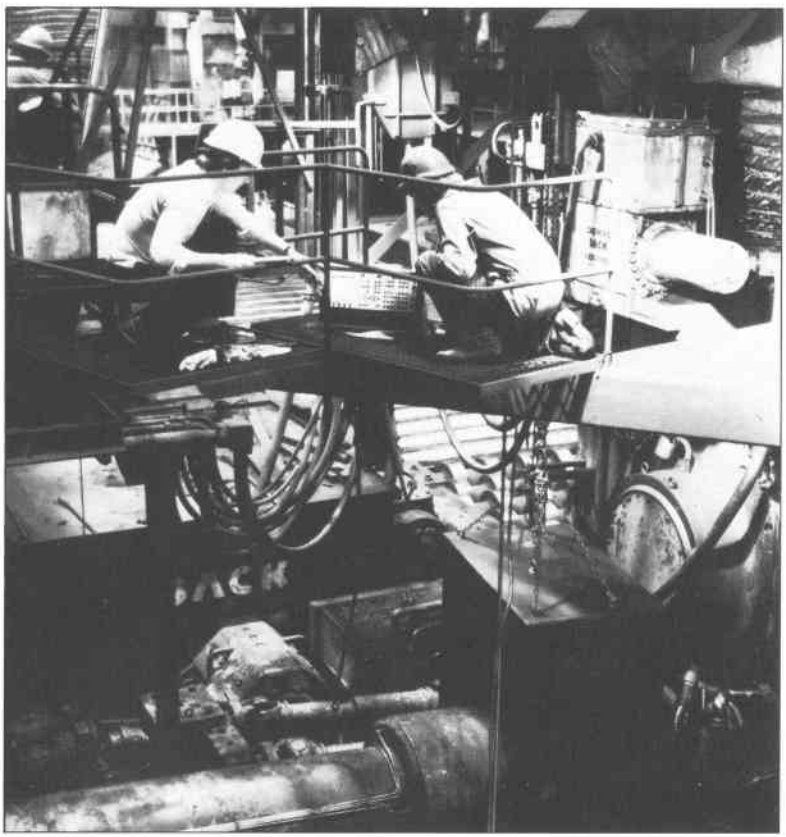


Abb. 1.2. Schwingungsmessungen werden zur Maschinenüberwachung und Fehlerdiagnose eingesetzt

benen Wert geregelt wird. Von einem zweiten Beschleunigungsaufnehmer, der auf der Struktur angebracht ist, erhält man schließlich die gewünschten Informationen über den Frequenzgang.

2. **Zustandsüberwachung von Maschinen und Fehlerdiagnose**: Im einfachsten Fall liefert bereits die Messung des Gesamtschwingungspegels einen Indikator für drohende Probleme. Mehr Information erhält man jedoch aus einer Frequenzanalyse. Dabei wird das für die Maschine in gutem Zustand charakteristische Frequenzspektrum der Schwingung gemessen und im weiteren durch fortlaufende Schwingungsmessung hinsichtlich der Veränderung spektraler Komponenten überwacht. Solche Veränderungen sind normalerweise als Anzeichen für kommende Probleme zu deuten. Auch eine Fehlerdiagnose läßt sich aus derartigen Schwingungsmessungen stellen.

Abb. 1.3. Schwingungsmessung bei der Strukturanalyse eines Eisenbahnwagens

Im industriellen Bereich bilden Schwingungsmessungen die Basis zum Auswuchten rotierender Maschinen. Unwucht ist oft die Ursache besonders starker Schwingungen, die schließlich zu Materialermüdung oder Lagerschäden führen können.

3. **Strukturanalyse**: Dies ist eine sehr leistungsfähige Methode, das dynamische Verhalten einer Struktur mit Hilfe von Schwingungsmessungen zu untersuchen. Mit einem Kraft- und einem Beschleunigungsaufnehmer werden Erregung und Strukturantwort simultan über einen Zweikanal-Frequenzanalysator gemessen. Durch die hohe Rechengeschwindigkeit des Analysators, der vielfach in Verbindung mit einem Tischrechner betrieben wird, erhält man wichtige Informationen zur Verifizierung der Berechnungsergebnisse sowie zur Strukturmodifikation — von der kleinsten Turbinenschaufel bis hin zu einer großen Brückenkonstruktion.

Abb. 1.4. Messung der vom Griff einer Kettensäge übertragenen Schwingungen mit Beschleunigungsaufnehmer und Schwingungsmesser

4. **Humanschwingungsmessung:** Hier beschäftigt man sich mit Schwingungen, die auf den menschlichen Körper einwirken. Solche Schwingungen können zum Beispiel von Personenfahrzeugen oder von schweren Handwerkzeugen ausgehen. Die gemessenen Schwingungen werden nach internationalen Standards hinsichtlich Komfort und Gesundheitsbeeinträchtigung bewertet.

1.3. WAS IST SCHWINGUNG?

Eine Schwingung ist ein dynamischer Vorgang — eine ständige Hin- und Herbewegung um eine Gleichgewichtslage. Sie wird verursacht durch Übertragen und Speichern von Energie innerhalb einer Struktur, das Resultat der Wirkung einer oder mehrerer Kräfte. Schwingungen sind oft das unerwünschte Nebenprodukt eines sonst nützlichen Vorganges und nur sehr schwer zu vermeiden.

Schwingungen können einmal im *Zeitbereich* als Verlauf der Schwingungsamplitude über der Zeit beschrieben werden („Zeitfunktion"). Zeitfunktionen sind in verschiedene Klassen einzuordnen, definiert entweder durch die mathematische Beschreibungsform oder durch statistische Eigenschaften. Schwingungen lassen sich aber auch im *Frequenzbereich* durch ihr Frequenzspektrum beschreiben. Beide Darstellungsformen sind untereinander über die *Fouriertransformation* verknüpft. Eine eingehende Behandlung dieses Themas findet man in dem Buch „Frequency Analysis" von Brüel & Kjær.

Im Gegensatz zu anderen Schwingungsaufnehmern können piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer zur Messung *sämtlicher* Schwingungstypen, unabhängig von ihrer Natur in Zeit- oder Frequenzbereich, eingesetzt werden, *solange nur ein Beschleunigungsaufnehmer von passendem Frequenz- und Dynamikbereich gewählt wird.* Wegen des überaus großen Frequenz- und Dynamikbereiches piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer wird man hier für jede Meßaufgabe den passenden Aufnehmertyp finden. Lediglich die nachfolgende Analysetechnik wird von Fall zu Fall dem Typ der Schwingung anzupassen sein.

1.4. SCHWINGUNGSPARAMETER

Der piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer liefert unmittelbar ein Beschleunigungssignal, welches elektronisch zur Geschwindigkeit und in einem weiteren Schritt zum Schwingweg integriert werden kann — ein besonderer Vorzug dieses Aufnehmertyps.

Abb. 1.5 zeigt den Effekt der Integration der Beschleunigung, gemessen an einer elektrischen Bohrmaschine. Die Schwingung wird dabei im Frequenzbe-

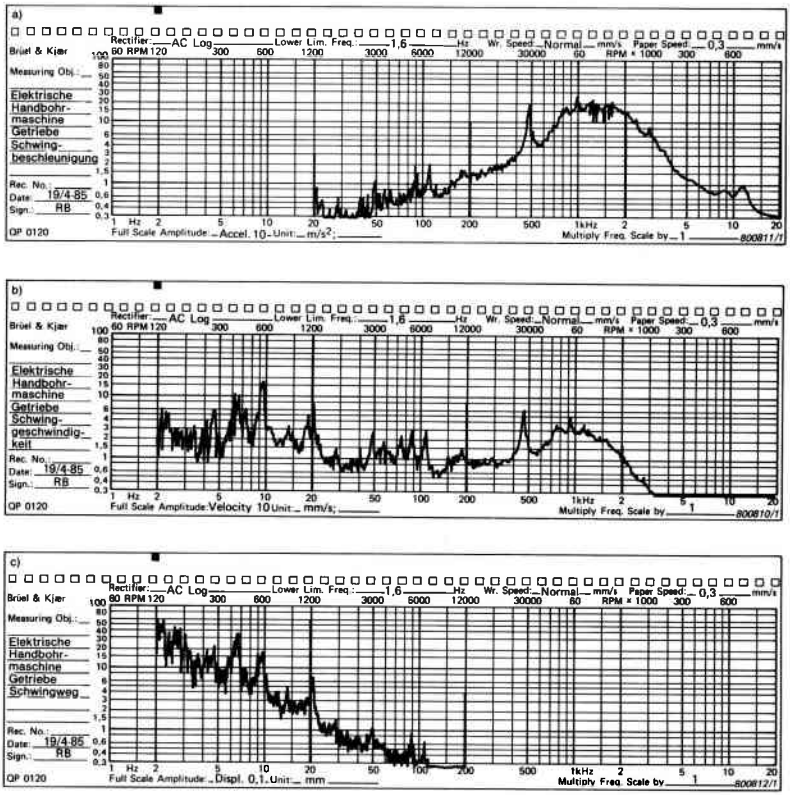


Abb. 1.5. Frequenzanalyse der an einer elektrischen Bohrmaschine gemessenen Schwingungen, dargestellt in den drei Meßgrößen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Schwingweg

reich dargestellt. Der Integrator wirkt als Tiefpaßfilter, die vor der Integration dominierenden hochfrequenten Komponenten werden durch ihn abgeschwächt. Der Einsatz eines solchen Integrationsnetzwerkes kann demnach zum „Verlust" von Information über die Schwingung führen. Dies ist natürlich nur dann akzeptabel, wenn dieser Informationsverlust nicht mit dem Ziel der Messung in Widerspruch steht.

Hat man zur Integration keinen besonderen Grund, so sollte die Beschleunigung direkt zur Weiterverarbeitung herangezogen werden. Häufigster Grund für die Messung der Schwinggeschwindigkeit ist wohl die Frage nach der soge-

nannten Schwingstärke. Oft ist es andererseits wünschenswert, die Anforderungen an die nachfolgende Meßkette hinsichtlich Dynamikbereich gering zu halten und dadurch den Signal/Rausch-Abstand der Gesamtmessung zu verbessern. In einem solchen Fall wird man denjenigen Parameter wählen, der das flachste Frequenzspektrum aufweist (siehe Abb. 1.5(b)). Aber lediglich die Frequenzanalyse kann Einblick in die frequenzmäßige Zusammensetzung einer Schwingung geben. Für Breitbandmessungen an rotierenden Maschinen hat man aus Erfahrung herausgefunden, daß in 70% aller Fälle die Schwinggeschwindigkeit der optimale Parameter zur Beurteilung ist, in 30% die Beschleunigung, während der Schwingweg kaum jemals Verwendung findet. Der Schwingweg wird manchmal bei niedrigen Frequenzen und großen Ausschlägen beurteilt, wie man sie bei großen Strukturen — Schiffen, Gebäuden, Brücken — finden kann.

Werden komplizierte Signale gemessen, wie etwa Schocks oder Impulse, sollten *niemals* Integrationsnetzwerke eingesetzt werden, da diese Phasenfehler erzeugen, die bei solchen Signalen zu beträchtlichen Amplitudenfehlern führen.

1.5. DIE QUANTITATIVE BESCHREIBUNG VON SCHWINGUNGEN

Es gibt verschiedene Wege, ein Schwingungssignal im Zeitbereich quantitativ zu beschreiben. Die Maßeinheiten (z.B. in/s^2, m/s^2, g etc.) können unterschiedlich sein, wobei die in diesem Abschnitt verwendeten allerdings weithin gebräuchlich sind.

Abb. 1.6 zeigt das Zeitsignal der einfachsten Schwingungsform. Sie repräsentiert die Bewegung um eine Gleichgewichtslage, wobei sich jeder Momentanzustand in festen Zeitintervallen exakt wiederholt. Dieses Intervall wird als

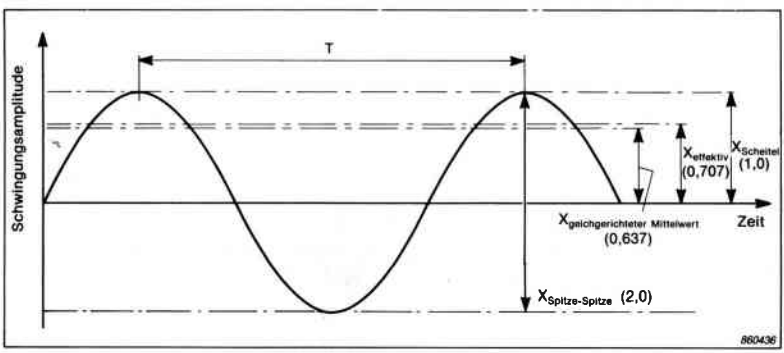


Abb. 1.6. Einfache harmonische Schwingung. Die Bezugsamplitude kann Schwingweg, Schwinggeschwindigkeit oder Beschleunigung sein

Periode oder Schwingungsdauer T bezeichnet. Die Änderung der Auslenkung zeigt einen sinusförmigen Verlauf über der Zeit.

Es läßt sich zeigen, daß Form und Frequenz einer solchen Schwingung gleich sind, ob man jetzt Schwingweg, Schwinggeschwindigkeit oder Beschleunigung betrachtet. Unterschiedlich ist lediglich die Phasenlage.

Die Amplitude des in Abb. 1.6 dargestellten Schwingungssignals läßt sich mit Hilfe der folgenden Größen beschreiben:

1. **Effektivwert (quadratischer Mittelwert):** Die zweifelsohne beste Beschreibung der Stärke einer Schwingung. Die Quadratwurzel aus dem über der Zeit integrierten und gemittelten Quadrat der Auslenkung steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der in der Schwingung enthaltenen Energie und damit mit dem vorhandenen Zerstörungspotential. Der Effektivwert einer Sinusschwingung ist gleich das $1/\sqrt{2}$fache des Scheitelwertes.

2. **Scheitelwert:** Gibt die maximal gemessene Auslenkung an. Diese Größe ist besonders geeignet zur Beschreibung kurzdauernder Schocks. Allerdings — dem Zeitverlauf wird dabei in keiner Weise Rechnung getragen.

3. **Spitze-Spitze-Wert:** Obwohl von gewissem Wert bei der Beschreibung des Schwingweges, wird diese Größe kaum verwendet.

4. **Mittelwert:** Obwohl der Mittelwert den zeitlichen Verlauf der Schwingung berücksichtigt, besteht keinerlei Zusammenhang zwischen ihm und irgendeiner physikalischen Größe. In Abb. 1.6 wird dieser Mittelwert als *gleichgerichteter* Mittelwert bezeichnet.

5. **Crestfaktor:** Gibt das Verhältnis von Scheitelwert zu Effektivwert eines Signals an. Aus der oben angegebenen Definition des Effektivwertes ergibt sich für den Crestfaktor der Sinusschwingung von Abb. 1.6 der Wert $\sqrt{2}$. Wird die Schwingung mehr impulshaltig oder hat sie mehr zufällige Natur, steigt der Crestfaktor an. Dieser recht einfache Zusammenhang läßt sich mit Hilfe eines einfachen Schwingungsmessers, der mit einem Effektivwert- und einem Spitzenwertdetektor ausgerüstet ist, leicht feststellen. Bei Breitbandmessungen am Lagergehäuse einer Maschine wird man das Anwachsen einer einzelnen Schwingungskomponente zufolge eines schlechten Lagers im Effektivwert vielleicht nicht erkennen, wogegen der Crestfaktor hier eine deutliche Aussage liefert. So läßt sich durch Überwachung des Crestfaktors der bevorstehende Zusammenbruch eines Lagers vorhersehen.

   Ein anderes Beispiel für die Nützlichkeit des Crestfaktors findet man auf dem Gebiet der Strukturanalyse. Der Crestfaktor des auf die Struktur wirkenden Eingangssignals enthält wichtige Informationen über die Erregung

selbst. Ist der Crestfaktor sehr hoch, was zum Beispiel bei der Hammererregung der Fall sein kann, wird die Struktur vielleicht schon im nichtlinearen Bereich angeregt. Ein hoher Crestfaktor kann aber auch bedeuten, daß die Erregung nicht genügend Energie für ein ausreichendes Signal/Rausch-Verhältnis enthält. Andererseits ist ein hoher Crestfaktor Indikator für einen weiten Frequenzbereich der Erregung.

1.5.1. Lineare Amplituden- und Frequenzskalen

Lineare Amplituden- und Frequenzskalen wird man bei der Schwingungsmessung überall dort verwenden, wo hohe Auflösung gefordert ist. Eine lineare Frequenzskale erleichtert das Trennen eng benachbarter Frequenzkomponenten. Sie hat den weiteren Vorteil, daß äquidistante, harmonische Komponenten im Signal leicht zu erkennen sind.

1.5.2. Logarithmische Amplituden- und Frequenzskalen

Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer sind zur präzisen Schwingungsmessung über extrem große Dynamik- und Frequenzbereiche geeignet. Zur guten Interpretierbarkeit der Meßergebnisse bestehen demnach folgende Anforderungen:

1. Eine Amplitudenskale, passend für Schwingungsamplituden von den niedrigsten, gerade noch meßbaren Werten bis hinauf zu extremen Schocks, die außerdem eine gute Vergleichbarkeit gewährleistet.

2. Eine Frequenzskale mit gleichbleibender prozentualer Auflösung über den gesamten Darstellungsbereich.

Beide Anforderungen lassen sich auf folgende Weise erfüllen:

1. **Skalierung in Dezibel:** Obwohl eher mit akustischen Messungen in Verbindung gebracht, ist das Dezibel (dB) ebenso vorteilhaft in der Schwingungsmessung verwendbar. Es ist definiert als Verhältnis zweier Amplituden und wird logarithmisch angegeben. Für Verhältnisse von Schwingungsamplituden gelten folgende Beziehungen:

$$N\,(\mathrm{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{a^2}{a_{\mathrm{ref}}^2} \right)$$

$$= 20 \log_{10} \left(\frac{a}{a_{\mathrm{ref}}} \right)$$

mit

N = Schwingungspegel in Dezibel

a = gemessene Schwingungsamplitude

a_{ref} = Referenzamplitude

Nach ISO 1683 werden folgende Referenzamplituden empfohlen:

Beschleunigung = $10^{-6}\,ms^{-2}$

Geschwindigkeit = $10^{-9}\,ms^{-1}$

Schwingweg = $10^{-12}\,m$

Für eine Sinusschwingung der Kreisfrequenz ω = 1000 rad je Sekunde (ungefähr 159 Hz) sind diese Amplitudenwerte numerisch äquivalent. Auf die Referenzwerte ist Bezug zu nehmen, wenn die Schwingungspegel in dB angegeben werden (z.B. „Der gemessene Schwingungspegel war 110 dB bezogen auf $10^{-6}\,ms^{-2}$"). Zum Vergleich von Schwingungspegeln kann die Differenz in Dezibel herangezogen werden, vorausgesetzt, es wurde derselbe Referenzwert zugrundegelegt. Es genügt zu sagen, der eine Schwingungspegel liegt 20 dB über dem anderen, ohne daß der Referenzwert dabei eine Rolle spielt.

2. **Logarithmischer Frequenzmaßstab**: Die Frequenz wird oftmals in logarithmischem Maßstab dargestellt. Eine solche Skalierung zeigt den niedrigen Frequenzbereich gedehnt, der Bereich hoher Frequenzen erscheint komprimiert. Ergebnis ist eine konstante relative Auflösung über die gesamte Frequenzachse (am Bildschirm oder auf dem Papier), wobei die Darstellungsgröße in handlichem Format bleibt. Eine logarithmische Frequenzskale ist demnach zur Darstellung großer Frequenzbereiche geeignet.

1.6. DIE ANALYSE VON SCHWINGUNGEN

Der Informationsgehalt, der aus herkömmlichen Zeitbereichsanalysen gewonnen werden kann, ist begrenzt, obwohl die heutigen Analysetechniken mehr und mehr an Leistungsfähigkeit gewinnen. Durch Einsatz von Geräten zur Frequenzanalyse, wie analoge und digitale Frequenzanalysatoren, erhält man eine Menge zusätzlicher, für die Interpretation sehr wertvoller Information. In diesem Handbuch wird keine tiefergehende Darstellung von Geräten dieser Art gegeben. Die Brüel & Kjær-Bücher „Mechanical Vibration and Shock Measurements" und „Frequency Analysis" liefern eine solide theoretische Grundlage zur Frequenzanalyse, Haupt- und Kurzkataloge enthalten Details über die von Brüel & Kjær auf diesem Sektor angebotenen Geräte.

Komplexität der Meßgeräte und Analysetechniken mögen vielleicht in weiten Grenzen variieren. Aber in jedem Fall wird der Schwingungsaufnehmer das kritischste Glied in der Meßkette sein, da ohne ein präzises Schwingungssignal jede weitere Analyse nicht mehr zuverlässig sein kann.

Der zuverlässigste, vielfältigste und genaueste unter den Schwingungsaufnehmern ist der piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer.

2. DER PIEZOELEKTRISCHE BESCHLEUNIGUNGS-AUFNEHMER

2.1. EINFÜHRUNG

Ziel dieses Abschnittes ist es, eine grundlegende Einführung mit theoretischem Hintergrund in Arbeitsweise und Charakteristik des piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers zu geben. Wegen seiner speziellen Arbeitsweise wird in einem gewissen Ausmaß auch der zugehörige Vorverstärker in die Betrachtungen einzubeziehen sein. Eine vollständige Beschreibung von Betriebsart und Daten dieser Vorverstärker findet man in Abschnitt 3, „Vorverstärker für Beschleunigungsaufnehmer". Eine Zusammenstellung des kompletten Angebotes an Beschleunigungsaufnehmern aus dem Hause Brüel & Kjær bringt Anhang H.

Der piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer ist weithin anerkannt als der leistungsfähigste Aufnehmer für Absolutschwingungsmessungen. Diese Meinung resultiert aus seinen besonders günstigen Eigenschaften:

1. Einsetzbar über einen sehr großen Frequenzbereich.
2. Hervorragende Linearität über einen außerordentlich weiten Dynamikbereich.
3. Integrierbarkeit des Beschleunigungssignals zu Schwinggeschwindigkeit und Schwingweg auf elektronischem Weg.
4. Schwingungsmessungen sind in einem weiten Feld von Umgebungsbedingungen möglich, ohne daß die hohe Genauigkeit leidet.
5. Durch das aktive Aufnehmerprinzip benötigt man keine externe Versorgung.
6. Keine bewegten Teile, daher extreme Standfestigkeit.
7. Kompakter Aufbau mit günstigem Verhältnis von Empfindlichkeit zu Masse.

Um den Wert dieser Vorteile richtig abschätzen zu können, sollte man die Eigenschaften einiger anderer Aufnehmer bzw. Schwingmeßeinrichtungen kurz betrachten.

1. **Induktiver Aufnehmer (Proximity probe):** Ein Aufnehmer lediglich zur Messung relativer Verlagerungen. Dieser Aufnehmertyp ist auch geeignet zur Erfassung statischer Verschiebungen und besitzt eine niedrige Ausgangsimpedanz. Das Arbeitsprinzip ist jedoch nicht aktiv, die Leistungsfähigkeit im höherfrequenten Bereich gering. Zusätzlich muß die schwingende Oberfläche elektrisch leitend sein.

2. **Kapazitiver Aufnehmer:** Ein kleiner, berührungsloser Wegaufnehmer mit hoher Empfindlichkeit und weitem Frequenzbereich. Nachteile sind die Einschränkung auf elektrisch leitfähige Meßobjekte, der beschränkte Dynamikbereich und die aufwendige Kalibrierung.

3. **Potentiometeraufnehmer:** Kostengünstiger Aufnehmer mit niedriger Ausgangsimpedanz für statische Verlagerungen. Dynamik- und Frequenzbereich sind allerdings beschränkt, die Lebensdauer ist vergleichsweise gering, die Auflösung schlecht.

4. **Piezoresistiver Aufnehmer:** Ein Aufnehmer für Schwingbeschleunigung, der auch zur Erfassung statischer Größen geeignet ist. Frequenz- und Dynamikbereich können durchaus hoch sein. Durch seine geringe Schockfestigkeit wird dieser Aufnehmer jedoch leicht zerstört. Oft schützt man solche Aufnehmer durch viskose Dämpfer gegen Schockbelastung. Dies reduziert jedoch den Betriebstemperaturbereich und ändert die Phasencharakteristik.

5. **Elektrodynamischer Aufnehmer:** Ein aktiver Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer mit niedriger Ausgangsimpedanz. Frequenz- und Dynamikbereich sind eingeschränkt, er ist empfindlich gegen externe Magnetfelder, oft auch gegen Lageänderungen.

2.2. DIE ARBEITSWEISE EINES BESCHLEUNIGUNGSAUFNEHMERS

Abb. 2.1 zeigt ein vereinfachtes Modell eines Delta Scher®-Beschleunigungsaufnehmers von Brüel & Kjær. Aktive Elemente des Aufnehmers sind die piezoelektrischen Elemente. Sie wirken als Federn zwischen der Basis des Aufnehmers und den seismischen Massen über den starren, dreieckigen Zentralpfosten. Wird der Aufnehmer in Schwingung versetzt, wirkt auf jedes der piezoelektrischen Elemente eine Kraft gleich dem Produkt von Beschleunigung der seismischen Masse und deren Masse selbst. Das piezoelektrische Element erzeugt eine elektrische Ladung proportional dieser Kraft. Da die Massen konstant sind, produzieren die Elemente also eine Ladung proportional der Beschleunigung der seismischen Massen. Da diese Beschleunigung wiederum über einen weiten Frequenzbereich nach Betrag und Phase gleich ist der Beschleunigung der Aufnehmerbasis, ist das Ausgangssignal des Aufnehmers letztendlich proportional der Beschleunigung der Aufnehmerbasis und somit gleich der des Objektes, auf dem der Aufnehmer sitzt.

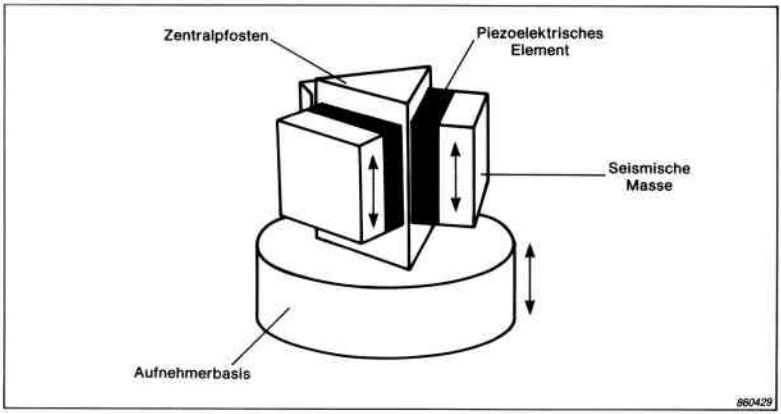


Abb. 2.1. Schema eines piezoelektrischen Delta Scher®-Beschleunigungsaufnehmers von Brüel & Kjær

Ein vereinfachtes Rechenmodell zeigt Abb. 2.2.

2.2.1. Analytische Beschreibung der Arbeitsweise eines Beschleunigungsaufnehmers

Abb. 2.2 zeigt ein einfaches Rechenmodell des im vorigen Punkt beschriebenen Beschleunigungsaufnehmers bezogen auf ein Inertialsystem. Beide Massen sind ohne Abstützung und verbunden durch eine ideale Feder. Die Dämpfung ist

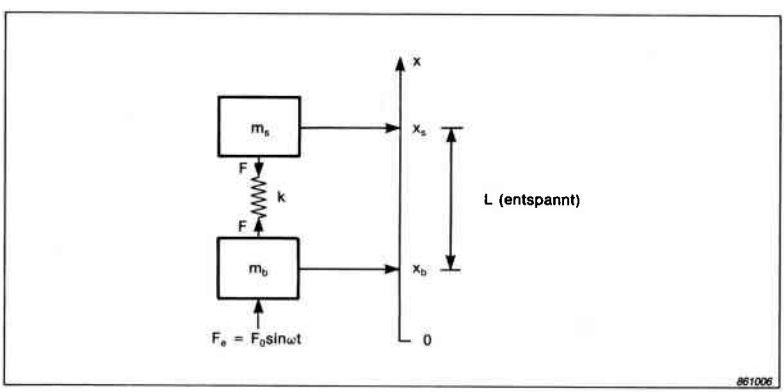


Abb. 2.2. Vereinfachtes Modell eines Beschleunigungsaufnehmers

in diesem Modell vernachlässigt, da sie bei Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmern sehr gering ist.

m_s = gesamte seismische Masse

m_b = Masse der Aufnehmerbasis

x_s = Auslenkung der seismischen Masse

x_b = Auslenkung der Aufnehmerbasis

L = Distanz zwischen seismischer Masse und Aufnehmerbasis bei Ruhelage im Inertialsystem

k = äquivalente Steifigkeit der piezoelektrischen Elemente

F_e = harmonische Erregerkraft

F_0 = Amplitude der Erregerkraft

ω = Erregungsfrequenz (rad/s) = $2\pi f$

ω_n = Eigenfrequenz des Beschleunigungsaufnehmers in (rad/s)

ω_m = Eigenfrequenz des montierten Beschleunigungsaufnehmers (rad/s)

f_m = Eigenfrequenz des montierten Beschleunigungsaufnehmers (Hz)

f = Erregungsfrequenz (Hz)

Die folgenden Terme beschreiben die im Modell wirkenden Kräfte

$F = k\,(x_s - x_b - L)$ (Federkraft)

$m_b\ddot{x}_b = F + F_e$ (Kraft auf die Basis)

$m_s\ddot{x}_s = -F$ (Kraft auf die seismische Masse)

Die Bewegungsgleichung des Modells hat folgendes Aussehen

$$\ddot{x}_s - \ddot{x}_b = -\frac{F}{m_s} - \frac{F + F_e}{m_b} = -\frac{k}{\mu}(x_s - x_b - L) - \frac{F_e}{m_b} \qquad (1)$$

oder

$$\mu \ddot{r} = -kr - \frac{\mu}{m_b} F_0 \sin \omega t$$

mit

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_b}$$

oder

$$\mu = \frac{m_s m_b}{m_s + m_b}$$

μ wird oft als „reduzierte Masse" bezeichnet, r ist die relative Verschiebung zwischen seismischer Masse und Basis.

$$r = x_s - x_b - L$$

Bei freiem Beschleunigungsaufnehmer ohne Erregung durch äußere Kräfte ($F_e = 0$) reduziert sich die Bewegungsgleichung für seine *freie* Schwingung zu

$$\mu \ddot{r} = -kr$$

Diese einfache Differentialgleichung läßt sich lösen mit dem Ansatz, daß die Verschiebung von m_s relativ zu m_b harmonisch mit einer Amplitude R verläuft.

$$r = R \sin \omega t$$

$$-\mu R \omega^2 \sin \omega t = -kR \sin \omega t$$

Die *Resonanzfrequenz* ω_n des Beschleunigungsaufnehmers kann daher direkt angeschrieben werden als

$$\omega_n^2 = \frac{k}{\mu}$$

Die praktische Bedeutung dieses Ergebnisses sieht man sofort, wenn man die Gleichung umformt:

$$\omega_n^2 = k\left(\frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_b}\right) \qquad (2)$$

Ist der Beschleunigungsaufnehmer also vollkommen steif auf einer Struktur angebracht, deren Masse die des gesamten Aufnehmers wesentlich übersteigt,

so wird m_b wesentlich größer als m_s. Die Resonanzfrequenz des Aufnehmers sinkt also gegenüber derjenigen im freien Zustand ab. Im Grenzfall, wo der Aufnehmer auf einer Struktur mit *unendlich* großer Masse montiert wird ($m_b \rightarrow \infty$), reduziert sich die letzte Gleichung zu

$$\omega_m^2 = \frac{k}{m_s} \tag{3}$$

Es ist die Eigenfrequenz des seismischen Feder-Masse-Systems, die als *Resonanzfrequenz in motiertem Zustand* ω_m des Beschleunigungsaufnehmers definiert wird. Diese *Resonanzfrequenz in montiertem Zustand* ist eine *Eigenschaft* des seismischen Feder-Masse-Systems. Später wird noch gezeigt werden, daß diese Frequenz herangezogen wird, den *nutzbaren Arbeitsfrequenzbereich* eines Beschleunigungsaufnehmers zu bestimmen.

In der Praxis ist es natürlich unmöglich, den Beschleunigungsaufnehmer auf einer unendlich großen und steifen Struktur zu montieren, um seine *Resonanzfrequenz in montiertem Zustand* zu messen. Man erzielt eine hinreichende Annäherung durch Montage des Aufnehmers auf einem 180 g schweren Stahlblock und Erregung der Anordnung mit konstanter Beschleunigung über einen weiten Frequenzbereich, um die *Resonanzfrequenz in montiertem Zustand* zu bestimmen. In Abschnitt 5 wird dies noch näher erläutert.

Die tatsächliche Resonanzfrequenz in montiertem Zustand wird sich gegenüber dem Nennwert verändern, wenn die Struktur nicht unendlich starr ist oder wenn durch die Montagetechnik eine zusätzliche Nachgiebigkeit zwischen Aufnehmerbasis und Struktur entsteht. Die einfache Resonanz bei starrer Montage wird sich dann in zwei Resonanzen aufspalten, die niedrigste Resonanzfrequenz wird dabei in jedem Fall niedriger sein als die bei starrer Montage. In Abschnitt 4 wird dies noch näher ausgeführt.

Nun ist noch die erzwungene Schwingung des Beschleunigungsaufnehmers zu untersuchen. In die analytische Betrachtung ist also noch die auf den Aufnehmer wirkende Kraft einzubeziehen. Die Bewegungsgleichung (1) des Modells wird jetzt zu

$$\ddot{r} + \omega_n^2 r + \frac{F_0}{m_b} \sin \omega t = 0$$

Mit dem Ansatz einer harmonischen Bewegung der Massen erhält man daraus

$$-\omega^2 R \sin \omega t + \omega_n^2 R \sin \omega t + \frac{F_0}{m_b} \sin \omega t = 0$$

und weiter

$$R(\omega_n^2 - \omega^2) + \frac{F_0}{m_b} = 0$$

oder

$$R = -\frac{F_0}{m_b(\omega_n^2 - \omega^2)}$$

Bei Frequenzen weit unterhalb der Resonanzfrequenz des Aufnehmers ($\omega << \omega_n$) erhält man für den Schwingweg, jetzt R_0 genannt:

$$R_0 = -\frac{F_0}{m_b \omega_n^2}$$

Das Verhältnis des Schwingweges R_0 bei niedrigen zum Schwingweg R bei hohen Frequenzen läßt sich nun folgendermaßen ausdrücken

$$\frac{R}{R_o} = \frac{-\dfrac{F_0}{m_b(\omega_n^2 - \omega^2)}}{-\dfrac{F_o}{m_b\,\omega_n^2}}$$

Bezeichnet man dieses Verhältnis mit dem Symbol A , erhält man nach Zusammenfassen

$$A = \frac{1}{1 - \left(\dfrac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \qquad (4)$$

Dieses wichtige Resultat zeigt, daß die relative Verschiebung zwischen Basis und seismischer Masse ansteigt, wenn die Frequenz der Anregung vergleichbar zur Eigenfrequenz des Aufnehmers wird. Folgerichtig steigen damit auch die Kraft auf das piezoelektrische Element und weiter das elektrische Ausgangssignal des Aufnehmers. Da die in den Beschleunigungsaufnehmern von Brüel & Kjær eingesetzten piezoelektrischen Elemente konstante Kraftempfindlichkeit aufweisen, entspricht das elektrische Ausgangssignal des Aufnehmers nahe seiner Eigenfrequenz völlig seinem mechanischen Resonanzverhalten. Das typische Aussehen der Frequenzgangkurve eines Beschleunigungsaufnehmers (siehe Abb. 2.3) und die entsprechenden Meßfehler folgen also ebenfalls dieser Gleichung. In Abschnitt 2.3 wird dies noch näher ausgeführt.

Die Resonanzfrequenz des freien Beschleunigungsaufnehmers hängt ganz wesentlich vom Verhältnis der gesamten seismischen Masse zur übrigen Aufnehmermasse — hauptsächlich die der Basis — ab. Als allgemeiner Richtwert sind gesamte seismische Masse und Basismasse etwa gleich, woraus sich folgender Zusammenhang ergibt

$$\frac{\text{Resonanzfrequenz in montiertem Zustand}}{\text{Resonanzfrequenz des freien Aufnehmers}} \approx \frac{1}{\sqrt{2}}$$

2.3. FREQUENZBEREICH

Abb. 2.3 zeigt die relative Änderung des elektrischen Ausgangssignals eines Beschleunigungsaufnehmers. Frequenzgangkurven dieser Art zeigt das Ausgangssignal, wenn der Aufnehmer mit konstantem Schwingungspegel über einen weiten Frequenzbereich beaufschlagt wird. Zur Messung eines solchen Frequenzganges wird der Aufnehmer auf einem 180 g schweren Schwingtisch montiert. Man erhält auf diese Weise eine Näherung für die *Resonanzfrequenz in montiertem Zustand*. Dieser Frequenzgang entspricht Gleichung (4) des letz-

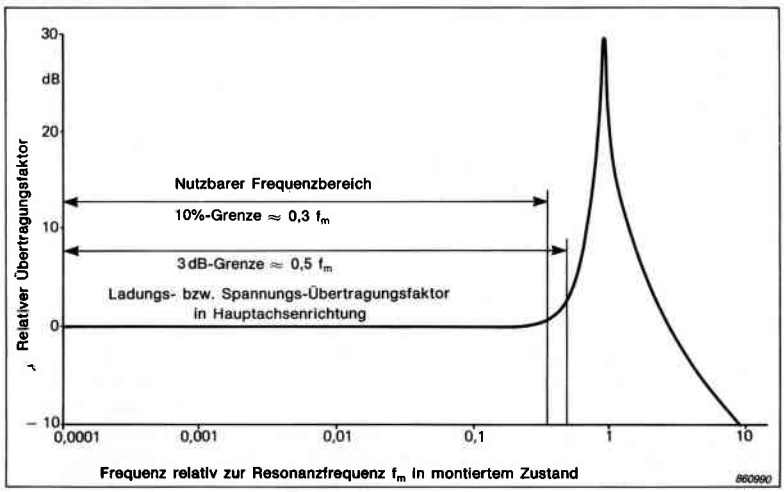


Abb. 2.3. Relative Empfindlichkeit eines Beschleunigungsaufnehmers als Funktion der Frequenz

ten Abschnitts. Der so ermittelte Wert der *Resonanzfrequenz in montiertem Zustand* kann jetzt direkt in (4) eingesetzt werden, man erhält

$$A = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^2} \qquad (5)$$

Gleichung (5) kann herangezogen werden, die Abweichung zwischen gemessenem und tatsächlichem Schwingungspegel für jede Frequenz zu berechnen, woraus sich der nutzbare Frequenzbereich des Aufnehmers bestimmen läßt.

2.3.1. Obere Grenzfrequenz

Abb. 2.3 zeigt, daß die *Resonanzfrequenz in montiertem Zustand* den Frequenzbereich bestimmt, über welchen der Beschleunigungsaufnehmer eingesetzt werden kann, d.h. in dem ein konstanter Schwingungspegel ein elektrisches Ausgangssignal konstanter Amplitude ergibt.

Je höher die Resonanzfrequenz in montiertem Zustand, desto größer wird also auch der nutzbare Frequenzbereich des Beschleunigungsaufnehmers sein. Um jedoch eine höhere Resonanzfrequenz zu erzielen, sind entweder steifere piezoelektrische Elemente oder eine niedrigere seismische Gesamtmasse erforderlich. Da die Steifigkeit piezoelektrischer Elemente im allgemeinen konstant ist, bleibt nur die geringere seismische Masse. Solch eine geringere Masse übt andererseits jedoch geringere Kräfte auf das piezoelektrische Element aus, die Empfindlichkeit des Aufnehmers wird also absinken. Aus diesem Grunde sind immer Beschleunigungsaufnehmer mit sehr hohem Frequenzbereich weniger empfindlich. Umgekehrt haben hochempfindliche Beschleunigungsaufnehmer wiederum einen geringeren nutzbaren Frequenzbereich.

Aus den Frequenzgangkurven lassen sich einige wichtige Frequenzbereiche für den Beschleunigungsaufnehmer ablesen:

5% Grenzfrequenz: Die Frequenz, bei der die Abweichung zwischen gemessenem und aktuellem Schwingungspegel an der Aufnehmerbasis 5% beträgt. Die maximale Schwingfrequenz, bei der mit dieser Genauigkeit noch gemessen werden kann, liegt bei einem Fünftel (0,22) der Resonanzfrequenz in montiertem Zustand.

10% Grenzfrequenz: Die Frequenz, bei der die Abweichung zwischen gemessenem und aktuellem Schwingungspegel an der Aufnehmerbasis 10% beträgt. Die maximale Schwingfrequenz, bei der mit dieser Genauigkeit noch gemessen werden kann, liegt bei einem Drittel (0,30) der Resonanzfrequenz in montiertem Zustand.

3 dB-Grenzfrequenz: Die Frequenz, bei der die Abweichung zwischen gemessenem und aktuellem Schwingungspegel an der Aufnehmerbasis 3 dB beträgt. Die maximale Schwingfrequenz, bei der mit dieser Genauigkeit noch gemessen werden kann, liegt etwa bei der Hälfte (0,54) der Resonanzfrequenz in montiertem Zustand.

2.3.2. Untere Grenzfrequenz

Piezolelektrische Beschleunigungsaufnehmer sind nicht geeignet zur Erfassung statischer Meßgrößen. Die piezoelektrischen Elemente produzieren eine Ladung nur dann, wenn auf sie *dynamische* Kräfte einwirken. Die erzielbare untere Grenzfrequenz wird durch den Vorverstärker bestimmt, an den der Beschleunigungsaufnehmer angeschlossen ist, da es eben vom Vorverstärker abhängt, wieviel Ladung vom Beschleunigungsaufnehmer abfließt. Mit Beschleunigungsaufnehmern und Vorverstärkern von Brüel & Kjær sind Schwingungen mit Frequenzen bis hinunter zu 0,003 Hz meßbar.

In der Praxis sind Fälle, wo eine niedrige Grenzfrequenz in der Größenordnung von Zehntel von Hertz wirklich erforderlich ist, sehr selten, so daß die Einschränkung auf dynamische Größen keine wirkliche Einschränkung ist.

Abschnitt 3, „Vorverstärker für Beschleunigungsaufnehmer", befaßt sich ausführlich mit den tieffrequenten Eigenschaften von Vorverstärkern. Speziell für tieffrequente Messungen bedeutsame Umgebungseinflüsse werden in Abschnitt 4, „Beschleunigungsaufnehmer in der Praxis", abgedeckt.

2.4. PIEZOELEKTRISCHE MATERIALIEN

Piezoelektrische Materialien bilden unter Einwirkung von Kräften elektrische Ladung aus. Materialien, die diese Eigenschaft zeigen, sind piezoelektrische Einkristalle — wie Quarz und Rochellesalz — oder künstlich polarisierte ferroelektrische Keramiken, zusammengesetzt aus verschiedenen Komponenten wie Bariumtitanat, Bleizirkonat oder Bleimetaniobat.

Der Prozess, in dem diese Keramiken polarisiert werden, ist ähnlich dem der Magnetisierung von Eisen im magnetischen Feld. Beidseitig am Material wird eine Hochspannung angelegt. Dadurch werden Bezirke innerhalb der Molekularstruktur in der Weise orientiert, daß extern wirkende Kräfte eine Verformung dieser Bezirke bewirken, wobei an gegenüberliegenden Oberflächen Ladungen entgegengesetzter Polarität frei werden. Abb. 2.4 zeigt eine schematische Darstellung dieses Effekts. Wird der piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer in Schwingungen versetzt, wirken beschleunigungsproportionale Kräfte auf die piezoelektrischen Elemente, die durch sie erzeugte Ladung wird an den Kontaktflächen abgegriffen. Durch den streng linearen Zusammenhang zwischen

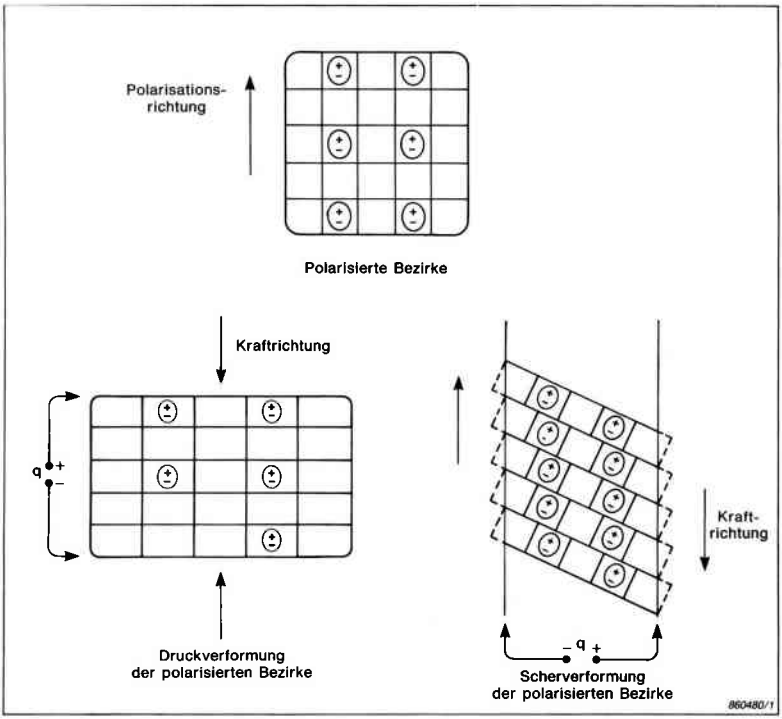


Abb. 2.4. Einfache Modellvorstellung des piezoelektrischen Effekts in einer künstlich polarisierten Keramik. Die Ladung q wird an den bezeichneten Oberflächen frei

der einwirkenden Kraft und der durch sie erzeugten Ladung erhält der piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer seine exzellenten Eigenschaften über große Dynamik- und Frequenzbereiche. Die Empfindlichkeit eines piezoelektrischen Materials wird in pC/N angegeben.

Wie in Abb. 2.4 gezeigt, können diese Materialien sowohl Druck wie auch Scherbelastungen verarbeiten. In beiden Fällen wird die Ladung an den unter Krafteinwirkung stehenden Oberflächen frei.

Bei Deformation durch Druck wird die Ladung in Polarisationsrichtung erzeugt und abgegriffen. Das hat jedoch einen entscheidenden Nachteil, da andere Eingangsgrößen, wie z.B. Temperaturschwankungen, ebenfalls solche Ladungen in Polarisationsrichtung erzeugen. Diese werden natürlich zugleich mit den durch die Schwingung erzeugten erfaßt, das Ausgangssignal des Aufneh-

mers steht also nicht allein in Bezug zur Schwingung. Benützt man jedoch als Meßeffekt die Scherverformung, wird die Ladung in einer Richtung normal zur Polarisationsrichtung abgegriffen, die störenden Ladungen zufolge Temperaturschwankung wirken sich jetzt nicht auf das Ausgangssignal aus. Dies ist einer der Gründe, warum Beschleunigungsaufnehmer nach dem Scherprinzip bessere Eigenschaften zeigen als Kompressionstypen. Der Einfluß von Temperaturschwankungen wird in Abschnitt 4.2.2 noch eingehend behandelt.

Ferroelektrische Keramiken können in jeder beliebigen Form hergestellt werden. Ihre Zusammensetzung kann zur Erzielung spezieller Eigenschaften für verschiedene Anwendungen variiert werden. Anders liegt der Fall bei monokristallinen piezoelektrischen Materialien wie etwa Quarz, wo die Zusammensetzung festliegt und die Formgebung beschränkt ist durch die Größe des Kristalls, aus dem das Element geschnitten wird. Aus diesem Grund sind Empfindlichkeit und Kapazität von Beschleunigungsaufnehmern mit monokristallinen Elementen im allgemeinen geringer als von solchen mit ferroelektrischen Keramiken.

Die in den Beschleunigungsaufnehmern von Brüel & Kjær verwendeten piezoelektrischen Keramiken tragen die Bezeichnungen PZ 23, PZ 27, PZ 45 und PZ 100. Folgende Eigenschaften sind für sie typisch:

1. PZ 23 zählt zur Bleititanat/Bleizirkonat-Familie ferroelektrischer Keramiken und ist künstlich polarisiert. Es ist einsetzbar bei Temperaturen bis zu 250 °C (482 °F). Wegen seiner hohen Empfindlichkeit (ca. 300 pC/N) und anderer guter Allroundeigenschaften wird es bei Brüel & Kjær in den meisten Beschleunigungsaufnehmern verwendet.

2. PZ 27 ist ein künstlich polarisiertes Bleizirkonat/Titanat-Element sehr ähnlich PZ 23. Es ist geeignet für Miniatur-Beschleunigungsaufnehmer.

3. PZ 45 ist eine künstlich polarisierte ferroelektrische Keramik spezieller Zusammensetzung mit besonders geringem Temperaturgang, einsetzbar bei Temperaturen bis zu 400 °C (752 °F). Brüel & Kjær verwendet sie für Aufnehmer mit symmetrischem Ausgang, für Hochtemperatur- und für Hochbeschleunigungsaufnehmer.

4. PZ 100 ist ein sorgfältig ausgewählter und vorbereiteter Quarzkristall. Er ist einsetzbar bei Temperaturen bis hinauf zu 250 °C (482 °F) und weist eine ausgezeichnete Stabilität bei geringer Temperatursprungempfindlichkeit auf. Brüel & Kjær verwendet ihn für das Aufnehmer-Bezugsnormal Typ 8305 und in den Kraftaufnehmern.

Dem Datenblatt der Beschleunigungsaufnehmer von Brüel & Kjær kann für jeden Aufnehmertyp das verwendete piezoelektrische Material entnommen werden.

2.5. PRAKTISCHE AUFNEHMERKONSTRUKTIONEN

Unter den Beschleunigungsaufnehmern von Brüel & Kjær sind drei verschiedene Bauarten zu finden. Die beiden ersten, Plan-Scher und Delta Scher®, sind in Abb. 2.5 zu sehen. Auch ein Kompressionstyp wird angeboten, siehe Abb. 2.6. Wegen der überragenden Eigenschaften wird allerdings das Delta Scher®-Prinzip in nahezu allen Beschleunigungsaufnehmern von Brüel & Kjær bevorzugt.

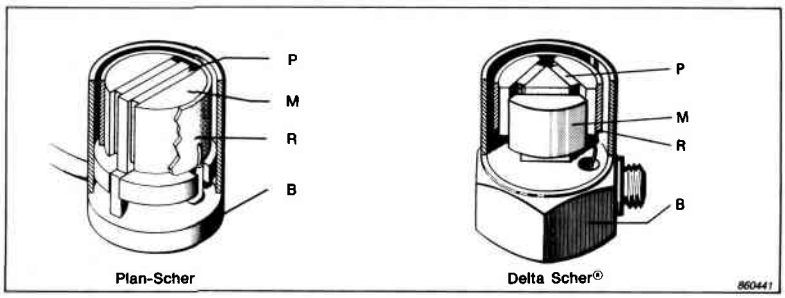


Abb. 2.5. Plan-Scher und Delta Scher® Anordnung. M=seismische Masse, P=piezoelektrisches Element, R=Spannring, B=Basis

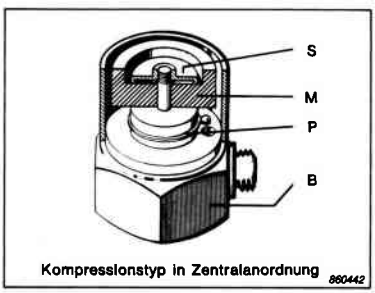


Abb. 2.6. Herkömmlicher Kompressionstyp. M=seismische Masse, P=piezoelektrisches Element, B=Basis, und S=Feder

1. **Delta Scher® Bauart:** Drei piezoelektrische Elemente, jedes mit einer seismischen Masse, sind in einer Dreieckskonfiguration um einen prismatischen Zentralpfosten angeordnet. Gehalten werden sie durch einen kräftigen Vorspannring. Kleber oder Bolzen werden bei dieser Konstruktion nicht ver-

wendet, Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit erreichen dadurch ein Höchstmaß. Die statische Vorbelastung der piezoelektrischen Elemente durch den Spannring ergibt eine besonders gute Linearität. Die Ladung wird hier zwischen Gehäuse und Spannring abgegriffen.

Im Vergleich zu anderen Konstruktionen ergibt die Delta Scher®-Bauart ein besseres Verhältnis von Empfindlichkeit zu Masse, eine relativ hohe Resonanzfrequenz und sehr gute Isolierung gegenüber Dehnungen der Basis und Temperatursprüngen. Die hervorragenden Gesamteigenschaften machen diese Bauart gleichermaßen geeignet für Universal- und für viele Spezialtypen.

2. **Plan-Scher-Bauart**: Auch bei dieser Bauart wird das piezoelektrische Element einer Scherbeanspruchung unterworfen, genau wie beim Delta Scher®-Typ. Beiderseits eines flachen Zentralpfostens sind zwei plattenförmige piezoelektrische Elemente angeordnet. Zwei seismische Massen, geformt wie in Abb. 2.5 gezeigt, werden durch einen kräftigen Vorspannring mit der gleichen Funktion wie beim Delta Scher®-Typ in ihrer Position gehalten. Basis und piezoelektrische Elemente sind mechanisch sehr gut gegeneinander isoliert, was eine hervorragende Unempfindlichkeit gegenüber Basisbiegung und Temperatursprüngen ergibt.

3. **Kompressionstyp**: Diese traditionelle und einfache Bauart ergibt ein recht günstiges Verhältnis von Empfindlichkeit zu Masse. Das piezoelektrische Feder-Masse-System ist über einen zylindrischen Zentralkörper direkt auf der Basis montiert. Wegen dieser direkten Verbindung wirken bei diesem Typ allerdings Basis und Zentralkörper als Feder parallel zum piezoelektrischen Element, dynamische Beanspruchungen der Basis, wie z.B. Biegung oder Wärmedehnung, erzeugen Spannungen im piezoelektrischen Element und somit fehlerhafte Meßsignale. Obwohl Brüel & Kjær die Basis der Aufnehmer besonders dick ausführt, um diese Effekte auf ein Minimum herabzudrücken, werden Biegung und Dehnung der Aufnehmerbasis immer noch auf das piezoelektrische Element übertragen. Das ergibt am Ausgang des Aufnehmers fehlerhafte weil nicht schwingungsbezogene Ausgangssignale exakt mit der Frequenz der Schwingung. Im vorigen Abschnitt wurde gezeigt, daß auch Temperatursprünge Ladungen in den piezoelektrischen Elementen erzeugen, die beim Kompressionstyp ebenfalls mit erfaßt werden.

   Aus den oben erwähnten Gründen verwendet Brüel & Kjær das Kompressionsprinzip nur bei Hochbeschleunigungsaufnehmern (z.B. für Schockmessungen), wo der Störsignalpegel stets klein ist gegenüber dem Schwingungssignal. Als Kompressionstyp ist auch das Aufnehmer-Bezugsnormal ausgeführt, das in störungsfreier Umgebung zur Aufnehmerkalibrierung eingesetzt wird. Hier wird die Steifigkeit der Basis durch eine Berylliumscheibe

erhöht, was den Einfluß von Basisdehnungen auf ein Minimum herabdrückt. Dieser Aufnehmer ist außerdem umgekehrt aufgebaut, damit die Beschleunigung an der Basis des auf ihm montierten Aufnehmers möglichst exakt gemessen wird.

2.5.1. Beschleunigungsaufnehmer mit Ladungs-Strom-Wandler

Diese Beschleunigungsaufnehmer sind mit einem eingebauten Vorverstärker ausgerüstet. Abb. 2.7 zeigt einen solchen Aufnehmer. Der Beschleunigungsaufnehmerteil entspricht der Delta Scher®-Konstruktion aus dem vorigen Abschnitt. Der elektronische Teil ist in Dickfilm-Mikrotechnik ausgeführt, ein Vorverstärker mit exzellenten Eigenschaften. Abschnitt 3 enthält eine Beschreibung der Arbeitsweise des Vorverstärkerteils.

Beschleunigungsaufnehmer mit Ladungs-Strom-Wandler benötigen eine externe Stromversorgung. Der eingebaute Vorverstärker wird über eine Konstantspannung gespeist, das Schwingungssignal wird als modulierter Speisestrom zur Versorgung übertragen. Dieses Prinzip wird ebenfalls in Abschnitt 3 ausführlich behandelt.

Eingebaute Vorverstärker bringen natürlich Einschränkungen hinsichtlich Temperatur- und Schockbelastbarkeit. Um diese Einschränkungen zu umgehen,

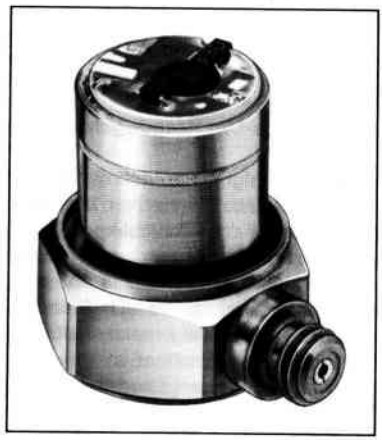


Abb. 2.7. Brüel & Kjær "Line-drive"-Beschleunigungsaufnehmer. Das Aufnehmergehäuse ist in der Darstellung entfernt, die eingebaute Elektronik sichtbar

bietet Brüel & Kjær auch getrennte Ladungs-Strom-Wandler für Beschleunigungsaufnehmer an.

2.5.2. Weitere Bauarten

Basierend auf den Prinzipien von Kompressions- und Scherungstypen gibt es weitere Bauarten von Beschleunigungsaufnehmern. Brüel & Kjær verwendet in seinem Programm lediglich die oben erwähnten, insbesondere das Delta Scher®-Prinzip, welches die bestmöglichen Aufnehmereigenschaften ohne unnötige Kompromisse gewährleistet. Die im folgenden aufgeführten allgemeinen Grundprinzipien sind außerdem noch zu finden:

Scherungsring-Bauart mit ringförmig ausgeführten piezoelektrischen Elementen und seismischen Massen, die einfach zusammengeklebt werden.

Isolierte Scherungstypen (verschraubte Scherungstypen) ähnlich dem ebenen Scherungstyp, außer daß die piezoelektrischen Elemente über eine Verschraubung gesichert sind.

2.6. ÜBERTRAGUNGSFAKTOR

Wie im vorigen ausgeführt wurde, ist der piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer ein aktiver Aufnehmertyp mit einem der einwirkenden Beschleunigung proportionalen elektrischen Ausgangssignal. Zu seiner Rolle als Meßwertaufnehmer wird jetzt der Zusammenhang zwischen Eingang (Beschleunigung) und Ausgang (Ladung oder Spannung) näher betrachtet.

2.6.1. Ladungs- und Spannungs-Übertragungsfaktor

Der piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer kann sowohl als Ladungs- wie auch als Spannungsquelle betrachtet werden. Das piezoelektrische Element wirkt als Kapazität C_a parallel mit dem sehr hohen Leckwiderstand R_a, der für praktische Anwendungsfälle vernachlässigt werden kann. Das Piezoelement kann somit entweder als ideale Ladungsquelle Q_a parallel mit C_a und der Kabelkapazität C_c oder als Spannungsquelle V_a in Reihe mit C_a und belastet mit C_c behandelt werden. Abb. 2.8 zeigt die Ersatzschaltbilder für beide Betrachtungsweisen. Beide Modelle sind gleichermaßen verwendbar, je nachdem welches den jeweils einfacheren Berechnungsweg liefert.

Die Wahl des Vorverstärkers hängt davon ab, ob man die Ladung oder die Spannung als elektrisches Ausgangssignal heranziehen möchte.

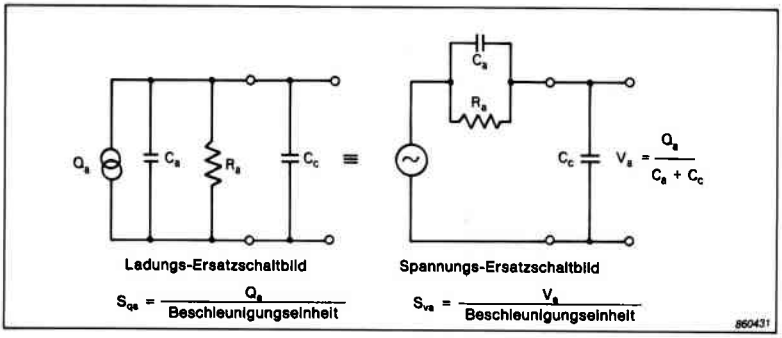


Abb. 2.8. Elektrische Ersatzschaltbilder für piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer mit Anschlußkabel

Der Ladungs-Übertragungsfaktor S_{qa} eines piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers wird in Ladung (gemessen in pC) je Beschleunigungseinheit angegeben:

$$S_{qa} = \frac{pC}{ms^{-2}} = \frac{pC_{eff}}{ms^{-2}_{eff}} = \frac{pC_{Spitze}}{ms^{-2}_{Spitze}}$$

In ähnlicher Weise wird der Spannungs-Übertragungsfaktor in Spannung je Beschleunigungseinheit ausgedrückt:

$$S_{va} = \frac{mV}{ms^{-2}} = \frac{mV_{eff}}{ms^{-2}_{eff}} = \frac{mV_{Spitze}}{ms^{-2}_{Spitze}}$$

Aus den Ersatzschaltbildern ist unmittelbar abzulesen, daß die vom Aufnehmer abgegebene Spannung geteilt wird im Verhältnis von Aufnehmerkapazität zu Kabelkapazität. Demzufolge bewirkt eine Änderung der Kabelkapazität — sei es durch einen anderen Kabeltyp, sei es von der Kabellänge her — eine Veränderung des Spannungs-Übertragungsfaktors. In einem solchen Fall wird also immer eine Neukalibrierung vonnöten sein. Dieser Hauptnachteil eines Spannungs-Vorverstärkers wird in Abschnitt 3 noch näher untersucht. Heutzutage wird als Vorverstärker nahezu ausschließlich der Ladungsverstärker eingesetzt.

Bei hohen und mittleren Frequenzen innerhalb des nutzbaren Frequenzbereiches eines Beschleunigungsaufnehmers ist der Spannungs-Übertragungsfaktor unabhängig von der Frequenz. Dies gilt auch für den Ladungs-Übertragungsfaktor in Beschleunigungsaufnehmern mit den piezoelektrischen Materialien PZ 45

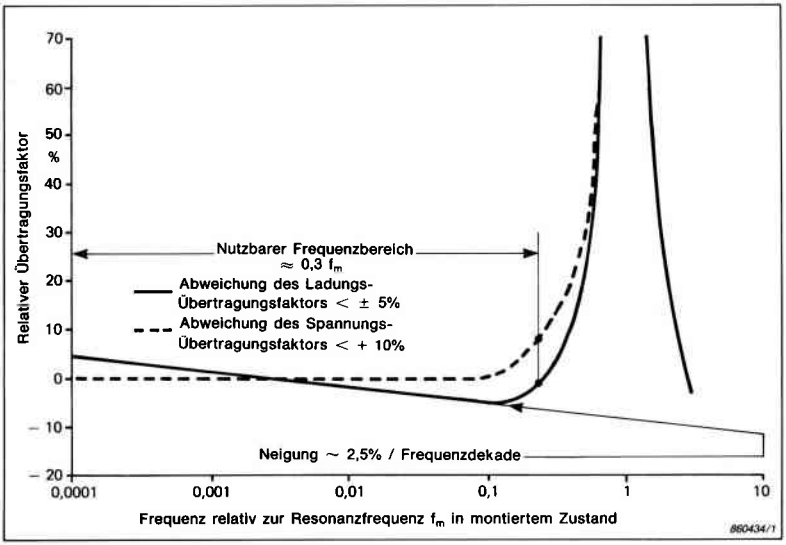


Abb. 2.9. Ladungs- und Spannungs-Übertragungsfaktor eines Beschleunigungsaufnehmers mit piezoelektrischem Material PZ 23 über der Frequenz

und PZ 100, nicht jedoch für die mit PZ 23 und PZ 27. Die letztgenannten Materialien sind so ausgelegt, daß Ladungsempfindlichkeit und Kapazität mit steigender Frequenz um etwa 2,5% je Dekade abnehmen. Diese Abnahme kompensiert zum Teil den Anstieg des Ausgangssignals im Resonanzbereich. Aus diesem Grund beträgt die maximale Abweichung zwischen gemessener und tatsächlicher Beschleunigung im nutzbaren Frequenzbereich bei Beschleunigungsaufnehmern mit dem Material PZ 23 und mittlerer bis hoher Resonanzfrequenz lediglich ± 5%, wie in Abb. 2.9 gezeigt.

2.6.2. Uni-Gain®-Übertragungsfaktor

Nahezu alle Beschleunigungsaufnehmer von Brüel & Kjær sind als sogenannter Uni-Gain®-Typ ausgeführt. Das bedeutet, daß der gemessene Übertragungsfaktor mit 2% Genauigkeit einen einfach handzuhabenden Wert wie 1, 3,16, 10 oder 31,6 pC/ms^{-2} aufweist. Mit Uni-Gain®-Beschleunigungsaufnehmern kann demnach also ein Aufnehmer durch einen anderen vom gleichen Typ ohne Änderung der Meßgeräteeinstellungen ersetzt werden. Da die oben aufgeführten Werte einer Stufung von 10 dB gleichkommen, wird die Einstellung und Kalibrierung der Meßkette überdies besonders einfach. Wird zum Beispiel ein

Aufnehmer durch einen anderen von unterschiedlichem Typ ersetzt, sind in der Meßkette nur feste Verstärkungsänderungen in Schritten von 10 dB erforderlich.

Uni-Gain®-Übertragungsfaktoren werden in Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmern durch sorgfältige Justierung der seismischen Massen erzielt.

2.6.3. Linearität und Dynamikbereich

Linearität ist eine Grundanforderung an jedes Meßsystem. Der Ausgang des Systems muß zum Eingang in einem linearen Zusammenhang stehen, und zwar über den gesamten benötigten Frequenz- und Dynamikbereich. Die hervorragende Linearität von Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmern ist in Abb. 2.10 illustriert.

Der piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer ist von außerordentlicher Linearität über einen weiten Dynamikbereich einfach wegen der guten Linearitätseigenschaften piezoelektrischer Materialien. Theoretisch arbeitet der Aufnehmer linear bis hinab zu statischen Beschleunigungen. Durch im Meßsystem generiertes Rauschen wird jedoch in der Praxis eine endliche untere Frequenzgrenze gesetzt. Für dieses Rauschen gibt es verschiedene Quellen, die in den Abschnitten 3 und 4 noch näher diskutiert werden.

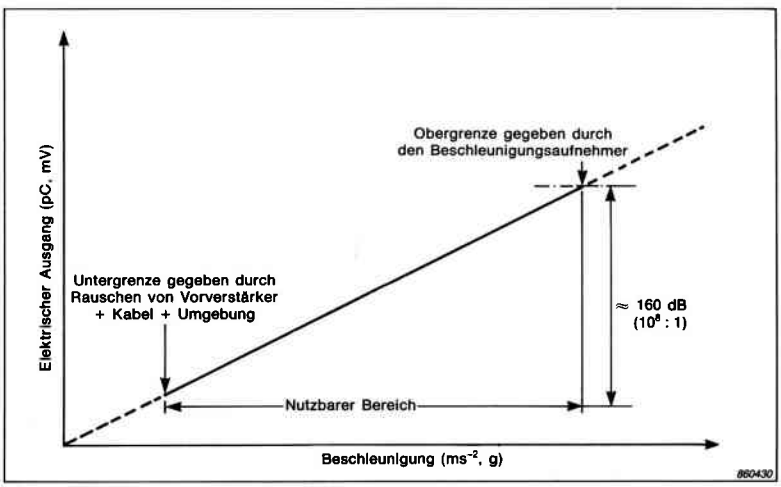


Abb. 2.10. Das Ausgangssignal des Beschleunigungsaufnehmers aufgetragen als Funktion der Beschleunigung demonstriert die Linearität und den großen Dynamikbereich

Wird ein Beschleunigungsaufnehmer über die höchstzulässige Beschleunigung hinaus belastet, arbeitet er zunehmend nichtlinear. Bei Pegeln weit über dieser Höchstgrenze kann es zu einem Abgleiten des Spannringes von den piezoelektrischen Elementen und einem Kurzschluß mit der Basis kommen, wodurch der Aufnehmer für weitere Messungen unbrauchbar wird. In der Praxis wird dieser Fall kaum jemals eintreten, außer der Aufnehmer wird Schockbelastungen weit oberhalb seiner spezifizierten Grenze ausgesetzt.

2.6.4. Querempfindlichkeit

Im allgemeinen wird ein Beschleunigungsaufnehmer auch ein Ausgangssignal abgeben, wenn lediglich Beschleunigungen quer zu seiner Hauptachsenrichtung anliegen. Im Kalibrierzeugnis des Beschleunigungsaufnehmers ist die Querempfindlichkeit als Prozentsatz seiner Empfindlichkeit in Hauptachsenrichtung angegeben. Im Idealfall sollte zwar die Querempfindlichkeit des Aufnehmers gleich Null sein, in der Praxis ist dies durch Imperfektionen in piezoelektrischem Material und Metallteilen jedoch nicht erzielbar. Bei Brüel & Kjær wird große Sorgfalt auf die Auswahl homogener piezoelektrischer Keramiken und auf Fertigung, Polieren und Ausrichten bei der Montage verwendet. So kann bei angemessener Behandlung und Montage auf einer ebenen, sauberen Oberfläche die maximale Querempfindlichkeit der meisten Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmer unterhalb von 4% der Hauptrichtungsempfindlichkeit bei 30 Hz gehalten werden, siehe Abb. 2.11.

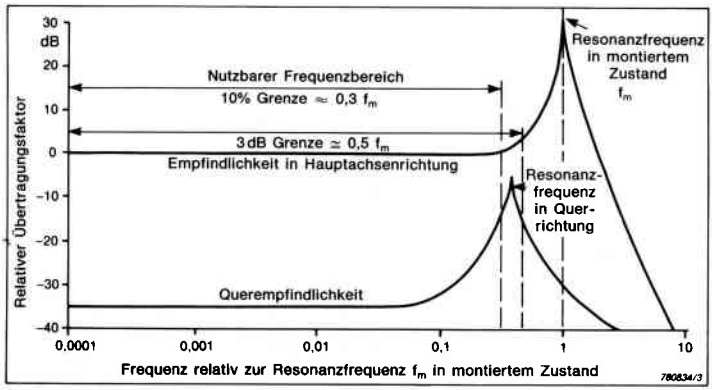


Abb. 2.11. Frequenzgang eines Beschleunigungsaufnehmers bei Schwingungen in Hauptachsen- und in Querrichtung

Bei Frequenzen unterhalb eines Sechstels der Resonanzfrequenz in montiertem Zustand in Hauptachsenrichtung kann die Querempfindlichkeit kleiner als 10% gehalten werden. Für Frequenzen oberhalb eines Drittels der genannten Resonanzfrequenz ist es schwer, eine Querempfindlichkeit anzugeben, da in diesem Bereich eine Resonanz in Querrichtung auftritt, wie in Abb. 2.11 zu sehen.

In Abb. 2.12 ist verdeutlicht, daß die Querempfindlichkeit eigentlich daher rührt, daß die Achse der maximalen Ladungs- bzw. Spannungsempfindlichkeit nicht mit der Montageachse zusammenfällt. Daraus folgt wiederum, daß es eine Richtung maximaler und eine Richtung minimaler Querempfindlichkeit geben muß, die zueinander und jeweils zur Hauptachsenrichtung im rechten Winkel stehen. Im Kalibrierzeugnis wird immer der Maximalwert der Querempfindlichkeit spezifiziert. Die Richtung minimaler Querempfindlichkeit wird bei Brüel & Kjær durch einen roten Punkt am Aufnehmergehäuse markiert.

Es soll an dieser Stelle erwähnt werden, daß die Delta Scher®-Anordnung in alle Querrichtungen gleiche Steifigkeit und damit auch nur eine Querresonanz aufweist. Andere Scherungstypen haben demgegenüber oft zwei oder mehr Querresonanzen.

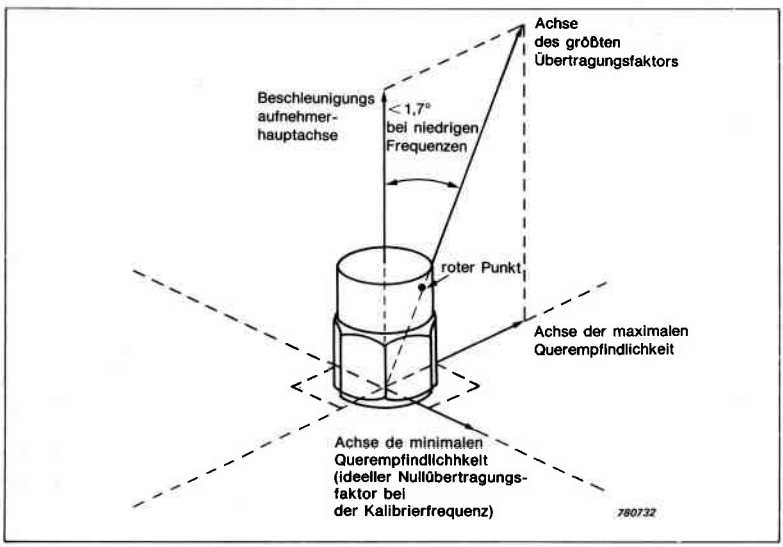


Abb. 2.12. Vektorielle Darstellung der Querempfindlichkeit

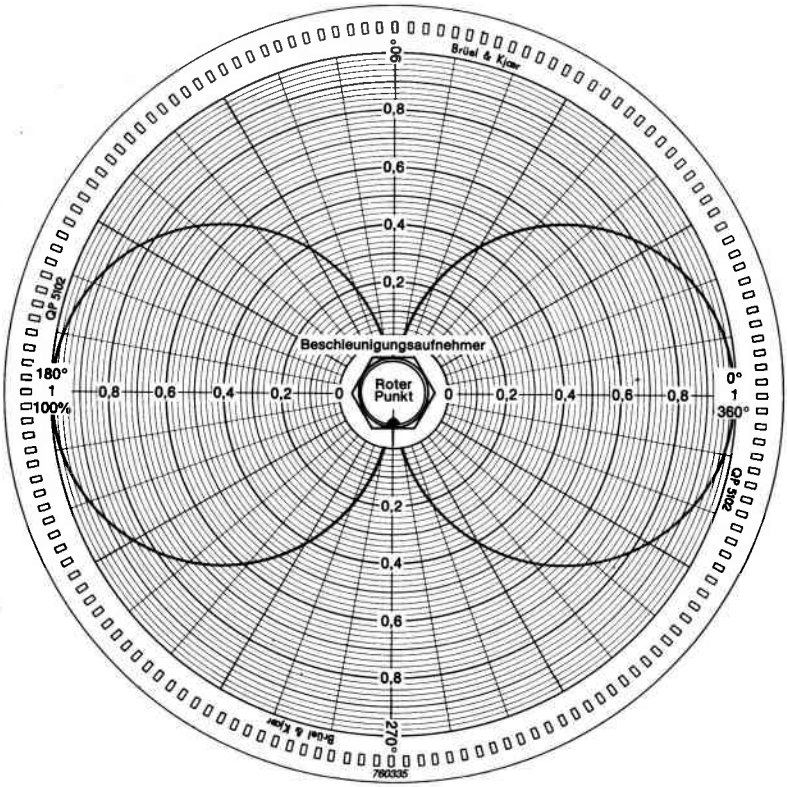


Abb. 2.13. Diagramm zur Bestimmung der Querempfindlichkeit in beliebiger Richtung, wenn die maximale Querempfindlichkeit bekannt ist

Da die Querresonanz gerade eben außerhalb des nutzbaren Frequenzbereichs eines Beschleunigungsaufnehmers liegt mit einem Spitzenwert der Querempfindlichkeit wenig unterhalb der in Hauptachsenrichtung, ist es wichtig, Schwingungen und Stöße in Querrichtung deutlich unterhalb der für die Hauptachsenrichtung spezifizierten kontinuierlichen Grenzwerte zu halten. Starke Schockbelastungen in Querrichtung durch Herabfallen oder Anschlagen können den Beschleunigungsaufnehmer über die zulässigen Grenzen belasten und zur Zerstörung der piezoelektrischen Elemente führen.

Folgende Vorkehrungen lassen sich gegen übermäßige Querschwingungen treffen:

1. Ausrichten des roten Punktes in Richtung der maximalen Querschwingungen.

2. Einsatz eines mechanischen Filters zum Fernhalten von Schwingungen außerhalb der Hauptachsenrichtung.

3. Aus dem Diagramm von Abb. 2.13 läßt sich, ausgehend von der maximalen Querempfindlichkeit, die Aufnehmerempfindlichkeit in jeder beliebigen Richtung berechnen.

   Beispiel: Bei 60° gegenüber der Richtung maximaler Querempfindlichkeit sinkt diese um den Faktor 0,5 ab. (Das gleiche Resultat erhält man aus der Berechnung über den Cosinus des Winkels). Ein Beschleunigungsaufnehmer mit einer maximalen Querempfindlichkeit von 2% hat also bei 60° eine Querempfindlichkeit von

$$0{,}5 \times 2\% = 1\%$$

2.7. PHASENGANG

Die Phasenverschiebung eines Beschleunigungsaufnehmers entspricht der zeitlichen Verzögerung zwischen mechanischem Eingang und resultierendem elektrischen Ausgangssignal. Ist diese Phasenverschiebung nicht für alle Frequenzen innerhalb des nutzbaren Frequenzbereiches konstant, ändern sich die Phasenbeziehungen der einzelnen Frequenzkomponenten im Signal relativ zueinander — das elektrische Ausgangssignal wird also gegenüber der Schwingung selbst verzerrt.

In Abb. 2.14 kann man Empfindlichkeit und Phasengang eines Beschleunigungsaufnehmers sehen. Bei Frequenzen unterhalb der Resonanzfrequenz in montiertem Zustand ist die Phasenverschiebung durch den Aufnehmer ohne Belang. Im Resonanzbereich selbst eilt die Bewegung der seismischen Massen derjenigen der Basis nach, eine Verzerrung im Signal entsteht. Durch die geringe Dämpfung von Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmern ist der Frequenzbereich, in dem Resonanzerscheinungen zum Tragen kommen, relativ schmal, der Aufnehmer kann also unbedenklich über den gesamten nutzbaren Frequenzbereich verwendet werden, ohne daß Phasenverzerrungen zu befürchten sind.

Dessenungeachtet ist es jedoch notwendig, den Phasengang von Ladungs- oder Spannungsvorverstärker im Auge zu behalten, speziell wenn dort Integrationsnetzwerke oder andere Filter eingesetzt werden. Ganz besonderes Gewicht bekommt diese Frage bei der Messung von kurzzeitigen Signalen (Transienten) und mechanischen Schocks.

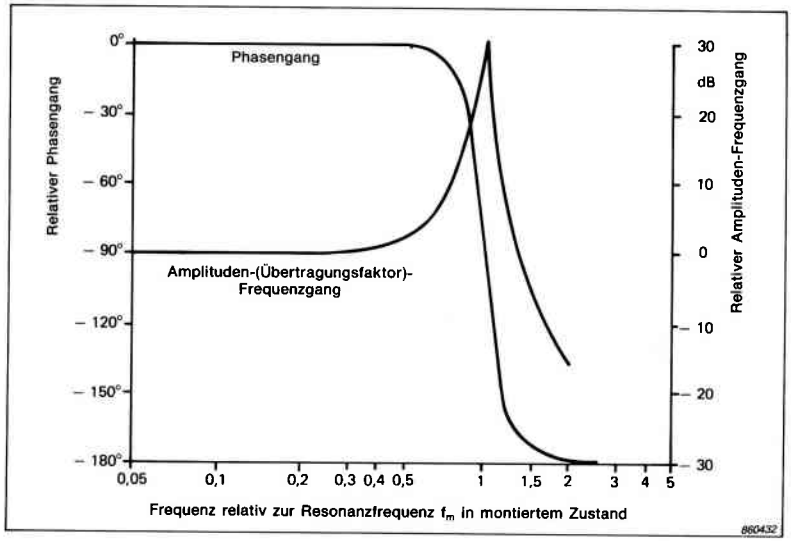


Abb. 2.14. Amplituden- und Phasengang eines Beschleunigungsaufnehmers in Abhängigkeit von der Frequenz

2.8. VERHALTEN BEI TRANSIENTEN SCHWINGUNGEN

Bei der Messung von transienten (kurzzeitigen) Schwingungen und Stößen ist auf die Linearität des gesamten Meßsystems besonders zu achten, da Nichtlinearitäten starke Verzerrungen im Meßsignal nach sich ziehen. Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer werden zufolge ihrer hervorragenden Linearität transiente Signale über einen weiten Bereich ohne Probleme verzerrungsfrei reproduzieren. In den seltensten Fällen wird es der Aufnehmer sein, der für schlechte Messungen bei transienten Signalen verantwortlich zeichnet. Weit häufiger ist es der Vorverstärker, ein eingebundenes Filter oder ein Integrationsnetzwerk, das hier das Problem verursacht. In jedem Fall, um die Genauigkeit einer Messung sicherzustellen, ist es notwendig, die folgenden Kurzzeiteffekte zu beachten.

2.8.1. Ladungsverlust

In Abb. 2.15 sieht man die typische Verzerrung eines quasistatischen Beschleunigungsimpulses, wie er etwa bei einem Raketenstart oder in einem schnellen Lift auftreten kann. Die Verzerrung durch die in einem unzulässigen

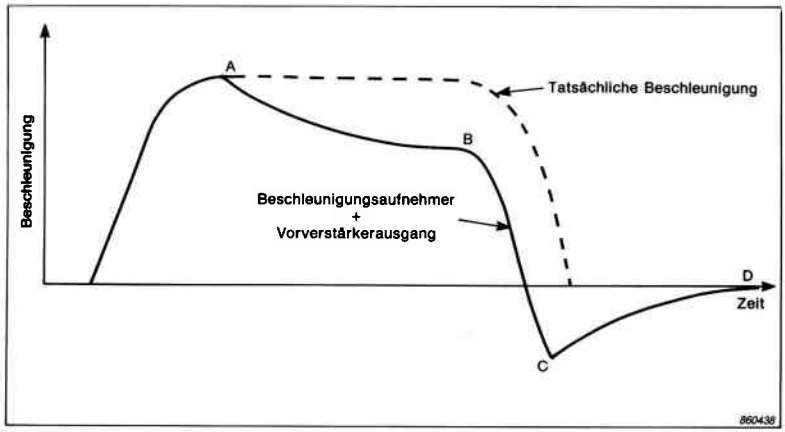


Abb. 2.15. Verzerrung eines quasistatischen Beschleunigungsimpulses zufolge von „Ladungsverlust" in der Kombination Beschleunigungsaufnehmer — Vorverstärker

Frequenzbereich betriebene Kombination von Beschleunigungsaufnehmer und Vorverstärker läßt sich wie folgt erklären:

Wird der Beschleunigungsaufnehmer einer quasistatischen Beschleunigung ausgesetzt, entsteht eine statische Ladung an den Oberflächen der piezoelektrischen Elemente. Durch die Kapazität des Elementes wird diese Ladung dort gespeichert, der hohe Isolationswiderstand des Aufnehmers hindert sie zunächst am Abfließen. Da aber die Zeitkonstante, die aus dem Beschleunigungsaufnehmer selbst, aus der Eingangsimpedanz des Vorverstärkers und aus dem Netzwerk zur Begrenzung der unteren Grenzfrequenz resultiert, immer endlich sein muß, wird immer ein wenig Ladung abfließen, was zu dem zwischen den Punkten A und B erkennbaren Abfall im Meßsignal führt. Geht jetzt die Beschleunigung auf wieder Null zurück, springt auch die Ladung um einen entsprechenden Betrag und fällt damit auf einen Wert unterhalb Null entsprechend Punkt C, bevor sie allmählich wieder den Nullwert (Punkt D) erreicht. Die exponentielle Änderung zwischen den Punkten A und B bzw. C und D ist jeweils identisch und bestimmt durch die Zeitkonstante der Kombination von Beschleunigungsaufnehmer und Vorverstärker.

Dieser Effekt führt vor allem zu Fehlern bei der Messung des Scheitelwertes der Beschleunigung und wird durch den Gebrauch des Beschleunigungsaufnehmers mit einer ungeeigneten Einstellung der unteren Grenzfrequenz am Vorverstärker herbeigeführt. Meßfehler im Scheitelwert bleiben unterhalb von 5%, wenn die untere –3dB-Grenzfrequenz am Vorverstärker geringer eingestellt wird

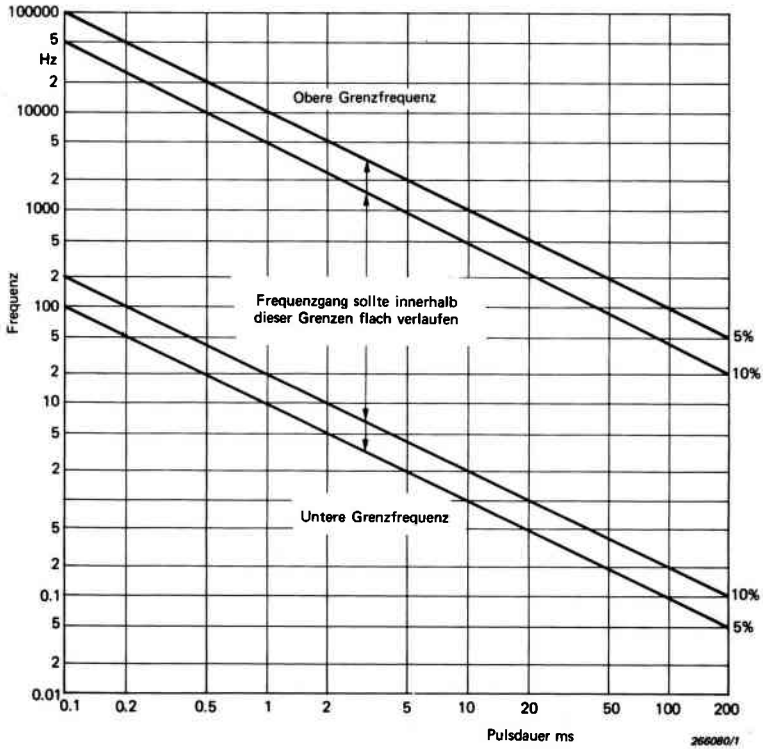


Abb. 2.16. Anforderungen an obere und untere –3 dB Grenzfrequenz zur Messung von Impulsen der Dauer T mit einem Scheitelwertfehler von weniger als 5% bzw. 10%

als 0,008/T, wobei T die Dauer der *Rechteck*transienten bedeutet. Für Halbsinustransiente muß die untere Grenzfrequenz geringer als 0,05/T sein.

Die erforderliche Frequenzbandbreite der gesamten Meßkette zur Messung solcher Transienten mit spezifizierter Genauigkeit kann Abb. 2.16 entnommen werden. Im gleichen Bild sind auch die Anforderungen an die obere Grenzfrequenz zu finden, damit hochfrequente Komponenten des transienten Signals verzerrungsfrei wiedergegeben werden.

Die Verzerrungen transienter Signale durch Einsatz eines Beschleunigungsaufnehmers mit unpassendem Frequenzbereich erscheinen besonders bei quasistatischem Signalcharakter oft ähnlich den Verzerrungen zufolge anderer

Phänomene, wie z.B. Nullpunktverschiebung (siehe Abschnitt 2.8.3). Man muß sich bewußt sein, daß Ursachen und damit Abhilfemaßnahmen bei solchen Problemen durchaus unterschiedlich sein können.

2.8.2. Nachklingen

Nachklingen ist eine Signalverzerrung durch Einsatz eines Beschleunigungsaufnehmers zur Messung transienter Signale außerhalb seines nutzbaren Frequenzbereiches. Ein Beispiel eines solcherart verzerrten Signals ist in Abb. 2.17 zu sehen. Durch die hohen Frequenzkomponenten im Signal wird die Eigenfrequenz des Beschleunigungsaufnehmers angeregt, was eigentlich vermieden werden sollte. Eine erste Warnung für Nachklingen kann eine Übersteuerungsanzeige am Vorverstärker sein.

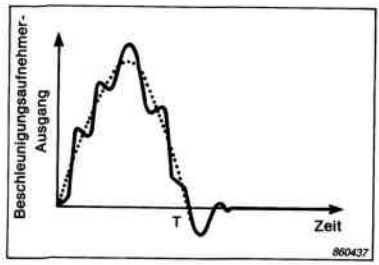


Abb. 2.17. Signalverzerrung durch „Nachklingen"

„Nachklingen" verursacht Fehler bei der Messung des Scheitelwertes transienter Signale. Für einen Scheitelwert-Meßfehler von weniger als 5% sollte die Resonanzfrequenz des Beschleunigungsaufnehmers in montiertem Zustand höher liegen als 10/T, wobei T die Dauer des transienten Signals in Sekunden bedeutet.

Die Aufnehmerresonanz kann durch zusätzliche Maßnahmen bedämpft werden, wodurch das Nachklingen reduziert sowie Dynamikbereich und Bandbreite der Meßkette optimal ausgenützt werden können. Dies kann entweder durch Verwendung eines mechanischen Filters (Abschnitt 4.5) bei der Aufnehmermontage oder durch einen Vorverstärker mit Tiefpaßfilter erreicht werden. Im letzteren Fall muß die –3 dB-Grenzfrequenz f_o des Filters etwa bei der Hälfte der Resonanzfrequenz f_m des Aufnehmers in montiertem Zustand liegen (f_o = 0,5 f_m), die Flankensteilheit des Filters oberhalb der Grenzfrequenz muß 12 dB/Oktave betragen. Die entsprechenden Frequenzgänge sind in Abb. 2.18 dargestellt, eine Halbsinustransiente der Dauer $T = 1 / f_m$ kann jetzt mit einem Scheitelwertfehler von weniger als 10% gemessen werden.

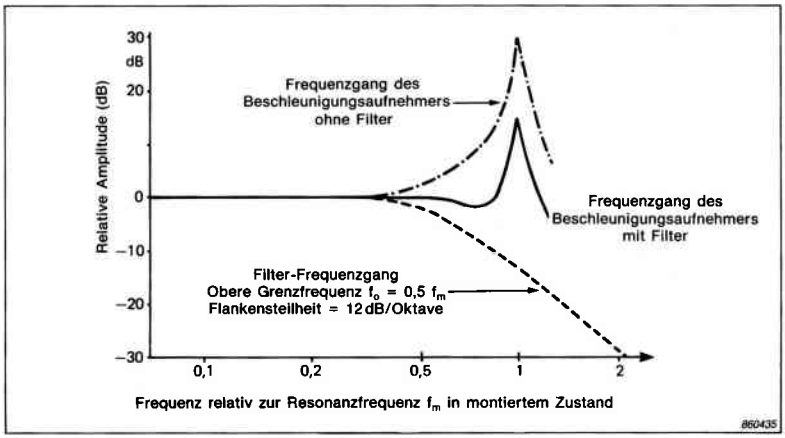


Abb. 2.18. Anforderungen an ein Tiefpaßfilter oder den Frequenzgang des Vorverstärkers zur Dämpfung der Aufnehmer-Resonanzfrequenz f_m in montiertem Zustand, damit Schockimpulse vom Halbsinustyp der Dauer $T=1/f_m$ Sekunden mit weniger als 10% Amplitudenfehler gemessen werden können

2.8.3. Nullpunktverschiebung

Abb. 2.19 zeigt Ausgangssignale eines Beschleunigungsaufnehmers, in beiden Fällen hervorgerufen durch identische Halbsinusimpulse. Jedesmal wurde die Signalverzerrung durch den Aufnehmer verursacht. Der Beschleunigungspegel lag dabei sehr nahe der zulässigen oberen Grenze für den Aufnehmer.

Da vor allem im Grenzbereich auch piezoelektrische Elemente nicht vollständig elastische Körper sein können, läßt sich vorstellen, daß bei plötzlicher Entlastung nicht alle Molekularbezirke in den Zustand wie vor Beginn der Belastung zurückkehren werden. Diese Bezirke werden also nach Entlastung noch weiter Ladung abgeben, die in der Folge nur langsam mit der durch die untere Grenzfrequenz des Vorverstärkers gegebenen Zeitkonstanten abfließt. Im gleichen Maß geht damit auch die Ausgangsspannung am Vorverstärker nur langsam gegen Null. Dieser Effekt tritt zufällig und überdies mit zufälligem Vorzeichen auf.

Die Zeit bis zum Abklingen einer solchen Nullpunktverschiebung kann um den Faktor 1000 größer sein als die Dauer des Impulses selbst. Aus diesem Grunde sind hier große Fehler beim Einsatz von Integrationsnetzwerken zu erwarten.

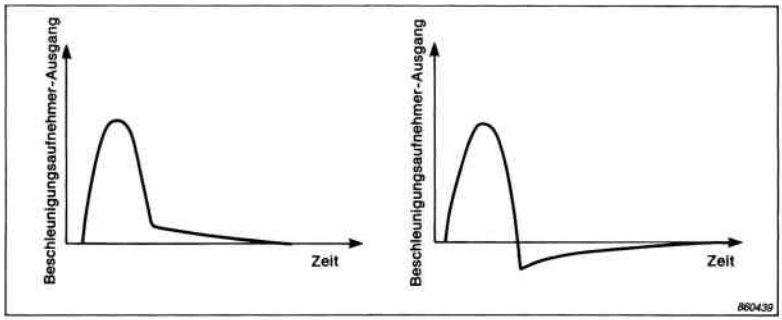


Abb. 2.19. Ausgang der Beschleunigungsaufnehmer/Vorverstärker-Kombination als Reaktion auf einen Halbsinusimpuls von solcher Maximalbeschleunigung, daß „Nullpunktverschiebung" hervorgerufen wurde

Nullpunktverschiebung kann oft durch Einsatz mechanischer Filter vermieden werden.

MAN BEACHTE: Nullpunktverschiebung, „Ladungsverlust" und „Nachklingen" werden nur zum Problem, wenn der Beschleunigungsaufnehmer außerhalb seiner spezifizierten Betriebsbereiche verwendet wird.

3. VORVERSTÄRKER FÜR BESCHLEUNIGUNGS-AUFNEHMER

Der Vorverstärker hinter dem Beschleunigungsaufnehmer hat die wichtige Aufgabe, das hochohmige Ausgangssignal des Aufnehmers in ein niederohmiges Signal zum direkten Anschluß an Meß- und Analysesysteme umzusetzen.

Zusätzlich kann der Vorverstärker auch noch eine oder mehrere der folgenden Aufgaben übernehmen:

1. Anpassung des Signals an die Empfindlichkeit der Meßgeräte.

2. Signalverstärkung zur Erzielung der gewünschten Empfindlichkeit der Gesamtmeßkette.

3. Integration des Aufnehmersignals zu Schwinggeschwindigkeit und Schwingweg.

4. Übersteuerungsanzeige sowohl am Eingang wie am Ausgang des Vorverstärkers.

5. Hoch- und Tiefpaßfilterung zum Ausblenden unerwünschter Komponenten.

Abb. 3.1 zeigt das komplette Angebot an Vorverstärkern aus dem Hause Brüel & Kjær. Sie sind in folgenden Bauformen verfügbar:

Abb. 3.1. Das Angebot an Schwingungs-Vorverstärkern aus dem Hause Brüel & Kjær

1. Einzelgeräte, die die meisten der oben aufgeführten Aufgaben übernehmen können. Versorgt werden sie teils vom Netz, teils von Batterien. Eine Zusammenstellung dieser Geräte findet man in Anhang E.

2. Als Teil des Eingangskreises von Meßgeräten wie Schwingungsmesser oder als Einschub für Meßmagnetbandgeräte etc. Eine Zusammenstellung findet man in Anhang F.

3. Ladungs-Strom-Wandler, die sich ganz wesentlich von den unter 1 und 2 genannten Bauformen unterscheiden. Hier handelt es sich um Miniaturausführungen, die nur den Eingangsteil eines konventionellen Vorverstärkers enthalten und entweder in den Aufnehmer eingebaut, auf ihn direkt darauf oder unmittelbar daneben montiert werden. Ein einfaches zweiadriges oder ein Koaxialkabel übernimmt sowohl die Signalübertragung wie auch die Speisung. Ladungs-Strom-Wandler arbeiten mit fester Verstärkung und besitzen keinerlei Bedienungselemente.

3.1. AUSFÜHRUNG UND ARBEITSWEISE VON VORVERSTÄRKERN

Grundsätzlich gibt es zwei Arten von Vorverstärkern, die zum Betrieb zusammen mit piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern geeignet sind:

1. Ladungs-Vorverstärker: Sie liefern eine Ausgangsspannung proportional der elektrischen Ladung am Eingang. Aber sie verstärken keine Ladung!
2. Spannungs-Vorverstärker: Sie liefern eine der Eingangsspannung proportionale Ausgangsspannung.

Ladungsverstärker werden generell gegenüber Spannungsverstärkern bevorzugt. Dies zeigt sich auch im aktuellen Angebot von Brüel & Kjær, in dem lediglich Typ 2650 sowohl einen Spannungs- wie auch einen Ladungseingang aufweist. Allerdings ist dieser Vorverstärker eher zur Aufnehmerkalibrierung als für allgemeine Meßaufgaben ausgelegt. Der wesentliche Vorteil eines Ladungsverstärkers ist die Möglichkeit, daß sowohl kurze wie auch sehr lange Aufnehmerkabel verwendet werden können, ohne daß sich die Empfindlichkeit des Meßsystems dadurch ändert. Beim Spannungsvorverstärker hingegen wird durch eine Veränderung der Kabellänge ein Nachkalibrieren des Systems notwendig. Eine Diskussion dieser Frage brachte bereits Abschnitt 2.6.1.

3.2. LADUNGSVERSTÄRKER

Der Ladungsverstärker hat einen Operationsverstärker als Eingangsstufe. Die Beschaltung des Operationsverstärkers mit einem Kondensator in der Gegenkopplung wirkt als Integrationsnetzwerk, integriert wird der Eingangsstrom. Dieser Eingangsstrom fließt zufolge der im Beschleunigungsaufnehmer

an den hochohmigen piezoelektrischen Elementen ausgebildeten Ladung. Der Operationsverstärker versucht diesen Strom zu kompensieren und erzeugt dadurch eine Ausgangsspannung proportional dieser Ladung.

3.2.1. Ladungs-Übertragungsfaktor

Die Ausgangsspannung eines Ladungsverstärkers ist proportional der Ladung an seinem Eingang und damit auch der Beschleunigung des Aufnehmers. Die Verstärkung wird über den Kondensator in der Gegenkopplung des Operationsverstärkers eingestellt.

Abb. 3.2 zeigt das Ersatzschaltbild des Ladungsverstärkers mit angeschlossenem piezoelektrischem Beschleunigungsaufnehmer. Die Bezeichnungen beziehen sich im folgenden auf dieses Bild.

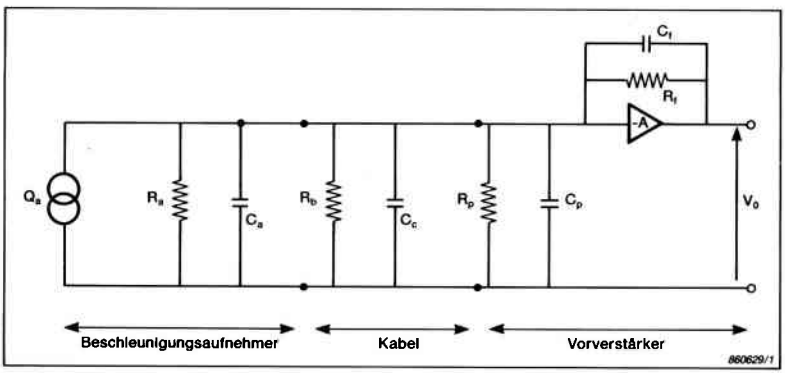


Abb. 3.2. Ersatzschaltbild für einen Ladungs-Vorverstärker mit über ein Kabel angeschlossenem Beschleunigungsaufnehmer

Q_a	=	in den piezoelektrischen Elementen gebildete Ladung (proportional zur Beschleunigung)
C_a	=	Kapazität des Beschleunigungsaufnehmers
R_a	=	Innenwiderstand des Beschleunigungsaufnehmers
C_c	=	Kapazität von Kabel und Steckern
R_b	=	Widerstand zwischen Schirm und Mittelleiter des Kabels
C_p	=	Kapazität des Vorverstärkereinganges
R_p	=	Eingangswiderstand des Vorverstärkers
C_f	=	Gegenkopplungskapazität
R_f	=	Gegenkopplungswiderstand
A	=	Spannungsverstärkung des Operationsverstärkers
V_o	=	Ausgangsspannung des Vorverstärkers

Normalerweise können Innenwiderstand des Beschleunigungsaufnehmers, Eingangswiderstand des Vorverstärkers und Gegenkopplungswiderstand sehr groß gehalten werden. Demnach kann das Ersatzschaltbild von Abb. 3.2 zu der in Abb. 3.3 gezeigten, einfacheren Variante reduziert werden, in der die Gesamtkapazitäten sowie die fließenden Ströme eingezeichnet sind:

C_t = $C_a + C_c + C_p$
I = Gesamtstrom aus dem Beschleunigungsaufnehmer
I_i = Strom aus C_t
I_c = Strom in der Gegenkopplung des Operationsverstärkers
V_c = Spannung an der Gegenkopplungskapazität

Eingangsspannung V_i und Ausgangsspannung V_o hängen über folgende Beziehung zusammen:

$$V_o = -A\,V_i$$

Des weiteren kann V_c leicht berechnet werden, da gilt

$$V_c = V_o - V_i = V_o - \frac{V_o}{-A} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) V_o$$

Beim idealen Operationsverstärker fließt kein Eingangsstrom. Wendet man die Kirchhoff'sche Regel auf die in Abb. 3.3 eingetragenen Ströme an, ergibt sich

$$I + I_i + I_c = 0$$

Diese Ströme können durch andere Parameter des Schaltkreises ausgedrückt werden. I hängt dabei unmittelbar mit der in den piezoelektrischen Elementen produzierten Ladung zusammen.

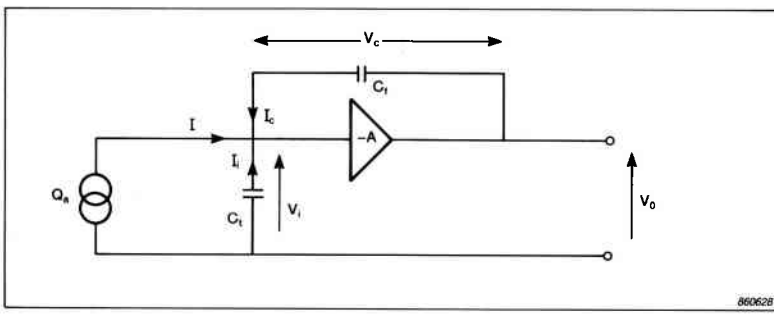


Abb. 3.3. Vereinfachtes Ersatzschaltbild für einen Ladungs-Vorverstärker mit angeschlossenem Beschleunigungsaufnehmer

$$I = \frac{dQ_a}{dt}$$

$$I_c = C_f \frac{dV_c}{dt} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) C_f \frac{dV_o}{dt}$$

$$I_i = -C_t \frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{A} C_t \frac{dV_o}{dt}$$

Setzt man diese Beziehungen in die Kirchhoff'sche Gleichung ein, erhält man

$$\frac{dQ_a}{dt} = -\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_f \frac{dV_o}{dt} - \frac{1}{A} C_t \frac{dV_o}{dt}$$

Die Gleichung läßt sich jetzt durch Integration lösen. Die Integrationskonstante — sie entspricht einem Gleichspannungsversatz zu Anfang am Verstärkerausgang — wird Null gesetzt, da ein solcher Versatz im realen Verstärker sehr schnell abklingen würde. Als Lösung der Gleichung erhält man demnach

$$V_o = -\frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_f + \frac{1}{A} C_t} \qquad (1)$$

Für große Spannungsverstärkung A ($\approx 10^5$) reduziert sich die Lösung zu dem einfachen Ausdruck

$$V_o = -\frac{Q_a}{C_f} \qquad (2)$$

Man sieht daraus, daß die Ausgangsspannung proportional ist der Ladung am Eingang und damit der Beschleunigung des Beschleunigungsaufnehmers. Die Verstärkung des Vorverstärkers wird durch die Gegenkopplungskapazität bestimmt.

Die Eingangskapazität hat keinen Einfluß auf die Ausgangsspannung, da im Idealfall ($A \rightarrow \infty$) die Eingangsspannung stets zu Null wird

$$V_i = -\frac{V_o}{A} = 0$$

Demnach hat also der endliche Eingangswiderstand keinen Einfluß auf die Ausgangsspannung. Das bedeutet, daß am Eingangspunkt des Operationsverstärkers nur die Ströme aus Beschleunigungsaufnehmer und Gegenkopplung fließen, die beide gleich groß aber von entgegengesetztem Vorzeichen sind. Letztenendes fließt also die gesamte Ladung aus dem Beschleunigungsaufnehmer in den Gegenkopplungskondensator.

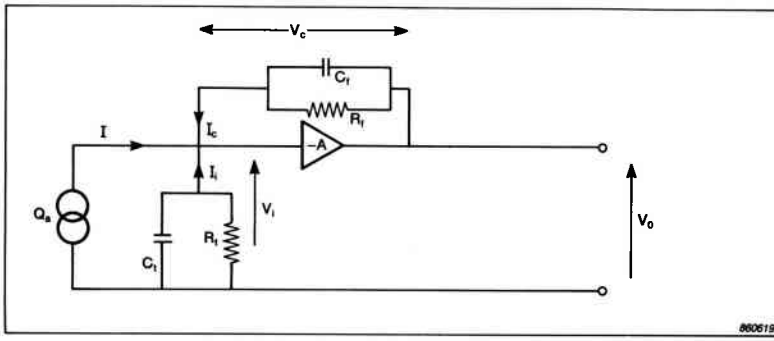


Abb. 3.4. Ersatzschaltbild für einen Ladungs-Vorverstärker mit angeschlossenem Beschleunigungsaufnehmer

Soweit das einfache Modell. Aber wie sieht es in der Realität aus, wenn man die Einflüsse von R_a, R_b und R_p in Betracht zieht? Das entsprechende Modell ist in Abb. 3.4 zu sehen, in dem jetzt resultierender Widerstand R_t und Kapazität C_t am Eingang eingetragen sind. Das Ersatzschaltbild enthält jetzt sämtliche Elemente von Abb. 3.2. Die entsprechenden Gleichungen haben nun folgendes Aussehen:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_p}$$

$$V_o = -AV_i$$

$$V_c = \left(1 + \frac{1}{A}\right) V_o$$

$$I_c = C_f \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_c}{R_f}$$

$$= \left(1 + \frac{1}{A}\right)\left[C_f \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_f}\right]$$

$$I_i = -C_t \frac{dV_i}{dt} - \frac{V_i}{R_t} = \frac{1}{A}\left[C_t \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_t}\right]$$

$$\frac{dQ_a}{dt} = -\left(1 + \frac{1}{A}\right)\left[C_f \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_f}\right] - \frac{1}{A}\left[C_t \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_t}\right]$$

Diese Gleichung läßt sich jetzt nicht mehr durch einfache Integration lösen wie im vorigen Modell. Setzt man jedoch voraus, daß Spannungen und Ströme harmonisch mit der Zeit verlaufen, erhält man eine Lösung durch entsprechenden Ansatz. Wiederum kann man die Gleichspannungsanteile in der Anfangsbedingung vernachlässigen, da sie in der Realität stets rasch abklingen werden. Die Lösung hat dann folgendes Aussehen:

$$j\omega Q_a = -\left(1 + \frac{1}{A}\right)\left[j\omega V_o C_f + \frac{V_o}{R_f}\right] - \frac{1}{A}\left[j\omega V_o C_t + \frac{V_o}{R_t}\right]$$

Durch Umformen erhält man daraus für die Ausgangsspannung V_o

$$V_o = -\frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right)\left(C_f + \frac{1}{j\omega R_f}\right) + \frac{1}{A}\left(C_t + \frac{1}{j\omega R_t}\right)} \quad (3)$$

Nimmt man wiederum an, daß A und R_f sehr groß sind, ergibt sich der gleiche Zusammenhang wie zuvor

$$V_o = -\frac{Q_a}{C_f} \quad (4)$$

Der Einfluß eines endlichen Widerstandes R_f wird durch folgenden Ausdruck wiedergegeben:

$$V_o = -\frac{Q_a}{C_f\left(1 + \frac{1}{j\omega R_f C_f}\right)} \quad (5)$$

Das heißt also, da Q_a proportional ist der Beschleunigung des Aufnehmers, läßt sich der Gesamtübertragungsfaktor der Kombination aus Beschleunigungsaufnehmer und Vorverstärker durch Variieren von C_f bestimmen. Zusätzlich zeigt die letzte Gleichung, daß das Verhalten im Tieffrequenzbereich durch die Zeitkonstante der Gegenkopplung bestimmt wird.

3.2.2. Untere Grenzfrequenz

Die untere Grenzfrequenz eines Ladungsverstärkers wird bestimmt durch die Zeitkonstante in der Gegenkopplung des Operationsverstärkers und ist unabhängig von der Belastung des Vorverstärkereinganges. Variiert wird die untere Grenzfrequenz durch Verändern des Widerstandes in der Gegenkopplung.

Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer arbeiten nach einem aktiven Prinzip und sind daher zur naturgetreuen Wiedergabe statischer Meßgrößen ungeeignet. Aus physikalischen Grundsatzüberlegungen ist es nämlich offensichtlich, daß aus einem System ohne jeden Leistungseingang niemals Leistung entnommen werden kann. Eine auf die piezoelektrischen Elemente wirkende statische Kraft kann also auch keinerlei Eingangsleistung erzeugen.

Um das Verhalten eines Ladungsverstärkers (aber auch eines Spannungsverstärkers) im tieffrequenten Bereich zu verstehen, muß man sich zunächst über die Wirkungsweise eines einfachen RC-Gliedes im klaren sein.

Ein Kondensator ist ein Speicher für elektrische Ladung. Seine Kapazität ist definiert als die Ladungsmenge, die bei Anliegen der Einheitsspannung am Kondensator gespeichert wird. Die folgenden Gleichungen zeigen den Zusammenhang zwischen Spannung V, Strom I, Ladung Q und Kapazität C für den idealen Kondensator, in unserem Fall das piezoelektrische Element:

$$V = \frac{Q}{C}$$

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

$$I = C\,\frac{dV}{dt}$$

Wird ein idealer Kondensator bis auf eine bestimmte Spannung V_o aufgeladen, bleibt diese Spannung an seinen Elektroden weiter erhalten, weil der

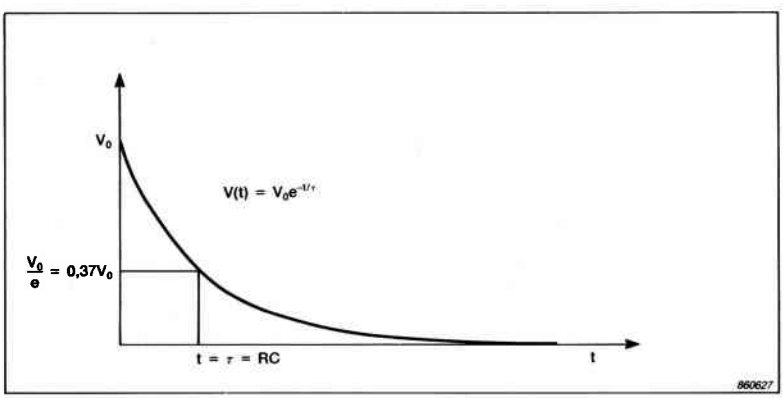


Abb. 3.5. Der exponentielle Spannungsabfall am Kondensator mit der Bedeutung der „Zeitkonstanten" τ

ideale Kondensator Gleichstrom völlig sperrt (sein Leckwiderstand ist unendlich groß). Im realen Kondensator ist der Leckwiderstand jedoch stets von endlicher Größe. Die gespeicherte Ladung wird also abfließen, die Spannung fällt exponentiell mit einer durch die Zeitkonstante τ des Systems bestimmten Geschwindigkeit ab. In Abb. 3.5 ist dieses Verhalten graphisch dargestellt.

Für rein sinusförmige Meßsignale hat die Zeitkonstante τ eine unmittelbare quantitative Bedeutung. Sie bestimmt das Systemverhalten im niederfrequenten Bereich. In Abb. 3.6 ist das Ersatzschaltbild einer mit einem RC-Glied belasteten Ladungsquelle — des piezoelektrischen Elementes — dargestellt. Die resultierenden Kapazitäten und Widerstände sind darin jeweils bereits als Einzelkomponente zusammengefaßt.

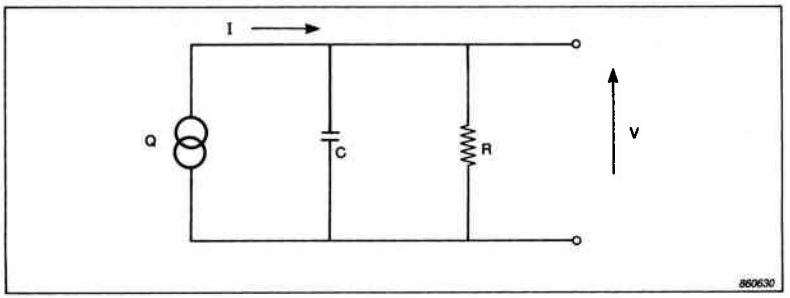


Abb. 3.6. Ersatzschaltbild eines durch Kapazität und Widerstand von Kabel und Vorverstärker belasteten Beschleunigungsaufnehmers. Dieses Modell kann der Untersuchung des Niederfrequenzverhaltens von Vorverstärkern zugrunde gelegt werden.

Mit obigen Definitionen lassen sich die Funktionsgleichungen hier schnell anschreiben:

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{V}{R} + C\frac{dV}{dt}$$

Wie schon früher werden Strom und Spannung als harmonische Funktionen angesetzt. Man erhält als Lösung

$$V = \frac{Q}{\left(1 + \frac{1}{j\omega RC}\right) C} = \frac{Q}{\left(1 + \frac{1}{j\omega\tau}\right) C}$$

$$= \frac{Q\left(1 + j\frac{1}{\omega\tau}\right)}{\left(1 + \frac{1}{\omega^2\tau^2}\right)C}$$

Zur Vereinfachung der analytischen Untersuchung wurden Gleichanteile und Anfangsbedingungen zu Null gesetzt. Aus dem komplexen Ausdruck lassen sich Betrag $|V|$ und Phasenwinkel ϕ der Ausgangsspannung relativ zum Eingang ausrechnen:

$$\tan\phi = \frac{1}{\omega\tau}$$

$$|V| = \frac{Q\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau}\right)^2}}{\left(1 + \left(\frac{1}{\omega\tau}\right)^2\right)C}$$

Für $\omega\tau = 1$ erhält man $\tan\phi = 1$, $\phi = 45°$ und $V = \frac{Q}{\sqrt{2}\,C}$

Phasen- und Amplitudenbeziehung zwischen Eingang und Ausgangsspannung als Funktion von $\omega\tau$ sind in Abb. 3.7 zu sehen. Die Frequenz für $\omega\tau = 1$ ($2\pi fRC = 1$) beträgt

$$f_l = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

Diese Frequenz wird normalerweise als untere Grenzfrequenz bezeichnet. Charakterisiert wird sie durch einen Abfall von 3 dB im Ausgangssignalpegel bei einer Phasendrehung von 45°.

Zurück zum Ladungs-Vorverstärker sieht man aus Gleichung (3) von Abschnitt 3.2.1, daß die untere Grenzfrequenz durch die Zeitkonstante im Gegenkopplungszweig bestimmt wird, also $\tau_f = R_f C_f$. Die Phasendifferenz zwischen Eingang und Ausgang beträgt normalerweise –180° (Phasenumkehr), bei der unteren Grenzfrequenz tritt eine weitere Verzögerung um 45° auf. Aus Gleichung (3) sieht man weiter, daß eine ohm'sche Last am Eingang die untere Grenzfrequenz nicht beeinflußt, solange sie nicht vergleichbar mit R_f / A wird.

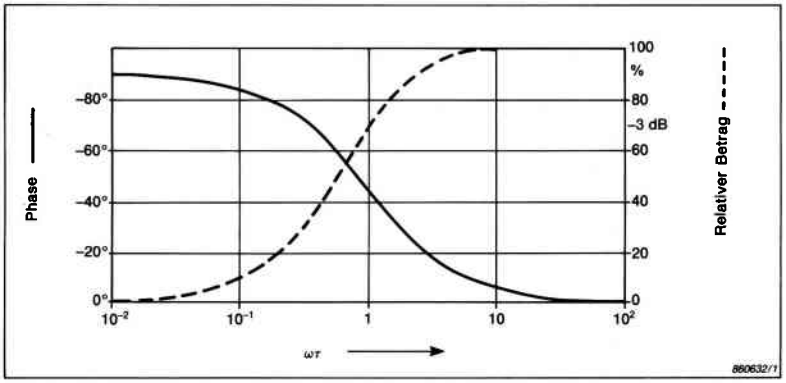


Abb. 3.7. Phasen- und Amplitudenbeziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung als Funktion von $\omega\tau$

Das bedeutet, vorausgesetzt C_f und C_t sind von gleicher Größenordnung, daß der Einfluß der ohm'schen Komponente um den Faktor A gegenüber dem einfachen RC-Glied reduziert ist.

Beispiel: Wie groß muß R_t für eine untere Grenzfrequenz von 1 Hz sein?

Mit A ungefähr 10^5 und C_f = 1 nF erhält man

$$R_t = \frac{1}{2\pi C_f}$$

$$R_t = \frac{1}{2\pi \; 1 \; 10^5 \; 10^{-9}} = 1{,}6\,\text{k}\Omega$$

Dieses Beispiel zeigt deutlich, wie unempfindlich die untere Grenzfrequenz eines Ladungsverstärkers gegenüber der Last am Eingang ist. In der Praxis wäre es wohl sehr schwer, den kombinierten Widerstand von Beschleunigungsaufnehmer, Verbindungskabel und Verstärkereingang auf den oben berechneten Wert herabzudrücken. Nicht einmal vollständiges Eintauchen des Aufnehmers in Wasser würde dazu ausreichen.

Das Ladungsverstärkerprogramm von Brüel & Kjær bietet Grenzfrequenzen bis herab zu Bruchteilen von Hertz. Dieses Tieffrequenzverhalten ist notwendig zur Messung langdauernder Impulse und von quasistatischen Schwingungen. Solche Messungen sind allerdings nur mit Delta Shear®-Beschleunigungsaufnehmern möglich, da andere Aufnehmertypen durch Umgebungseinflüsse tieffrequente Störsignale erzeugen, die das Schwingungssignal in diesem Bereich überdecken.

3.2.3. Kapazitive Eingangslast durch Aufnehmerkabel

Die Empfindlichkeit eines Ladungsverstärkers wird durch Veränderung der Kapazität zufolge wechselnder Länge des Aufnehmerkabels nicht wesentlich beeinflußt. Lediglich bei sehr großen Kabellängen tritt eine geringfügige Abschwächung im hochfrequenten Bereich auf.

Wie schon gezeigt wurde, wird das Ausgangssignal eines Ladungsverstärkers nur durch die Gegenkopplungskapazität C_f und die im piezoelektrischen Element erzeugte Ladung Q_a beeinflußt. In einem typischen Ladungsverstärker liegt der Wert von C_f normalerweise zwischen 100 pF und 10 nF. Üblich ist ein Wert von 1 nF, was einen Übertragungsfaktor von 1 mV/pC ergibt. Dies gilt, solange nicht C_t vergleichbar wird mit AC_f. Ein kurzes Beispiel soll die Unempfindlichkeit des Ladungsverstärkers gegen wechselnde Kabelkapazitäten beleuchten.

Beispiel: Welche Kabellänge ist maximal zulässig, wenn sich der Ladungs-Übertragungsfaktor der Kombination Beschleunigungsaufnehmer — Ladungsverstärker nicht mehr als 1% ändern darf?

Für C_f und C_a gleich 1 nF und A gleich 10^5 erhält man aus Gleichung (1) von Abschnitt 3.2.1

$$V_o = -\frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_f + \frac{1}{A} C_t}$$

$$C_t = 0{,}01\ (A+1)\ C_f = 0{,}01\ (10^5+1)\ 1\,\text{nF} = 10^3\,\text{nF} = 1\,\mu\text{F}$$

Diese Kapazität entspricht einer Kabellänge von 10 000 m bei einer Kabelkapazität von 100 pF/m.

Eine hohe kapazitive Last am Vorverstärkereingang kann geringfügigen Einfluß auf dessen Hochfrequenzverhalten haben. Dies folgt aus der Eigenschaft eines jeden Operationsverstärkers, daß seine Verstärkung für hohe Frequenzen abnimmt. Demnach ist also die Annahme, daß A unendlich groß ist, die bei der Herleitung des Ladungs-Übertragungsfaktors getroffen wurde, nicht ganz korrekt. Aus der früher abgeleiteten Gleichung für die Ausgangsspannung geht die Abschwächung im hochfrequenten Bereich hervor:

$$V_o = -\frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right)\left(C_f + \frac{1}{j\omega R_f}\right) + \frac{1}{A}\left(C_t + \frac{1}{j\omega R_t}\right)}$$

Beispiel: Vorausgesetzt, die Verstärkung *A* reduziert sich bei hohen Frequenzen auf 10^3 und die Gegenkopplungskapazität betrage 1 nF. Die kapazitive Eingangslast sei 20 nF entsprechend einer Aufnehmerkabellänge von 200 m mit einer Kapazität von 100 pF/m. Diese Last bewirkt ein Absinken der Empfindlichkeit um 5% — der Effekt ist also normalerweise ohne jede Bedeutung.

Abb. 3.8 zeigt quantitativ, wie ein Ansteigen der Eingangskapazität durch sehr lange Aufnehmerkabel den Frequenzgang eines Brüel & Kjær-Ladungs-Vorverstärkers beeinflußt. Für spezielle Fälle ziehe man das zugehörige Bedienungshandbuch zu Rate.

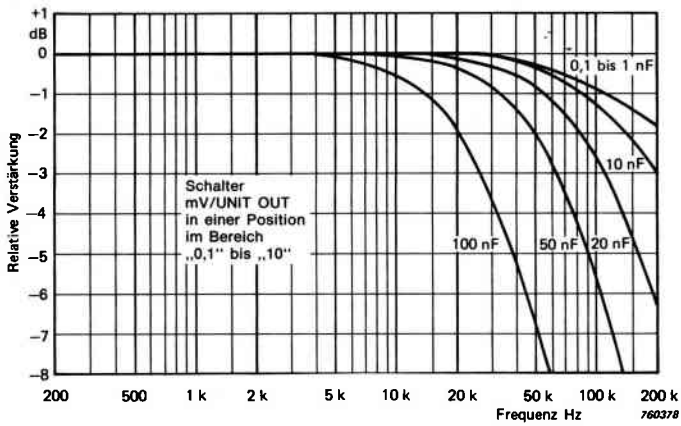


Abb. 3.8. Einfluß der kapazitiven Eingangslast auf das Hochfrequenzverhalten eines Brüel & Kjær-Ladungsverstärkers

3.2.4. Ladungsabschwächung

Eine zusätzliche Parallelkapazität hat nur vernachlässigbar kleinen Einfluß auf den Übertragungsfaktor — eine zusätzliche Kapazität in Serie reduziert jedoch die effektive Ausgangsladung des Aufnehmers. Manchmal ist dieser Effekt wünschenswert, wenn nämlich hohe Schwingungspegel mit hochempfindlichen Aufnehmern gemessen werden sollen. Zu hohe Ladung übersteuert den Eingang des Vorverstärkers. Durch sorgfältig kalibrierte Kapazitäten in Serie und parallel zum Aufnehmer läßt sich die Ladung am Eingang definiert abschwächen, wie in Abb. 3.9 gezeigt.

Als Alternative liefert Brüel & Kjær fertige Ladungsabschwächer. Sie bewirken 20 dB bzw. 12 dB Abschwächung und sind erhältlich unter den Bestellnummern WB 0726* bzw. WB 0778*.

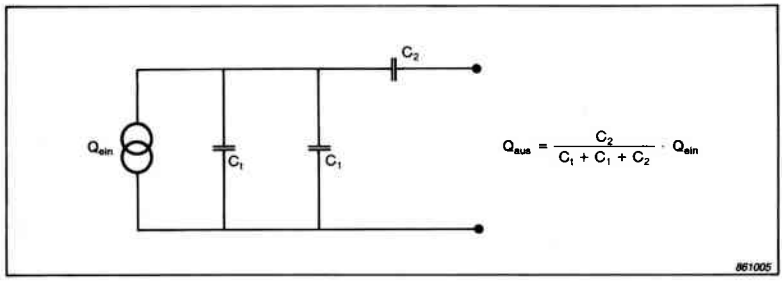


Abb. 3.9. Konzept eines Ladungsabschwächers

3.2.5. Rauschen im Ladungsverstärker

Lange Aufnehmerkabel und niedrige Verstärkungseinstellung erhöhen das Rauschen im Ladungsverstärker, das Signal/Rausch-Verhältnis für die Messung wird dadurch schlechter.

Ein starkes Absinken der ohm'schen Last am Eingang zieht ebenfalls erhöhtes Rauschen nach sich.

Abb. 3.10 zeigt ein Modell der internen Rauschquellen eines Operationsverstärkers. Dieses Modell enthält keine Einflüsse externer Störquellen wie triboelektrische Effekte, Erdschleifeninduktion oder elektromagnetische Einstreuung in den Kabeln. Diese werden in Abschnitt 3.6 untersucht.

Z_t = Ersatzimpedanz für Aufnehmer und Kabel
Z_f = Ersatzimpedanz des Gegenkopplungszweiges
e_n = Rauschspannung
i_n = Rauschstrom
V_o = Ausgangsspannung

Im Falle des hochohmigen Beschleunigungsaufnehmers und bei überwiegend kapazitiver Gegenkopplung ist das Stromrauschen vernachlässigbar. Wie in

* Diese Teile sind keine Standardgeräte sondern Produkte der Systemingenieurgruppe von Brüel & Kjær. Kontaktieren sie ihren zuständigen Repräsentanten.

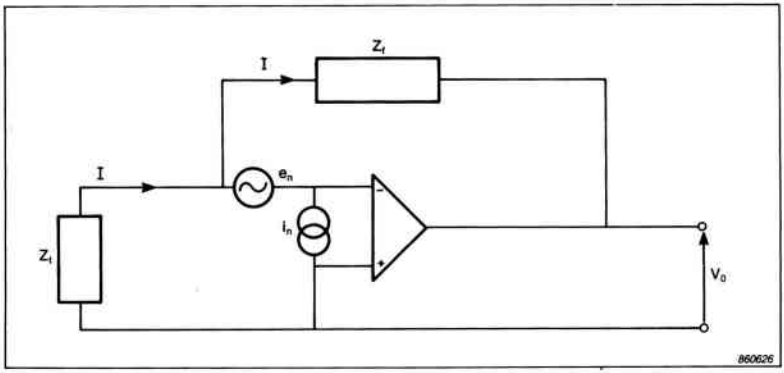


Abb. 3.10. Ersatzschaltbild eines Ladungs-Vorverstärkers mit angeschlossenem Beschleunigungsaufnehmer. Sämtliche Störquellen innerhalb des Vorverstärkers sind durch eine Spannungsquelle und eine Stromquelle am Eingang ersetzt.

Abschnitt 3.2.1 gezeigt wurde, liegt der invertierende Eingang des Operationsverstärkers virtuell auf Masse, es fließt daher auch kein Eingangsstrom. Es gilt also

$$I = \frac{-e_n}{Z_t} = \frac{e_n - V_o}{Z_f}$$

$$V_o = e_n \left(1 + \frac{Z_f}{Z_t}\right)$$

Zur Konvertierung in einen Ausdruck bezogen auf das Quellsignal ist noch durch den Verstärkungsfaktor Z_f / Z_t zu dividieren

$$e_s = -V_o \frac{Z_t}{Z_f}$$
$$= -e_n \left(1 + \frac{Z_t}{Z_f}\right)$$

Im mittelfrequenten Bereich sind die Impedanzen sowohl der Quelle wie auch des Ausganges vorwiegend kapazitiv, es gilt also

$$\frac{Z_t}{Z_f} = \frac{C_f}{C_t}$$

mit

$$C_t = C_e + C_c + C_p$$

$$e_s = -e_n \left(1 + \frac{C_f}{C_t} \right)$$

Durch Multiplikation mit C_t erhält man daraus weiter das äquivalente Ladungsrauschen q_t an der Quellkapazität C_t

$$q_t = e_s \cdot C_t = -e_n (C_t + C_f)$$

Man sieht aus diesem Resultat, daß das Ladungsrauschen mit C_t und C_f steigt, obwohl sich Übertragungsfaktor und untere Grenzfrequenz durch kapazitative oder ohm'sche Eingangslast nicht wesentlich ändern. Ein gewisses Absinken des Signal/Rausch-Verhältnisses ist daher beim Gebrauch sehr langer Aufnehmerkabel unvermeidlich. Abb. 3.11 zeigt die Abhängigkeit des

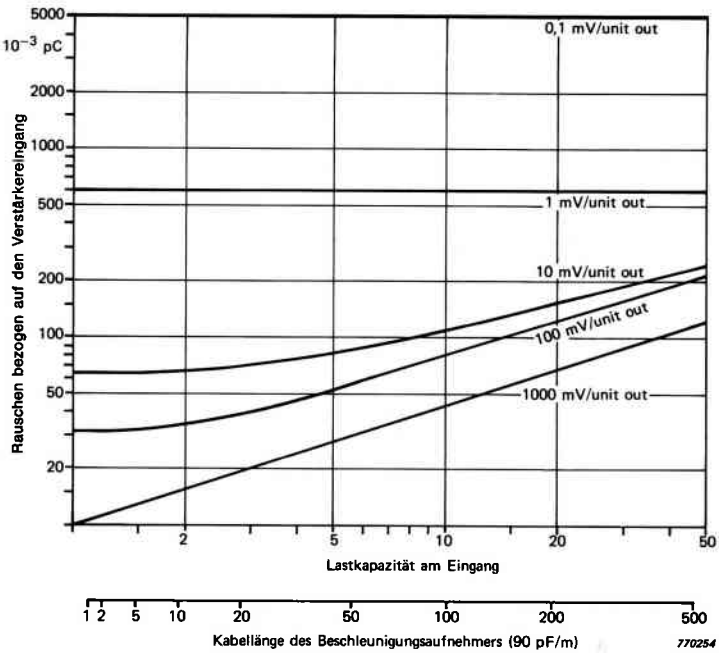


Abb. 3.11. Breitbandrauschen (2 Hz bis 100 kHz) eines Brüel & Kjær-Ladungsverstärkers als Funktion der Eingangs-Quellkapazität

Rauschpegels am Eingang von der Eingangskapazität für einen bestimmten Ladungsverstärker von Brüel & Kjær. Die Abhängigkeit für andere Ladungsverstärker zeigt ein ähnliches Bild.

Da C_f die Verstärkung des Vorverstärkers bestimmt, wird bei niedriger Verstärkungseinstellung ein höheres Rauschen auftreten, da dann eine größere Gegenkopplungskapazität erforderlich ist. Der Einsatz eines unempfindlicheren Aufnehmers bei gleichzeitig höherer Verstärkung am Vorverstärker wird das Signal/Rausch-Verhältnis verbessern.

Man beachte, daß das Aufnehmerkabel selbst dazu neigt, Rauschen zu erzeugen, wenn es mechanischen Schwingungen ausgesetzt ist. Im allgemeinen sollte man stets die rauscharmen Kabel von Brüel & Kjær einsetzen. Besonders trifft dies für die Messung mechanischer Schwingungen von niedrigem Pegel zu. Die Kabel sollten überdies sorgfältig fixiert werden. Abschnitt 4.6 bringt diesbezüglich nähere Hinweise.

Im niederfrequenten Bereich (<100 Hz) steigt das Rauschen des Verstärkers normalerweise umgekehrt proportional mit der Frequenz an, eine Eigenschaft des Operationsverstärkers. Durch ein Hochpaßfilter läßt sich dieses tieffrequente Rauschen reduzieren. Abb. 3.12 zeigt die Terzanalyse des von einem Brüel & Kjær-Ladungsverstärker erzeugten Rauschens.

Sinkt die ohm'sche Last am Eingang unterhalb 10 MΩ, beginnt das Rauschen des Vorverstärkers anzusteigen, vorwiegend im tieffrequenten Bereich. Eine Analyse dieses Rauschens erfordert allerdings eine detaillierte Kenntnis der

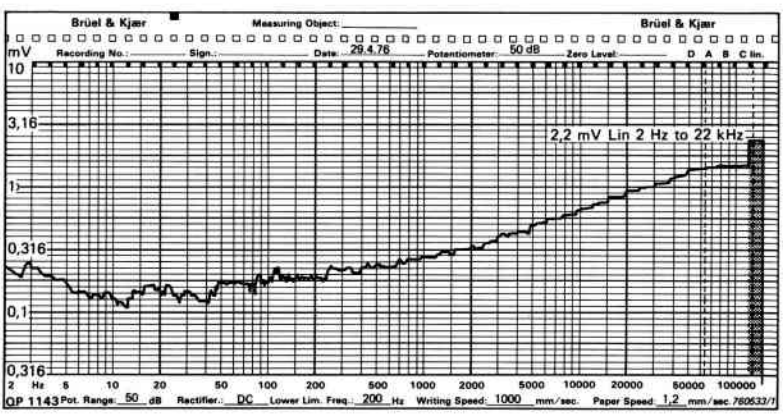


Abb. 3.12. Terzanalyse des von einem Brüel & Kjær-Ladungsverstärkers produzierten Rauschens

Eingangskomponenten mitsamt ihrer Ankopplung. Abb. 3.13 zeigt — experimentell ermittelt — den Zusammenhang zwischen Schmalbandrauschen eines Vorverstärkers und Eingangswiderstand. Das Rauschen ist dort in Volt bezogen auf die Wurzel aus der Filterbandbreite skaliert.

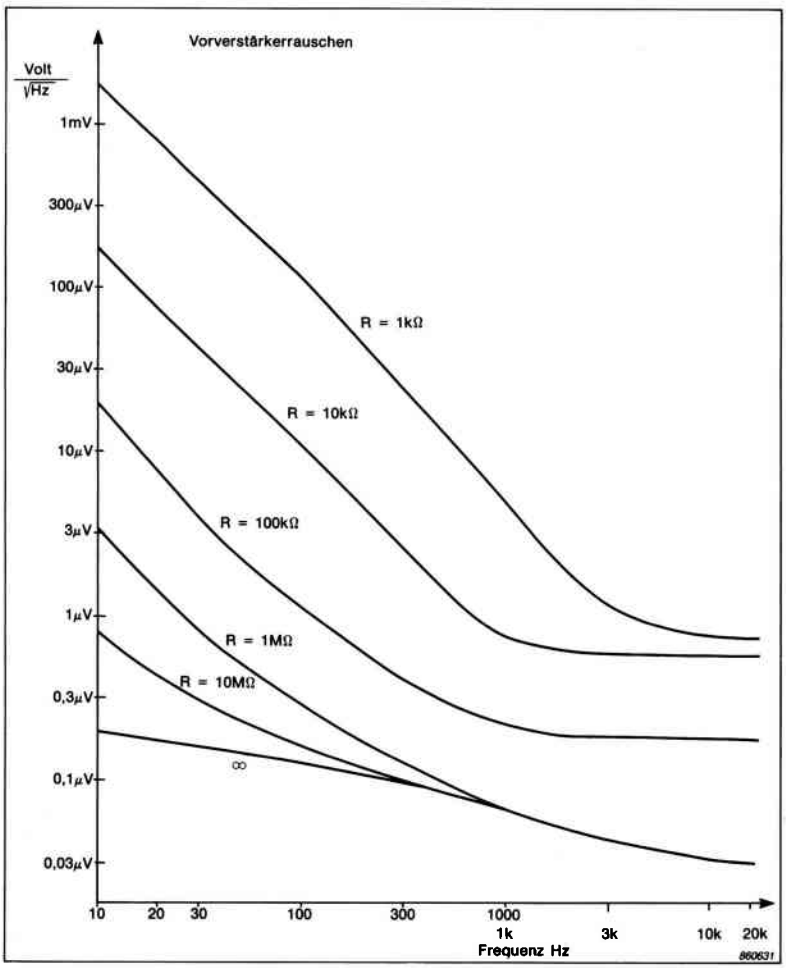


Abb. 3.13. Zusammenhang zwischen Eingangswiderstand und Rauschen für einen Ladungsverstärker

3.3. SPANNUNGSVORVERSTÄRKER

Die Ausgangsspannung eines Spannungsvorverstärkers ist proportional der Eingangsspannung, der Beschleunigungsaufnehmer wird als Spannungsquelle behandelt. Änderungen der Kabelkapazität verändern den Gesamtübertragungsfaktor der Meßkette. Änderungen des Eingangswiderstandes können das tieffrequente Verhalten beeinflussen.

Ein Spannungs-Vorverstärker ist empfindlich gegenüber der durch die Schwingung über der Aufnehmerkapazität induzierten Wechselspannung und liefert eine dieser Spannung proportionale Ausgangsspannung. Spannungs-Vorverstärker sind gegenüber Ladungs-Vorverstärkern einfacher im Aufbau, zeigen in der Anwendung jedoch deutliche Nachteile. Da Brüel & Kjær lediglich einen einzigen Vorverstärker mit zusätzlichem Spannungseingang anbietet, werden die Ausführungen über diesen Verstärkertyp hier entsprechend reduziert, ein grober Überblick soll genügen.

3.3.1. Spannungs-Übertragungsfaktor

Abb. 3.14 zeigt das Ersatzschaltbild für einen Spannungs-Vorverstärker mit angeschlossenem Beschleunigungsaufnehmer. Es ist identisch mit dem aus Abb. 3.2 mit Ausnahme der Beschaltung des Operationsverstärkers. Dieser ist jetzt als Spannungsfolger mit der Verstärkung 1 geschaltet ($V_o = V_i$). Die sehr hohe Eingangsimpedanz wird durch C_p und R_p repräsentiert. Die Bezeichnungen sind gleich denen in Abb. 3.2 und Abb. 3.3.

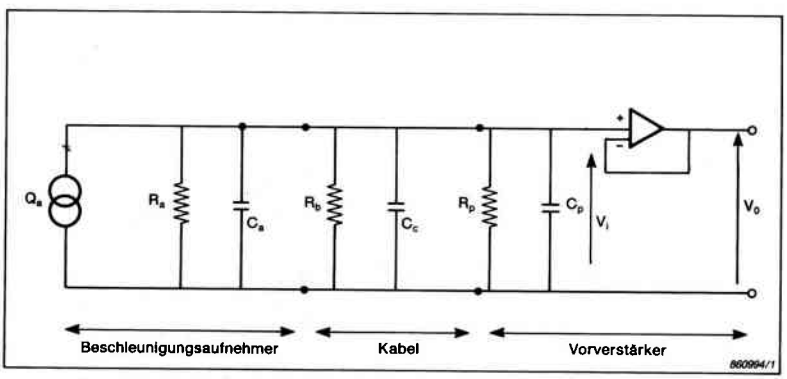


Abb. 3.14. Ersatzschaltbild für einen Spannungsverstärker mit einem piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer als Spannungsquelle

In Abb. 2.8 wurde bereits gezeigt, daß ein nicht durch Kabel und Vorverstärker belasteter Beschleunigungsaufnehmer eine Ausgangsspannung V_a erzeugt entsprechend

$$V_a = \frac{Q_a}{C_a}$$

Der sehr große Parallelwiderstand R_a ist wegen seiner Größe vernachlässigbar. Nach den Überlegungen von Abschnitt 3.2.2 läßt sich die Eingangsspannung am Operationsverstärker direkt anschreiben

$$V_i = \frac{Q_a}{C_a + C_c + C_p}$$

und weiter

$$V_o = V_i = V_a \frac{C_a}{C_a + C_c + C_p}$$

Der Ausdruck läßt sich auch mit dem Ladungs-Übertragungfaktor S_{qa} [pC/ms^{-2}] und dem Spannungs-Übertragungsfaktor S_{va} [mV/ms^{-2}] formulieren

$$S_{va} = \frac{S_{qa}}{C_a + C_c + C_p}$$

$$= S_{va(offen)} \frac{C_a}{C_a + C_c + C_p}$$

$S_{va(offen)}$ bedeutet darin den Spannungs-Übertragungsfaktor des offenen (unbelasteten) Beschleunigungsaufnehmers.

Da der Ladungs-Übertragungsfaktor S_{qa} und C_a Parameter des Beschleunigungsaufnehmers sind, hängt demnach S_{va} von der Kabelkapazität ab. Wie man leicht einsieht, ist diese Abhängigkeit unerwünscht, da dadurch ein Beschleunigungsaufnehmer nur zusammen mit dem Anschlußkabel, mit dem er bei der Herstellung kalibriert worden war, verwendet werden kann, sofern auf den dokumentierten Übertragungsfaktor in Zusammenhang mit einem Spannungs-Vorverstärker zurückgegriffen werden soll. Wird das Kabel gewechselt, wird eine Neukalibrierung erforderlich. Ein kurzes Beispiel soll dies illustrieren.

Beispiel: Angenommen, für eine Schwingungsmessung ist ein längeres und stärkeres Aufnehmerkabel erforderlich. Das dem Aufnehmer zugehörige Kabel sei ein 1,2 m langes Brüel & Kjær-Standardkabel AO 0038, eingesetzt soll ein verstärktes 3 m-Kabel vom Typ AO 0122 werden. Der neue Spannungs-Übertragungsfaktor für diese Kombination berechnet sich wie folgt:

Typische Kapazität von Kabel AO 0038 = 110 pF
Kapazität des Aufnehmers (einschließlich Kabel) = 1117 pF
Ladungs-Übertragungsfaktor = 9,8 pC/ms^{-2}
Spannungs-Übertragungsfaktor = 8,76 mV/ms^{-2}

Die Kapazität C_a des piezoelektrischen Elementes allein läßt sich daraus leicht ableiten

$$C_a = 1007\,\text{pF}$$

Die Kapazität C_c eines Kabels vom Typ AO 0122 beträgt typischerweise 260 pF. Der neue Spannungs-Übertragungsfaktor läßt sich jetzt unschwer berechnen.

$$S_v = \frac{9{,}8 \cdot 10^{-12}}{(1007 \cdot 10^{-12}) + (260 \cdot 10^{-12})}$$

$$= 7{,}73\,\text{mV/ms}^{-2}$$

Nur durch den Wechsel der Aufnehmerkabels hat sich der Spannungs-Übertragungsfaktor also um 11% reduziert.

Diese Abhängigkeit des Übertragungsfaktors von der Eingangskapazität ist nicht nur außerordentlich unpraktisch, wenn verschiedene Aufnehmerkabel eingesetzt werden sollen. Sie bedeutet auch eine Verschlechterung des Signal/Rausch-Verhältnisses mit längeren Kabeln. Bei Einsatz extrem langer Kabel liegt nur ein geringer Bruchteil der offenen Aufnehmerspannung am Verstärkereingang an.

3.3.2. Untere Grenzfrequenz

Die Ableitung des Niederfrequenzverhaltens von Abschnitt 3.2.2 kann auch hier verwendet werden, um zu zeigen, daß die untere Grenzfrequenz (–3 dB-Punkt) gegeben ist durch

$$f_l = \frac{1}{2\pi R_t C_t}$$

mit

$$C_t = C_a + C_c + C_p$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_p}$$

Um sicherzustellen, daß die untere Grenzfrequenz niedrig genug ist, um Messungen bis herab zu 1 Hz oder tiefer zu ermöglichen, muß das RC-Produkt sehr groß sein. Theoretisch läßt sich dies auf zwei Wegen erreichen:

1. Man macht die Gesamtkapazität so groß wie möglich. Da C_a eine Aufnehmerkonstante ist, muß dazu C_c durch Verwendung eines längeren Kabels vergrößert werden. Eine nicht gerade praktische Lösung, da damit der Spannungs-Übertragungsfaktor herabgesetzt wird, was einen Verlust im Dynamikbereich nach sich zieht.

2. Konstruktion eines Vorverstärkers mit hochohmigem Eingang — der Weg, der üblicherweise eingeschlagen wird. Wird jedoch der Eingangswiderstand aus irgendwelchen Gründen herabgesetzt, steigt die untere Grenzfrequenz als Folge an. Dies kann z.B. durch Eindringen von Feuchtigkeit in den Ausgangsstecker des Aufnehmers geschehen. Der Leckwiderstand wird verringert, der Parallelwiderstand am Eingang setzt den Gesamt-Eingangswiderstand herab.

3.3.3. Rauschen im Spannungs-Vorverstärker

Anders als das vom Ladungs-Vorverstärker produzierte Rauschen ist es beim Spannungs-Vorverstärker unabhängig von der Eingangskapazität — Verstärkungseinstellung und Kabellänge haben also hier keinen Einfluß auf das Eingangsrauschen. Einen wirklichen Vorteil stellt dies allerdings nicht dar, da das Signal/Rausch-Verhältnis mit dem mit steigender Kabellänge sinkenden Übertragungsfaktor schlechter wird.

3.4. AUSGANGSKABEL AM VORVERSTÄRKER

In beiden Fällen, Ladungs- und Spannungs-Vorverstärker, ist es wichtig, daß der Ausgang ausreichend Strom für den Eingang eines Meßgerätes zur Verfügung stellt. Die Spannung, die diesen Strom erzeugt, wird am Ausgang des Operationsverstärkers abgegriffen und über der Kabelimpedanz aufgebaut.

Liegt am Ausgang des Vorverstärkers eine hohe kapazitive Last, kann eine Begrenzung des maximalen Ausgangsspannungsbereiches auftreten. Probleme wird dies nur bereiten, wenn sehr lange Kabel bei hochfrequenten Signalen erforderlich sind. Bei 10 kHz etwa wird eine solche Begrenzung erst auftreten, wenn für den als Beispiel herangezogenen Vorverstärker die Last 20 nF übersteigt (entsprechend 200 m Kabel von 100 pF/m).

In manchen Fällen ist diese Begrenzung direkt durch die maximale Ausgangsleistung des Vorverstärkers gegeben. Bei einem maximalen Ausgangsstrom von 8 mA (typisch) und einer Last von 20 nF entsprechend einer Impedanz von

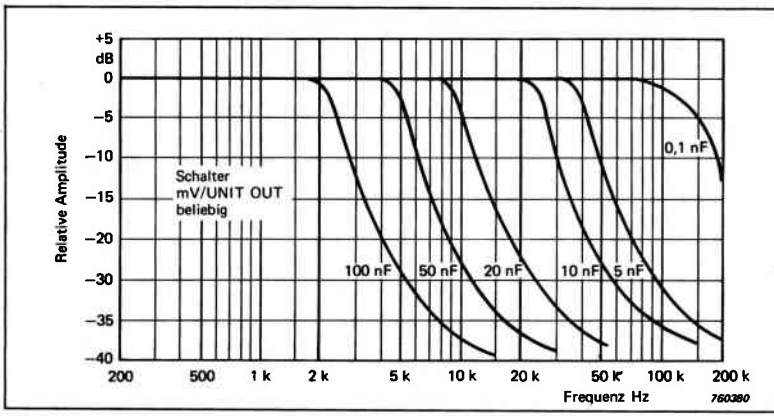


Abb. 3.15. Typischer Einfluß der kapazitiven Ausgangslast auf das Hochfrequenzverhalten eines Brüel & Kjær-Ladungs-Vorverstärkers

etwa 796 Ω bei 10 kHz ergibt sich eine maximal Ausgangsspannung von 6,37 V. Würde die Kombination aus Schwingungspegel, Aufnehmer- und Vorverstärker-Übertragungsfaktor eine höhere Ausgangsspannung ergeben, tritt eine Abschwächung auf. Abb. 3.15 zeigt den Einfluß der Kapazität des Ausgangskabels auf das Hochfrequenzverhalten eines Brüel & Kjær-Ladungsverstärkers.

3.5. LADUNGS-STROM-WANDLER

Ein Ladungs-Strom-Wandler ist im wesentlichen die Eingangsstufe eines Ladungs- oder Spannungsverstärkers, die direkt in einen Beschleunigungsaufnehmer eingebaut werden kann. Abb. 3.16 zeigt das Angebot von Beschleunigungsaufnehmern mit eingebautem Ladungs-Strom-Wandler aus dem Hause Brüel & Kjær. Ein getrennter Ladungs-Strom-Wandler läßt sich außerdem entweder direkt auf einem konventionellen Beschleunigungsaufnehmer aufsetzen oder in seiner unmittelbaren Nähe montieren. Diese getrennte Montage von Typ 2644 hat den Vorteil, daß gegenüber Aufnehmern mit eingebautem oder aufgesetztem Ladungs-Strom-Wandler höhere Schwingungspegel bei außerdem höheren Temperaturen gemessen werden können. Der Ladungs-Strom-Wandler Typ 2644 von Brüel & Kjær ist in Abb. 3.17 zu sehen.

Die Versorgung eines Ladungs-Strom-Wandlers muß von einer externen Stromquelle aus erfolgen. Für die Ladungs-Strom-Wandler von Brüel & Kjær ist der Strom-Spannungs-Wandler Typ 2813 vorgesehen, ein batteriegespeistes Gerät mit der Möglichkeit, bis zu zwei Ladungs-Strom-Wandler gleichzeitig zu versorgen. Typ 2813 ist in Abb. 3.18 zu sehen. Sein Spannungsausgang wird

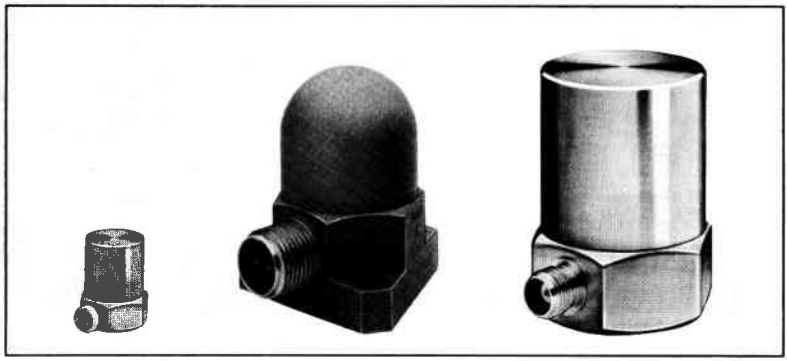


Abb. 3.16. Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmer mit Ladungs-Strom-Wandler (von links nach rechts) Typ 4390, 8317 und 8318. Die Bilder sind im Maßstab 1:1, 1:1 und 1:2 (in gleicher Reihenfolge)

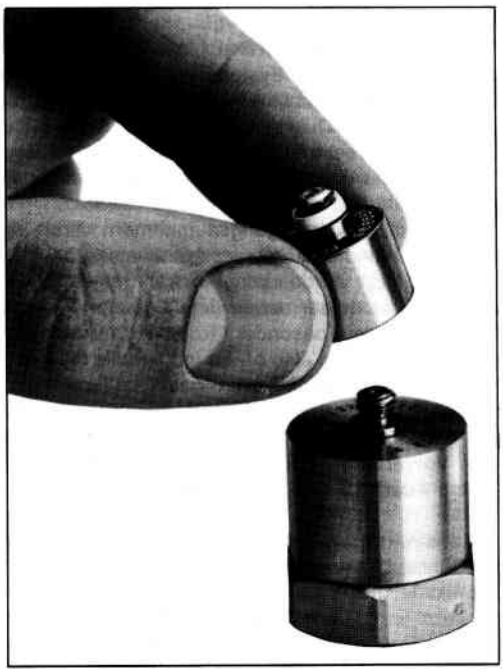


Abb. 3.17. Montage des Ladungs-Strom-Wandlers Typ 2644 am Beschleunigungsaufnehmer

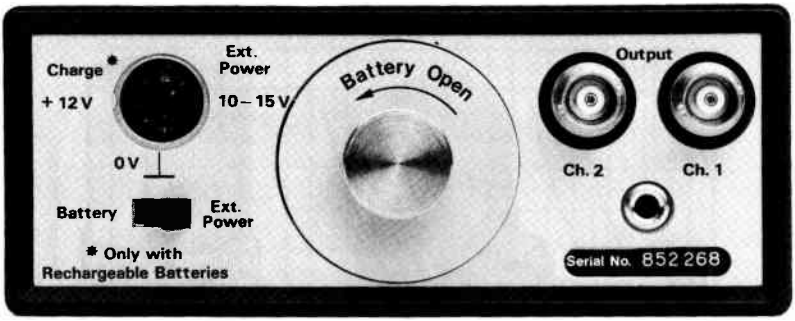


Abb. 3.18. Zweikanal-Strom-Spannungs-Wandler Typ 2813

direkt mit dem Eingang der nachfolgenden Meß- oder Analysiergeräte verbunden. Ein ähnlicher Strom-Spannungs-Wandler ist in einigen Schwingungs- und Signalanalysatoren von Brüel & Kjær bereits eingebaut.

Die Praxis, den Vorverstärker in den Beschleunigungsaufnehmer einzubauen, ist keinesfalls neu. Das erste dieser Systeme wurde entwickelt mit dem Ziel, die Eigenschaften von Aufnehmern mit sehr niedriger Kapazität und niedriger Empfindlichkeit zu verbessern, die Quarz als piezoelektrisches Material verwendeten. Solche Aufnehmer sind sehr empfindlich gegenüber Kabelrauschen (triboelektrisches Rauschen) und elektromagnetischen Einstreuungen.

Obwohl bei modernen Beschleunigungsaufnehmern durch Verwendung piezoelektrischer Keramiken und rauscharmer Aufnehmerkabel die beschriebenen Probleme weitgehend gelöst werden konnten, kann es nach wie vor vorteilhaft sein, eingebaute oder unmittelbar neben dem Aufnehmer montierte Ladungs-Strom-Wandler zu verwenden, besonders in einer „verrauschten" Umgebung. Ladungs-Strom-Wandler werden also oft für industrielle Messungen herangezogen. Sie bieten hier noch den Vorteil, die Signale niederohmig über sehr lange und kostengünstige Kabel übertragen zu können. Die Empfindlichkeit eines solchen Systems gegenüber Erdschleifen und Kabelrauschen ist geringer als bei jeder anderen Vorverstärkerkonfiguration. Abschnitt 3.6 bringt zu diesem Thema noch nähere Ausführungen.

Verschiedene Konstruktionen von Ladungs-Strom-Wandlern waren unbefriedigend hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit zufolge Unzulänglichkeiten der eingebauten Elektronik. Mit Hilfe der Dickfilmtechnik, die hier bei Brüel & Kjær erfolgreich eingesetzt wird, ist es möglich geworden, qualitativ hochwertige Vorverstärker von hoher Leistungsfähigkeit in Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmern einzubauen.

Der Einbau von Elektronik in einen Beschleunigungsaufnehmer zieht allerdings Einschränkungen hinsichtlich Temperatur- und Dynamikbereich des Aufnehmers nach sich. Gleiches trifft für direkt auf dem Beschleunigungsaufnehmer montierte Ladungs-Strom-Wandler zu. Bei Messungen an leichten Strukturen ist überdies gegebenenfalls die zusätzliche Masse dieses Vorverstärkers in Betracht zu ziehen.

Für die Konstruktion von Ladungs-Strom-Wandlern sind verschiedene Varianten bekannt. Nahezu sämtliche Systeme verwenden heute ein Zweileiter-System, bei dem sowohl die Versorgung wie auch die Übertragung des Meßsignals über ein und dasselbe zweipolige Anschlußkabel erfolgen. Die Versorgung kann dabei über eine Konstantspannungs- oder über eine Konstantstromquelle erfolgen. Beide Systeme sind untereinander *nicht* austauschbar. Die Ladungs-Strom-Wandler von Brüel & Kjær arbeiten mit Konstantspannungsversorgung, das Schwingungssignal wird durch Modulation des Speisestromes übertragen. Wie noch gezeigt werden wird, ist dieses System dem mit Konstantstromversorgung hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit überlegen.

3.5.1. Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmer mit eingebautem Ladungs-Strom-Wandler und Strom-Spannungs-Wandler

Der Übertragungsfaktor eines Beschleunigungsaufnehmers mit eingebautem Ladungs-Strom-Wandler wird ausgedrückt als Strom-Übertragungsfaktor ($\mu A/ms^{-2}$) bezogen auf den Ausgang des Ladungs-Strom-Wandlers. Den Gesamtübertragungsfaktor erhält man daraus einfach durch Multiplikation mit dem Übertragungsfaktor des Strom-Spannungs-Wandlers ($mV/\mu A$) in mV/ms^{-2}

Wird zum Beispiel ein Beschleunigungsaufnehmer mit eingebautem Ladungs-Strom-Wandler und einem Übertragungsfaktor von $3{,}16\,\mu A/ms^{-2}$ an einen Strom-Spannungs-Wandler Typ 2813 angeschlossen, erhält man einen Gesamtübertragungsfaktor von $3{,}16\,mV/ms^{-2}$.

3.5.2. Brüel & Kjær Ladungs-Strom-Wandler und Strom-Spannungs-Wandler

Der Ladungs-Übertragungsfaktor des Beschleunigungsaufnehmers (pC/ms^{-2}) wird zunächst über den Übertragungsfaktor von Typ 2644 ($\mu A/pC$) in einen Strom-Übertragungsfaktor ($\mu A/ms^{-2}$) bezogen auf dessen Ausgang umgesetzt. Die Fortsetzung erfolgt, genau wie im vorhergehenden Abschnitt, durch Multiplikation mit dem Übertragungsfaktor des Strom-Spannungs-Wandlers — man erhält wiederum mV/ms^{-2}.

Wird zum Beispiel ein Beschleunigungsaufnehmer mit einem Übertragungsfaktor von 3,16 pC/ms^{-2} zusammen mit Typ 2644 und Typ 2813 betrieben, erhält man den gleichen Gesamtübertragungsfaktor wie im vorigen Beispiel, nämlich 3,16 mV/ms^{-2}.

3.6. VERGLEICH DER EMPFINDLICHKEIT VERSCHIEDENER VORVERSTÄRKERSYSTEME GEGENÜBER EXTERNEN STÖRQUELLEN

Besonders bei Vielkanal-Meßsystemen, wo Erdschleifen und lange Kabel oft ein Problem darstellen, ist es wichtig, die Empfindlichkeit der verschiedenen Systeme gegenüber äußeren Störeinflüssen vergleichsweise zu kennen, damit das optimale System für ein bestimmtes Umfeld ausgewählt werden kann.

Folgende Systeme kommen in diesem Abschnitt zum Vergleich:

1. Normal geerdete (also nicht erdfreie) Beschleunigungsaufnehmer mit Ladungs-Vorverstärker.

2. Geerdete Beschleunigungsaufnehmer, angeschlossen an einen Ladungs-Vorverstärker mit erdfreiem Eingang.

3. Brüel & Kjær Ladungs-Strom-Wandler mit Konstantspannungsquelle und Strommodulation.

4. Brüel & Kjær Ladungs-Strom-Wandler mit Konstantspannungsquelle, Strommodulation und erdfreiem Eingang.

5. Ladungs-Spannungs-Wandlersysteme mit Konstantstromversorgung (nicht lieferbar von Brüel & Kjær).

6. Symmetrische Beschleunigungsaufnehmer in Verbindung mit einem Ladungs-Vorverstärker mit Differenzeingang.

Darüber hinaus werden die Vorteile einer isolierten Aufnehmermontage (z.B. mit Glimmerscheibe) sowie eines Beschleunigungsaufnehmers mit elektrisch isolierter Basis diskutiert.

In der folgenden Untersuchung wird als Störungsquelle am Eingang die Kombination zweier Effekte angenommen:

1. **Der triboelektrische Effekt**: Jedes Koaxialkabel erzeugt selbst elektrische Ladung, sobald es mechanisch bewegt wird. Der vergleichenden Untersuchung wird in allen Fällen ein durch diesen Effekt im Kabel hervorgerufenes Ladungssignal q_n von 100 pC zugrundegelegt. Der triboelektrische Effekt kann in der Untersuchung als ideale Ladungsquelle betrachtet werden.

Dieses Phänomen wird vor allem bedeutend, wenn das Kabel nicht auf der schwingenden Oberfläche fixiert wird sowie bei Verwendung nicht rauscharmer Kabel.

Anmerkung: Eine durch den triboelektrischen Effekt erzeugte Ladung von 100 pC stellt einen Extremfall dar und wird hier lediglich für Vergleichszwekke angenommen.

2. **Erdschleifen**: Besonders bei großen Maschinen besteht häufig die Möglichkeit, daß das Maschinengehäuse nicht auf Erdpotential liegt. Demzufolge liegen dann auch das Gehäuse des Beschleunigungsaufnehmers und der Schirm des Kabels nicht auf Erdpotential — entlang des Kabels tritt ein Spannungsabfall auf. Für Vergleichszwecke wird bei allen betrachteten Systemen diese Spannung e_n mit 1 V angenommen.

Zusätzlich zu diesen beiden Effekten kann auch noch elektromagnetische Einstreuung einen Beitrag zum Störsignal liefern. Die Kombination von Leistungsschaltkreisen mit hochohmigen, kleine Signale führenden Systemen — ein typischer Fall ungünstiger Auslegung — kann hierfür Ursache sein. Ein anderer Fall sind über lange Distanzen neben Signalleitungen verlaufende Netzversorgungsleitungen. Das resultierende Störsignal kann entweder kapazitiv oder induktiv gekoppelt sein. Hochspannungssysteme mit geringer Kapazität gegenüber Erde erzeugen ein direktes Eingangssignal. Bei den üblichen Netzfrequenzen sind Ladungs-Strom-Wandler gegenüber dieser Art elektromagnetischer Einstreuung weniger empfindlich als Ladungsverstärker.

Induktive Kopplung tritt oft dann auf, wenn Aufnehmerkabel benachbart zu hohe Wechselströme führenden Leitungen verlegt werden. Dabei steigt die Kopplung mit der Frequenz. Impulsspitzen im Strom, ausgehend von schnellen Schaltkreisen, und andere hochfrequente Ströme sind häufig Ursache elektromagnetischer Einstreuung. Durch magnetische Abschirmung kann dieser Effekt auf ein Minimum herabgedrückt werden. Kabel mit verdrillten Aderpaaren sind gegenüber Einstreuung weniger empfindlich, da der Gesamtfluß nahe bei Null liegt. In der Praxis bieten hier Koaxialkabel meist ausreichenden Schutz.

Gegenüber Störungen durch Erdschleifen haben elektromagnetische Einstreuungen im allgemeinen untergeordnete Bedeutung, die Kopplungsparameter sind hier auch nur schwer zu erfassen. Im folgenden werden daher nur Erdschleifen und triboelektrische Effekte betrachtet.

In allen Fällen wird das Störsignal auf den Eingang des Endgerätes in der Kette bezogen und in den entsprechenden Einheiten angegeben (z. B. eine äquivalente Ladung für einen Ladungs-Vorverstärker, ein äquivalenter Strom für einen Strom-Spannungs-Wandler mit Konstantspannungsspeisung oder eine äquivalente Spannung für eine Konstantstromversorgung mit Spannungsmodulation). Durch Multplikation mit dem Übertragungsfaktor des Endgerätes kann aus diesen Werten die gesamte Störempfindlichkeit berechnet werden.

Zur Erleichterung des Vergleiches werden die Ergebnisse der Untersuchung zunächst in Tabellenform präsentiert. Die Störempfindlichkeit ist dabei in Dezibel bezogen auf die einer Kombination eines nicht isolierten Beschleunigungsaufnehmers, angeschlossen an einen gewöhnlichen Ladungs-Vorverstärker, angegeben. Ein negatives Vorzeichen bedeutet demnach eine geringere Störempfindlichkeit bzw. eine bessere Immunität gegenüber äußeren Störungen. Siehe Tabelle 3.1.

Beschreibung von Beschleunigungsaufnehmer + Vorverstärker	Relative Empfindlichkeit gegen externe Störungen (dB)		Relative Empfindlichkeit gegen externe Störungen mit zusätzlich isolierter Aufnehmerbasis (dB)	
	Erdschleifenstörungen	Triboelektrische Störungen	Erdschleifenstörungen	Triboelektrische Störungen
Normaler Beschleunigungsaufnehmer Ladungsverstärker mit geerdetem Eingang	0 (Ref. 1000 pC/V)	0 (Ref. 100 pC)	−130	0
Normaler Beschleunigungsaufnehmer Ladungsverstärker mit erdfreiem Eingang	−70	0	−80	0
Brüel & Kjær Beschleunigungsaufnehmer mit eingebautem Ladungs-Strom-Wandler Brüel & Kjær Strom-SpannungsWandler	−26	−80	−154	−80
Brüel & Kjær Beschleunigungsaufnehmer mit eingebautem Ladungs-Strom-Wandler Brüel & Kjær Strom-SpannungsWandler mit erdfreiem Eingang	−70	−80	−134	−80
Leitungstreiber-Beschleunigungsaufnehmer Konstantstromversorgung (nicht von Brüel & Kjær)	0	−80	−130	−80
Symmetrischer Beschleunigungsaufnehmer Ladungsverstärker mit Differenzeingang	−60	0	−60	0

T01158D0

Tabelle 3.1. Vergleich externer Störgrößeneinflüsse für verschiedene Beschleunigungsaufnehmer/Vorverstärker-Kombinationen

In der Tabelle sind zwei Referenzwerte angegeben, einer für die Empfindlichkeit gegenüber Erdschleifeninduktion, der andere für die Empfindlichkeit gegenüber triboelektrischen Störungen. Vergleiche werden nur zwischen gleichartigen Störquellen gezogen.

3.6.1. Geerdeter Beschleunigungsaufnehmer und Ladungs-Vorverstärker

Abb 3.19 zeigt das Ersatzschaltbild für diese Anordnung, Ladungs- und Spannungsstörquellen sind darin eingetragen. Über die Grundbeziehung zwischen Ladung, Spannung und Kapazität, das Ohm'sche Gesetz und mit den Voraussetzungen über die Störpegel aus dem vorigen Abschnitt ist es relativ einfach, die äquivalente Störladung am Eingang des Vorverstärkers anzugeben. Die Störquellen werden als voneinander unabhängig angenommen.

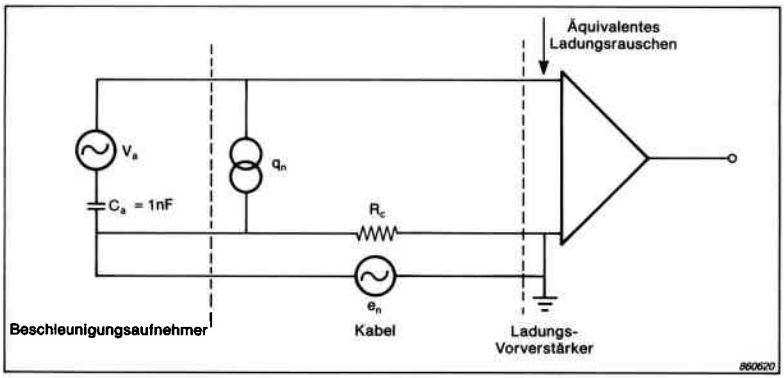


Abb. 3.19. Vereinfachtes Ersatzschaltbild für einen einseitig geerdeten Beschleunigungsaufnehmer angeschlossen an einen einseitig geerdeten Ladungsverstärker

Erdschleifen
Die Störladung ergibt sich einfach als Produkt von Störspannung und Kapazität des Beschleunigungsaufnehmers (C_a = 1 nF) mit 1000 pC/V.

Triboelektrischer Effekt
Diese Störgröße wurde zum Vergleich mit anderen Systemen hier mit 100 pC definiert.

Die Störung durch Erdschleifen überwiegt hier den triboelektrischen Effekt ganz wesentlich.

3.6.2. Geerdeter Beschleunigungsaufnehmer mit Ladungsverstärker (erdfreier Eingang)

Der Ladungsverstärker Typ 2651 besitzt einen sogenannten erdfreien Eingang, umschaltbar auf einen einseitig geerdeten Eingang. Ein solcher einseitig geerdeter Eingang ist bei allen Ladungs-Vorverstärkern von Brüel & Kjær vorhanden. Die Untersuchung wird für den erdfreien Eingang ein wenig komplizierter, da ein zweiter Operationsverstärker im Eingangskreis des Vorverstärkers liegt. Das Ersatzschaltbild dieser Anordnung ist in Abb. 3.20 zu sehen.

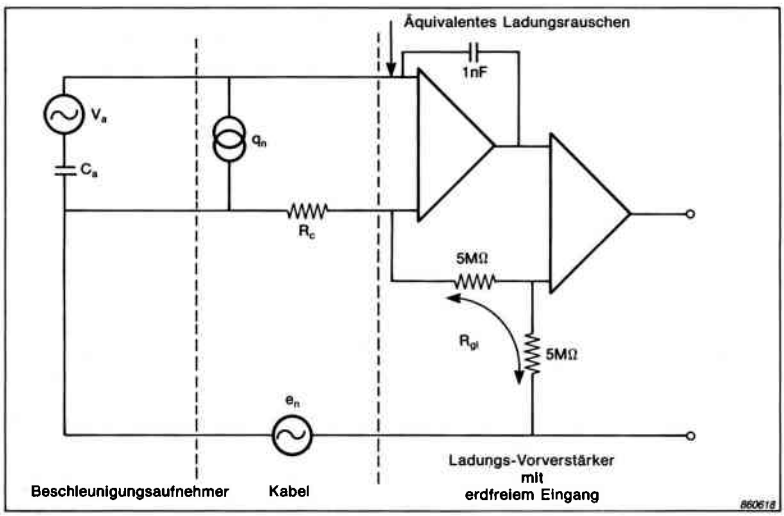


Abb. 3.20. Vereinfachtes Ersatzschaltbild für einen einseitig geerdeten Beschleunigungsaufnehmer, angeschlossen an einen Ladungsverstärker mit erdfreiem Eingang

Erdschleifen

Zur Berechnung der Erdschleifenstörungen benötigt man die Gleichtaktunterdrückung (Common Mode Rejection Ratio, CMRR) des zusätzlichen Operationsverstärkers, im konkreten Fall etwa 70 dB (entsprechend einem Faktor von $0{,}3\,10^{-3}$). Die Störspannung des Kabels wird geteilt entsprechend dem Verhältnis von Längswiderstand R_c des Kabels und dem resultierenden, hohen Widerstand R_{gl} gegen Masse vor dem zweiten Verstärker. An R_{gl} fällt also nahezu die gesamte Störspannung ab. Als typischer Wert für R_c kann 0,05 Ω/m angesetzt werden. Die äquivalente Ladung bezogen auf den Ausgang des erdfreien Verstärkers erhält man nach Division durch 1 mV/pC, den Übertragungsfaktor des Ladungsverstärkers.

Die äquivalente Störladung am Eingang beträgt nun

$$C_a \frac{R_c}{R_{gl} + R_c} \cdot e_n + \frac{CMRR}{1\,mv/pC} \cdot \frac{R_{gl}}{R_{gl} + R_c} e_n$$

Setzt man die entsprechenden Werte in diesen Ausdruck ein und nimmt man eine Kabellänge von 200 m an, erhält man eine Erdschleifen-Störempfindlichkeit von 0,301 pC/V.

Triboelektrischer Effekt

Triboelektrische Störungen werden durch den zweiten Operationsverstärker nicht beeinflußt, es bleibt bei 100 pC am Eingang.

Man sieht also, daß ein erdfreier Eingang Erdschleifenprobleme praktisch beseitigt. Das gravierende Problem stellen hier die triboelektrischen Störungen dar.

3.6.3. Brüel & Kjær Ladungs-Strom-Wandler mit Strom-Spannungs-Wandler (geerdeter Eingang)

Abb. 3.21 zeigt das Ersatzschaltbild eines Beschleunigungsaufnehmers mit Ladungs-Strom-Wandler, angeschlossen an einen Strom-Spannungs-Wandler

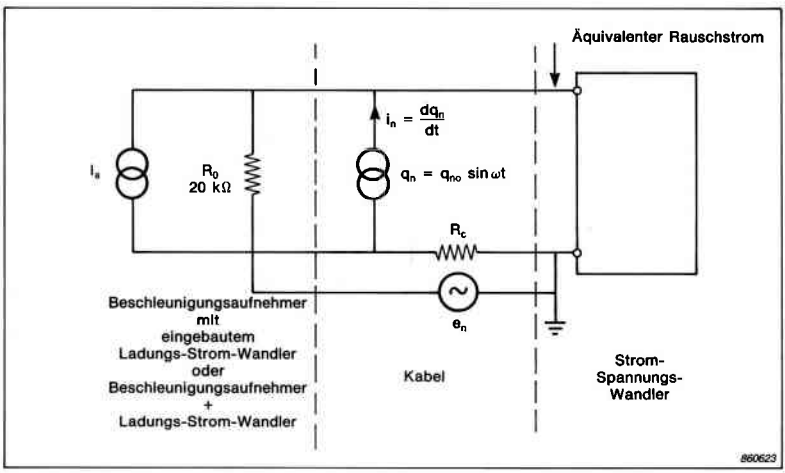


Abb. 3.21. Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines geerdeten Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmers mit Ladungs-Strom-Wandler, angeschlossen an einen Strom-Spannungs-Wandler von Brüel & Kjær

wie Typ 2813 oder einen Brüel & Kjær-Analysator. Auszudrücken ist jetzt der äquivalente Störstrom am Eingang des Strom-Spannungs-Wandlers. Der Übertragungsfaktor des Ladungs-Strom-Wandlers liegt mit 1 μA/pC fest, für seine Ausgangsimpedanz wird 20 kΩ eingesetzt.

Erdschleifen

$$Q = \frac{e_n}{R_0\ 10^{-6}\ [A/pC]}$$

Die Division durch $[A/pC]$ liefert aus dem äquivalenten Störstrom die äquivalente Störladung am Eingang des Ladungs-Strom-Wandlers. Man erhält eine äquivalente Störempfindlichkeit von 50 pC/V.

Triboelektrischer Effekt

Der Strom i zufolge des triboelektrischen Effekts kann als zeitlich harmonisch veränderliche Größe angesetzt werden, verursacht durch niederfrequente harmonische Bewegung des Kabels. Der Störstrom am Eingang berechnet sich dann als

$$i_n = \frac{dq_n}{dt} = \omega q_{no} \cos \omega t$$

Zieht man noch den Übertragungsfaktor des Strom-Spannungs-Wandlers in Betracht, erhält man eine triboelektrische Störempfindlichkeit von 10^{-2} pC bei 16 Hz (ω = 100), die mit der Frequenz ansteigt. Für die gleiche Störempfindlichkeit wie beim einfachen Ladungsverstärker von Abschnitt 3.6.1 müßte die Anregungsfrequenz des Kabels bei 160 kHz liegen. Verglichen mit einem normalen Ladungs-Vorverstärker bietet demnach der Ladungs-Strom-Wandler eine enorme Verbesserung hinsichtlich der Empfindlichkeit gegenüber triboelektrischen Störeinflüssen.

Man kann außerdem sehen, daß die Störungen zufolge Erdschleifen mehrere tausendmal größer sind als die durch triboelektrische Effekte. Verglichen mit dem normalen Ladungs-Vorverstärker zeigt der Ladungs-Strom-Wandler eine bessere Immunität gegen Störungen. Selbst gegenüber dem erdfreien Ladungsverstärker ist die Störunempfindlichkeit des Ladungs-Strom-Wandlers noch überlegen, wenn ein hoher triboelektrischer Störpegel vorhanden ist.

3.6.4. Brüel & Kjær Ladungs-Strom-Wandler mit Strom-Spannungs-Wandler (erdfreier Eingang)

Ähnlich wie beim Ladungsverstärker (Abschnitt 3.6.2) kann auch der Eingang des Ladungs-Strom-Wandlers erdfrei gehalten werden. Typ 2813 bietet diese Möglichkeit. Abb. 3.22 zeigt das entsprechende Ersatzschaltbild. Es ist iden-

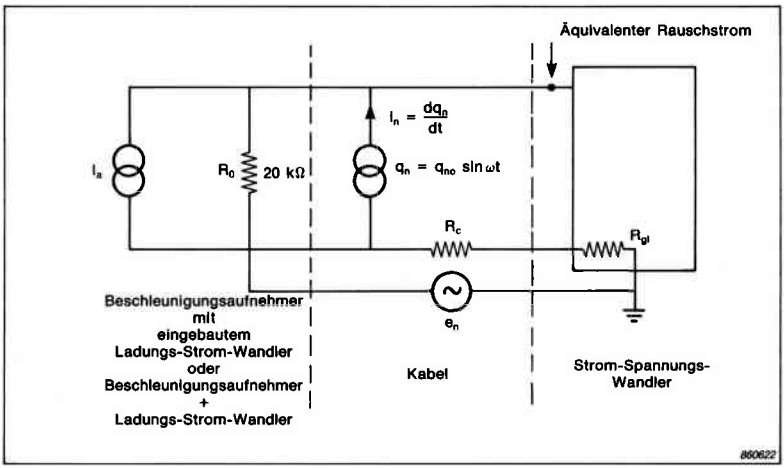


Abb. 3.22. Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines geerdeten Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmers mit Ladungs-Strom-Wandler, angeschlossen an einen Strom-Spannungs-Wandler von Brüel & Kjær mit erdfreiem Eingang

tisch mit dem des vorigen Abschnitts, mit Ausnahme des äquivalenten Gleichtaktwiderstandes R_{gl} ($\approx 20\,k\Omega$). In Typ 2813 wird dieser durch einen Operationsverstärker gebildet. Die Erdschleifen-Störspannung wird wiederum zwischen R_c und R_{gl} aufgeteilt. Typ 2813 hat eine Gleichtaktunterdrückung (*CMRR*) von 70 dB, das Kabel wird mit einer Länge von 200 m angenommen.

Erdschleifen

$$q_n = \frac{e_n \frac{R_c}{R_{gl}}}{R_o\,[\Omega]\ 10^{-6}\,[A/pC]} + \frac{e_n\,[V]}{CMRR\ 1\,[mV/pC]}$$

Daraus ergibt sich eine Empfindlichkeit gegenüber Erdschleifenspannungen von lediglich 0,325 pC/V, was mit dem normalen Ladungsverstärker mit erdfreiem Eingang vergleichbar ist.

Triboelektrischer Effekt

Die Empfindlichkeit gegenüber triboelektrischen Störungen wird durch den erdfreien Eingang nicht beeinflußt, die entsprechenden Resultate des vorigen Abschnitts können unverändert übernommen werden.

3.6.5. Leitungstreiber mit Konstantstromversorgung

Systeme dieser Art werden von Brüel & Kjær nicht angeboten. Die Versorgung ist bei diesem System einfacher gegenüber solchen mit Konstantspannungsversorgung und Strommodulation, wie etwa bei Typ 2813. Zunächst soll noch einmal darauf hingewiesen werden, daß durch elektromagnetische Felder Störungen im Kabel induziert werden können. Dies gilt ganz besonders, wenn billige zweiadrige Kabel eingesetzt werden. In der Folge soll gezeigt werden, daß Leitungstreiber mit Konstantstromversorgung empfindlicher gegenüber Kabeleinstreuungen sind als die von Brüel & Kjær entwickelten Systeme. Unabhängig vom jeweils eingesetzten Leitungstreibertyp ist jedoch bei Vorhandensein starker elektromagnetischer Felder immer die Verwendung von Koaxialkabeln zu empfehlen. Diese Hinweise sind an dieser Stelle besonders wichtig, da der Hauptvorteil jedes Leitungstreibers oder Ladungs-Strom-Wandlers seine Fähigkeit ist, die Einflüsse externer elektromagnetischer Felder zu unterdrücken und damit weitgehend den Einsatz preisgünstiger zweiadriger Versorgungskabel zu ermöglichen.

Abb. 3.23 zeigt ein Ersatzschaltbild für ein Konstantstromsystem.

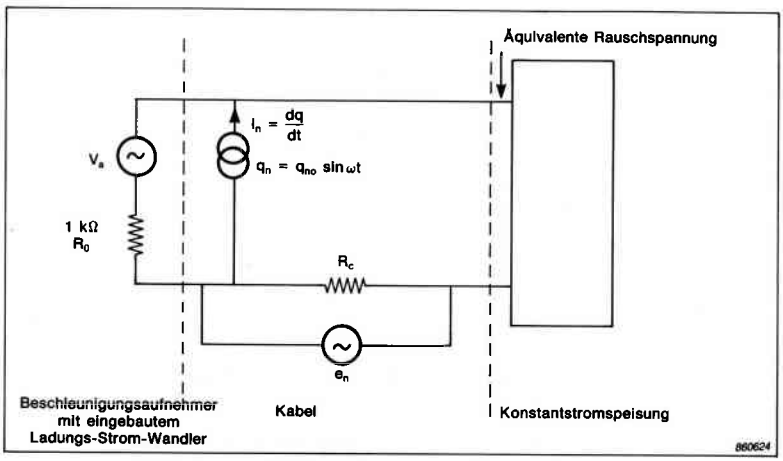


Abb. 3.23. Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Leitungstreibersystems mit Konstantstromversorgung

Erdschleifen

Die Erdschleifenspannung wird voll über dem Eingang der Stromversorgung aufgebaut. Hat der Leitungstreiber einen Übertragungsfaktor von 1 mV/pC,

ergibt sich demnach daraus eine Empfindlichkeit gegen Erdschleifenspannungen von 1000 pC/V. Dieser Wert ist deutlich schlechter als der bei den von Brüel & Kjær angebotenen Systemen, er stellt keine Verbesserung gegenüber herkömmlichen Ladungsverstärkern dar.

Triboelektrischer Effekt

$$q_n = \frac{i_n R_o}{1\,[mV/pC]}$$

$$= \frac{R_o \omega q_{no} \cos \omega t}{1\,[mV/pC]}$$

Bei einer Anregung von 16 Hz erhält man ein Ladungsstörsignal von etwa 10^{-2} pC, genau wie bei Brüel & Kjær Ladungs-Strom-Wandlern.

3.6.6. Symmetrische Beschleunigungsaufnehmer mit Differenz-Ladungsverstärker

Im symmetrischen Beschleunigungsaufnehmer sind die piezoelektrischen Elemente vom Gehäuse elektrisch isoliert. Abb. 3.24 zeigt das entsprechende Ersatzschaltbild. Zwischen jedem Ladungsabgriff und dem Aufnehmergehäuse existiert eine Kapazität C_h. Die Asymmetrie in diesen Kapazitäten unter Betriebsbedingungen wird durch ΔC_h modelliert.

Die Kapazität zwischen der äußeren und den beiden inneren Abschirmungen wird durch C_s repräsentiert und als gleichmäßig verteilt auf die beiden inneren Kapazitäten angesetzt.

Die Kapazität des die beiden Leiter umgebenden Dielektrikums ist durch C_d dargestellt, die Asymmetrie betrage ΔC_d.

Die triboelektrischen Ladungen q_{n1} und q_{n2} stammen aus unkorrellierten Quellen und gleichen sich daher nicht aus.

Bei einer Asymmetrie von 1 pF zwischen den beiden Abgriffen der piezoelektrischen Elemente innerhalb des Beschleunigungsaufnehmers (ΔC_h = 1 pF) beträgt die äquivalente Störladung 1 pC/V.

Entsprechend dem hohen Impedanzverhältnis zwischen C_s und R_c bei 50 Hz ist die Kabelasymmetrie um etwa den Faktor 10^8 kleiner als die des Aufnehmers und daher vernachlässigbar.

Die unkorrelierten triboelektrischen Ladungen erzeugen nach wie vor die gleichen Ladungsstörungen am Eingang wie bei der normalen Kombination Beschleunigungsaufnehmer/Ladungsverstärker.

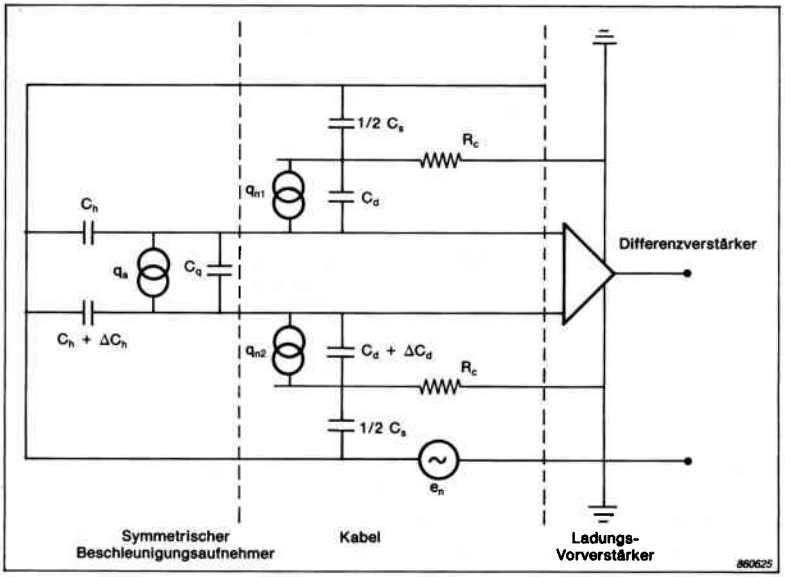


Abb. 3.24. Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines symmetrischen Beschleunigungsaufnehmers, angeschlossen an einen Ladungsverstärker mit Differenzeingang

3.6.7. Isolierte Montage des Beschleunigungsaufnehmers

Ein Beschleunigungsaufnehmer kann von der Oberfläche der Meßobjektes elektrisch isoliert montiert werden (siehe Abschnitt 4.4). Man erreicht dies entweder durch eine Glimmerscheibe zwischen Aufnehmer und Objekt oder man verwendet überhaupt einen Beschleunigungsaufnehmer mit isolierter Basis. In den meisten Fällen erhält man eine Verbesserung des Verhaltens gegenüber Erdschleifenstörungen.

Offensichtlich sind im Kabel erzeugte triboelektrische Ladungen unabhängig von der isolierten Montage des Beschleunigungsaufnehmers, die Empfindlichkeit gegenüber triboelektrischen Effekten ändert sich demnach dadurch nicht. Ohne durch die komplexe Schaltkreisanalyse gehen zu müssen, kann man die in Tabelle 3.2 zusammengefaßten Empfindlichkeiten erhalten.

Beschreibung isolierter Beschleunigungsaufnehmer mit Vorverstärker	Empfindlichkeit gegen Erdschleifenstörungen pc/V
Normaler Aufnehmer mit Ladungs-Vorverstärker	$0{,}3 \times 10^{-3}$
Brüel & Kjær Aufnehmer mit eingebautem Ladungs-Strom-Wandler und Versorgung (geerdeter Eingang)	$0{,}02 \times 10^{-3}$
Brüel & Kjær Aufnehmer mit eingebautem Ladungs-Strom-Wandler und Versorgung (erdfreier Eingang)	$0{,}2 \times 10^{-3}$
Leitungstreiber mit Konstantstromversorgung	$0{,}3 \times 10^{-3}$

T01163D0

Tabelle 3.2. Vergleich der Empfindlichkeit verschiedener Beschleunigungsaufnehmer/Vorverstärker-Systeme gegenüber Erdschleifenstörungen bei isolierter Aufnehmermontage

3.7. SPEZIELLE AUSSTATTUNG VON VORVERSTÄRKERN

In diesem Abschnitt werden spezielle Baugruppen behandelt, die in Ladungsverstärkern und Schwingungsmeßgeräten mit Vorverstärkereingang von Brüel & Kjær zu finden sind. Die prinzipielle Anordnung dieser Baugruppen in einem Brüel & Kjær-Vorverstärker ist in Abb. 3.25 gezeigt. Mehr Details darüber findet man in der Kurzdatentabelle von Anhang E.

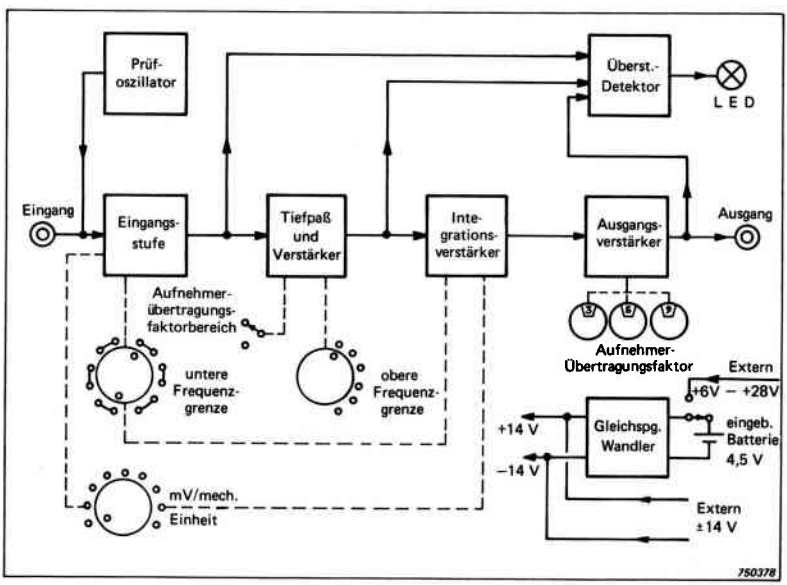


Abb. 3.25. Blockschaltbild eines Brüel & Kjær-Ladungsverstärkers

3.7.1. Integrationsnetzwerke

Die Möglichkeit, aus dem Beschleunigungssignal durch Integration Schwinggeschwindigkeit und Schwingweg zu gewinnen, ist ein ganz wesentlicher Vorteil, der sich aus dem Einsatz eines Beschleunigungsaufnehmers für Schwingungsmessungen jeder Art ergibt. Die Auswahl der optimalen Meßgröße wurde bereits in Abschnitt 1 diskutiert, die Integration von Schwingungssignalen soll an dieser Stelle behandelt werden.

Für harmonische Signale besteht ein einfacher Zusammenhang zwischen den Größen Beschleunigung, Schwinggeschwindigkeit und Schwingweg. Integration bedeutet in diesem Fall einfach Division durch einen der Frequenz proportionalen Faktor.

Sei das Beschleunigungssignal eine Sinusschwingung, ausgedrückt durch

$$a = a_0 \sin \omega t$$

mit

a = Beschleunigung zur Zeit t
a_0 = Beschleunigungsamplitude
ω = Kreisfrequenz in Radiant je Sekunde.

Die erste Integration führt auf die Schwinggeschwindigkeit v

$$v = \int a \, dt$$

$$= \frac{-a_0}{\omega} \cos \omega t$$

$$= v_0 \cos \omega t$$

mit

$$v_0 = \frac{-a_0}{\omega}$$

Wie man sieht, wurde die Integrationskonstante Null gesetzt. Für die Integration transienter Signale wäre diese Annahme allerdings nicht zulässig.

Die zweite Integration ergibt den Schwingweg x

$$x = \int v \, dt$$

$$= \frac{-a_0}{\omega^2} \sin \omega t$$

$$= x_0 \sin \omega t$$

mit

$$x_0 = \frac{-a_0}{\omega^2}$$

Diese einfache analytische Untersuchung zeigt, daß im vorliegenden Fall der einfachen Integration des Beschleunigungssignals zur Schwinggeschwindigkeit eine Division durch einen frequenzproportionalen Faktor entspricht, der doppelten Integration zum Schwingweg eine Division durch einen dem Quadrat der Frequenz proportionalen Faktor.

In der einfachsten Form erreicht man eine elektronische Integration durch ein Netzwerk nach Abb. 3.26.

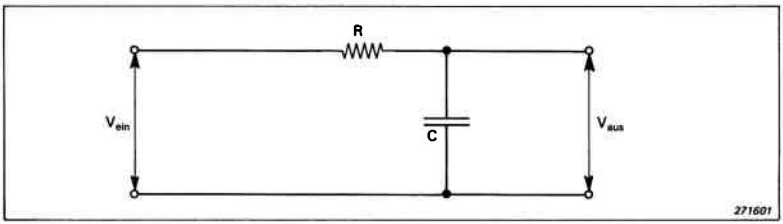


Abb. 3.26. Einfaches RC-Integrationsnetzwerk

Wird die Spannung V_{ein} vom Ausgang der Beschleunigungsaufnehmer-Vorverstärker-Kombination an den Eingang des Netzwerkes gelegt, läßt sich die Spannung V_{aus} am Kondensator berechnen zu

$$V_{aus} = \frac{V_{ein}}{1 + j\omega RC}$$

Für $\omega RC >> 1$ folgt weiter

$$V_{aus} \approx \frac{1}{jRC} \frac{V_{ein}}{\omega}$$

Vergleicht man diesen Ausdruck mit der zuvor durchgeführten analytischen Integration, so erkennt man, daß hier eine Integration auf elektronischem Weg stattfindet. Dem Faktor 1/RC kann durch interne Kalibrierung Rechnung getra-

gen werden. Eine doppelte Integration des Beschleunigungssignals zum Schwingweg erreicht man durch ein zweites derartiges Netzwerk.

Trägt man den Absolutbetrag des letzten Ausdrucks über der Frequenz auf, erhält man einen Verlauf wie in Abb. 3.27. Man kann sehen, daß es eine untere Grenzfrequenz ω_L gibt, unterhalb derer keine echte Integration stattfindet. Zwischen ω_L und ω_T wird, wenn man so sagen will, zum Teil integriert. Richtig integriert werden nur Signale mit Frequenzen oberhalb ω_T.

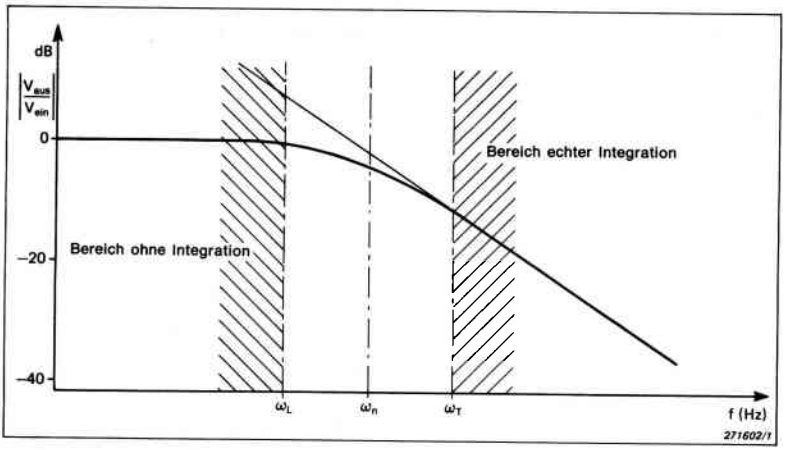


Abb. 3.27. Die Qualität des integrierten Signals in Abhängigkeit von der Frequenz

Verstärkt man das Signal, bevor man es dem Integrator zuführt, wird der Integrationsbereich des Filters erweitert. Gleichzeitig wird dadurch der Dynamikbereich des Integrators verbessert. Ein Integrator dieser Art wird als „aktiv" bezeichnet. Alle Vorverstärker von Brüel & Kjær mit Integrationsnetzwerken enthalten Integratoren dieses Typs. Der typische Frequenzgang eines Integrators ist in Abb. 3.28 zu sehen. Man beachte das Auftreten eines Maximums innerhalb der Filterdurchlaßkurve.

Bei der Messung transienter Signale sind Integrationsnetzwerke nur mit Vorsicht zu verwenden. Durch die niederfrequenten Komponenten kann das Filter im Bereich des Maximums angeregt werden, das Integrationsnetzwerk zeigt ein sogenanntes „Nachklingen", das Meßsignal wird verzerrt. Eine zusätzliche Verzerrung transienter Signale wird durch den Phasengang des Filters verursacht. Abb. 3.29 zeigt diese Effekte am Beispiel der Integration von zwei sinusförmigen Beschleunigungsimpulsen von 1 ms und 10 ms Dauer. Das Ergebnis der

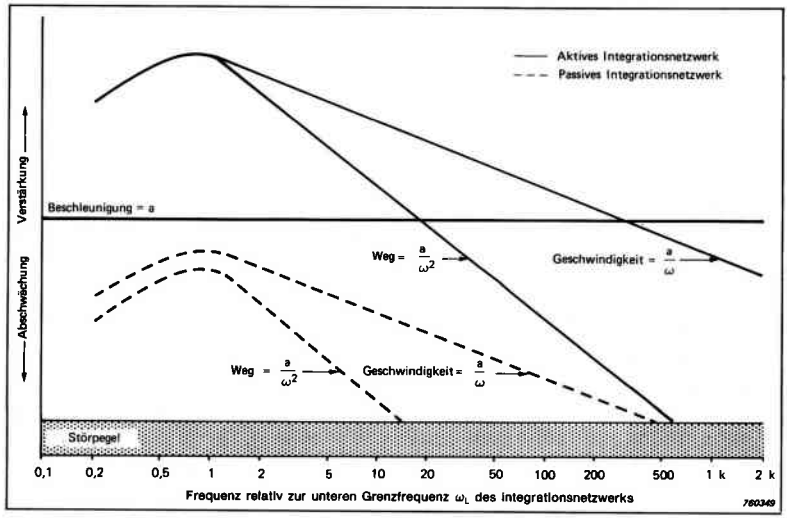


Abb. 3.28. Frequenzgang eines elektronischen Integrators

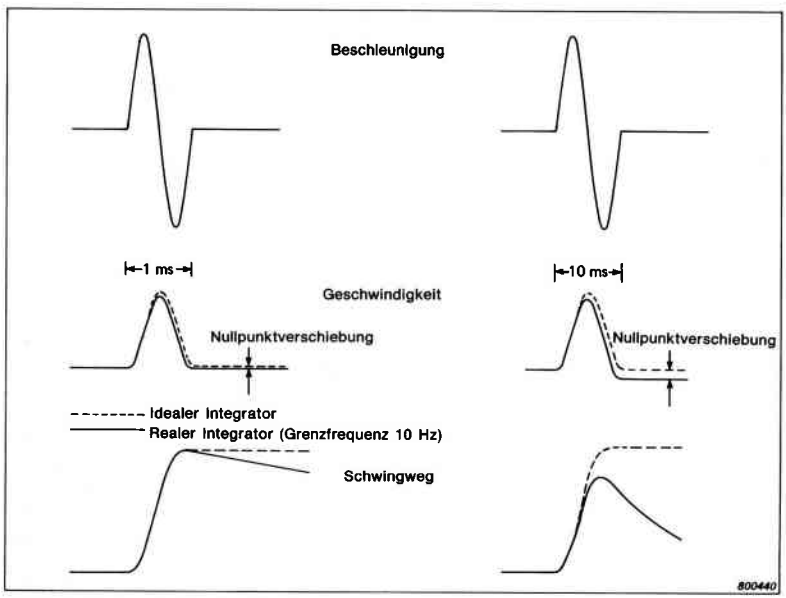


Abb. 3.29. Vergleich der Ergebnisse elektronischer Integration mit den theoretischen Resultaten an zwei Beschleunigungsimpulsen

elektronischen Integration wird dabei mit der exakten Berechnung verglichen. Der höhere Gehalt niederfrequenter Anteile beim längeren Signal führt zu Fehlern bei der Messung des Scheitelwertes.

3.7.2. Filter

Oft ist es vorteilhaft, den Frequenzbereich bei einer Schwingungsmessung zu begrenzen. So zum Beispiel bei Messungen an rotierenden Maschinen mit Zahnradgetrieben, wenn die Anteile im Bereich der Drehfrequenz interessieren. Komponenten weit oberhalb dieses Frequenzbereiches können hier deutlich höhere Pegel aufweisen als die eigentlich interessanten. Werden sie nicht vorzeitig über ein Tiefpaßfilter aus dem Signal gefiltert, können sie zufolge Übersteuerung im Verstärker abgeschnitten werden, was weiter zum Auftreten von Störkomponenten mit Differenzfrequenzen führen kann, die dann vielleicht wiederum im interessierenden Frequenzband liegen, von echten Schwingungssignalen jedoch jetzt nicht mehr unterscheidbar sind. Durch sorgfältige Filterung kann auch der Dynamikbereich einer Meßkette optimiert werden, wie in Abschnitt 1.4 beschrieben.

Ein Hochpaßfilter kann eingesetzt werden, um niederfrequente Störsignale, die nicht von Schwingungen stammen, auszublenden, wie Temperatursprünge oder Basisdehnungen. In allgemeinen können solche Störgrößen aber nur zum Problem werden, wenn man andere als Delta Scher®-Beschleunigungsaufnehmer verwendet.

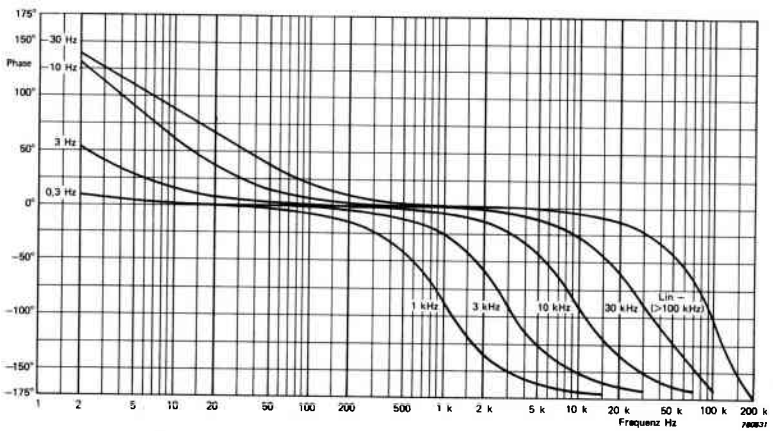


Abb. 3.30. Phasencharakteristik eines Brüel & Kjær-Ladungsverstärkers für verschiedene Filtereinstellungen

Verschiedene Vorverstärker von Brüel & Kjær sind mit aktiven Hoch- und Tiefpaßfiltern ausgestattet, deren –3 dB-Eckfrequenzen umschaltbar sind. Für Details ziehe man die Anhänge E und F zu Rate.

Soweit es um die Messung periodischer Signale geht, haben mit den Filtern in Zusammenhang stehende Phasennichtlinearitäten keinen Einfluß auf den Effektivwert. Bei der Messung transienter Signale sind die Phaseneinflüsse allerdings in Betracht zu ziehen. Ist der Frequenzgehalt des Signals bekannt, kann der Frequenzbereich so gewählt werden, daß die Signalverzerrungen durch Phasenfehler minimal sind. Dazu enthält das Bedienungshandbuch eines jeden Vorverstärkers ein Diagramm ähnlich dem vom Abb. 3.30, einem Beispiel entnommen dem Handbuch eines Ladungs-Vorverstärkers.

Werden zwei Ladungsverstärker parallel betrieben, wie etwa bei der Messung mechanischer Impedanzen oder bei der Kalibrierung, läßt sich die maximale Phasendifferenz $\Delta\phi$ aus folgender Beziehung bestimmen:

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \frac{\frac{f_{c1}}{f_{cn}} - \frac{f_{c2}}{f_{cn}}}{1 + \frac{f_{c1} \cdot f_{c2}}{f_{cn}^2}}$$

f_{c1} und f_{c2} bedeuten dabei die beiden unteren Grenzfrequenzen der einzelnen Vorverstärker, f_{cn} ist die Frequenz, für die die maximale Differenz gesucht wird. Diese Beziehung gilt gleichermaßen für alle Vorverstärker mit Filtern, die eine Flankensteilheit von 6 dB/Oktave (20 dB/Dekade) aufweisen. Bei einer Flankensteilheit von 12 dB/Oktave (40 dB/Dekade) wird der Phasenwinkel gegenüber dieser Gleichung doppelt so groß, der Ausdruck wird also zu

$$\Delta\phi = 2\tan^{-1} \frac{\frac{f_{c1}}{f_{cn}} - \frac{f_{c2}}{f_{cn}}}{1 + \frac{f_{c1} \cdot f_{c2}}{f_{cn}^2}}$$

3.7.3. Übersteuerungsanzeige

Eine wichtige und gleichzeitig einmalige Einrichtung von Brüel & Kjær-Ladungsverstärkern ist die Übersteuerungswarnung. Durch Überwachung des Signalpegels am Ausgang des Eingangsverstärkers, am Ausgang des Filters und am Ausgang des Ausgangsverstärkers (siehe Abb. 3.25) werden Fehlmessungen praktisch ausgeschlossen. Nur durch eine solche Anordnung kann vermieden werden, daß eine Übersteuerungsindikation durch Filterung wieder verloren

geht. Die Übersteuerungsanzeige selbst erfolgt durch eine kleine Leuchte. Die Schaltkreise reagieren bereits bei Spitzenübersteuerungen von lediglich 20 μs Dauer. Eine zweite Leuchte, die eine Aussteuerung innerhalb 20 dB unterhalb Übersteuerung anzeigt, ist ebenfalls eine sehr nützliche Einrichtung. Eingangs- und Ausgangsverstärkung können so eingestellt werden, daß dieses Anzeigelicht leuchtet — der Dynamikbereich ist dann optimal gewählt.

3.7.4. Referenzoszillator

Der Referenzoszillator kann zum Kalibrieren und zum Test des Meßsystems herangezogen werden. Besonders nützlich ist er bei Messungen mit tragbaren Meßeinrichtungen, wenn die Signale auf Magnetband aufgezeichnet werden. Das Referenzsignal kann jetzt zusammen mit dem Meßsignal auf Band gespielt werden — eine wertvolle Hilfe bei der späteren Kalibrierung der Aufnahme. Beim Einsatz von Meßverstärker und Pegelschreiber kann es auch zur Pegelbestimmung herangezogen werden.

3.7.5. Stromversorgungen

Brüel & Kjær-Vorverstärker können aus verschiedenen Quellen gespeist werden. Eine Zusammenstellung findet man in den Tabellen der Anhänge E und F.

Wenn möglich sollte eine symmetrische Spannungsversorgung verwendet werden, da dann Gleichtaktsignale und Rauschen der Versorgungsspannung besser unterdrückt werden. Besonders wichtig ist dieser Gesichtspunkt bei großen Vielkanal-Schwingungsmeßeinrichtungen.

Bei Batteriespeisung wird das Meßgerät voll tragbar, das Systemrauschen wird gleichzeitig geringer. Dies sind wichtige Gesichtspunkte für den Einsatz der Meßgeräte vor Ort, außerhalb des Labors.

Das Speisegerät Typ 2805 liefert bis zu 12 symmetrische Versorgungen, kann aber auch 12 einpolige Spannungen zur Verfügung stellen.

4. BESCHLEUNIGUNGSAUFNEHMER IN DER PRAXIS

4.1. EINFÜHRUNG

In diesem Abschnitt findet man Richtlinien für den richtigen Einsatz piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer, damit korrekte Schwingungsmessungen sichergestellt sind. Abb. 4.1 zeigt die zahlreichen Einflußgrößen, mit denen bei einer Schwingungsmessung zu rechnen ist. Der Delta Scher®-Beschleunigungsaufnehmer drückt zufolge seiner speziellen Konstruktion die Einflüsse aller dieser Störgrößen auf ein Minimum herab, so daß das Ausgangssignal praktisch wirklich nur Bezug zur Schwingung selbst hat. Zwei wichtige Gebiete werden hier behandelt:

1. Die Umgebung: Es gibt keinen Schwingungsaufnehmer, der vollständig unempfindlich gegen Umgebungseinflüsse jeder Art ist. Es wird jedoch gezeigt

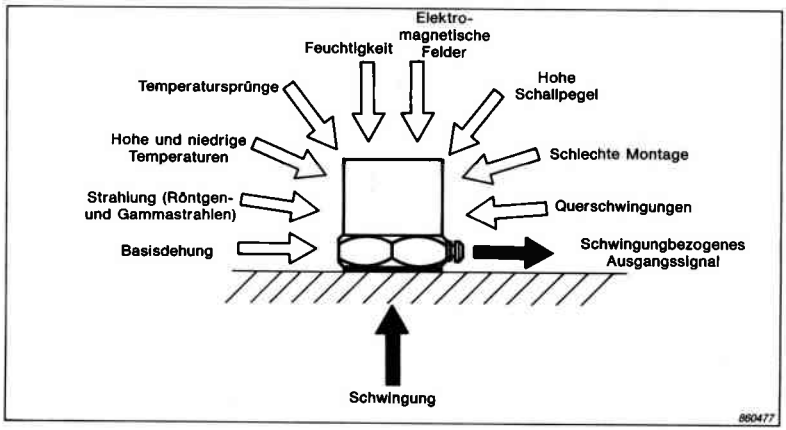


Abb. 4.1. Eine Auswahl verschiedener Einflußgrößen, die bei einem mangelhaft konstruierten Schwingungsaufnehmer zu nicht schwingungsbezogenen Ausgangssignalen führen können

werden, daß Delta Scher®-Beschleunigungsaufnehmer auch unter extremen Umweltbedingungen hervorragende Eigenschaften aufweisen. Die Empfindlichkeit dieses Aufnehmertyps gegenüber Umwelteinflüssen ist sehr gering und überdies definiert.

2. Die Montage: Durch die Montagetechnik können Frequenzgang und Dynamikbereich eines Beschleunigungsaufnehmers durchaus verändert werden. Überlegungen hinsichtlich der Aufnehmermasse und des Montageortes sind zusätzlich anzustellen. Will man höchstmögliche Leistungsfähigkeit erzielen, sind die Richtlinien dieses Abschnitts unbedingt zu beachten.

4.2. UMGEBUNGSEINFLÜSSE

Schwingungsmessungen sind oftmals in einer Umgebung durchzuführen, die besondere Anforderungen an den Beschleunigungsaufnehmer stellt. Für zuverlässige Meßergebnisse müssen Beschleunigungsaufnehmer konstruiert werden, die *sämtliche* Umgebungseinflüsse so weit wie möglich unterdrücken. Zahlreiche Beschleunigungsaufnehmerkonstruktionen sind bis heute bekannt geworden. Keine erreicht jedoch in der Unterdrückung von Umgebungseinflüssen die Eigenschaften des Delta Scher®-Prinzips. Seine äußerst niedrige Empfindlichkeit gegenüber extremen Umwelteinflüssen ist überdies systematisch und definiert, so daß zum Beispiel die Auswirkungen hoher Temperaturen oder starker Magnetfelder berechnet, der Einfluß auf den gemessenen Schwingungspegel abgeschätzt werden kann.

Jeder Beschleunigungsaufnehmer von Brüel & Kjær wird mit umfassenden Spezifikationen über die Empfindlichkeit gegenüber Umgebungsgrößen geliefert. Die Methoden, diese Einflüsse meßtechnisch zu erfassen, sind in internationalen Standards beschrieben, speziell in ISO 5347 — „Methods for the Calibration of Shock and Vibration Pickups" — sowie im amerikanischen Standard ANSI S2.11-1969 — „The Selection of Calibrations and Tests for Electrical Transducers Used for Measuring Shock and Vibration".

4.2.1. Temperaturbereich

Der piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer ist zur Messung von Schwingungen innerhalb weiter Temperaturbereiche geeignet. Entsprechend den Eigenschaften piezoelektrischer Materialien sind jedoch Änderungen sowohl im Spannungs- wie auch im Ladungs-Übertragungsfaktor zu berücksichtigen, wenn der Beschleunigungsaufnehmer bei Temperaturen außerhalb des Nennbereiches betrieben wird.

Als Beispiel zeigt Abb. 4.2 die Veränderung von Kapazität, Ladungs-Übertragungsfaktor und Spannungs-Übertragungsfaktor des piezoelektrischen Materi-

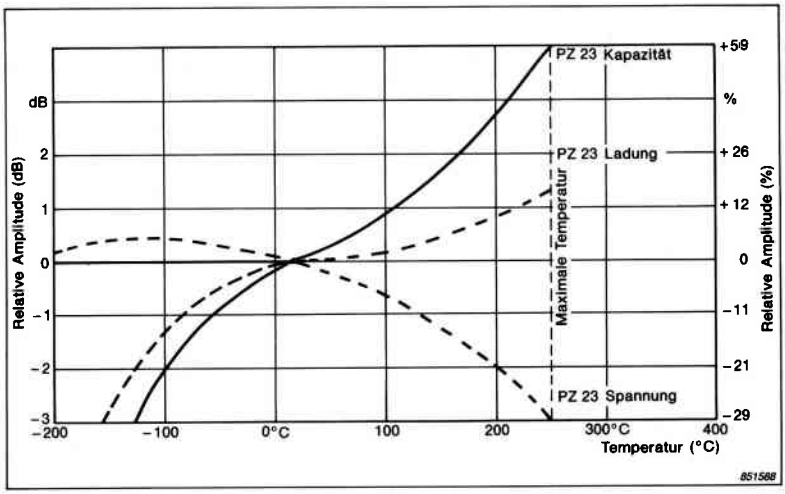


Abb. 4.2. Temperaturabhängigkeit von Kapazität, Ladungs-Übertragungsfaktor und Spannungs-Übertragungsfaktor des piezoelektrischen Materials PZ23

als PZ23, welches von Brüel & Kjær in nahezu allen Beschleunigungsaufnehmern verwendet wird. Das Kalibrierzeugnis, das mit jedem Beschleunigungsaufnehmer mitgeliefert wird, enthält ein ähnliches Diagramm mit der entsprechenden Information über das im Aufnehmer eingesetzte piezoelektrische Material. Diese Änderungen sind, wie gesagt, systematisch und genau definiert. Kehrt die Temperatur zur Nenntemperatur bei der Kalibrierung zurück, wird man keine bleibenden Veränderungen feststellen. Setzt man einen Beschleunigungsaufnehmer bei hohen Temperaturen ein, kann seine aktuelle Empfindlichkeit mit Hilfe dieses Diagramms leicht berechnet werden.

Die Zeit, bis der Übertragungsfaktor auf den im Kalibrierzeugnis angegebenen Nennwert zurückkehrt, läßt sich schwer bestimmen. Zum Teil hängt sie von der Temperatur ab, der der Beschleunigungsaufnehmer ausgesetzt war. Ändert sich die Umgebungstemperatur nur langsam, wird der Übertragungsfaktor der in Abb. 4.2 gezeigten Kurve folgen. Für schnelle Temperaturänderungen zeigen piezoelektrische Materialien jedoch einen hystereseähnlichen Effekt, der Beschleunigungsaufnehmer wird eine Zeit zur Stabilisierung benötigen, bis der Übertragungsfaktor den Wert nach dem genannten Diagramm erreicht. Im allgemeinen erfordert es einen Zeitraum von 24 Stunden, bis der Übertragungsfaktor eines Beschleunigungsaufnehmers seinen Normalwert erreicht, wenn man ihn plötzlich aus einem Temperaturbereich nahe dem zulässigen Maximalwert in eine Umgebung mit normaler Raumtemperatur bringt.

Jeder Beschleunigungsaufnehmer hat eine spezifizierte maximale Betriebstemperatur, oberhalb der der piezoelektrische Werkstoff zu depolarisieren beginnt, was eine bleibende Änderung des Übertragungsfaktors zur Folge hat. Für Beschleunigungsaufnehmer mit dem piezoelektrischen Material PZ23 liegt diese Temperatur bei 250 °C. Innerhalb 50 °C oberhalb der spezifizierten Grenztemperatur tritt der Empfindlichkeitsverlust allmählich ein. Darüber findet eine spontane Depolarisation statt, der Beschleunigungsaufnehmer ist dann zerstört.

Zur Schwingungsmessung bei hohen Temperaturen oberhalb 250 °C kann der Industrie-Beschleunigungsaufnehmer Typ 8310 eingesetzt werden. Er ist zum Betrieb bis zu 400 °C ausgelegt. Außerdem ist es möglich, die Basis eines Universal-Beschleunigungsaufnehmers vom Meßobjekt über einen Metallschirm mit hoher Wärmeleitfähigkeit thermisch zu entkoppeln, wie in Abb. 4.3 gezeigt. Die Wärmeableitung vom Beschleunigungsaufnehmer weg wird dadurch verbessert. Mit einem solchen Schirm können Messungen an Oberflächen mit Temperaturen bis zu 350 °C ausgeführt werden. Wird der Beschleunigungsaufnehmer zusätzlich luftgekühlt, kann man mit dieser Anordnung bis zu 450 °C gehen. Man hat allerdings dabei zu bedenken, daß die Montagesteifigkeit des Beschleunigungsaufnehmers durch solch eine Befestigung verändert werden kann, was zu einer Absenkung der Resonanzfrequenz in montiertem Zustand und damit zu einer Einschränkung des nutzbaren Frequenzbereiches führt. Die angeschlossenen Meßgeräte werden im allgemeinen diese Temperaturen nicht ertragen, sie sind daher in entsprechender Entfernung von der Meßstelle zu installieren.

Die untere Temperaturgrenze der meisten Beschleunigungsaufnehmer von Brüel & Kjær ist mit –74 °C spezifiziert. Spezifikationen unterhalb dieser Temperatur werden nicht angegeben, obwohl es durchaus möglich ist, Universal-

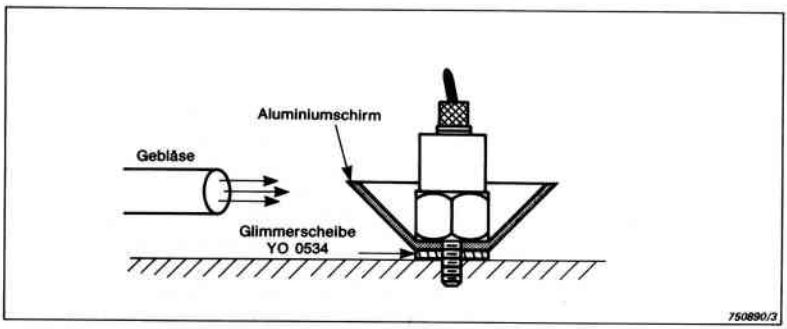


Abb. 4.3. Montage eines Beschleunigungsaufnehmers auf einer heißen Oberfläche mit Aluminiumschirm zur Verbesserung der Wärmeableitung

Beschleunigungsaufnehmer auch bei tieferen Temperaturen zu betreiben. Mit solchen Aufnehmern wurden schon Messungen bei Temperaturen von flüssigem Stickstoff durchgeführt (–196 °C).

4.2.2. Temperatursprünge

Rasche Fluktuationen der Umgebungstemperatur während einer Schwingungsmessung — z. B. durch Luft- oder Wärmeströmungen — können Anlaß zur Entstehung niederfrequenter Störsignale im Beschleunigungsaufnehmer sein. Sie entstehen aufgrund zweier verschiedener Effekte:

1. **Der pyroelektrische Effekt:** In piezoelektrischen Kristallen und ferroelektrischen Keramiken entstehen elektrische Ladungen auch durch Temperaturdifferenzen und -schwankungen. Bei künstlich polarisierten Keramiken treten diese Ladungen an den Oberflächen *senkrecht* zur Polarisationsrichtung auf. Wird demnach die durch Schwingungen induzierte Ladung ebenfalls *senkrecht* zur Polarisationsrichtung abgegriffen, wie es bei Aufnehmern vom Kompressionstyp der Fall ist, werden sie zusammen mit den pyroelektrischen Ladungen erfaßt, was zu fehlerbehafteten Resultaten führt. Beim Scherungsaufnehmer wird diese zusätzliche Ladung hingegen nicht erfaßt, da die Abgreifelektroden an den Oberflächen *parallel* zur Polarisationsrichtung angebracht sind, wie in Abb. 4.4 gezeigt.

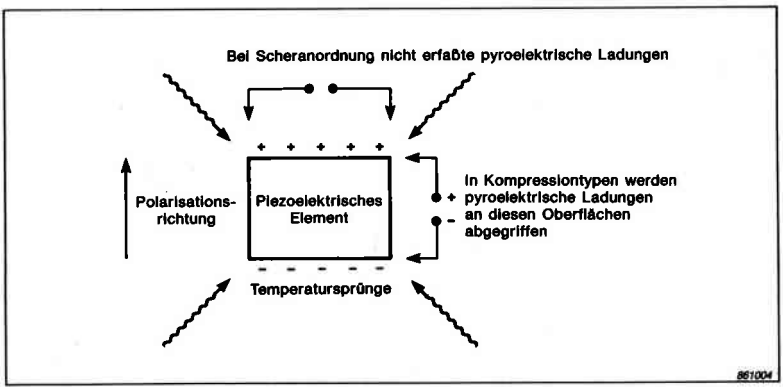


Abb. 4.4. Die geringe Temperatursprungempfindlichkeit eines piezoelektrischen Materials bei Scheranordnung in Gegenüberstellung zum Kompressionstyp. Die eingezeichneten Ladungen beruhen auf dem pyroelektrischen Effekt und haben keinerlei Bezug zur Schwingung.

Theoretisch sind demnach Scherungsaufnehmer unempfindlich gegenüber Temperatursprüngen. In der Praxis ist diese Empfindlichkeit etwa 100 mal geringer als bei Kompressionstypen. Durch große Sorgfalt bei der Auswahl piezoelektrischer Materialien wird bei Brüel & Kjær dieser Effekt auf ein Minimum herabgedrückt.

2. **Ungleichmäßige Wärmedehnung:** Sie tritt auf, wenn sich verschiedene Teile des Beschleunigungsaufnehmers bei Temperaturänderungen verschieden ausdehnen oder bei Temperaturdifferenzen über das Aufnehmergehäuse. In beiden Fällen wirken entsprechende Kräfte auf die piezoelektrischen Elemente, was wiederum zu einem Ausgangssignal führt. Beschleunigungsaufnehmer vom Kompressionstyp sind gegenüber diesen Effekten empfindlicher als Scherungsaufnehmer.

Störend werden diese Einflüsse nur bei der Messung niederfrequenter Schwingungen mit niedrigem Pegel in Erscheinung treten. Bei Außenmessungen an großen Strukturen, wie Gebäuden, Brücken oder Schiffen ist es daher wichtig, Beschleunigungsaufnehmer mit geringer Empfindlichkeit gegenüber diesen Effekten einzusetzen. Vielfach werden solche Temperaturfluktuationen auch in industrieller Umgebung zu erwarten sein, durch die üblicherweise relativ hohen Schwingungspegel werden sie jedoch hier kaum störend in Erscheinung treten.

Die typische Temperatursprungempfindlichkeit, wie dieser Störgrößeneinfluß genannt wird, kann dem jedem Beschleunigungsaufnehmer beigelegten Kalibrierzeugnis entnommen werden. Durch die im folgenden beschriebenen Maßnahmen kann diese niederfrequente Störung reduziert oder sogar ganz beseitigt werden.

1. **Richtige Auswahl:** Wichtigster Faktor bei der Reduktion der Temperatursprungempfindlichkeit ist die richtige Auswahl des Beschleunigungsaufnehmers. Delta Scher®-Konstruktionen sind Kompressionstypen in diesem Punkt deutlich überlegen.

2. **Hochpaßfilter:** Bei Kompressionsaufnehmern kann es erforderlich werden, Hochpaßfilter zur Ausblendung solcher niederfrequenten Störsignale einzusetzen. Solche Filter sind in den meisten Vorverstärkern von Brüel & Kjær vorhanden. Die untere Grenzfrequenz ist wählbar, typischerweise zwischen 0,3 Hz und 30 Hz. Für Kompressionsaufnehmer ist in einer Umgebung mit starken Temperaturfluktuationen eine untere Grenzfrequenz von mindestens 3 Hz notwendig. Ladungs-Strom-Wandler, wie Typ 2644 oder die in den Beschleunigungsaufnehmern Typ 4390, 8317 und 8318 eingebauten, haben spezifizierte untere Grenzfrequenzen, durch die diese Effekte auf ein Minimum gedrückt werden. Details über die verschiedenen Vorverstärker und Ladungs-Strom-Wandler findet man in den Datenblättern der entsprechenden Geräte.

3. **Abschirmung**: In manchen Fällen kann die Anbringung eines Schutzschirmes oder eines leichten Wärmeisolators um den Beschleunigungsaufnehmer Abhilfe schaffen. Ein Mikrofon-Windschirm ist für diesen Zweck gut geeignet. Oder man konstruiert eine Abschirmung aus leichtem Polystyrol.

4.2.3. Luftschall

In fast allen Fällen sind Schwingungen auch von Schallabstrahlung begleitet. Schwingungsmessungen werden daher oft in einer Umgebung mit hohem Schalldruckpegel auszuführen sein. Delta Scher®-Beschleunigungsaufnehmer von Brüel & Kjær sind in besonderem Maße so ausgelegt, daß auch hohe Schalldruckpegel keinen Einfluß auf die Schwingungsmessung haben. Erreicht wird dies durch eine mechanisch entsprechend isolierte Konstruktion. Die Luftschallempfindlichkeit eines Delta Scher®-Beschleunigungsaufnehmers liegt im Bereich von 0,0001 bis 0,004 ms^{-2} bei einem Schalldruckpegel von 154 dB im Frequenzbereich 2 bis 100 Hz[1]. Andere Konstruktionen zeigen hier eine weit höhere Empfindlichkeit. Ältere Kompressionsaufnehmertypen arbeiten unter diesen Bedingungen oft eher als Mikrofon, da sie keine mechanische Isolation zwischen Gehäuse und piezoelektrischen Elementen haben.

In vielen Fällen wird die akustische Anregung des Meßobjektes weit stärkere Auswirkungen zeigen.

4.2.4. Basisdehnung

Leichter zu verstehen ist dieser Effekt, wenn man von „Basisbiegung" spricht. Wird ein Beschleunigungsaufnehmer auf einer schwingenden Struktur montiert, wird seine Basis auch Biegekräften ausgesetzt, die daraus resultierende Ladung wird mitgemessen. Die Frequenz dieses Ladungssignals wird immer identisch mit der der Schwingung sein. Der Effekt wird daher bei tiefen Frequenzen ausgeprägt sein, wo die Schwingwege und damit die Dehnungen groß sind.

Besonders im Rückkopplungszweig einer Schwingprüfeinrichtung, wo das Stellsignal für den Kompressoreingang gewonnen wird, ist eine niedrige Empfindlichkeit gegen Basisdehnungen wichtig. Der Beschleunigungsaufnehmer für dieses Rückkopplungssignal könnte großen Basisdehnungen ausgesetzt sein, das Erregersignal für den Schwingerreger kann dadurch erheblich beeinflußt werden.

---

1 Die Luftschallempfindlichkeit wird in diesem Bereich gemessen. Der gleiche Wert kann auch für höhere Frequenzen angenommen werden. Siehe Abschnitt 5.5.4.

Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmer nach dem Delta Scher®-Prinzip weisen eine sehr geringe Empfindlichkeit gegenüber dieser Störgröße auf. Bei dieser Bauart sind die piezoelektrischen Elemente praktisch völlig isoliert von Basisverformungen jeder Art. Hier ist es auch keineswegs erforderlich, die Basis besonders dick und damit auch entsprechend schwer auszuführen, um diesen Einfluß gering zu halten, wie es bei Aufnehmern vom Kompressionstyp der Fall ist.

Das Aufnehmer-Bezugsnormal Typ 8305 von Brüel & Kjær ist ein Kompressionstyp, bei dem eine Berylliumscheibe zur Unterdrückung von Basisbiegungseinflüssen verwendet wird. Unter den definierten Bedingungen bei der Kalibrierung stellen Basisbiegungen prinzipiell kein Problem dar.

Die Basisdehnungsempfindlichkeit eines Universalaufnehmers vom Delta Scher®-Typ liegt bei $0{,}02\,ms^{-2}/\mu\epsilon$ für eine Basisdehung von $250\,\mu\epsilon$. Der typische Wert für jeden Aufnehmertyp ist im Kalibrierzeugnis, das mit jedem Aufnehmer mitgeliefert wird, angegeben.

4.2.5. Feuchtigkeit

Alle Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmer haben ein verschweißtes oder epoxiverklebtes Gehäuse, der eigentliche Aufnehmer ist dadurch gegen Feuchtigkeitseinflüsse vollkommen geschützt. Wird er in nasser oder extrem feuchter Umgebung eingesetzt, ist es wichtig, daß Kabel und Anschlußstecker vollkommen abgedichtet sind. Anderenfalls sinkt der Leckwiderstand des Aufnehmers ab, eine Änderung der unteren Grenzfrequenz ist die Folge. Zu empfehlen ist zu diesem Zweck ein Abdichtmittel wie Dow Corning RTV 738, 3M Scotch Clad Strip Coating 2253 oder ähnliches. Der Mantel von Brüel & Kjær-Aufnehmerkabeln ist prinzipiell aus wasserundurchlässigem Material wie PTFE oder PFA (Teflon) ausgeführt, sie können sogar vollständig in Flüssigkeit eingetaucht werden.

4.2.6. Magnetfelder

Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmer sind weitgehend unempfindlich gegenüber magnetischen Feldern. Die Empfindlichkeit liegt zwischen 0,5 und $30\,ms^{-2}$ je Tesla (0,005 und 0,3 g je k Gauss), wobei der ungünstigste Fall — Richtung des magnetischen Flusses in Hauptempfindlichkeitsrichtung — zugrundegelegt ist.

4.2.7. Strahlung

Alle Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmer — mit Ausnahme derjenigen mit eingebautem Ladungs-Strom-Wandler — können unter starker Gammastrahlung (100 Gy/h, 6 MeV) bis zu einer Gesamtdosis von 20 kGy (1 Gy=100 rad) eingesetzt werden. Versuche haben gezeigt, daß die Änderung des Übertragungsfaktors nach solchen Dosen unterhalb von 10% bleibt. Prinzipiell können gewöhnliche Aufnehmerkabel verwendet werden, für akkumulierte Dosen oberhalb 1 kGy werden allerdings spezielle Kabel empfohlen. Der Industrieaufnehmer Typ 8310 zeigt bei den gleichen Dosen weniger als 3% Änderung im Übertragungsfaktor und kann unter Einfluß sehr starker Strahlung eingesetzt werden. Bei Gesamtdosen von 1 MGy und 10^{18} Neutronen pro Quadratzentimeter (10 kGy/h, 1 bis 5 MeV und ein thermischer Neutronenfluß von 10^{12} Neutronen je Quadratzentimeter und Sekunde) ändert sich der Übertragungsfaktor um etwa 5%. Weitere Details findet man im Datenblatt für Industrie-Beschleunigungsaufnehmer.

4.3. DER EINFLUSS DER MASSE DES BESCHLEUNIGUNGSAUFNEHMERS

Durch die Montage des Beschleunigungsaufnehmers auf dem Meßobjekt wird die Gesamtmasse vergrößert, die örtliche Steifigkeit ändert sich, die dynamischen Eigenschaften der Struktur werden damit beeinflußt.

Von Bedeutung sind diese Einflüsse nur dann, wenn durch den Aufnehmer eine zusätzliche mechanische Impedanz von gleicher Größenordnung, wie die der Struktur ohne Beschleunigungsaufnehmer, hinzugefügt wird. Die vom Aufnehmer auf das Objekt angekoppelte mechanische Impedanz Z_a kann durch dessen Masse m_a ausgedrückt werden

$$Z_a = \omega m_a$$

Diese Beziehung ist gültig bei Frequenzen bis herauf zur 0,9fachen Resonanzfrequenz in montiertem Zustand. Innerhalb dieses Frequenzbereiches wird die Beschleunigung an der Struktur in der Umgebung der Meßstelle entsprechend der folgenden Gleichung modifiziert:

$$a_m = a_s \frac{Z_s}{Z_s + Z_a} \approx a_s \frac{m_s}{m_s + m_a}$$

mit

a_m = Beschleunigung gemessen vom Beschleunigungsaufnehmer

a_s = Beschleunigung an der Struktur ohne montierten Beschleunigungsaufnehmer

Z_s = mechanische Impedanz der unbelasteten Struktur

m_s = „Masse" der Struktur. In vielen Fällen wird die mechanische Impedanz hauptsächlich von der Masse der Struktur in der Umgebung des Beschleunigungsaufnehmers bestimmt.

Die Resonanzfrequenz der Struktur wird sich ebenfalls verringern entsprechend der Beziehung

$$f_m = f_s \sqrt{\frac{m_s}{m_s + m_a}}$$

mit

f_m = beliebige Resonanzfrequenz der Struktur unter Einfluß der Aufnehmermasse

f_s = beliebige Resonanzfrequenz der Struktur ohne Einfluß der Aufnehmermasse

Diese Beziehungen zeigen, daß bei gegenüber der Strukturmasse kleiner Beschleunigungsaufnehmermasse und damit mechanischer Impedanz die Beeinflussung der Schwingung nur gering ist. Als Faustregel sollte die Masse des Beschleunigungsaufnehmers höchstens ein Zehntel der Strukturmasse erreichen.

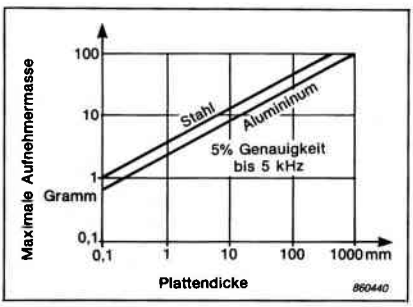


Abb. 4.5. Theoretisch abgeleiteter Zusammenhang zwischen Aufnehmermasse und Schwingungsänderung bei dünnen Aluminium- und Stahlplatten

Abb. 4.5 zeigt eine theoretisch abgeleitete Beziehung zwischen zulässiger Aufnehmermasse und Dicke einer Platte für eine spezifizierte Beeinflussung des Schwingungspegels über einen definierten Frequenzbereich. Sie kann bei Schwingungsmessungen an dünnen Stahl- und Aluminiumplatten herangezogen werden.

4.4. MONTAGE DES BESCHLEUNIGUNGSAUFNEHMERS

Für eine genaue Schwingungsmessung ist sicherzustellen, daß

1. Der nutzbare Frequenz- und Dynamikbereich nicht durch unsachgemäße Montage des Beschleunigungsaufnehmers eingeschränkt wird;

2. Die durch den Beschleunigungsaufnehmer hinzugefügte Masse das Schwingungsverhalten der Struktur nicht beeinflußt;

3. Der Meßpunkt exakt lokalisierbar ist — eine Voraussetzung für reproduzierbare Messungen.

Die Wahl der richtigen Montagetechnik hat auf jeden dieser Punkte maßgeblichen Einfluß. Es wurde schon gezeigt, daß der nutzbare Frequenzbereich des Beschleunigungsaufnehmers durch seine Resonanzfrequenz in montiertem Zustand bestimmt ist, die dem jedem Aufnehmer beigelegten individuellen Kalibrierzeugnis entnommen werden kann. Die dort angegebene Resonanzfrequenz

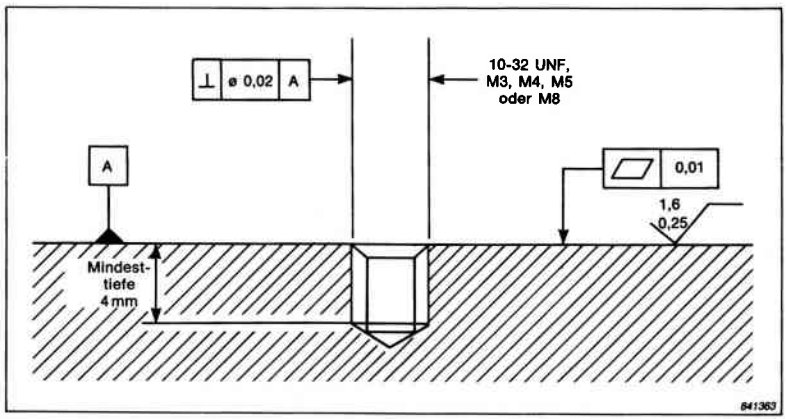


Abb. 4.6. Empfohlene Toleranzen für Montagefläche und Gewindebohrung. Dimensionen und Toleranzen sind nach ISO 1101 angegeben

wird allerdings unter optimalen Montagebedingungen gemessen: Der Beschleunigungsaufnehmer wird mit einer Standard-Stiftschraube auf einem Stahlblock von 180 g Masse befestigt, dessen Oberfläche wie in Abb. 4.6 bemaßt gefertigt wurde.

4.4.1. Anforderungen an die Oberfläche des Meßobjektes an der Meßstelle

Wichtig für eine hohe Resonanzfrequenz in montiertem Zustand ist vor allem, daß die Oberfläche an der Meßstelle so sauber und so glatt wie möglich ist. Optimal ist eine Oberflächengüte nach Abb. 4.6. Das Gewindeloch für die Stiftschraube ist ebenfalls mit den Maßen nach Abb. 4.6 auszuführen. Fettspuren lassen sich mit üblichen Lösungsmitteln wie Azeton entfernen.

4.4.2. Montagestelle

Vielfach liegt die Montagestelle für den Beschleunigungsaufnehmer durch den Zweck der Messung von vornherein fest. Der Beschleunigungsaufnehmer ist mit seiner Hauptempfindlichkeitsrichtung in Richtung der interessierenden Schwingung zu montieren.

Es wurde allerdings schon früher erwähnt, daß der Beschleunigungsaufnehmer auch gegenüber Schwingungen in anderer als der Hauptachsenrichtung empfindlich ist. Richtet man den roten Punkt eines Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmers in Richtung der maximalen Querschwingungskomponente aus, wird dieser Effekt minimal gehalten.

Die Meßstelle sollte so ausgewählt werden, daß der Übertragungsweg von der Schwingungsquelle her möglichst kurz und steif ist. Nachgiebigkeiten und Dämpfungselemente, wie zum Beispiel Dichtungsringe, sollten nicht auf diesem Weg liegen. Bei rotierenden Maschinen sind meist die Lagergehäuse zur Montage der Beschleunigungsaufnehmer gut geeignet.

Oftmals sind auch Schwingungskomponenten in anderer als der Hauptachsenrichtung des Beschleunigungsaufnehmers von Interesse. Ein Triaxialaufnehmer liefert simultan Schwingungsdaten für einen Meßpunkt in drei zueinander senkrechten Richtungen.

Das dynamische Verhalten vieler Strukturen ist sehr kompliziert. Eine auch nur kleine Verschiebung der Meßstelle kann bereits große Unterschiede in der Schwingung zur Folge haben, besonders bei hohen Frequenzen. Als Grundregel sollte gelten, niemals eine Schwingungsmessung in einem Knotenpunkt zu machen. Zum Auffinden der Schwingungsknoten und -bäuche an einer Struktur kann eine schnelle Übersichtsmessung notwendig werden, zu der man am besten eine Tastsonde ähnlich der in Abschnitt 4.4.9 beschriebenen verwendet.

Vielleicht eines der schwierigsten Gebiete der Schwingungsmessung ist die Erfassung der auf den Menschen einwirkenden Schwingungen. Das betrifft sowohl Ganzkörperschwingungen wie auch Hand-Arm-Schwingungen. In beiden Fällen sind spezielle Überlegungen hinsichtlich Aufnehmertyp, Frequenzbereich, Dynamikbereich, Meßort und Montagetechnik erforderlich.

4.4.3. Bestimmung des Frequenzganges eines Beschleunigungsaufnehmers für verschiedene Montagetechniken

Die folgenden Abschnitte befassen sich mit verschiedenen Montagetechniken und deren Einfluß auf Frequenzbereich und dynamische Eigenschaften des Beschleunigungsaufnehmers. Behandelt werden praktisch gut anwendbare Methoden. Die Frequenzgangmessungen wurden auf einem von einem kleinen Schwingerreger betriebenen Schwingtisch von 180 g Masse ausgeführt, auf dem der Beschleunigungsaufnehmer montiert war. Die Beschleunigung des Tisches wurde mit Hilfe einer Rückkopplungsanordnung (Kompressorschleife) über einen großen Frequenzbereich konstant gehalten.

Um einen Vergleich zu ermöglichen, wurde bei allen Messungen der gleiche Universalaufnehmer verwendet. Abb. 4.7 zeigt die Frequenzgänge für die wichtigsten der in diesem Abschnitt behandelten Montagetechniken zusammengestellt in einem Bild.

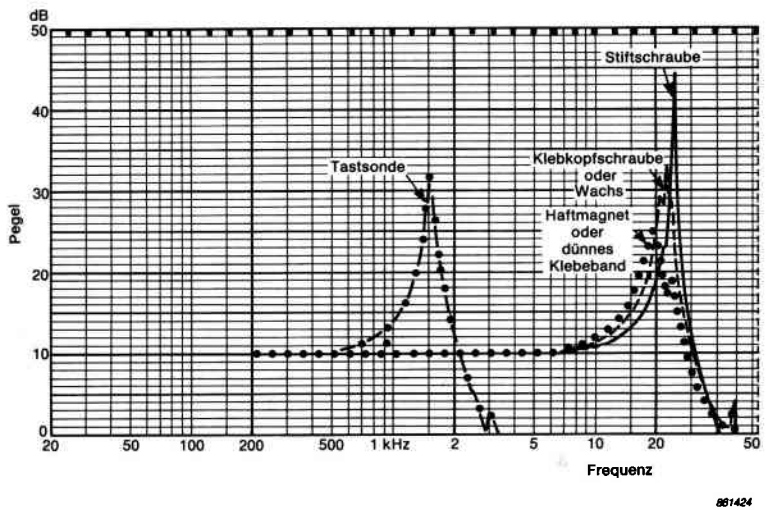


Abb. 4.7. Frequenzgangvergleich für verschiedene Aufnehmer-Montagetechniken

4.4.4. Stiftschraube

Montage:

1. Die Oberfläche des Meßobjektes ist mit den Toleranzen nach Abb. 4.6 vorzubereiten. Auch die Basis des Beschleunigungsaufnehmers sollte so sauber und glatt wie möglich sein.
2. Das Befestigungsloch ist mit den erforderlichen Maßen in das Meßobjekt zu bohren, das Gewinde zu schneiden. Die Maße sind abhängig vom jeweils eingesetzten Aufnehmertyp. Zur Aufnahme der Stiftschraube muß das Gewindeloch ausreichend tief sein. Für Miniatur-Beschleunigungsaufnehmer benötigt man einen M3-Gewindebohrer Typ QA 0041 und die 8 mm (0,312 inch) lange Stahlstiftschraube YQ 2007. Für Universalaufnehmer sind Gewindebohrer QA 0029 sowie die 10-32 UNF Stiftschrauben YQ 2960 und YQ 2962 mit 12 mm bzw. 8 mm (0,5 bzw. 0,312 inch) Länge vorgesehen. Für Beschleunigungsaufnehmer Typ 8318 verwendet man entsprechend den M8-Gewindebohrer QA 0141 sowie Stiftschraube YQ 9335.
3. Die Stiftschraube ist in das Loch einzuschrauben, der Beschleunigungsaufnehmer ist sodann auf die Stiftschraube aufzuschrauben. Man beachte, daß die Schraube nicht bis zum Grund des Gewindloches im Beschleunigungsaufnehmer eingedreht wird. Der Aufnehmer ist mit einem Schraubenschlüssel festzuziehen, darf dabei aber nicht überdreht werden. Siehe Abb. 4.8.

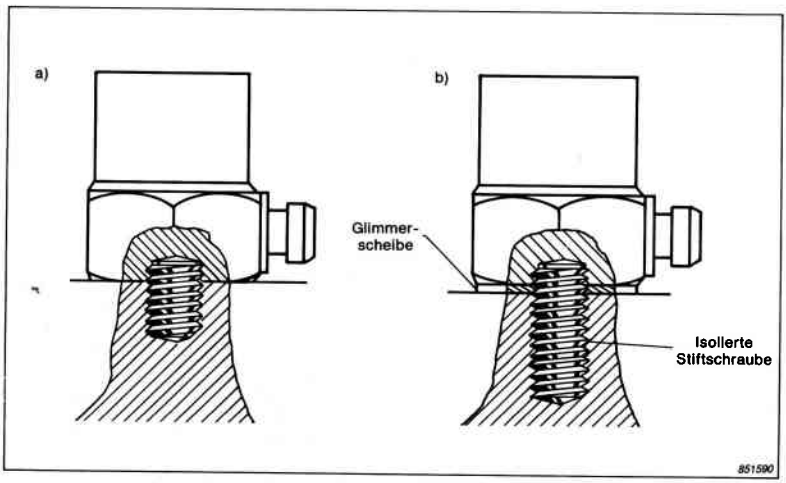


Abb. 4.8. Aufnehmermontage mit Stiftschraube, rechts im Bild mit isolierter Stiftschraube und Glimmerscheibe

Anwendungen:

1. Messung hochfrequenter Schwingungen, was die höchstmögliche Resonanzfrequenz in montiertem Zustand erfordert.
2. Permanente Schwingungsüberwachung

Vorteile:

1. Optimale Aufnehmereigenschaften. Wenn immer möglich sollte diese Montagetechnik bevorzugt werden.
2. Durch diese Art der Montage wird der nutzbare Temperaturbereich des Beschleunigungsaufnehmers nicht eingeschränkt.
3. Geeignet für sehr hohe Schwingungspegel.

Nachteile:

1. Die Vorbereitung der Oberfläche an der Meßstelle sowie das Bohren und Gewindeschneiden können zeitaufwendig sein.

Anmerkungen:

1. Eine dünne Schicht Silikonfett zwischen Aufnehmerbasis und Montagefläche wird das Hochfrequenzverhalten verbessern, besonders wenn die Oberfläche nicht völlig glatt ist.
2. Das empfohlene Drehmoment für die Montage des Beschleunigungsaufnehmers hängt von der Größe der Stiftschraube ab. Für die normale 10-32 UNF-Schraube beträgt es 1,8 Nm, für die kleinere M3-Stahlschraube 0,60 Nm. Anziehen von bloßer Hand scheint zunächst einmal kaum ausreichend ($\approx$0,3 Nm), obwohl die Einbuße im Frequenzgang des Beschleunigungsaufnehmers nur gering ist, wenn er mit festem Griff angezogen wurde. Nur bei Untersuchungen im Bereich höchster Frequenzen ist es wirklich notwendig, einen Schraubenschlüssel zur Befestigung des Beschleunigungsaufnehmers zu verwenden. Siehe Abb. 4.9.
3. Übermäßiges Drehmoment beim Anziehen mit dem Schraubenschlüssel ist unbedingt zu vermeiden, da dadurch die Stiftschraube abgerissen oder das Gewinde aus dem Beschleunigungsaufnehmer gerissen werden kann. Die Reste lassen sich dann oft nur schwer von Aufnehmer oder Meßobjekt entfernen, der Beschleunigungsaufnehmer selbst kann dadurch zerstört werden.
4. Die Stiftschraube darf keinesfalls Kontakt mit dem Boden des Sackloches im Beschleunigungsaufnehmer haben. Ist nämlich dadurch die Basis des Aufnehmers nicht in Kontakt mit dem Meßobjekt, sind große Meßfehler die Folge.

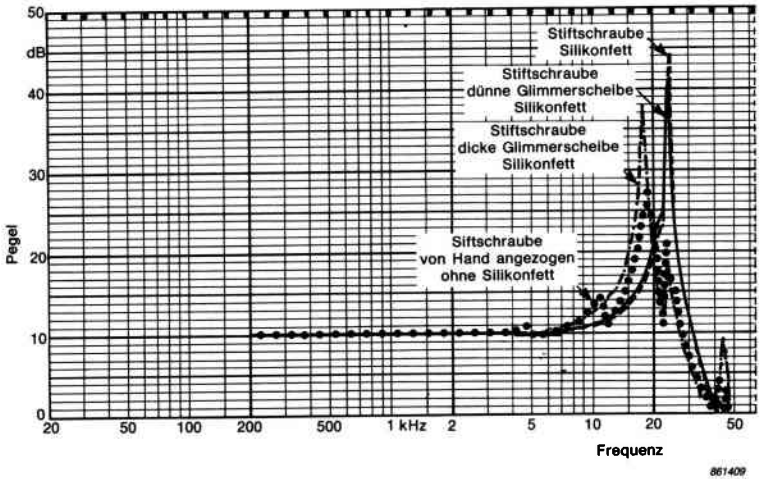


Abb. 4.9. Frequenzgang eines mit Stiftschraube montierten Universal-Beschleunigungsaufnehmers für verschiedene Montagetechniken

5. Wegen der Gefahr von Erdschleifen bei der Schwingungsmessung, besonders bei Vielstellen-Meßeinrichtungen an großen Maschinen, ist es manchmal erforderlich, den Beschleunigungsaufnehmer von der Oberfläche des Meßobjektes elektrisch zu isolieren. Dazu verwendet man entweder einen Beschleunigungsaufnehmer mit elektrisch isolierter Basis oder eine Glimmerscheibe YO 0534 oder YO 0746 zusammen mit einer isolierenden Stiftschraube YP 0150. Die zwischengelegte Glimmerscheibe setzt allerdings die Resonanzfrequenz des Beschleunigungsaufnehmers in montiertem Zustand herab, besonders bei Temperaturen oberhalb 80 °C, da dann Kriechen in der Stiftschraube auftreten kann. Jedenfalls sollte für gute mechanische Kopplung die Glimmerscheibe so dünn wie möglich sein.
6. Der Miniatur-Beschleunigungsaufnehmer Typ 4374 ist nicht zur Montage mit Stiftschraube konstruiert. Bei diesem Aufnehmer ist eine andere Befestigungsmethode anzuwenden.
7. Der Hochbeschleunigungsaufnehmer Typ 8309 trägt eine feste Montageschraube mit Gewinde M5.
8. Industrie-Beschleunigungsaufnehmer sind mit Schrauben zu montieren.

4.4.5. Klebewachs

Montage:

1. Die Montagefläche muß so glatt wie möglich sein. Ebenso ist sicherzustellen, daß die Basis des Beschleunigungsaufnehmers frei von Fettresten und anderen Verschmutzungen ist.
2. Ein kleines Stück des mit dem Beschleunigungsaufnehmer mitgelieferten Klebewachses YJ0216 ist abzukratzen und durch Rollen zwischen den Fingern weich zu machen.
3. Das Wachs ist sodann auf die Oberfläche des Meßobjektes zu schmieren, wobei die bedeckte Fläche über die der Aufnehmerbasis hinausgehen sollte. Die Wachsschicht sollte gerade dick genug sein, um den Spalt zwischen den beiden Oberflächen auszufüllen.
4. Der Beschleunigungsaufnehmer ist sodann auf die Meßstelle unter leichter Drehung mit Druck aufzubringen, bis es festhält. Ein wenig Praxis wird hier erforderlich sein. Siehe Abb. 4.10.

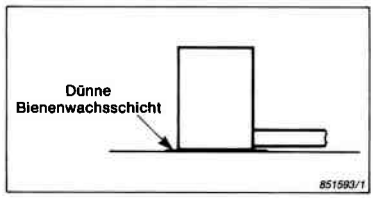


Abb. 4.10. Montage eines Miniatur-Beschleunigungsaufnehmers mit Wachs

Anwendungen:

1. Schnelle Testmessungen.
2. Messungen an Stellen, wo es nicht möglich oder nicht wünschenswert ist, ein Loch für die Stiftschraube zu bohren.
3. Montage von Beschleunigungsaufnehmern ohne Gewindeloch in der Basis.

Vorteile:

1. Schnelle und leichte Montage.
2. Die Resonanzfrequenz in motiertem Zustand liegt nur geringfügig unterhalb der für Stiftschrauben.

Nachteile:

1. Beschränkung des Temperaturbereiches auf unterhalb 40 °C.

2. Der maximal zulässige Schwingungspegel liegt bei etwa 100 ms^{-2}.

Anmerkungen:

1. Der nach oben hin enge Temperaturbereich hat seine Ursache im Erweichen des Wachses. Zunächst führt dies zu einem Absinken der Kontaktsteife und damit zu einer niedrigeren Resonanzfrequenz und schließlich zum Abfallen des Beschleunigungsaufnehmers vom Meßobjekt.

2. Eine zu dicke Wachsschicht setzt die Resonanzfrequenz in montiertem Zustand herab und engt damit den nutzbaren Frequenzbereich ein. Siehe Abb. 4.11.

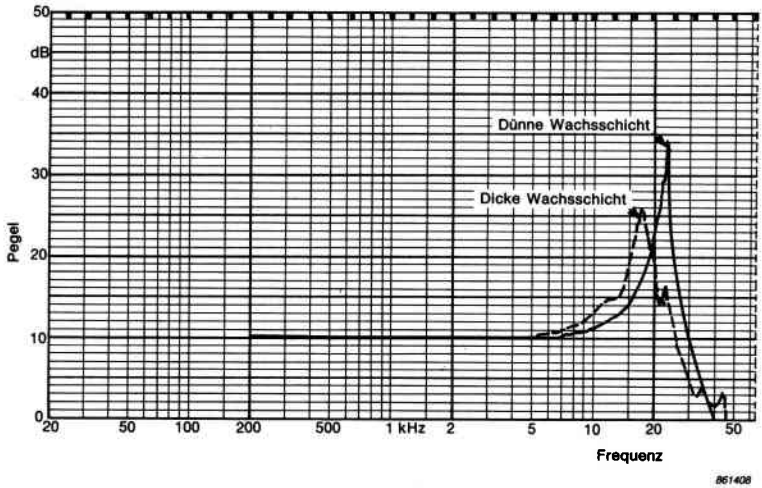


Abb. 4.11. Frequenzgang eines Universal-Beschleunigungsaufnehmers bei Montage mit Wachs

4.4.6. Haftmagnet

Montage:

1. Die Oberflächen von Testobjekt und Beschleunigungsaufnehmer müssen frei von Fett und vorspringenden Teilen sein.

2. Der Beschleunigungsaufnehmer ist auf den Haftmagnet UA 0642 aufzuschrauben und gegebenenfalls mit einem Schraubenschlüssel festzuziehen. Zur Montage von Miniatur-Beschleunigungsaufnehmern ist ein kleinerer Haftmagnet erhältlich. Durch eine dünne Schicht von Silikonfett zwischen Aufnehmerbasis und Haftmagnet sowie zwischen Haftmagnet und Meßobjekt wird das Hochfrequenzverhalten verbessert. Siehe Abb. 4.12.

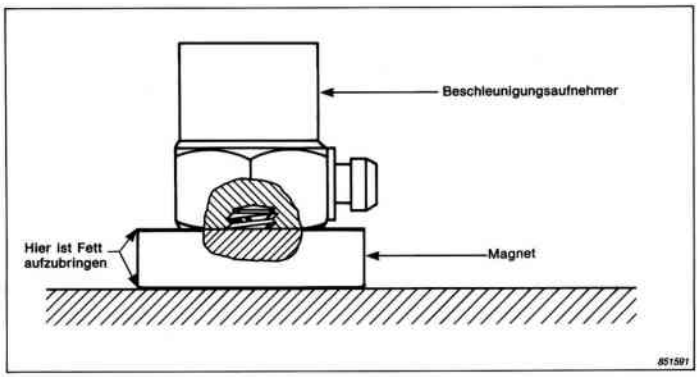


Abb. 4.12. Montage eines Beschleunigungsaufnehmers mit Haftmagnet UA 0642

Anwendungen:

1. Diese Methode ist wegen ihrer Schnelligkeit optimal für Überblicksmessungen zum Beispiel an Industriemaschinen, um die optimale Meßstelle für eine permanente Überwachung festzulegen.

Vorteile:

1. Sehr schnelle Montage.
2. In Anbetracht der offensichtlich geringen Kontaktsteifigkeit gutes Hochfrequenzverhalten, vor allem auf ebenen Oberflächen. Siehe Abb. 4.13.
3. Geeignet für hohe Beschleunigungen.

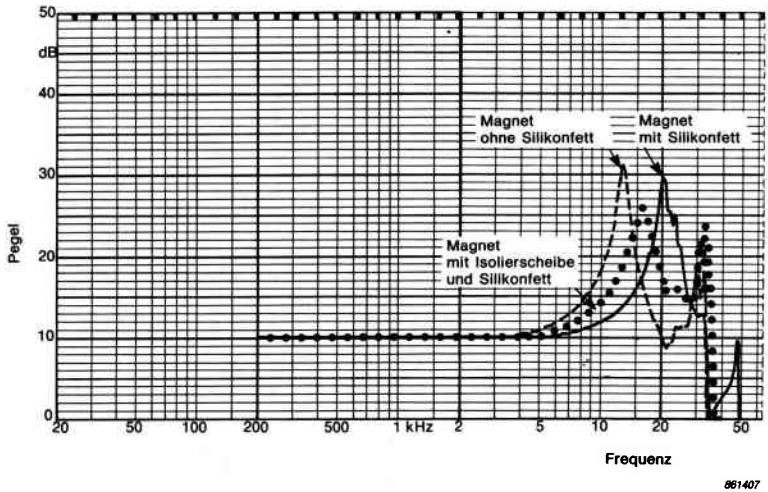


Abb. 4.13. Frequenzgang eines mit Haftmagneten montierten Universal-Beschleunigungsaufnehmers

Nachteile:

1. Die Oberfläche des Testobjektes muß ferromagnetisch sein. Anderenfalls kann eine ferromagnetische Scheibe oder Platte auf die Struktur geklebt oder geschraubt werden.
2. Die exakte Wiederauffindbarkeit des Meßpunktes bei späteren Messungen ist fraglich.
3. Die Masse des Magneten belastet die Struktur zusätzlich. Dies kann ein entscheidender Nachteil bei Messungen an leichten Strukturen wie Schalen oder Platten sein. Das Gewicht des Haftmagneten UA 0642 beträgt 16 g.

Anmerkungen:

1. Es ist bei dieser Methode leicht möglich, den Beschleunigungsaufnehmer vom Testobjekt elektrisch zu isolieren. Man erreicht dies durch die selbstklebende PTFE-Scheibe UA 0634, die mit einem Magnetsatz von 5 Haftmagneten mitgeliefert wird. Die Scheibe ist zwischen Meßobjekt und Haftmagnet einzulegen.
2. Messungen sind auch an gekrümmten Oberflächen, etwa an Rohren möglich, obwohl der nutzbare Frequenzbereich mit der Oberflächenkrümmung an der Meßstelle kleiner wird.

3. Die maximale Haftkraft des Magneten variiert zwischen 35 und 60 N, abhängig von den Bedingungen an der Oberfläche und vom eventuellen Einsatz einer isolierenden Scheibe. Der maximal zulässige Schwingungspegel hängt demzufolge vom Gewicht der Kombination von Haftmagnet und Beschleunigungsaufnehmer ab. Für die verschiedenen Aufnehmertypen von Brüel & Kjær kann dieser Grenzwert den Datenblättern der Aufnehmer entnommen werden. So kann zum Beispiel ein 17 Gramm schwerer Aufnehmer bis zu einer Beschleunigung von 1,2 km^{-2} eingesetzt werden, ein 175 Gramm schwerer Aufnehmer nur bis zu 0,2 kms^{-2}

4.4.7. Doppelseitig klebende Haftscheibe

Montage:

1. Die Oberflächen von Meßobjekt und Beschleunigungsaufnehmer müssen fettfrei sein.
2. Der Schutzfilm ist von der Haftscheibe abzuziehen, die Haftscheibe ist fest auf den Beschleunigungsaufnehmer zu drücken. Siehe Abb. 4.14.
3. Der Beschleunigungsaufnehmer ist auf der Oberfläche des Meßobjektes anzubringen.

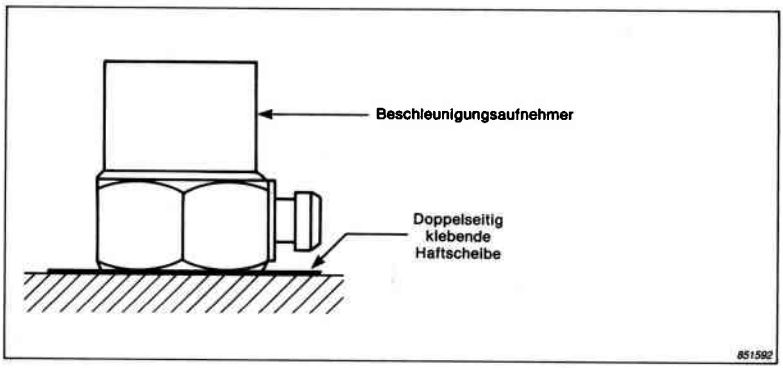


Abb. 4.14. Montage eines Beschleunigungsaufnehmers mit doppelseitig klebender Haftschelbe

Anwendungen:

1. Schnelle Testmessungen.
2. Messungen an Stellen, wo es nicht möglich oder wünschenswert ist, ein Loch für die Stiftschraube zu bohren.
3. Montage von Beschleunigungsaufnehmern ohne Gewindeloch in der Basis.

Vorteile:

1. Schnelle Montage mit recht gutem Hochfrequenzverhalten, geeignet für hohe Beschleunigungspegel.
2. Elektrisch isolierte Montage.

Nachteile:

1. Begrenzungen bei hohen und tiefen Temperaturen.

Anmerkungen:

1. Doppelseitig klebende Haftscheiben sind in zwei Größen erhältlich — 40 mm Durchmesser (DU 0079) und 5,5 mm Durchmesser (YO 0073). Die kleinere Ausführung wird in Packungen zu 25 Stück geliefert, sie ist zur Montage von Miniatur-Beschleunigungsaufnehmern vorgesehen. Die größere wird

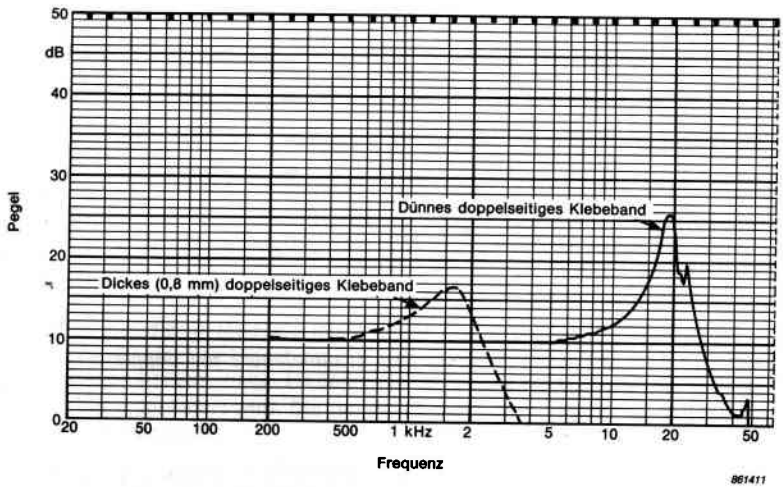


Abb. 4.15. Frequenzgang eines mit doppelseitig klebender Haftscheibe montierten Universal-Beschleunigungsaufnehmers

als Einzelstück geliefert; sie ist geeignet, auch den größten Beschleunigungsaufnehmer in jeder Richtung zuverlässig so festzuhalten, daß ein zufriedenstellendes Hochfrequenzverhalten sichergestellt ist. Siehe Abb. 4.15. Es soll aber darauf hingewiesen werden, daß hier wie auch bei allen anderen Montagemethoden die mit der Stiftschraubenbefestigung erzielbaren Optimaleigenschaften nur annähernd erreicht werden können.

2. Doppelseitig klebendes Band ist zur Aufnehmermontage ebenfalls geeignet. Man erzielt gute Resultate, vorausgesetzt, das Klebeband ist hinreichend dünn. Bei sehr dicken Bändern werden die Eigenschaften im Bereich hoher Frequenzen verschlechtert.

4.4.8. Kleber

Zur Aufnehmermontage mit Hilfe von Klebern gibt es grundsätzlich zwei Methoden.

Direktes Aufkleben

Montage:

1. Die Oberfläche an der Meßstelle muß möglichst glatt und frei von Verunreinigungen sein.
2. Der Beschleunigungsaufnehmer ist mit einem schnellhärtenden Cyanoacrylat-Kleber am Meßobjekt zu befestigen, die Anleitung zur Verarbeitung des Klebers ist dabei zu beachten. Siehe Abb. 4.16.

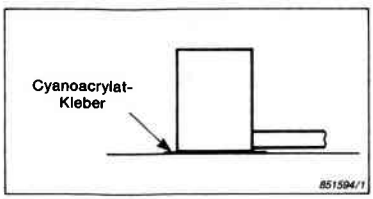


Abb. 4.16. Ankleben eines Miniatur-Beschleunigungsaufnehmers mit Cyanoacrylat-Kleber

Anwendungen:

1. Diese Befestigungsart ist vor allem bei Miniatur-Beschleunigungsaufnehmern allgemein üblich.
2. Permanente Schwingungsüberwachungssysteme, wenn eine Stiftschraubenmontage nicht möglich ist.

Vorteile:

1. Hervorragendes Verhalten im Bereich hoher Frequenzen und hoher Schwingungspegel.

Nachteile:

1. Die Entfernung des Beschleunigungsaufnehmers vom Meßobjekt ist nicht immer einfach. In jedem Fall wird es notwendig sein, den Beschleunigungsaufnehmer hinterher mit einem geeigneten Lösungsmittel zu reinigen, ein manchmal recht zeitaufwendiger Prozeß.
2. Die exakte Wiederauffindbarkeit des Meßpunktes bei späteren Messungen ist fraglich.
3. Der Beschleunigungsaufnehmer ist nur schwer elektrisch zu isolieren.

Klebkopfschrauben

Montage:

1. Die Montagefläche muß glatt und fettfrei sein.
2. Die geeignete Klebkopfschraube ist auszuwählen und mit Epoxidkleber auf das Meßobjekt zu kleben. Das Aushärten des Klebers ist abzuwarten. Abhängig vom Kleber kann dies bis zu 30 Minuten dauern. Als Kleber ist Araldit® besonders zu empfehlen.
3. Der Beschleunigungsaufnehmer ist von Hand auf die Schraube zu drehen. Schraubenschlüssel sind nur mit Vorsicht zu verwenden. Siehe Abb. 4.17.

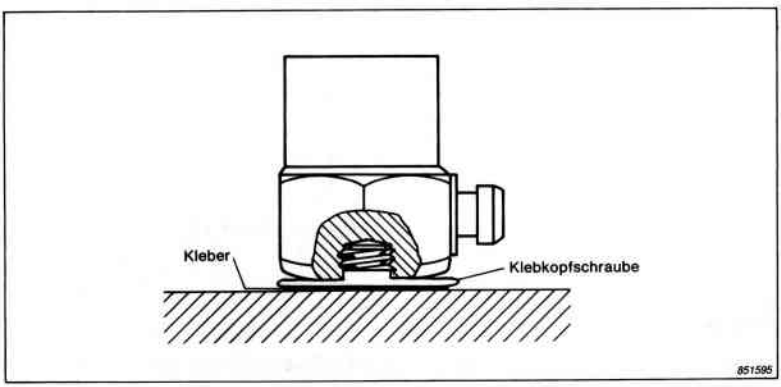


Abb. 4.17. Verwendung einer Klebkopfschraube zur Montage eines Beschleunigungsaufnehmers

Anwendungen:

1. In Vielpunkt-Überwachungseinrichtungen, wenn der Beschleunigungsaufnehmer von Meßpunkt zu Meßpunkt zu versetzen, eine hohe Reproduzierbarkeit erforderlich, eine normal Stiftschraubenmontage jedoch nicht möglich ist.

Vorteile:

1. Gute Allgemeineigenschaften.

Nachteile:

1. Zeitaufwendig (wenn Epoxidkleber verwendet werden).
2. Die Entfernung von Klebkopfschraube und Kleberresten vom Meßobjekt kann Schwierigkeiten bereiten.
3. Die elektrische Isolation ist schwierig. Ein Zwischenlegen von zwei Glasfasern unter der Klebkopfschraube kann eine gute Isolation bringen. Oder die ganze Schraube wird mit einer dünnen Epoxischicht bestrichen, die man vor dem eigentlichen Ankleben aushärten läßt.
4. Die maximal zulässige Temperatur für nach dieser Methode befestigte Aufnehmer liegt, abhängig vom verwendeten Kleber, um 80 °C. Es sind jedoch auch Kleber für Hochtemperaturanwendungen erhältlich, wie etwa 3M Cyanolite HG303, der bis 200 °C einsetzbar ist.

Anmerkungen:

1. Cyanoacrylat-Kleber können nur bei sehr glatten Oberflächen verwendet werden, weil durch Vorsprünge in rauhen oder gefrästen Flächen bei diesem Klebertyp Luftblasen enstehen können, die die Klebewirkung beeinträchtigen.
2. Epoxidkleber können verwendet werden, den Beschleunigungsaufnehmer direkt auf die Oberfläche zu kleben. Sie härten allerdings nicht so schnell aus wie Cyanoacrylat-Kleber
3. „Weiche" Kleber können **nicht** empfohlen werden, da hier die geringe Kontaktsteifigkeit eine starke Reduktion des nutzbaren Frequenzbereiches nach sich zieht. Siehe Abb. 4.18. „Weiche" Kleber weisen zusätzlich auch noch schlechtere Hochtemperatureigenschaften auf.
4. Geeignete Methyl-Cyanoacrylat-Kleber sind 3M Cyanolite 101 und Permabond 747, die von Brüel & Kjær unter der Bestellnummer QS 0007 erhältlich sind. Sie können bei Temperaturen zwischen –50 °C und 80 °C verwendet werden. Andere geeignete Kleber sind Eastman (Kodak) 910 MHT oder Loctite IS.

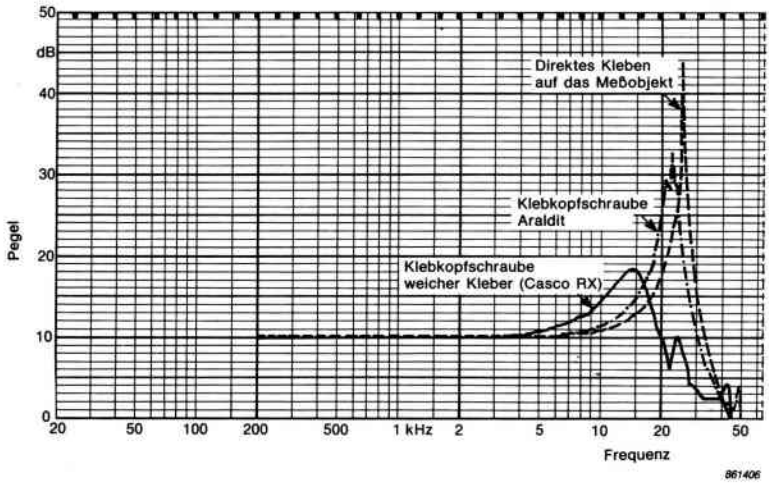


Abb. 4.18. Frequenzgang eines mit Kleber montierten Universal-Beschleunigungsaufnehmers

5. Ein Schraubenschlüssel zur Befestigung des Beschleunigungsaufnehmers auf der Klebkopfschraube sollte nur mit größter Vorsicht verwendet werden. Erfahrungen haben gezeigt, daß sonst beim Entfernen des Beschleunigungsaufnehmers oft nicht der Aufnehmer abgeschraubt wird sondern die Klebkopfschraube von der Oberfläche wegbricht. Die fest im Beschleunigungsaufnehmer sitzende Klebkopfschraube wird jetzt nur sehr schwer zu entfernen sein.

6. Es sind drei Typen von Klebkopfschrauben erhältlich. DB 0756 mit 14 mm Durchmesser und DB 2790 mit 25 mm Durchmesser tragen eine 10-32 UNF-Schraube, passend für die meisten Beschleunigungsaufnehmer von Brüel & Kjær. Erstere ist unter der Bestellnummer UA 0866 als Satz von 25 Stück erhältlich. Die Version DB 0757 mit 8 mm Durchmesser hat eine Schraube vom Gewinde M3. Sie ist erhältlich als Satz von 25 Stück (UA 0867).

4.4.9. Tastsonden*

Montage:

1. Der Beschleunigungsaufnehmer ist auf das 10-32 UNF-Gewinde der Tastsonde YP 0080 aufzuschrauben. Siehe Abb. 4.19.
2. Die Spitze der Sonde wird ein wenig in Silikonfett getaucht und dann auf die schwingende Oberfläche gedrückt, wobei darauf zu achten ist, daß die Sonde senkrecht angehalten und ein Gleiten der Spitze vermieden wird.

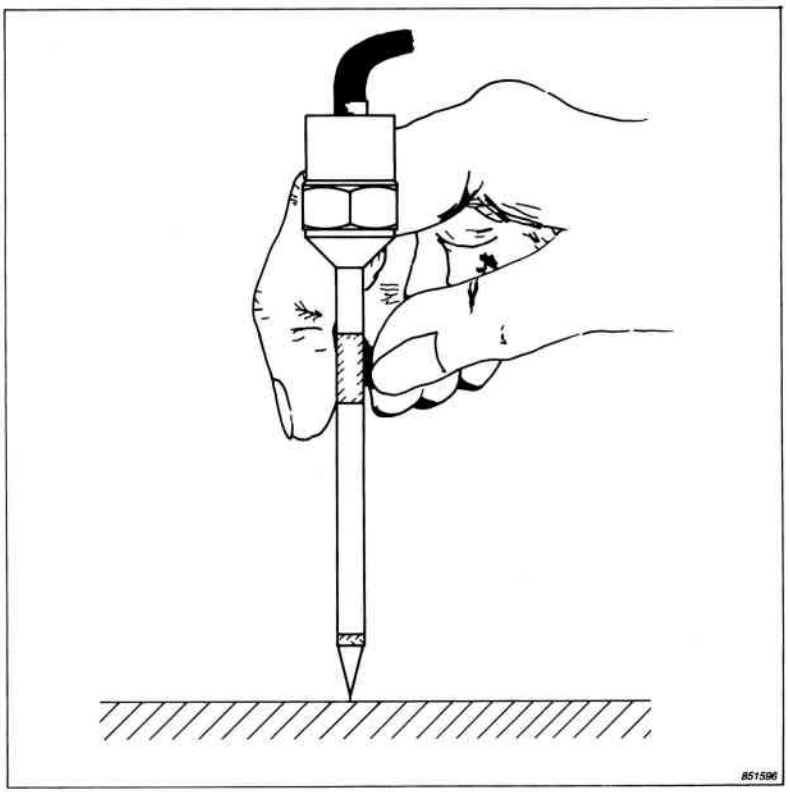


Abb. 4.19. Verwendung der Tastonde YP 0080 für schnelle Schwingungsmessungen

* Bei Messungen mit Tastsonden müssen die Grenzen dieser Methode immer in Betracht gezogen werden.

Anwendungen:

1. Nur für schnelle Testmessungen unterhalb 1000 Hz.

Vorteile:

1. Die schnellste aller Montagetechniken.

Nachteile:

1. Die Resonanzfrequenz fällt bei dieser Methode so stark ab, daß sie im Frequenzbereich der meisten Schwingungen zu liegen kommt und damit das Resultat der ganzen Messung in Frage stellt. Zusammen mit solchen Sonden ist daher immer die Einschaltung eines entsprechenden Tiefpaßfilters zu empfehlen. Siehe Abb. 4.20.
2. Sehr mangelhafte Reproduzierbarkeit

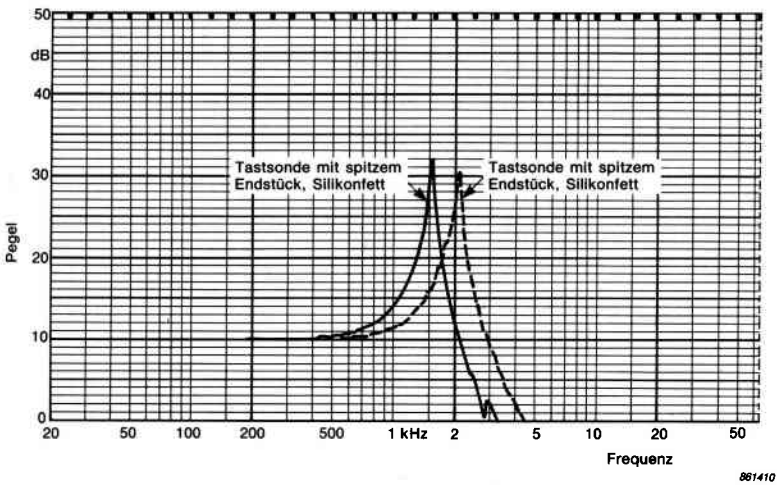


Abb. 4.20. Frequenzgang eines Universal-Beschleunigungsaufnehmers mit Tastsonde YP 0080

Anmerkungen:

1. Die Anwendung von Silikonfett ist ein Versuch, die Kontaktsteifigkeit anzuheben. Eine geringfügige Erweiterung des Frequenzbereiches erzielt man mit dem runden Endstück der Sonde (DB 0544).
2. Eine umgekehrte Tastsonde ähnlich der in Abb. 4.21 gezeigten kann für Schwingungsmessungen an unzugänglichen Stellen konstruiert werden. Eine abgerundete Klebkopfschraube kann dabei als Kontaktstück verwen-

det werden. Verglichen mit der zuerst vorgestellten Tastsonde zeigt diese Variante ein verbessertes Frequenzverhalten. Siehe Abb. 4.22.

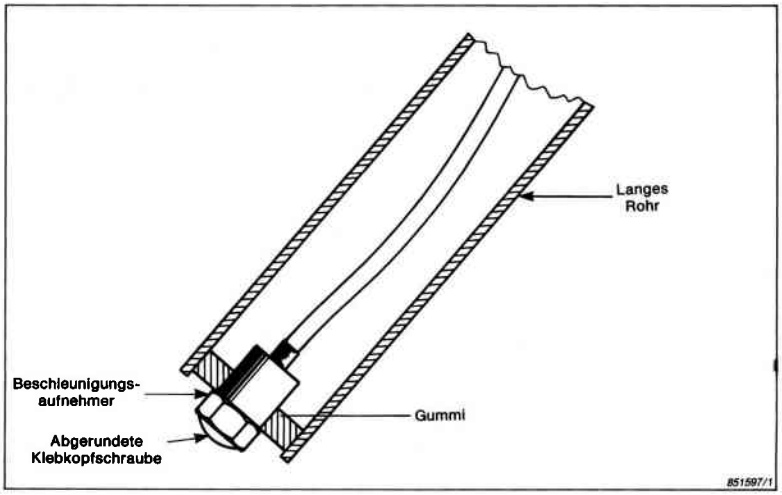


Abb. 4.21. Umgekehrte Tastsonde. Durch den Gummieinsatz wird das Rohr der Tastsonde entkoppelt. Die abgerundete Klebkopfschraube gewährleistet guten Kontakt mit dem Meßobjekt.

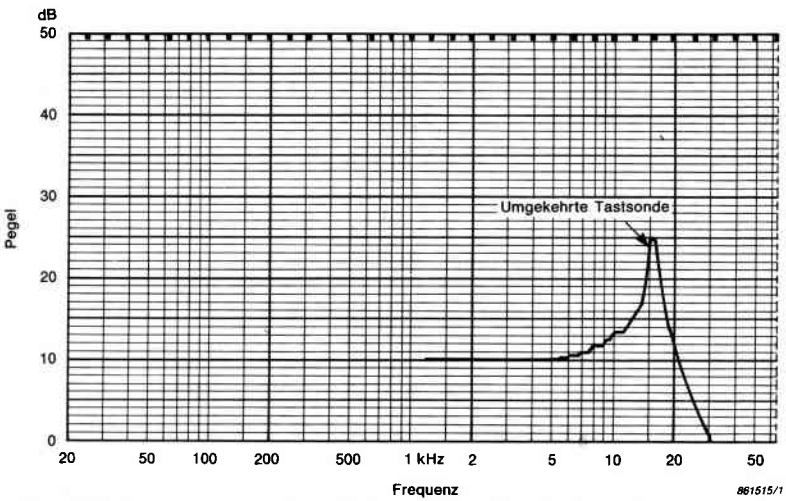


Abb. 4.22. Frequenzgang eines Universal-Beschleunigungsaufnehmers mit umgekehrter Tastsonde

4.5. MECHANISCHE FILTER

Das mechanische Filter UA 0559 ist sehr einfach in seinem Aufbau und zur Verwendung zusammen mit fast allen Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmern geeignet. Es ist lieferbar als Fünferpackung UA 0553.

Im folgenden eine kurze Liste von Anwendungsfällen mechanischer Filter:

1. Messung von tieffrequenten Schwingungen mit niedrigem Pegel, die von hochfrequenten Komponenten mit hohem Pegel „maskiert" werden.
2. Schutz des Beschleunigungsaufnehmers vor Zerstörung durch extreme Schocks und Vermeidung von Nullpunktverschiebungen.
3. Elektrische Isolation des Beschleunigungsaufnehmers vom Meßobjekt.
4. Festlegung einer definierten oberen Grenzfrequenz, was besonders bei Vorverstärkern ohne eingebaute Filter von Bedeutung ist.
5. Unterdrückung des Einflusses von Querschwingungen.

4.5.1. Beschreibung

Das mechanische Filter UA 0559 ist in Abb. 4.23 dargestellt. Es hat einen massiven, korrosionsfesten Basiskörper aus rostfreiem Stahl mit einer 10-32 UNF-Gewindebohrung zur Montage am Testobjekt und einer 10-32 UNF-Schraube an der Oberseite zur Befestigung des Beschleunigungsaufnehmers. Der Oberteil ist an den Kern aus Butylgummi geklebt und durch diesen von der Basis zuverlässig elektrisch isoliert. Gleichzeitig wirkt dieser Kern als Tiefpaßfilter zwischen Struktur und Beschleunigungsaufnehmer. Durch die seitliche Bohrung kann ein Drehstift geführt werden, der Basis und Oberteil während der Montage gegeneinander fixiert, was den Gummikern vor übermäßiger Torsion schützt. Dies gilt sowohl für die Befestigung des Beschleunigungsaufnehmers auf das Filter wie auch für die Montage der Kombination auf das Meßobjekt. Im letzteren Fall wird ein Anzugsdrehmoment von 1,8 Nm (15 lb in) empfohlen.

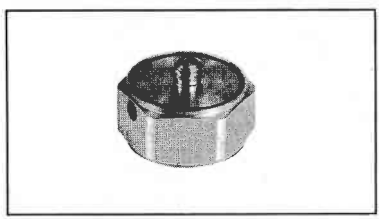


Abb. 4.23. Mechanisches Filter UA 0559

4.5.2. Wirkungsweise

Der Einfluß des mechanischen Filters auf Hauptachsen- und Querempfindlichkeit ist in Abb. 4.24 deutlich zu sehen. Es arbeitet als Tiefpaßfilter, wodurch die Resonanzen sowohl in Hauptachsen- wie auch in Querrichtung abgeschwächt werden. Während beim Beschleunigungsaufnehmer allein im Resonanzbereich eine Empfindlichkeitserhöhung von etwa 30 dB gegenüber dem Nominalwert auftritt, zeigt die Kombination mit dem mechanischen Filter eine stark gedämpfte Resonanz von lediglich etwa 3 bis 4 dB Überhöhung mit einem anschließenden Abfall von 40 dB/Dekade. Ein weiterer Vorteil ist die durch Zusatzmassen zwischen Beschleunigungsaufnehmer und Filter justierbare obere Grenzfrequenz. Die Empfindlichkeit gegenüber Querschwingungen wird in ähnlichem Ausmaß reduziert.

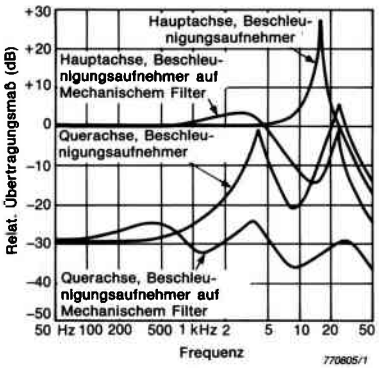


Abb. 4.24. Typische Haupt- und Querrichtungsempfindlichkeit eines auf dem mechanischen Filter montierten Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmers

Da die Filtereigenschaften von Steifigkeit und Dämpfungsverhalten des Gummis abhängen, kommt eine Temperaturabhängigkeit in das System. Bei niedriger Temperatur steigt die Steifigkeit des Gummikerns und entsprechend die Resonanzfrequenz an, begleitet von einer abnehmenden Dämpfung. Bei hohen Temperaturen sinkt die Steifigkeit und damit Resonanzfrequenz ab, begeleitet ebenfalls von einem Abnehmen der Dämpfung. Die genannten Charakteristiken sind in Abb. 4.25 dargestellt.

Soll das mechanische Filter in einer Umgebung eingesetzt werden, in der mit Verschmutzung durch Öl oder andere Kohlenwasserstoffe gerechnet werden muß, empfiehlt sich die Abdichtung von Oberseite und Drehstiftbohrungen mit einer entsprechend widerstandsfähigen Silikon-Dichtmasse.

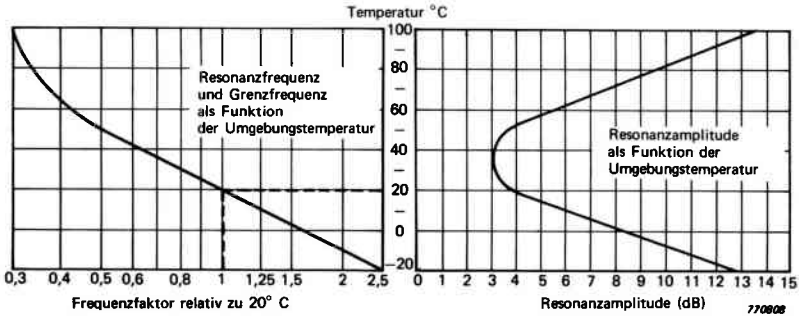


Abb. 4.25. Typischer Temperaturgang des mechanischen Filters UA 0559

Weitere Details können den entsprechenden Brüel & Kjær-Datenblättern entnommen werden.

4.6. AUFNEHMERKABEL

Unrichtige Meßergebnisse haben ihre Ursache oft in der unsachgemäßen Montage und Verlegung des Verbindungskabels zwischen Beschleunigungsaufnehmer und Ladungsverstärker. Die Hauptursachen sind dabei folgende:

1. Wird ein Koaxialkabel Biegungen, Druck oder mechanischer Spannung ausgesetzt, kommt es an einzelnen Stellen zur momentanen Trennung zwischen Schirm und Dielektrikum. Lokale Kapazitätsänderungen treten auf, es werden sogenannte „triboelektrische" Ladungen gebildet. Bekannt ist dieser Effekt als triboelektrischer Effekt. Besonders störend kann er sich bei der Messung von Schwingungen mit niedrigem Pegel auswirken.

2. Sehr starke elektromagnetische Felder können entlang des Kabels eine Spannung induzieren, die eine zusätzliche Störkomponente im Meßsignal darstellt.

3. Bei Aufnehmern vom Kompressionstyp können Biegekräfte über den Anschlußstecker zu den piezoelektrischen Elementen übertragen werden, wenn das Kabel nicht am Schwingen gehindert wird.

Der erste der aufgezählten Effekte wird am besten durch die Verwendung spezieller Koaxialkabel in rauscharmer Ausführung reduziert. Diese Ausführung ist Standard bei sämtlichen Aufnehmerkabeln von Brüel & Kjær. Darüber hinaus sollte das Kabel weder scharf gebogen noch verdreht werden, da dadurch die rauscharmen Maßnahmen nicht nur teilweise aufgehoben sondern auch die

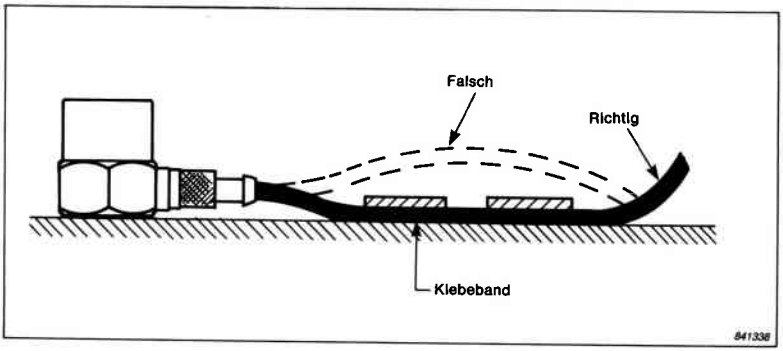


Abb. 4.26. Fixieren des Aufnehmerkabels zur Reduktion von Kabelstörungen

Anschlußstecker beschädigt werden könnten. Das Kabel sollte auf der Oberfläche befestigt werden, um übermäßige Bewegungen zu verhindern, die Anlaß zu triboelektrischen Störungen geben können. Siehe Abb. 4.26.

Der zweite Effekt wird durch sorgfältiges Verlegen des Kabels weitab von Quellen starker elektromagnetischer Felder vermieden. Ist dies nicht möglich, kann ein Ladungs-Strom-Wandler oder ein symmetrischer Beschleunigungsaufnehmer mit Spezialkabel Abhilfe schaffen. Die Vorteile dieser Systeme wurden bereits in Abschnitt 3.6 untersucht und sind in Tabelle 3.1 zusammengefaßt. Details über den symmetrischen Beschleunigungsaufnehmer Typ 8310 und den Differenz-Ladungsverstärker Typ 2634 findet man im Datenblatt über Industrie-Beschleunigungsaufnehmer.

Die meisten Beschleunigungsaufnehmerkabel von Brüel & Kjær sind mit wasserdichter Teflonummantelung ausgeführt und zum Einsatz in stark dampfhaltiger Atmosphäre geeignet. In besonders feuchter Umgebung sollte der Anschlußstecker zusätzlich mit einer bei Raumtemperatur vulkanisierender Gummimasse abgedichtet werden. Nähere Details findet man in Abschnitt 4.2.5 über Feuchtigkeitseinflüsse. Vollständige Informationen über das Angebot an Aufnehmerkabeln bei Brüel & Kjær einschließlich verrohrter und gepanzerter Ausführungen findet man in den Datenblättern über Beschleunigungsaufnehmer und Industrie-Beschleunigungsaufnehmer von Brüel & Kjær.

Beschleunigungsaufnehmer mit eingebautem Ladungs-Strom-Wandler benötigen nur ein einziges Kabel zur gleichzeitigen Versorgung und Signalübertragung. Oft werden einfache Zweileiterkabel verwendet, die preiswert sind verglichen mit den normalen, rauscharmen Aufnehmerkabeln. Man sollte jedoch bedenken, daß beim Einsatz von Beschleunigungsaufnehmern mit Ladungs-Strom-Wandler in Anwesenheit elektromagnetischer Felder Spannungen im Kabel induziert werden. Diese Spannungen entsprechen den in den Abschnitten

3.6.3, 3.6.4 und 3.6.6 behandelten Erdschleifenspannungen. Dort wurde auch gezeigt, daß die Ladungs-Strom-Wandler von Brüel & Kjær eine höhere Immunität gegenüber Erdschleifenstörungen aufweisen als Leitungstreiber mit Konstantstromversorgung. In jedem Fall ist es empfehlenswert, in rauher industrieller Umgebung für die Ladungs-Strom-Wandler Koaxialkabel zu verwenden. In weniger gestörter Umgebung kann man mit verdrillten Leiterpaaren das Auslangen finden.

4.7. ERDUNGSMASSNAHMEN

In vielkanaligen Schwingungsmeßeinrichtungen hat man oft Probleme mit kleinen Strömen, die zwischen den Erdleitern der Meßgeräte fließen. Verursacht werden sie durch Erdung an mehreren Punkten mit für die einzelnen Erdungspunkte unterschiedlichem Erdpotential.

Geerdet kann ein Gerät über den Schutzkontakt am Netzstecker werden. Das Gehäuse des Beschleunigungsaufnehmers kann ebenfalls einen Erdungspunkt bilden, wenn es in Kontakt mit einer geerdeten Struktur wie etwa einer Maschine steht. Allerdings besteht im industriellen Umfeld durchaus die Möglichkeit, daß ein Maschinengehäuse nicht auf Erdpotential liegt sondern einige Volt darüber oder darunter. Ursache kann eine schlechte Erdverbindung sein oder ein von Null verschiedenes Potential des Erdleiters.

Die Erdleiter des Verbindungskabels sind oft direkt mit dem Chassis und dem Gehäuse eines Meßgerätes verbunden, das wiederum seinerseits geerdet ist. Über Kabelabschirmungen und — wenn die Gehäuse der einzelnen Geräte untereinander der Kontakt stehen — über die Chassis können dann Erdschleifenströme zwischen den einzelnen Geräten fließen.

Erdschleifen äußern sich als ein dem Schwingungssignal überlagerter „Netzbrumm", der zu einer fehlerhaften Pegelanzeige führt. Vermieden werden sie durch „Aufbrechen" der Schleife, in der dieser Strom fließt. Dazu hat man verschiedene Möglichkeiten:

1. Die Meßanordnung darf nur an einem einzigen Punkt der ganzen Meßkette geerdet sein, die Erdverbindung muß zuverlässig sein.

2. Man wähle einen Ladungsverstärker mit der Möglichkeit, die Abschirmung des Aufnehmerkabels von der Meßerde des Vorverstärkers zu trennen. Man spricht in diesem Fall von einem „erdfreien Eingang". Hinsichtlich der eingehenden Analyse über die Entstehung von Störungen im Vorverstärker ziehe man Abschnitt 3.6 zu Rate.

3. Der Beschleunigungsaufnehmer kann mit einer isolierten Stiftschraube montiert werden, wie in Abschnitt 4.4.4 beschrieben.

Bei Industrieanwendungen empfiehlt sich der Einsatz elektrisch symmetrischer und isolierter Beschleunigungsaufnehmer in Verbindung mit einem Differenzverstärker. Bei dieser Aufnehmerkonstruktion ist die elektromagnetische Einstreuung über das Aufnehmerkabel minimal. Das zugehörige Kabel führt zwei getrennt abgeschirmte Adern. Zufolge der Symmetrie ist die Einstreuung hier gleich für beide Schirme. Der Differenz-Vorverstärker liefert ein Ausgangssignal proportional der *Signaldifferenz* in den beiden Adern, wegen der Symmetrie des Beschleunigungsaufnehmers werden die Störungsanteile zufolge elektromagnetischer Einstreuung eliminiert. Auch Erdschleifeneinflüsse werden durch einen solchen Aufbau reduziert.

5. KALIBRIEREN UND TESTEN DES BESCHLEUNIGUNGS-AUFNEHMERS

5.1. EINFÜHRUNG

Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Vielfältigkeit des piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers sind nur von begrenztem Wert, wenn die Meßergebnisse nicht in irgendeiner Weise auf einen absoluten physikalischen Standard

Calibration Chart for Accelerometer Type 4383

B K

Brüel & Kjær

Serial No. 1230172

Reference Sensitivity at 50 Hz, 100 ms^{-2} and 23 °C

Charge Sensitivity* 3,12 pC/ms^{-2} or 30,5 pC/g

Voltage Sensitivity* (incl. AO 0038) 2,75 mV/ms^{-2} or 26,9 mV/g (Voltage Preamp. input Capacitance: 3,5 pF)

Capacitance (incl. cable) 1134 pF

Typical Capacitance of cable AO 0038 110 pF

Maximum Transverse Sensitivity (at 30 Hz, 100 ms^{-2}) 1,8 %

Typical Undamped Natural Frequency 51 kHz

Typical Transverse Resonance Frequency, using Exciter Table 4290, with accelerometer mounted on a titanium cube by a 10 – 32 UNF-2A steel stud, mounting torque 1,8 Nm and greased surfaces: 10 kHz

Polarity is positive on the center of the connector for an acceleration directed from the mounting surface into the body of the accelerometer

Resistance minimum 20.000 MΩ at room temperature

Date: 86.01.10 Signature: J.A.

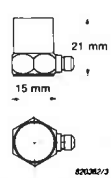
1 g = 9,807 ms^{-2} or 10 ms^{-2} = 1,02 g

* This calibration is traceable to the National Bureau of Standards Washington D.C.

BC 0163–12

Environmental:
Humidity: Welded, Sealed
Temperature Range: –74 to +250°C (–100 to +482°F)
Max. Shock Acceleration: 20 kms^{-2} peak
Typical Magnetic Sensitivity (50 Hz – 0,03 T): 1 ms^{-2}/T
Typical Acoustic Sensitivity: 0,002 ms^{-2} at 154 dB SPL (2 – 100 Hz)
Typical Base Strain Sensitivity (at 250 $\mu\epsilon$ in base plane): 0,01 $ms^{-2}/\mu\epsilon$
Typical Temperature Transient Sensitivity (3 Hz LLF): 0,1 ms^{-2}/°C
Specifications obtained in accordance with ANSI S2.11-1969

Physical:



Electrical Connector: Coaxial 10 – 32 UNF-2A

820362/3

Material: Titanium, ASTM Grade 2
Sensing Element: Piezoelectric, type PZ23
Weight: 17 gram
Construction: Delta Shear
Mounting Thread: 10 – 32 UNF-2B
Mounting Stud: 10 – 32 UNF-2A x13 mm, steel
Mounting Surface Flatness: <3 μm
Mounting Torque: Normal 1,8 Nm. Min. 0,5 Nm. Max. 3,5 Nm
Seismic Mass: 6,6 gram
Center of Gravity of Seismic Mass: 12,1 mm from mounting surface on central axis
Center of Gravity of Accelerometer: 9,2 mm from mounting surface on central axis
For further information see B&K "Piezoelectric Accelerometer and Preamplifier" handbook

Pat. DK 131401

Abb. 5.1. Das Kalibrierzeugnis: Individuelle und prototypengeprüfte Kalibrierspezifikationen

zurückzuführen sind. Es ist Zweck der Kalibrierung sicherzustellen, daß alle diese Vorzüge auch genützt werden können und damit jede Schwingungsmessung mit kalkulierbarer Zuverlässigkeit ausführbar ist. Der Aufnehmertest liefert Daten über Grenzwerte für Betriebsbereich und Umgebungsbedingungen, innerhalb derer die Kalibrierung Gültigkeit behält.

Jeder bei Brüel & Kjær hergestellte Beschleunigungsaufnehmer unterliegt strengsten Produktions- und Qualitätskontrollen, die nicht nur sicherstellen, daß der einzelne Aufnehmer zuverlässig ist und bleibt sondern auch eine geringe Streuung der Parameter innerhalb eines Typs gewährleisten. Die Beschleunigungsaufnehmer werden individuell kalibriert, die genauen Werte für die Einzelparameter stehen dem Anwender zur Verfügung.

Wenn man von Kalibrierung spricht, bezieht man sich oft nur auf die Kalibrierung des Übertragungsfaktors. In den Kalibrierdaten finden sich jedoch auch andere Parameter wie Frequenzgang, Kapazität und Gewicht sowie die Empfindlichkeit gegenüber Umgebungseinflüssen. Jeder Beschleunigungsaufnehmer wird mit einem individuellen Kalibrierzeugnis ausgeliefert, in dem die Ergebnisse der Kalibrierung ausführlich beschrieben sind. Ein Teil der Information gilt dabei individuell für den einzelnen Aufnehmer, ein anderer Teil ist dem Aufnehmertyp global zuzuordnen. Siehe Abb. 5.1, 5.2 und 5.3.

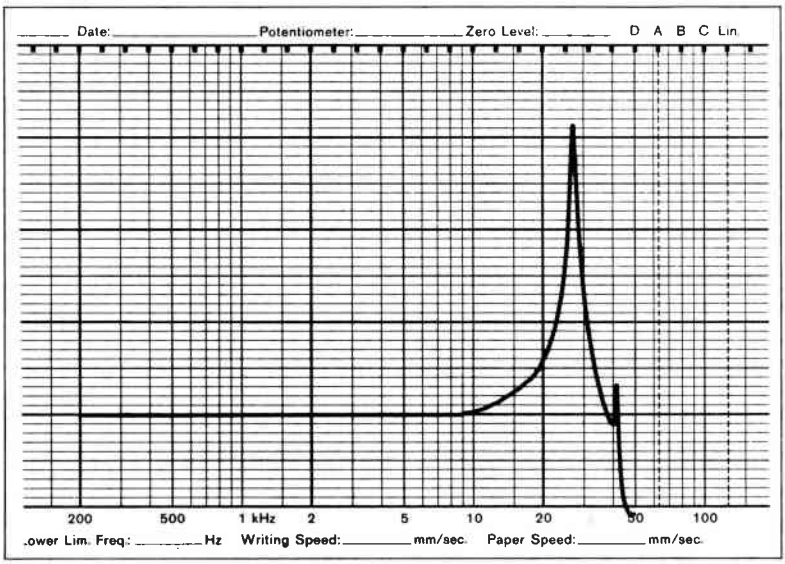
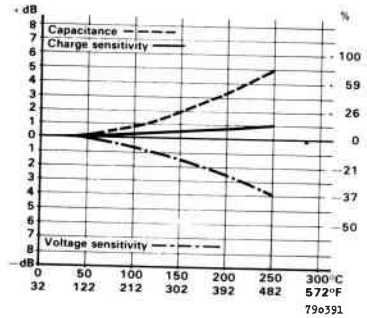
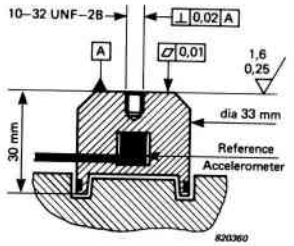


Abb. 5.2. Das Kalibrierzeugnis: Individuelle Frequenzgangkurve

Typical Temperature Sensitivity Deviation:
(Piezoelectric Material PZ23)



Schematic Drawing of Exciter 4290:
(Modified laboratory reference)



Material: Stainless steel

Mass of Exciter table: 180 gram

Mounting Technique:
Examine the mounting surface for cleanliness and smoothness.
If necessary, machine surface to tolerances shown in schematic drawing of Calibration Exciter 4290.
Fasten the 4383 using a 10 – 32 UNF-2A stud. Take care not to exceed the recommended mounting torque and that the stud does not bottom in the mounting holes.
A thin film of oil or grease between the accelerometer and the mounting surface helps achieve good contact and improves mounting stiffness.
For other types of mounting, see B&K "Piezoelectric Accelerometer and Preamplifier" handbook.

Mounted Resonance Frequency obtained on the Exiter 4290 using the recommended mounting technique is shown on the attached individual **Frequency Response Curve.**

Abb. 5.3. Das Kalibrierzeugnis: Allgemeine Informationen

Es soll nicht Aufgabe dieses Abschnittes sein, die gesamte Kalibrierprozedur Stufe für Stufe zu beschreiben. Diese Beschreibung findet man, wenn benötigt, in den Bedienungshandbüchern der hier angeführten Kalibriereinrichtungen. Was dieser Abschnitt bringen soll, ist ein umfassender Überblick über die bei Brüel & Kjær angewandten Kalibrier- und Testmethoden.

5.1.1. Warum Beschleunigungsaufnehmer kalibrieren?

Außer dem einen, eine Beziehung zu einer absoluten physikalischen Größe mit definierter Genauigkeit herzustellen, gibt es noch andere Gründe, eine Kalibrierung durchzuführen. In vielen Fällen sind es gesetzliche oder vertragliche Verpflichtungen, die einen Nachweis der Genauigkeit des Aufnehmers verlangen, unter Umständen auch mit Bezug auf internationale Standards.

Es können sich Situationen ergeben, wo der Beschleunigungsaufnehmer in einer speziellen Anordnung oder unter Umgebungsbedingungen eingesetzt wird, die durch die Angaben des Kalibrierzeugnisses nicht abgedeckt sind. In

solchen Fällen wird der Anwender genötigt sein, eine Kalibrierung unter den gegebenen Bedingungen durchzuführen. Die meisten Anwendungsfälle werden jedoch sicher innerhalb der in Kalibrierzeugnis angegebenen Grenzen liegen.

Der Systemtest ist ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt einer Kalibrierung, besonders in Meßanordnungen mit zahlreichen Einzelkomponenten. Fehler in der Berechnung des Gesamt-Übertragungsfaktors können einfach vermieden werden — durch eine kurze Kalibrierung der vollständigen Meßkette. In Abschnitt 5.3.5 wird auf diese Frage noch näher eingegangen.

Es ist immer ratsam, vor der eigentlichen Kalibrierung den Frequenzgang des Beschleunigungsaufnehmers nachzuprüfen. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, daß der Aufnehmer nicht zwischenzeitlich in irgendeiner Weise beschädigt worden ist. Beschädigungen zeigen sich als Irregularitäten im Frequenzgang des Beschleunigungsaufnehmers, aus denen geschlossen werden kann, daß der Aufnehmer entweder unbrauchbar oder zumindest nur mit eingeschränktem Frequenzbereich verwendbar ist. Die frühere Kalibrierung hat in diesen Fällen ihre Gültigkeit allerdings verloren. Die Messung des Frequenzganges eines Beschleunigungsaufnehmers wird in Abschnitt 5.4.2 behandelt.

5.2. DIE HIERARCHIE DER KALIBRIERSTANDARDS

5.2.1. Die allgemeine Hierarchie

Um die Notwendigkeit einer absoluten Kalibrierung jedes einzelnen Beschleunigungsaufnehmers hintanzuhalten, hat man eine Hierarchie von Aufnehmer-Bezugsnormalen eingeführt. Eine Hierarchie dieser Art ist in Abb. 5.4 dargestellt.

Aufnehmer-Bezugsnormale werden in drei Gruppen eingeteilt:

1. **Primäre Aufnehmer-Bezugsnormale:** Eine Kalibriermethode, die den Übertragungsfaktor eines Aufnehmers direkt in fundamentalen oder abgeleiteten physikalischen Einheiten wie etwa SI-Einheiten liefert, wird definitionsgemäß als *absolute* Methode bezeichnet. Ein auf solche Weise kalibrierter Aufnehmer ist ein primäres Aufnehmer-Bezugsnormal und steht an der Spitze dieser Hierarchie. Solche Aufnehmer befinden sich bei internationalen oder nationalen Standardisierungsinstitutionen sowie in den Labors, die solche Kalibrierungen ausführen.

2. **Aufnehmer-Bezugsnormale für den Transfer:** Diese Aufnehmer werden von den oben genannten Instituten und Labors kalibriert, entweder mit einer *Vergleichsmethode* über ein primäres Aufnehmer-Bezugsnormal oder mit einer absoluten Methode.

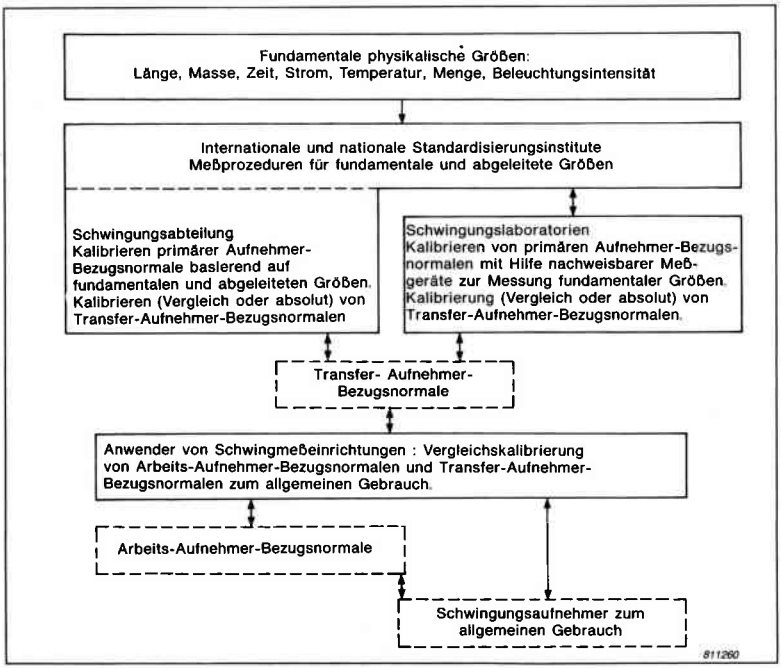


Abb. 5.4. Eine allgemeine Hierarchie von Kalibrierstandards

Aufnehmer-Bezugsnormale für den Transfer werden unter den Standardinstituten ausgetauscht und nachkalibriert, was die Konsistenz innerhalb dieser Institutionen gewährleistet. Auch die Konsistenz mit den zur Kalibrierung beauftragten Labors wird durch Tausch und Nachkalibrieren solcher Aufnehmer zwischen diesen Labors und einem Standardisierungsinstitut gewährleistet. Auf diese Weise wird überdies eine *Nachweisbarkeit* erzielt. Diese Nachweisbarkeit stellt sicher, welches Standardisierungsinstitut für die Konsistenz der in einem Kalibrierlabor durchgeführten Kalibrierung letztenendes verantwortlich ist. Der von diesem Labor kalibrierte Aufnehmer wird als „nachweisbar" zu diesem Standardisierungsinstitut geführt.

3. **Arbeits-Aufnehmer-Bezugsnormale:** Diese Aufnehmer werden als Bezugsnormal bei der Aufnehmerkalibrierung mit Vergleichsverfahren im Alltagsbetrieb verwendet. Arbeits-Aufnehmer-Bezugsnormale werden von den Standardisierungsinstitutionen oder den Kalibrierlabors mit absoluten oder mit Vergleichsverfahren kalibriert. Sie werden dabei mit Transfer-Aufnehmer-Bezugsnormalen verglichen. Auf diese Weise erhält man auch die Nachweisbarkeit der Kalibrierung des letztendlich zur Messung eingesetzten Aufnehmers.

5.2.2. Die Hierarchie bei Brüel & Kjær

Bei Brüel & Kjær beginnt die Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern mit dem Aufnehmer-Bezugsnormal Typ 8305, siehe Abb. 5.5.

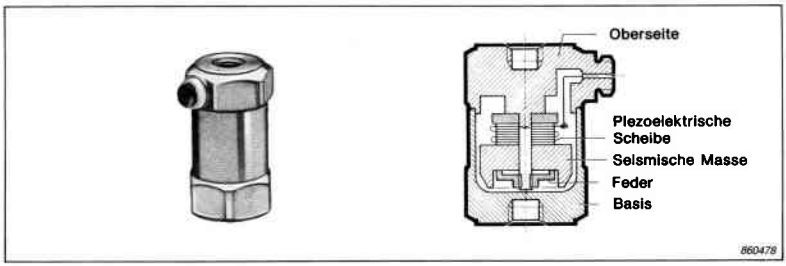


Abb. 5.5. Das Aufnehmer-Bezugsnormal Typ 8305

Typ 8305 ist ein piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer vom Kompressionstyp mit Überkopfanordnung. Als piezoelektrisches Element wird ein sorgfältig ausgewählter und vorbereiteter Quarzkristall PZ 100 verwendet, der wegen seiner geringen Empfindlichkeit gegen Temperatureinflüsse und seiner hervorragenden Langzeitstabilität ausgewählt wurde. Der Aufnehmer besitzt zwei gegenüberliegende Montageflächen mit Gewindebohrung, wodurch die Montage des zu kalibrierenden Aufnehmers zur Rücken-an-Rücken-Kalibrierung möglich ist (siehe Abschnitt 5.3.3).

Jeder Beschleunigungsaufnehmer dieses Typs wird mit einem Laser-Interferenzverfahren absolut kalibriert (siehe Abschnitt 5.3.1). Der Kalibriersatz Typ 3506, bestehend aus einem Aufnehmer Typ 8305 und einem Ladungsverstärker Typ 2626, wird als Satz mit der Laser-Interferenzmethode zusätzlich kalibriert (siehe Abb. 5.6).

Von Brüel & Kjær werden zu bestimmten Zeiten jeweils zwei Kalibriersätze Typ 3506 an das National Bureau of Standards (NBS) in den Vereinigten Staaten gesandt. Diese Transfer-Bezugsnormale werden dabei nicht per Post sondern durch Boten befördert. Diese Prozedur gewährleistet die Konsistenz der Laser-Kalibrierung von Brüel & Kjær für alle Aufnehmer-Bezugsnormale Typ 8305 mit Nachweisbarkeit zum NBS.

Ein Satz primärer Aufnehmer-Bezugsnormale für Beschleunigungsaufnehmer ist zusammen mit Ersatznormalen in Dänemark als Sicherheit bei Zerstörung irgendeines Aufnehmer-Bezugsnormals vorhanden.

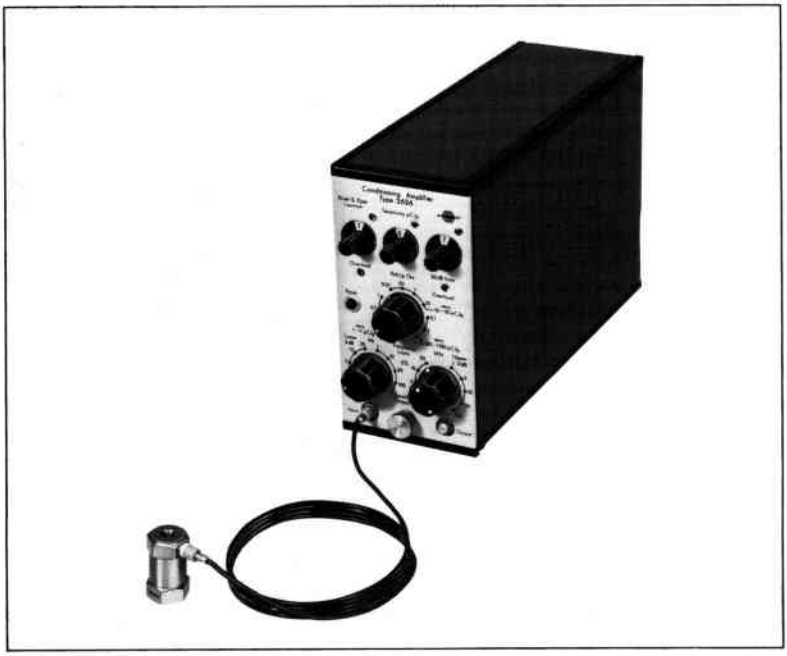


Abb. 5.6. Der Kalibriersatz Typ 3506

Alle übrigen bei Brüel & Kjær gefertigten Beschleunigungsaufnehmer werden in einem halbautomatischen Verfahren mit der Rücken-an-Rücken-Vergleichsmethode unter Verwendung von Typ 8305 kalibriert, was für den Einsatz dieses Aufnehmer-Bezugsnormals für die Alltagsarbeit nur als Empfehlung gelten kann.

Zur Kalibrierungsüberprüfung sind Transfer-Aufnehmer-Bezugsnormale weltweit bei verschiedenen Servicezentren von Brüel & Kjær und anderen Kalibrierlabors vorhanden. Alle Typen von Kundenaufnehmern werden hier nach der Rücken-an-Rücken-Methode mit der Kalibriereinrichtung Typ 9559 kalibriert (siehe Abschnitt 5.7.1). Mit diesem System können auch andere Parameter kalibriert werden.

Brüel & Kjær hat auf diese Weise eine geschlossene Hierarchie für Kalibrierungen aufgebaut, durch welche die Kalibrierung nicht nur im Zuge der Fertigung sondern auch noch Jahre nach dem Verkauf eines Beschleunigungsauf-

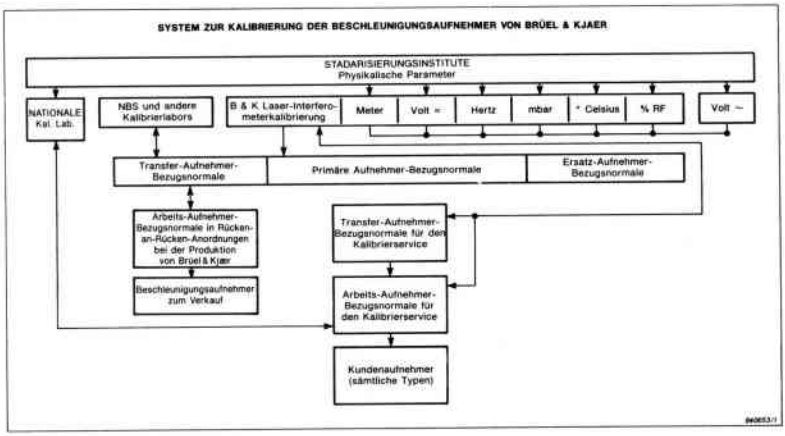


Abb. 5.7. Die Hierarchie der Kalibrierung bei Brüel & Kjær

nehmers kontrolliert werden kann, wobei die Nachweisbarkeit für jeden einzelnen Aufnehmer erhalten bleibt. In Abb. 5.7 ist diese Hierarche noch einmal zusammenfassend dargestellt.

5.2.3. Die Genauigkeit einer Kalibriertechnik

Es ist wichtig, den Unterschied zwischen Nachweisbarkeit und Genauigkeit richtig zu verstehen. Nachweisbarkeit bedeutet lediglich die Konsistenz mit der von einem Standardisierungsinstitut durchgeführten Kalibrierung und daß die Werte innerhalb bestimmter Toleranzen liegen. Führt demnach ein Kalibrierlabor die Kalibrierung mit genaueren Instrumenten aus als das Standardisierungsinstitut, werden auch seine Ergebnisse besser sein.

Damit die Genauigkeitsangaben verschiedener Kalibriermethoden auch auswertbar sind, müssen diese Angaben in konsistenter Form erfolgen. Bei Brüel & Kjær erfolgen sie nach dem British Calibration Service Guidance Document No. 3003. In diesem Dokument ist eine Methode beschrieben, jedem Meßwert einen einzigen (±)-Wert als Genauigkeitsangabe zuzuordnen mit Angabe der Wahrscheinlichkeit, daß der wahre Wert auch innerhalb dieser (±)-Toleranz liegt. Bei den Unsicherheiten der Kalibrierung ist zwischen zwei grundsätzlich verschiedenen Anteilen zu unterscheiden:

a) statistische Unsicherheit
b) systematische Unsicherheit

Die bei absoluten und bei Vergleichsmethoden auftretenden Unsicherheiten sollen jetzt kurz untersucht werden.

Absolute Methode: Mit Hilfe der Laser-Interferometrie kann die Amplitude einer Schwingung theoretisch mit einer Genauigkeit von 0,02% gemessen werden. In der Praxis treten jedoch noch Fehler auf bei der Spannungsmessung (0,1%), durch Verzerrungen in der Bewegung des Schwingtisches (0,1%), bei der Ausrichtung des Bezugsaufnehmers (0,2%) und durch Querbewegungen des Bezugsaufnehmers (0,1%). Die Genauigkeit einer absoluten Kalibrierung mit dem Kalibriersatz Typ 3506 läßt sich mit 0,6% bei einer Zuverlässigkeit von 99% berechnen.

Vergleichsmethode: Diese Methode wird vom NBS zur Überprüfung der Transfer-Aufnehmer-Bezugsnormale von Brüel & Kjær eingesetzt. Brüel & Kjær selbst verwendet sie zur Kalibrierung der gefertigten Beschleunigungsaufnehmer. Die geschätzte Genauigkeit liegt hier besser als 0,95%. Dazu ist jetzt noch die Unsicherheit bei der oben beschriebenen absoluten Kalibrierung des Kalibriersatzes Typ 3506 zu addieren, was schließlich einen Gesamtfehler von 1,12% mit einer Zuverlässigkeit von 99% ergibt.

Die genannten Zahlen basieren auf dem im Hause Brüel & Kjær eingesetzten Laser-Kalibriersystem, einem absoluten Kalibriersystem. Das bei NBS verwendetet Vergleichssystem liefert eine Genauigkeit von 1%. Mit den Werten von NBS für die Genauigkeit von Typ 3506 steigt der geschätzte Gesamtfehler auf 1,38% mit einer Zuverlässigkeit von 99%.

5.3. METHODEN DER KALIBRIERUNG

Zur Kalibrierung des Übertragungsfaktors unterscheidet man zwischen drei Methoden

1. Absolute Methoden: Laser-Interferometrie und Reziprozitätstechniken.

2. Vergleichsmethoden: Rücken-an-Rücken-Kalibrierung.

3. Kalibratoren: Schwingerreger mit bekanntem Schwingungspegel.

5.3.1. Laser-Interferometrie

Für diese absolute Kalibriermethode benötigt man sehr spezielle Einrichtungen, was die Anwendung durch den Benützer eines Beschleunigungsaufnehmers unwahrscheinlich erscheinen läßt.

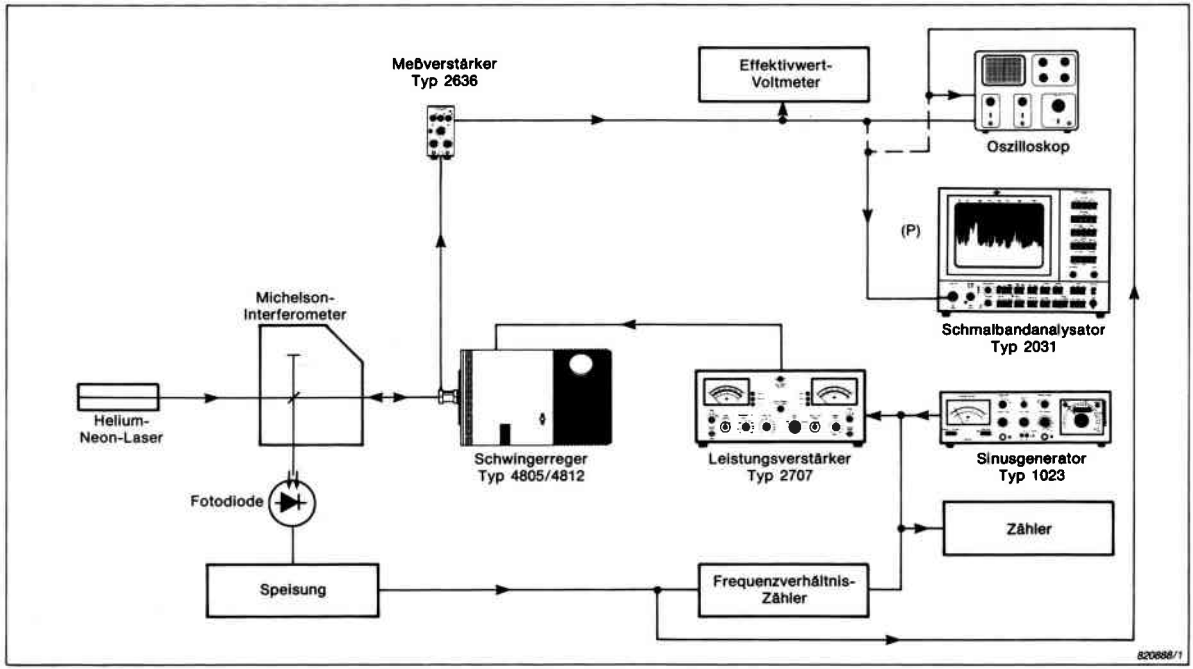


Abb. 5.8. Das von Brüel & Kjær eingesetzte Laser-Interferometer

Abb. 5.8 zeigt die bei Brüel & Kjær zur Kalibrierung des Aufnehmer-Bezugsnormals Typ 8305 und des Kalibriersatzes Typ 3506 verwendete Einrichtung.

Die Meßanordnung ist um ein Michelson-Interferometer aufgebaut. Der Laserstrahl ist auf die Deckfläche des zu kalibrierenden Aufnehmer-Bezugsnormals gerichtet, von wo er auf dem gleichen Weg reflektiert wird. Im Weg des reflektierten Strahls liegt als Strahlteiler der halbdurchlässige, ebene Spiegel des Interferometers. Er lenkt einen Teil des vom Aufnehmer reflektierten Lichtstrahls auf eine Fotodiode. Ein anderer Teil des Laserstrahls erreicht die Fotodiode über den Strahlteiler und den festen Spiegel des Interferometers. Durch Interferenz entstehen dort Helligkeitsschwankungen, abhängig von der Position des Aufnehmers. Das Ausgangssignal des Fotodiodenverstärkers wird einem Frequenzverhältnis-Zähler zugeführt, der die Anzahl der Auslöschungen je Periode zählt, die direkt proportional der Spitze-Spitze-Auslenkung des Beschleunigungsaufnehmers ist.

Das Steuersignal für die Schwingung (eine Sinusschwingung) wird von einem Sinusgenerator geliefert und gleichzeitig als externes Taktsignal für den Frequenzverhältnis-Zähler verwendet. Die Schwingungsamplitude wird auf den korrekten Wert eingestellt. Der elektrische Ausgang des Aufnehmer-Bezugsnormals wird über einen Ladungsverstärker und ein Effektivwertvoltmeter gemessen, die beide elektrisch kalibriert wurden.

Das Laser-Interferometer in dieser Anordnung mißt die Spitze-Spitze-Auslenkung von Typ 8305. Über die am Frequenzzähler abgelesene Frequenz läßt sich daraus die Beschleunigung berechnen. Den Übertragungsfaktor erhält man schließlich nach Messung des elektrischen Ausgangs des Beschleunigungsaufnehmers und Division durch die Beschleunigung.

Bei Brüel & Kjær wird zur Erregung eine Frequenz von 160 Hz und ein Beschleunigungspegel von $10\,ms^{-2}$ verwendet.

5.3.2. Andere Absolutmethoden

Es gibt noch andere Methoden zur absoluten Kalibrierung. Sie werden allerdings von Brüel & Kjær nicht verwendet und sollen daher an dieser Stelle nur kurz erwähnt werden.

1. Reziprozitätskalibrierung: Bis vor kurzem war diese Methode in der Brüel & Kjær-Literatur als absolute Methode vorgeschlagen worden, die von jedermann nur mit einer Grundausrüstung, also ohne Spezialgeräte ausgeführt werden kann. Das Verfahren ist allerdings recht verwickelt, gute Resultate sind nur schwer zu erzielen. Sie wird in diesem Handbuch nicht näher beschrieben.

2. Kalibrierung mit der Schwerkraft: Bei diesem Verfahren wird der Beschleunigungsaufnehmer sorgfältig um eine horizontale Achse gedreht, so daß auf ihn lediglich die Schwerkraft wirkt, und zwar einmal in positiver, einmal in negativer Hauptachsenrichtung. Es ist allerdings nur für sehr niedrige Frequenzen praktikabel und wird manchmal für statische Beschleunigungsaufnehmer eingesetzt. Bei Brüel & Kjær wird es demzufolge nicht praktiziert.

5.3.3. Vergleichskalibrierung mit der „Rücken-an-Rücken"-Methode

Die Rücken-an-Rücken-Methode wird bei Brüel & Kjær zur Werkskalibrierung aller Beschleunigungsaufnehmertypen eingesetzt. Brüel & Kjær verwendet ein halbautomatisches System, wie es ähnlich von jedem Anwender aufgebaut werden kann, der eine eigene Vergleichskalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern durchführen will.

Der Beschleunigungsaufnehmer, dessen Übertragungsfaktor gemessen werden soll, wird in einer Rücken-an-Rücken-Anordnung mit dem Aufnehmer-Bezugsnormal Typ 8305 montiert, die ganze Kombination wird sodann auf einen passenden Schwingerreger gesetzt. Die Beschleunigung ist bei dieser Anordnung gleich für beide Aufnehmer, das Verhältnis der Ausgangspegel entspricht daher dem Verhältnis ihrer Übertragungsfaktoren.

Die Schwingerreger Typ 4801 oder 4805 mit Kalibrierkopf Typ 4815 sind speziell zur Rücken-an-Rücken-Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern konstruiert. Typ 4815 hat das Aufnehmer-Bezugsnormal Typ 8305 bereits eingebaut. Mehr Information findet man in den Datenblättern dieser Geräte.

Abb. 5.9 zeigt die Rücken-an-Rücken-Anordnung in der einfachsten Form. Die Beschleunigungsaufnehmer werden mit einer Schwingung konstanter Frequenz

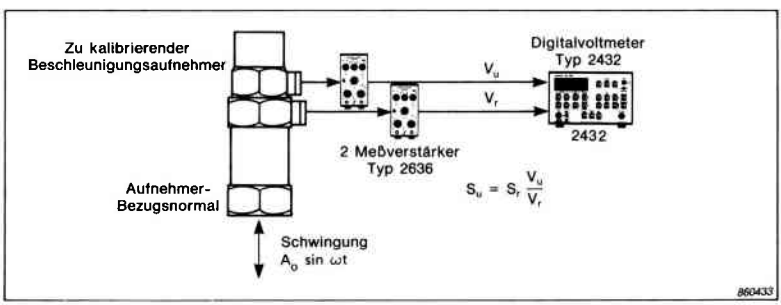


Abb. 5.9. Einfache Anordnung zur Rücken-an-Rücken-Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern. Das Aufnehmersignal wird über einen Vorverstärker dem Voltmeter zugeführt

erregt, ihre Ausgangssignale werden über Vorverstärker (Ladungs- oder Spannungs-Vorverstärker, je nachdem, ob der Ladungs- oder der Spannungs-Übertragungsfaktor von Interesse ist) einem hochwertigen elektronischen Voltmeter mit bekannter Genauigkeit zugeführt.

Über eine erweiterte Spannungs-Meßeinrichtung, den Aufnehmerkomparator Typ 2970, kann die Leistungsfähigkeit dieses Systems gesteigert werden (siehe Abb. 5.10). Die Empfindlichkeit des Vorverstärkers im Pfad des zu kalibrierenden Beschleunigungsaufnehmers ist jetzt solange zu verstellen, bis der Zeigerausschlag von Typ 2970 minimal wird. Der Übertragungsfaktor kann dann einfach an den Einstellknöpfen des Vorverstärkers abgelesen werden.

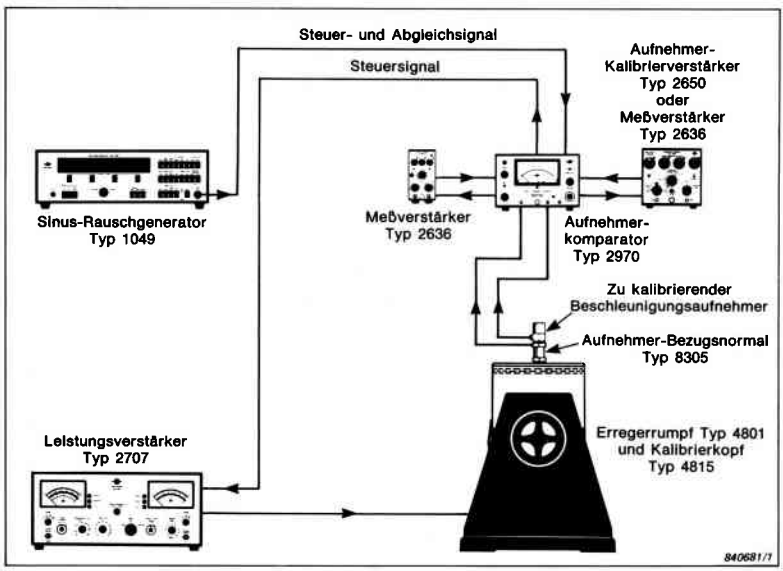


Abb. 5.10. Vollständiges Kalibriersystem zur hochgenauen Rücken-an-Rücken-Kalibrierung, basierend auf dem Aufnehmerkomparator Typ 2970

Typ 2970 übernimmt in dieser Anordnung folgende Rollen:

1. Vereinfachung des Vergleichs der Ausgangssignale.

2. Beschleunigung der Prozedur.

3. Kalibrierung mit einer Genauigkeit ähnlich der der Werkskalibrierung von Brüel & Kjær und der Kalibrierung durch NBS.

4. Spannungs-Ladungsumsetzung für Spannungs- und Ladungskalibrierung.

Frequenz und Beschleunigungspegel bei der Kalibrierung können entsprechend dem zu erfüllenden Standard variiert werden. Brüel & Kjær kalibriert mit einer Frequenz von 160 Hz bei einem Pegel von 100 ms^{-2}. Typ 2970 kann nur im Frequenzbereich 60 bis 250 Hz verwendet werden.

In der Praxis spielt es nur wenig Rolle, bei welcher Frequenz und welchem Pegel ein Beschleunigungsaufnehmer kalibriert wird, vorausgesetzt, die Werte liegen im normalen Arbeitsbereich des Aufnehmers. Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer zeigen nämlich ein außerordentlich streng lineares Verhalten sowohl im Frequenz- wie auch im Dynamikbereich. In Abschnitt 2.6.1 wurde gezeigt, daß der Ladungs-Übertragungsfaktor (und die Kapazität) eines Universal-Beschleunigungsaufnehmers von Brüel & Kjær mit den piezoelektrischen Werkstoffen PZ 23 und PZ 27 mit steigender Frequenz um 2.5% pro Dekade abnimmt, was für die Berechnung des Übertragungsfaktors bei anderen Frequenzen herangezogen werden kann. So beträgt z.B. der Unterschied für 50 Hz und 160 Hz ungefähr 1,3%.

Bei der Messung des Spannungs-Übertragungsfaktors ist zu bedenken, daß dieser nur für die Kombination von Beschleunigungsaufnehmer und Aufnehmerkabel als Ganzes gilt, daß also beide zusammen kalibriert werden müssen. Wird das Kabel gewechselt, verliert die Kalibrierung ihre Gültigkeit.

5.3.4. FFT-gestützte Rücken-an-Rücken-Kalibrierung

Eine umfassende Rücken-an-Rücken-Kalibrierung läßt sich sehr schnell mit Hilfe eines FFT-Analysators ausführen. Der Schwingerreger wird jetzt mit Breitbandrauschen gespeist. Die Ausgangssignale von Aufnehmer-Bezugsnormal und zu kalibrierendem Beschleunigungsaufnehmer werden an die beiden Eingänge des Zweikanal-Signalanalysators Typ 2032 oder 2034 von Brüel & Kjær angeschlossen. Aus der vom Analysator gemessenen Übertragungsfunktion können nach ausreichender Mittelung Übertragungsfaktor und Phasengang relativ zum Aufnehmer-Bezugsnormal über einen weiten Frequenzbereich abgelesen werden.

Wie bei jedem Kalibriersystem hängt die Genauigkeit der Kalibrierung von der Genauigkeit jedes einzelnen Gerätes in der Anordnung ab, aber auch von der Genauigkeit des Aufnehmer-Bezugsnormals im gesamten Frequenzbereich, also auch bei Frequenzen, bei denen es selbst nicht kalibriert worden war (160 Hz). Für weitere Informationen über diese Technik wenden Sie sich bitte an Ihr zuständiges Brüel & Kjær-Büro.

5.3.5. Die Prüfung des Übertragungsfaktors mit kalibrierten Schwingerregern

Die bequemste und verbreitetste Methode, den Übertragungsfaktor zu prüfen, ist der Test mit einem kalibrierten Schwingerreger. Brüel & Kjær bietet ein eigens für diesen Zweck entwickeltes Gerät an. Jedermann, der Schwingungsmessungen durchführt, kann auch diese Methode einfach anwenden.

Schwingerreger für Kalibrierzwecke Typ 4294: Dieses kleine, batteriegespeiste, einfach in jeder Tasche zu transportierende Gerät ist ein kalibrierter Schwingerreger. Es liefert eine Schwingung mit einem festen Beschleunigungspegel von $10\,ms^{-2}$ effektiv bei einer Frequenz von 159,2 Hz (1000 rads/s) entsprechend einer effektiven Schwinggeschwindigkeit von $10\,mms^{-1}$ und einem effektiven Schwingweg von $10\,\mu m$. Die Genauigkeit ist besser als $\pm 3\%$. Ideal ist dieses Gerät für den Systemtest vor Ort. Abb. 5.11 zeigt, wie eine Überprüfung des Übertragungsfaktors eines Beschleunigungsaufnehmers mit Typ 4294 und einem Meßverstärker in der Praxis aussieht.

Typ 4294 kann für zwei Aufgaben eingesetzt werden:

1. Prüfung des Übertragungsfaktors von Beschleunigungsaufnehmern
2. Einstellung und Kalibrierung eines Meßsystems.

Zur Überprüfung des Übertragungsfaktors eines Beschleunigungsaufnehmers wird dieser einfach am Erregerkopf montiert, die Ausgangsspannung am angeschlossenen Vorverstärker wird gemessen. Dazu genügt bereits ein gutes Voltmeter.

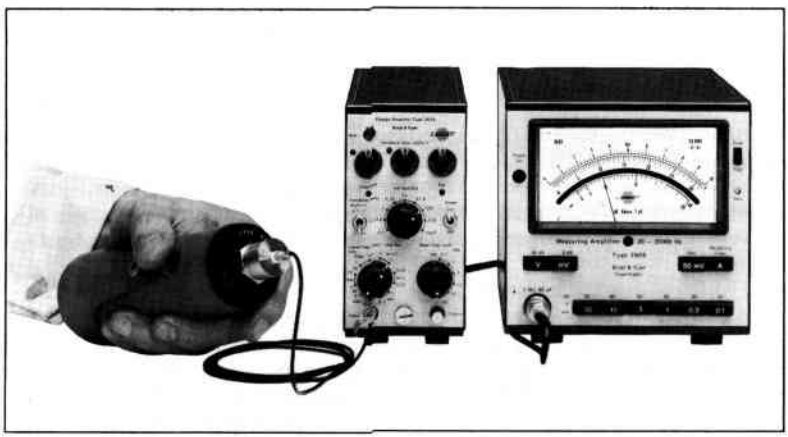


Abb. 5.11. Schwingerreger für Kalibrierzwecke Typ 4294

Sehr empfehlenswert ist der Einsatz von Typ 4294 zur Kalibrierung einer ganzen Meßkette, vom Beschleunigungsaufnehmer bis zum Analysator. Gemessen wird jetzt der Übertragungsfaktor des Gesamtsystems, unabhängig von den Einstellungen der einzelnen Geräte in der Kette.

Zusätzlich kann bei der Gesamtkalibrierung die Verstärkung eines bestimmten Gerätes z.B. auf Vollausschlag für den vom Schwingerreger gelieferten Referenzpegel einjustiert werden.

5.4. DIE MESSUNG ANDERER PARAMETER VON BESCHLEUNIGUNGSAUFNEHMERN

Der Übertragungsfaktor eines Beschleunigungsaufnehmers ist mit Sicherheit der in der Praxis am meisten verwendete Aufnehmerparameter. Er ist jedoch bei weitem nicht der einzige Parameter, dessen Kenntnis als Grundlage für genaue Schwingungsmessungen anzusehen ist. Individuell gemessene Informationen werden noch für folgende Parameter von Interesse sein:

1. Querempfindlichkeit
2. Frequenzgang
3. Resonanzfrequenz in montiertem Zustand
4. Kapazität

Die meisten dieser Paramter werden bei Brüel & Kjær für jeden einzelnen Beschleunigungsaufnehmer im Zuge der Produktion gemessen.

Die quantitative Erfassung von Umgebungseinflüssen wird in Abschitt 5.5 behandelt.

5.4.1. Querempfindlichkeit

Bei Brüel & Kjær wird die Querempfindlichkeit mit Hilfe eines speziellen Schwingtisches ähnlich dem in Abb. 5.12 gezeigten gemessen. Die Platte, auf der der Beschleunigungsaufnehmer befestigt ist, wird in horizontaler Richtung zu Schwingungen von 100 ms^{-2} Beschleunigung bei einer Frequenz von 30 Hz angeregt und dabei gleichzeitig langsam um ihre vertikale Achse gedreht. Die Richtung der auf den Beschleunigungsaufnehmer wirkenden Querbeschleunigung wird durch diese Anordnung variiert. Das Ausgangssignal des Beschleunigungsaufnehmers wird gemessen, der Maximalwert der Querempfindlichkeit bestimmt. Die Richtung minimaler Querempfindlichkeit wird dabei bei den meisten Aufnehmern durch einen roten Punkt markiert.

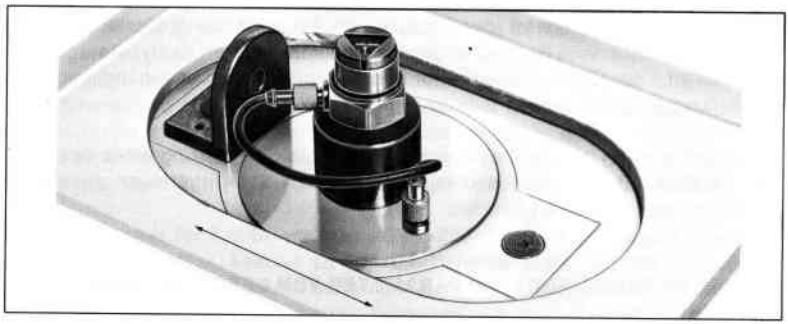


Abb. 5.12. Spezieller Schwingerreger ähnlich dem bei Brüel & Kjær zur Bestimmung der Querempfindlichkeit verwendeten

5.4.2. Frequenzgang

Abb. 5.13 zeigt eine Meßanordnung, wie sie ähnlich bei Brüel & Kjær zur Messung des Frequenzganges aller Beschleunigungsaufnehmer ausgenommen der Miniaturtypen eingesetzt wird.

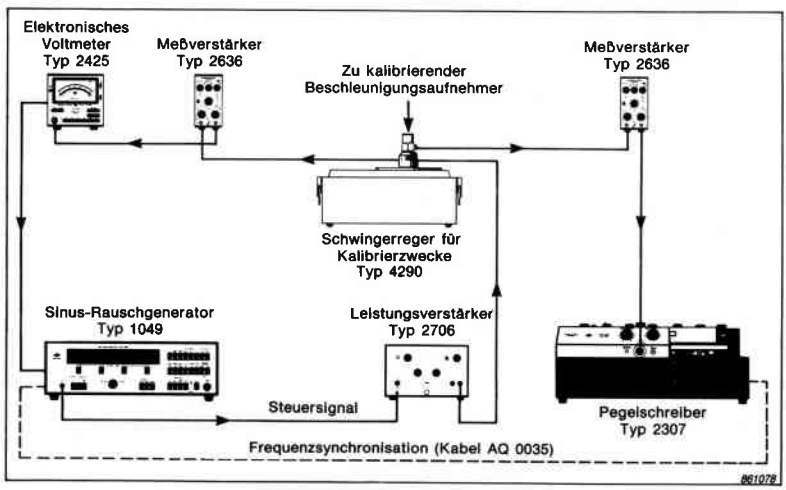


Abb. 5.13. Meßanordnung zur Bestimmung des Frequenzganges eines Beschleunigungsaufnehmers

Abb. 5.14. Schwingerreger für Kalibrierzwecke Typ 4290

Der Schwingerreger für Kalibrierzwecke Typ 4290 (siehe Abb. 5.14) wird vom Frequenzgenerator über einen Frequenzbereich von 200 Hz bis 50 kHz betrieben. Der bewegte Teil von Typ 4290 ist ein Kopf aus Stahl von 180 g Masse mit einer sorgfältig gefertigten Montagefläche mit Gewindebohrung, die eine optimale Aufnehmermontage gewährleistet

Über ein Rückkopplungssignal (Kompressorschleife) wird die Beschleunigung des Kopfes über den gesamten Frequenzbereich konstant gehalten. Ein im Kopf eingebauter Miniatur-Beschleunigungsaufnehmer liefert das der aktuellen Beschleunigung entsprechende Signal. Es wird in den Kompressorteil des Generators eingespeist und zur Regelung der Ausgangsspannung des Generators in der Weise verwendet, daß der Beschleunigungspegel am Kopf über der Frequenz konstant bleibt. Das Ausgangssignal des zu kalibrierenden Beschleunigungsaufnehmers wird über einen Vorverstärker dem Pegelschreiber zugeführt.

Mit Ausnahme der Miniaturaufnehmer und von Typ 8310 ist jedem Beschleunigungsaufnehmer von Brüel & Kjær eine nach der in dieser Weise gemessene individuelle Frequenzgangkurve beigelegt. Die im Kalibrierzeugnis angegebene

Resonanzfrequenz in montiertem Zustand kann in diesem Diagramm identifiziert werden. Da man daraus die Werte für jede beliebige Frequenz entnehmen kann, fällt die Beschränkung auf feste Frequenzgrenzen fort.

Wenn man den Frequenzgang eines Beschleunigungsaufnehmers mit dieser Technik mißt, sollte man folgende Punkte beachten:

1. Kritisch ist die Montage des Beschleunigungsaufnehmers auf dem Erregerkopf. Eine schlechte Montage kann zu Fehlern in der Frequenzgangkurve führen. Weitere Details findet man in Abschnitt 4.4.

2. Ein konstanter Beschleunigungspegel am Erregerkopf kann nur bei ausreichender Verstärkung in der Rückkopplungsschleife (Kompressorschleife) aufrecht erhalten werden. Es ist ratsam zu kontrollieren, ob die Beschleunigung auch wirklich über den gesamten Frequenzbereich während der Messung konstant bleibt. Dazu führt man das Ausgangssignal des Beschleunigungsaufnehmers in der Rückkopplung über seinen Vorverstärker dem Pegelschreiber zu und stellt sodann die Verstärkung am Vorverstärker und die Regelgeschwindigkeit am Generator den Erfordernissen entsprechend ein. Beschrieben ist diese Methode im Bedienungshandbuch von Sinusgenerator oder Regelverstärker.

3. Oberhalb 30 kHz sinkt die Genauigkeit, mit der der Kompressor die Beschleunigung am Erregerkopf konstant hält, schnell ab. Dennoch kann mit dieser Anordnung die Resonanzfrequenz in montiertem Zustand bis zu 50 kHz zuverlässig kontrolliert werden.

5.4.3. Ungedämpfte Eigenfrequenz

Für die Schwingungsmessung hat dieser Parameter nur geringe praktische Bedeutung. Dennoch ist er im Kalibrierzeugnis angegeben, da er zu den fundamentalen Parametern eines Beschleunigungsaufnehmers zu rechnen ist. Zu seiner Messung gibt es zwei Methoden:

Der Beschleunigungsaufnehmer wird an seinem Kabel aufgehängt und elektrisch von einer Spannungsquelle, angekoppelt über einen Kondensator von 1 nF erregt. Die ungedämpfte Resonanzfrequenz ist als die Frequenz definiert, bei der Spannung und Strom im Beschleunigungsaufnehmer phasengleich sind. Eine Näherung erhält man mit der Frequenz, bei der die Spannungen an Kondensator und Beschleunigungsaufnehmer gegeneinander um 90° phasenverschoben sind. Am einfachsten läßt sich dies mit einer Anordnung ähnlich der von Abb. 5.15 bestimmen, indem man beide Spannungen auf einem Oszilloskop zur Anzeige bringt. Ist die Erregerfrequenz gleich der Resonanzfrequenz, wird die Lissajousfigur zu einem Kreis.

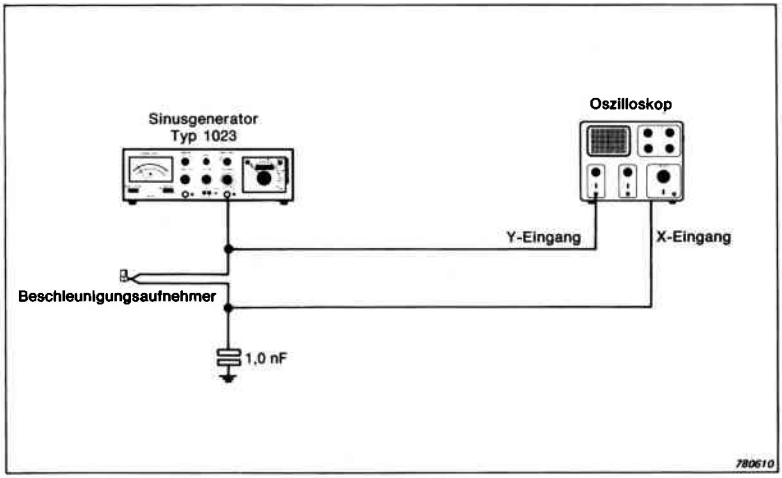


Abb. 5.15. Einrichtung zur Messung der ungedämpften Resonanzfrequenz eines Beschleunigungsaufnehmers

Bei der zweiten Methode wird wieder der Beschleunigungsaufnehmer an seinem Kabel aufgehängt, die Anregung erfolgt jetzt jedoch mit einem Schock durch leichtes Klopfen gegen seine Basis. Das Aufnehmersignal wird über einen Vorverstärker einem Speicheroszilloskop zugeführt, wo der Verlauf der abklingenden Schwingung sichtbar wird. Die Periode einer Schwingung wird am Oszilloskop ausgemessen, ihr Reziprokwert ist gleich der gesuchten ungedämpften Resonanzfrequenz.

5.4.4. Kapazität

Die Kapazität eines Beschleunigungsaufnehmers kann als Verhältnis von Ladungs- zu Spannungs-Übertragungsfaktor definiert und auf diese Weise aus den beiden Kalibrierwerten berechnet werden. Damit erhält man diesen Wert allein aus dem Kalibrierzeugnis.

Wird die Kapazität bei einer Frequenz von 1000 Hz mit Hilfe einer Kapazitäts-Meßbrücke gemessen, wird man ein gegenüber dem zuvor berechneten Wert unterschiedliches Resultat erhalten. Der Grund liegt in der mit 2,5% je Frequenzdekade abfallenden Kapazität piezoelektrischer Elemente.

Die typische Kapazität, die im Kalibrierzeugnis angegeben ist, schließt den Einfluß des mitgelieferten oder integrierten Aufnehmerkabels mit ein. Um dar-

aus die Kapazität des Beschleunigungsaufnehmers allein zu berechnen, ist lediglich die Kapazität des Kabels zu subtrahieren. Ein typischer Wert für die Kabelkapazität ist ebenfalls dem Kalibrierzeugnis zu entnehmen.

5.5. BESTIMMUNG DER UMGEBUNGSEINFLÜSSE AUF DIE SPEZIFIKATIONEN EINES BESCHLEUNIGUNGSAUFNEHMERS

Im Kalibrierzeugnis eines Beschleunigungsaufnehmers sind auch Daten über die Umgebungseinflüsse auf den Aufnehmer angegeben. Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den Methoden, wie diese Einflüsse bei Brüel & Kjær meßtechnisch erfaßt werden.

5.5.1. Temperatursprungempfindlichkeit

Zur Messung dieses Parameters wird der Beschleunigungsaufnehmer auf einem Aluminiumblock montiert, dessen Masse etwa das Zehnfache der des Aufnehmers beträgt. Diese Kombination wird sodann langsam in einen Behälter mit Wasser von einer Temperatur von etwa 25 °C über der Raumtemperatur getaucht. Dabei wird sorgfältig darauf geachtet, keine Schwingungen im Beschleunigungsaufnehmer anzuregen.

Der Vorverstärker wird auf eine untere Grenzfrequenz von 3 Hz mit einer Flankensteilheit von 6 dB/Octave gesetzt. Der Spitzenwert des Ausgangssignals des Beschleunigungsaufnehmers wird mit einem Speicheroszilloskop gemessen. Der für dieses Ausgangssignal notwendige Beschleunigungswert wird aus dem Übertragungsfaktor des Beschleunigungsaufnehmers berechnet. Nach Division durch die Temperaturdifferenz erhält man daraus die gesuchte Temperatursprungempfindlichkeit.

5.5.2. Temperaturempfindlichkeit

Ist bei einer Schwingungsmessung deutlich abseits der Raumtemperatur eine Genauigkeit von besser als 1 oder 2 dB erforderlich, ist es ratsam, die im Kalibrierzeugnis gegebene Information zur Berechnung einer Korrektur des Übertragungsfaktors des Beschleunigungsaufnehmers heranzuziehen. Diese Information ist in einen Diagramm angegeben, das die Abweichung von Übertragungsfaktor und Kapazität von den bei der Kalibriertemperatur (Raumtemperatur) gewonnenen Kalibrierwerten mit der Temperatur zeigt. Spannungs-Übertragungsfaktor, Ladungs-Übertragungsfaktor und Kapazität variieren gleichermaßen mit der Umgebungstemperatur.

Für Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmer ist eine individuelle Kalibrierung der Temperaturabhängigkeit nicht notwendig, da piezoelektrische Materialien

des gleichen Typs ähnliche Abhängigkeiten zeigen. Es ist daher ausreichend, die Temperaturkurven in einem einmaligen Test zu bestimmen; diese können dann auf den Kalibrierzeugnissen aller Aufnehmer eines Typs vorgedruckt werden.

Zur Messung der Temperaturabhängigkeit wird der Beschleunigungsaufnehmer auf einem speziellen Schwingerreger mit einer in eine Klimakammer führenden Stoßstange montiert. Innerhalb der Klimakammer wird der zu kalibrierende Beschleunigungsaufnehmer auf einem am Ende dieser Stoßstange befindlichen Tisch montiert, Schwingerreger und Aufnehmer-Bezugsnormal befinden sich am anderen Ende außerhalb der Kammer. Der bei Brüel & Kjær verwendete Tisch kann bis zu zwanzig Beschleunigungsaufnehmer tragen, abhängig von ihrer Größe. Die Kalibrierung wird bei niedrigen Frequenzen ausgeführt, um Resonanzeffekte in Stoßstange oder Tisch sicher zu vermeiden. Die Messung der Temperaturabhängigkeit ist eine zeitraubende Prozedur, da es immer notwendig ist, hinreichende Zeit für den Temperaturausgleich im Beschleunigungsaufnehmer abzuwarten. Temperaturgradienten würden die gemessene Empfindlichkeit anderenfalls erheblich beeinflussen.

Mit dieser Technik kann die Temperaturabhängigkeit der Aufnehmerkapazität aus denen von Spannungs- und Ladungs-Übertragungsfaktor abgeleitet werden.

5.5.3. Empfindlichkeit gegen Basisdehnungen

Zur Messung der Basisdehnungsempfindlichkeit wird der Beschleunigungsaufnehmer auf einem dicken Kragbalken aus Stahl nahe der Einspannstelle montiert. Auf dem Balken werden rund um den Aufnehmer Dehnmeßstreifen angebracht. Der Balken wird an seinem freien Ende ausgelenkt, die Aufnehmerbasis erfährt hierdurch eine Dehnung. Das Meßsignal der Dehnmeßstreifen wird zusammen mit dem des Beschleunigungsaufnehmers auf einem Speicheroszilloskop festgehalten. Sobald die Dehnung auf 250 $\mu\epsilon$ abgefallen ist, wird das Ausgangssignal des Beschleunigungsaufnehmers gemessen, die Beschleunigung, die ein Ausgangssignal gleicher Größe hervorrufen würde, wird berechnet. Diese Beschleunigung dividiert durch die zugehörige Dehnung ergibt die Basisdehnungsempfindlichkeit. Der typische Wert ist in jedem Kalibrierzeugnis zu finden.

5.5.4. Luftschallempfindlichkeit

Die genaue Luftschallempfindlichkeit eines Beschleunigungsaufnehmers ist nur schwer zu messen, da die Gefahr mechanischer Interferenz der akustischen Anregung und damit verbundener Fehlergebnisse sehr groß ist. Bei Brüel & Kjær wird der Beschleunigungsaufnehmer in einer speziellen Kammer montiert, ein

von dieser Kammer sehr sorgfältig isolierter Hochdruck-Mikrofonkalibrator erzeugt im Inneren einen Schalldruckpegel von 154 dB. Diese Anordnung gewährleistet die mindestmögliche Schwingungsanregung des Beschleunigungsaufnehmers.

Der Kalibrator wird mit einem Gleitsinus erregt, das Ausgangssignal des Beschleunigungsaufnehmers in einem Frequenzanalysator verarbeitet. Aus dem Spektrum ist es möglich zu unterscheiden, welcher Signalanteil auf akustische Anregung zurückzuführen ist und welcher auf eine Schwingungsübertragung vom Kolben des Kalibrators. Bei Frequenzen oberhalb 100 Hz wird letzterer den ersten normalerweise überdecken, weshalb die Luftschallempfindlichkeit nur in einem Frequenzbereich zwischen 2 und 100 Hz spezifiziert wird. Es läßt sich jedoch abschätzen, daß das Ergebnis bis zu Frequenzen von einigen Kiloherz Gültigkeit behält. Bei diesen hohen Frequenzen wird die Wellenlänge mit den Abmessungen des Aufnehmers vergleichbar.

5.5.5. Empfindlichkeit gegen Magnetfelder

Auch bei diesem Parameter ist eine genaue Messung mit Schwierigkeiten verbunden. Bei Brüel & Kjær wird der Beschleunigungsaufnehmer im Zentrum einer großen Spule plaziert, ein Netzstrom von 50 Hz durch die Spule erzeugt ein starkes Magnetfeld. Im Zentrum der Spule herrscht eine magnetische Feldstärke von 0,03 T. Der Beschleunigungsaufnehmer ist starr auf einer schweren Unterlage montiert, so daß die elektromagnetisch induzierte Schwingung von Aufnehmer und Unterlage minimal bleibt. Das Ausgangssignal des Beschleunigungsaufnehmers wird gemessen, die Empfindlichkeit wird analog zu den vorhergehenden Fällen berechnet. Folgende Punkte sind dabei zu beachten:

1. Die Induktion eines Stromes im Spannring rund um die piezoelektrischen Elemente ist unvermeidlich. Dieser Strom bewirkt eine Reaktionskraft im elektromagnetischen Feld, die piezoelektrischen Elemente, mit denen der Ring in Kontakt steht, werden in Bewegung versetzt.

2. Eine gewisse Bewegung wird auch in den seismischen Massen induziert, so klein ihre Permeabilität auch sein mag.

3. Auch im Aufnehmerkabel wird Strom induziert.

Da es nicht möglich ist, die einzelnen Anteile zu trennen, wird der Gesamteffekt zur Bestimmung der Magnetfeldempfindlichkeit herangezogen.

5.5.6. Temperaturgrenzen

Als Temperaturgrenzen sind maximale und minimale Temperaturen definiert, unter denen der Beschleunigungsaufnehmer noch gebrauchsfähig ist. Wenn der Beschleunigungsaufnehmer eine Zeit von 24 Stunden zur „Erholung" bei Raumtemperatur gehabt hat, sind nach der Einwirkung extremer Temperaturen innerhalb dieser Grenzen nur kleine und wohldefinierte Änderungen in allen Kalibrierparametern zu erwarten.

Bei Brüel & Kjær erreicht man dies einfach durch Aufheizen des Beschleunigungsaufnehmers in einem Ofen und Abkühlen in einem Gefrierschrank. Danach wird die komplette Kalibrierung nach 24 Stunden überprüft. Eine Empfindlichkeitsänderung von 2% ist zulässig.

5.5.7. Schockgrenzen

Die Schockgrenzen werden auf einer hydraulischen Maschine bestimmt, die den Beschleunigungsaufnehmer einhundertmal in kurzer Folge mit einem Schock von definiertem Pegel belastet. Der Versuch wird in allen drei Achsenrichtungen (x, y und z) des Aufnehmers wiederholt, anschließend werden Übertragungsfaktor und Frequenzgang neu kalibriert. Als maximal zulässiger Schock wird der minimale Wert in beliebiger Richtung angegeben, der eine Änderung des Übertragungsfaktors von mehr als 2% bewirkt.

Die Schockgrenzen sind gleichzeitig Grenzen für die Messung, vorausgesetzt, der mit dem Beschleunigungsaufnehmer verwendete Vorverstärker kann die außerordentlich hohen Eingangsladungen einwandfrei verarbeiten. In dem seltenen Fall, daß zu Schockmessungen ein Hochempfindlichkeitsaufnehmer eingesetzt werden soll, kann das Ausgangssignal des Beschleunigungsaufnehmers über einen Ladungsteiler abgeschwächt werden. Siehe Abschnitt 3.2.4.

5.6. WERKSEITIGE PRÜFUNG VON AUFNEHMERKABELN

Abb. 5.16 zeigt eine Meßeinrichtung ähnlich der bei Brüel & Kjær verwendeten zur Prüfung der Störeigenschaften von Beschleunigungsaufnehmerkabeln. Das Kabel wird mit einer kapazitiven Last abgeschlossen, die einem Universal-Beschleunigungsaufnehmer entspricht und mit einer Kraft vorgespannt. Das Kabel ist an einen Ladungs-Vorverstärker angeschlossen. Zwischen zwei Stützen wird das Kabel eingespannt und in der Mitte mit einem Schwingerreger verbunden. Es wird mit Schmalbandrauschen um 80 Hz angeregt, das Ausgangssignal wird gemessen. Bei unzulässig hoher Störspannung gilt das Aufnehmerkabel als Ausschuß. Bei Brüel & Kjær wird jedes Aufnehmerkabel vom Typ AO 0038 individuell untersucht, alle anderen Kabel werden lediglich an Prototypen getestet.

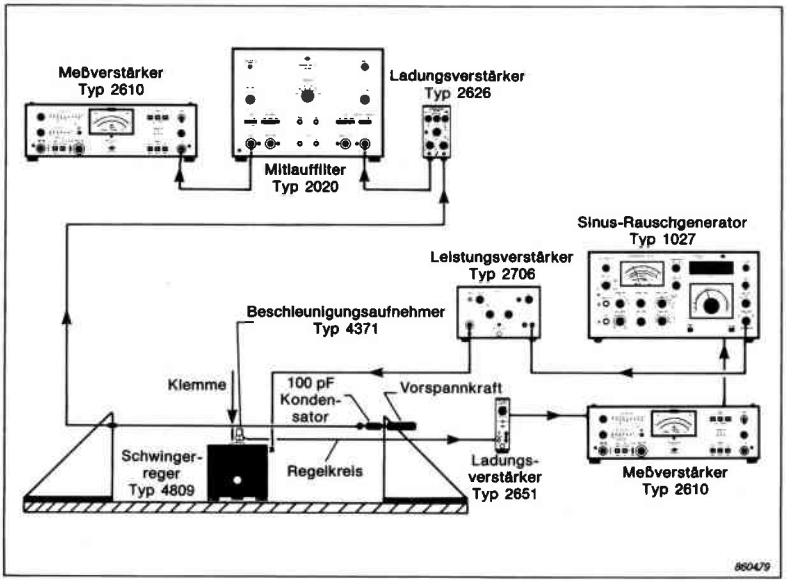


Abb. 5.16. Die Messung triboelektrischer Störungen in Aufnehmerkabeln

5.7. KALIBRIEREINRICHTUNGEN

5.7.1. Kalibriersystem Typ 9559

Es handelt sich hier um ein komplettes Spezialsystem zur Kalibrierung sowohl von Beschleunigungsaufnehmern wie auch von Mikrofonen. Ausgerüstet mit einem solchen System kann ein Labor Übertragungsfaktor und Frequenzparameter kalibrieren und Kalibrierzertifikate ausstellen. Dieses System ist in Abb. 5.17 zu sehen.

Von Brüel & Kjær wird dieses System weltweit in mehreren Servicezentren eingesetzt, es steht jeder Organisation für Kalibrierungen zur Verfügung. Jedes System enthält auch eine schrittweise Anleitung zur Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern und Mikrofonen. Nähere Informationen über Typ 9559 erhalten Sie bei Ihrem zuständigen Brüel & Kjær-Repräsentanten.

Abb. 5.17. Kalibriersystem Typ 9559

5.7.2. Individuelle Kalibriereinrichtungen

Abb. 5.18 gibt einen Überblick über die bei Brüel & Kjær erhältlichen Kalibriereinrichtungen, die in diesem Abschnitt behandelt wurden.

5.8. STANDARDS BETREFFEND DIE KALIBRIERUNG VON BESCHLEUNIGUNGSAUFNEHMERN

Bei Brüel & Kjær werden Kalibrierungen und Tests von Beschleunigungsaufnehmern nach ISO 5347 - „Methods for the Calibration of Vibration and Shock Pickups" - ausgeführt. In diesem Dokument sind die Techniken beschrieben, die für die verschiedenen Kalibrierungen von Beschleunigungsaufnehmern empfohlen werden. Es sollte für weitere Details direkt konsultiert werden.

Weitere Standards mit Bezug auf Kalibrierung:

ANSI S2.11-1969-„The selection of calibrations and tests for electrical transducers used for measuring shock and vibration"

ISO/DP 8042-„Characteristics to be specified for seismic transducers for shock and vibration measurements"

British Calibration Service Guidance Document No. 3003.

Schwingerreger für Kalibrierzwecke Typ 4290 	Kleiner Schwingerreger speziell zur Messung des Frequenzganges von Beschleunigungsaufnehmern. Zu verwenden mit Brüel & Kjær Sinusgeneratoren. ■ Maximale Erregerkraft 3N. Frequenzbereich 200 Hz bis 50 kHz ■ Eingebauter Beschleunigungsaufnehmer zur Regelung des Generators
Kalibrierkopf Typ 4815 	Hauptsächlich zur Hochbeschleunigungskalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern und anderen Meßwertaufnehmern nach der Rücken-an-Rücken-Methode oder mit Laser-Interferometrie. ■ Eingebautes Aufnehmer-Bezugsnormal ■ Passend zu Erregerrumpf Typ 4801 oder Permanentmagnetischem Erregerrumpf Typ 4805 ■ Zur Aufnehmerkalibrierung im Frequenzbereich 5 Hz bis 10 kHz
Aufnehmerkomparator Typ 2970 	Zur schnellen Vergleichkalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern nach der Rücken-an-Rücken-Methode. Zu verwenden mit Kalibriersatz Typ 3506 und Aufnehmer-Kalibrierverstärker Typ 2650 ■ Kalibriergenauigkeit ± 1,02% bei 99% Sicherheit
Schwingerreger für Kalibrierzwecke Typ 4294 	Referenz-Schwingungsquelle im Taschenformat zur Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern und ganzen Meßsystemen ■ Fester Effektivwert 10 ms 2 ± 3% bei 159,2 Hz (1000 rad/s) ■ Batteriespeisung (1 * IEC 6LF22)
Kalibriersatz Typ 3506 	Aufnehmer-Bezugsnormal Typ 8305 und Ladungsverstärker Typ 2626, kalibriert als Satz mit Laser-Interferometrie. Zum Einsatz in Beschleunigungsaufnehmer-Kalibriersystemen

T01019D0

Abb. 5.18. Zusammenstellung der bei Brüel & Kjær erhältlichen Kalibriereinrichtungen

6. ANHANG

ANHANG A

m	cm	mm	ft	in
1	100	1000	3,281	39,37
0,01	1	10	0,0328	0,3937
0,001	0,1	1	0,00328	0,03937
0,3048	30,48	304,8	1	12
0,0254	2,54	25,4	0,0833	1

T01087GB0

Tabelle 1. Umrechnung von Längenmaßen

m/s	km/h	ft/min	mile/h
1	3,6	196,85	2,2369
0,2778	1	54,68	0,6214
$5{,}08 \times 10^{-3}$	$1{,}829 \times 10^{-2}$	1	$1{,}136 \times 10^{-2}$
0,4470	1,6093	88	1

T01088GB0

Tabelle 2. Umrechnung von Geschwindigkeiten

g	m/s^2	cm/s^2	ft/s^2	in/s^2
1	9,81	981	32,2	386
0,102	1	100	3,281	39,37
0,00102	0,01	1	0,0328	0,3937
0,03109	0,3048	30,48	1	12
0,00259	0,0254	2,54	0,0833	1

T01089GB0

Tabelle 3. Umrechnung von Beschleunigungen

kg	tekma	gram	lbs	oz
1	0,102	1000	2,2046	35,274
9,807	1	9807	21,6205	345,93
10^{-3}	1,02 10^{-4}	1	2,205 10^{-3}	3,527 10^{-2}
0,45359	4,625 10^{-2}	453,59	1	16
2,835 10^{-2}	2,8908 10^{-3}	28,35	6,25 10^{-2}	1

T01091GB0

Tabelle 4. Umrechnung von Gewichten (Massen)

N	kp	lb ft/s^2
1	0,102	7,2329
9,807	1	71,0
0,1379	1,405 10^{-2}	1

T01090GB0

Tabelle 5. Umrechnung von Kräften

N/m^2	mbar	mm H_2O	atm	in WG	psi
1	10^{-2}	0,102	9,869 10^{-6}	4,02 10^{-3}	1,4505 10^{-4}
100	1	10,917	9,868 10^{-4}	0,402	1,4504 10^{-2}
9,807	9,807 10^{-2}	1	9,678 10^{-5}	3,937 10^{-2}	1,4223 10^{-3}
1,013 10^5	1013	1,0332 10^4	1	406,77	14,696
249,10	2,491	25,4	2,453 10^{-3}	1	3,605 10^{-2}
6908,9	69,089	704,49	6,805 10^{-2}	27,736	1

T01092GB0

Tabelle 6. Umrechnung von Drücken

J = Ws	kWh	kpm	kcal	Btu	ft lb
1	2,778 10^{-7}	0,1020	2,39 10^{-4}	9,48 10^{-4}	0,7376
3,6 10^{6}	1	3,6710 10^{5}	860	3413	2,655 10^{6}
9,807	2,7241 10^{-6}	1	2,3423 10^{-3}	9,2949 10^{-3}	7,233
4187	1,163 10^{3}	427	1	3,9685	3087,4
1056	2,93 10^{4}	107,59	0,25198	1	778
1,3558	3,766 10^{-7}	0,1383	3,239 10^{-4}	1,285 10^{-3}	1

T01094D0

Tabelle 7. Umrechnung von Arbeit, Energie und Wärme

kW	kpm/s	hk	kcal/h	ft lb/s	hp
1	102	1,36	860	738	1,34
9,81 10^{-3}	1	1,33 10^{-2}	8,44	7,23	1,32 10^{-2}
0,735	75	1	632	542	0,986
1,16 10^{-3}	0,119	1,58 10^{-3}	1	0,858	1,56 10^{-3}
1,36	0,138	1,84 10^{-3}	1,17	1	1,82 10^{-3}
0,745	76	1,014	642	550	1
2,93 10^{-4}	2,99 10^{-2}	3,99 10^{-4}	0,252	0,216	3,93 10^{-4}
3,52	35,9	0,479	3024	259	0,471

T01096D0

Tabelle 8. Umrechnung von Leistungen

Symbol	Präfix	Faktor
G	giga	10^{9}
M	méga	10^{6}
k	kilo	10^{3}
c	centi	10^{-2}
m	milli	10^{-3}
μ	micro	10^{-6}
n	nano	10^{-9}
p	pico	10^{-12}

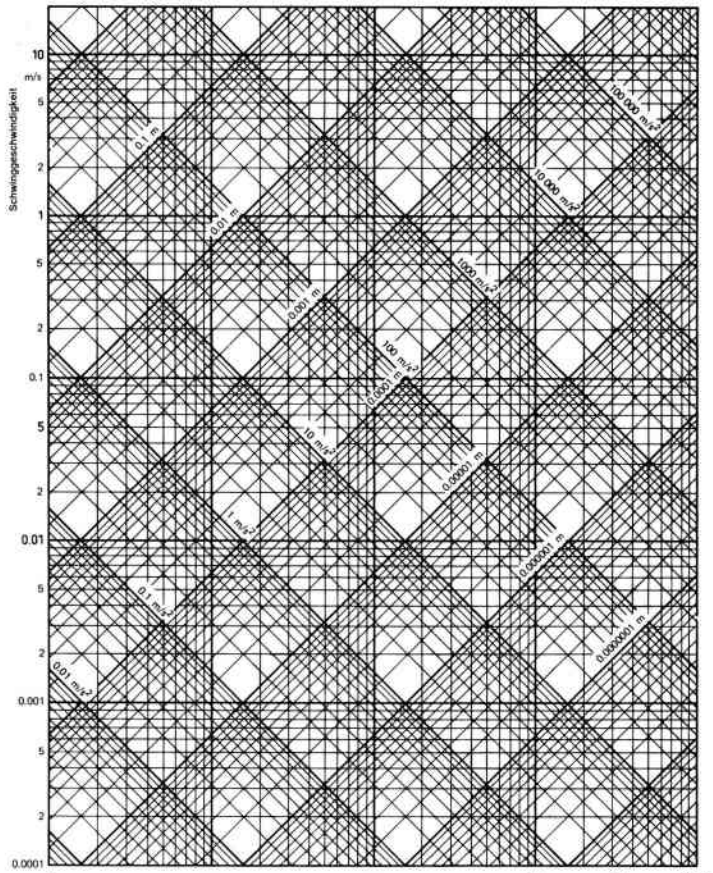
T01235D0

Tabelle 9. Präfixe

ANHANG B

SCHWINGUNGSNOMOGRAMM

Das Schwingungsnomogramm ist eine graphische Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Frequenz, Schwingweg, Schwinggeschwindigkeit und Schwingbeschleunigung für einfache harmonische Schwingungen. Sind zwei beliebige Parameter bekannt, können die beiden anderen aus dem Nomogramm abgelesen werden.



Geschwindigkeit, Schwingweg und Beschleunigung als Effektivwerte

ANHANG C

STANDARDS

Wegen der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Standards und ihrer Vielfalt wäre eine vollständige Aufzählung an dieser Stelle nur von beschränktem Wert. Brüel & Kjær hat eine Publikation, „National and International Standards and Recommendations — Acoustics, Vibration & Shock, Luminance and Contrast", herausgegeben, die Sie bei Ihrem zuständigen Repräsentanten beziehen können. Dort ist eine Auswahl der von nationalen Organisationen publizierten Standards zusammen mit den Anschriften dieser Organisationen zu finden.

ANHANG D

SCHWINGUNGSLITERATUR VON BRÜEL & KJÆR

Auf dem Gebiet der Schwingungen veröffentlicht Brüel & Kjær laufend umfangreiche technische Literatur. Sie ist in folgende Kategorien eingeteilt:

Grundlagenbücher: Diese Bücher im Format A5 bieten eine einfache Einführung in Teorie und Anwendung des jeweiligen Fachgebietes. Auf dem Sektor Schwingungen gibt es derzeit drei solcher Grundlagenbücher: Schwingungsmessung, Schwingungstests und Zustandsüberwachung von Maschinen. Sie sind über die örtlichen Repräsentanten von Brüel & Kjær zu beziehen.

Application Notes: Diese Kurzberichte werden laufend publiziert. Sie konzentrieren sich auf die Anwendung von Brüel & Kjær-Einrichtungen auf verschiedenen aktuellen Gebieten.

Technical Review: Diese Zeitschrift wird viermal jährlich publiziert. Sie stellt Anwendungen von Brüel & Kjær-Geräten und aktuelle Neuentwicklungen vor, die für den Kundenkreis als interessant erachtet werden.

Bücher: Von Brüel & Kjær sind verschiedene Fachbücher über Schwingungen erhältlich. Hier eine Auswahl:

„Mechanical Vibration and Shock Measurements"
„Frequency Analysis"
„Modal Testing – Theory and Practice"
„Modal Analysis of Large Structures"

Eine Liste der gegenwärtig erhältlichen Application Notes und Technical Reviews erhalten Sie auf Anfrage.

ANHANG E

Zusammenstellung der gegenwärtig bei Brüel & Kjær lieferbaren Vorverstärker. Der Ladungs-Strom-Wandler Typ 2644 wird in Abschnitt 3 vorgestellt. Weitere Informationen findet man in den Datenblättern der einzelnen Geräte.

Vorverstärker Typ		2635 3stellige Empfindlichkeitseinstellung, rauscharmer Ladungsverstärker	2626 3stellige Empfindlichkeitseinstellung, rauscharmer Ladungsverstärker
Meßarten		Beschleunigung Geschwindigkeit Schwingweg	Beschleunigung
Eingangs-empfindlichkeit		0,1 mV bis 10 V/pC (–20 bis +80 dB)	0,1 mV bis 1 V/pC (–20 bis +60 dB)
Frequenzbereich (–3 dB-Grenzen)		0,1 Hz bis 200 kHz	0,3 Hz bis 100 kHz
Wählbare Grenzfrequenzen (–3dB-Grenzen)	Untere	0,2; 1; 2; 10 Hz (10% Grenzen)	0,3: 3; 10; 30 Hz
	Obere	0,1; 1; 3; 10; 30; > 100 kHz (10%-Grenzen)	1; 3; 10; 30; > 100 kHz
Versorgung		Interne Batterien oder externe Gleichspannung	Netz
Sonstiges		Übersteuerungsanzeige, Testoszillator, Batteriezustandsanzeige	Übersteuerunganzeige. Ausgang direkt und transformatorgekoppelt
Anwendungen		Schwingungsmessungen vor Ort. Unterwasserschallmessungen mit Hydrofonen.	Allgemeine Meßaufgaben. Vergleichskalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern

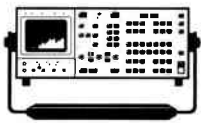
2651	2634	2650
3 Uni-Gain-Empfindlichkeit-seinstellungen. Ladungs-verstärker. Geeignet für sehr tiefe Frequenzen	**Kleiner, robuster Ladungsver-stärker mit justierbarer Verstär-kung. Unempfindlich gegen elektromagnetische Einstreu-ungen**	**4stellige Empfindlichkeitsein-stellung. Rauscharmer La-dungs- und Spannungsverstär-ker**
Beschleunigung Geschwindigkeit	Beschleunigung	Beschleunigung
0,1–1–10 mV/pC (–20 bis + 20 dB)	0,9 bis 10 mV/pC intern justierbar (0 bis 20 dB)	0,1 mV/pC bis 100 mV/pC, 100 mV/V (–20 bis 40 dB)
0,003Hz bis 200 kHz	1 Hz bis 200 kHz	0,3 Hz bis 200 kHz
0,003; 0,03; 0,3;1 Hz	—	0,3; 3 Hz; 2 kHz
200 kHz	—	1; 3; 10; 30; > 200 kHz
Ext. DC	Ext. DC	AC Mains
Eingang geerdet oder erdfrei	Normaler oder Differenzein-gang. Kann am Maschinenge-häuse montiert werden	Übersteuerungsanzeige, Testoszillator
Vielkanal- messungen, Schockmessungen	Schwingungsmessungen im industriellen Umfeld Permanente Installationen	Vergleichskalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern. Allgemeine Meßaufgaben

T00969D0

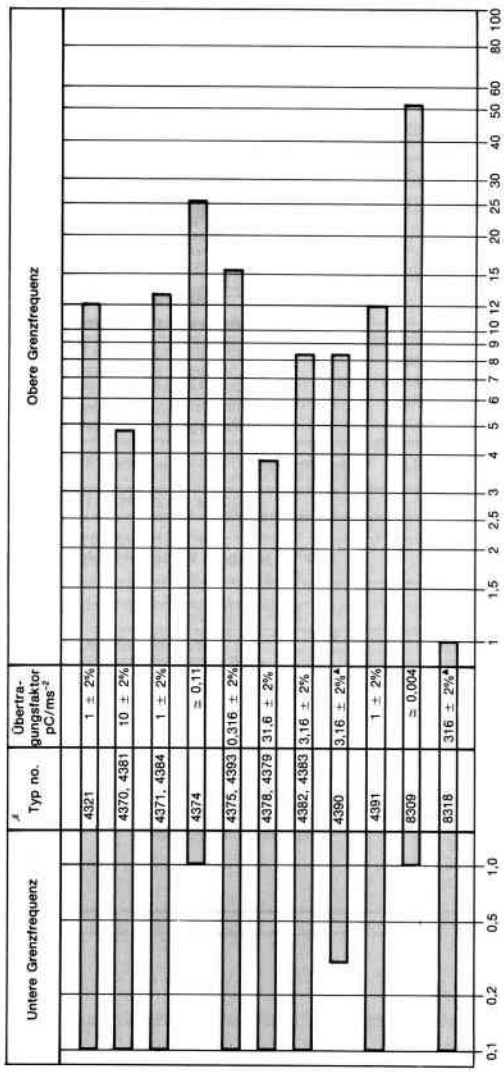
ANHANG F

An diese Geräte kann man Beschleunigungsaufnehmer direkt anschließen. Weitere Informationen findet man in den Datenblättern der einzelnen Geräte.

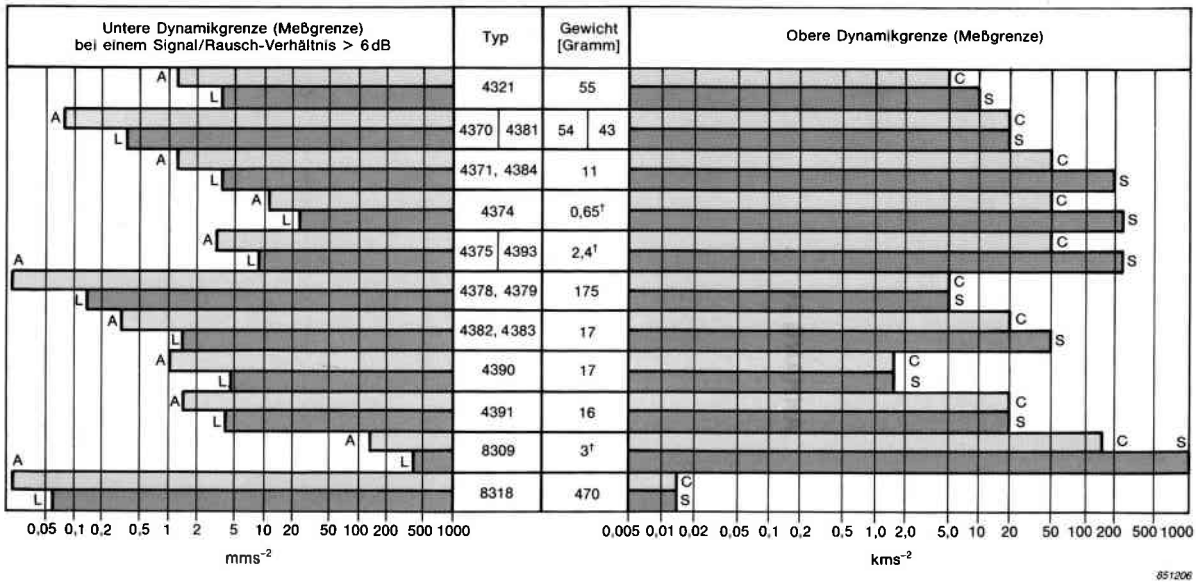
Gerät Typ	2511 Schwingungsmesser	2513 2516[3] Integrierende Schwingungsmesser
Beschreibung	Ein vielseitiges Meßgerät für allgemeine Schwingungsmessungen	Wirtschaftliche und genaue Schwingungsmesser für den Alltagseinsatz
Meßarten	Beschleunigung Geschwindigkeit Schwingweg	Beschleunigung, Geschwindigkeit
Frequenzbereich (–3 dB)	0,3 Hz bis 15 kHz	10 Hz bis 10 kHz[1]
Wählbare Grenzfrequenzen (–3dB-Grenzen)	LLF 1,3 bis 10 Hz[1] ULF 1 bis 15 kHz[2]	LLF[2] 8 Hz bis 10 Hz ULF[2] 1 kHz bis 10 kHz
Detektoren	Effektivwert (RMS) Wahrer Spitze-Spitze-Wert	60 s-Leq, Effektivwert, max. Spitzenwert
Versorgung	interne Batterie externe Gleichspannung	interne Batterie
Eingang	Ladung	Ladung
Schwingungsmesser	1. 0,3 Hz und 3 Hz für Beschleunigungsmessung 2. Mit 1 kHz einsetzbar zur Schwingstärkemessung	1. Unbewertet 2. Für unbewertete Messungen, Schwingstärke und Hand/Arm-Schwingungen (IOS/DP 5349, VDI 2056, VDI 2057 und ISO 2954 3. Typ 2513 arbeitet in SI-Einheiten, Typ 2516 in anglo-amerikanischen Einheiten. Typ 2513/WH 2134 ist eine vereinfachte Version dieser Geräte

7007 ZM 0060	2515
 Meßmagnetbandgerät	 **Schwingungsanalysator**
Mit Schwingungs-Einschub ZM 0060 ein tragbares Gerät zur Aufzeichnung von Schall- und Schwingungsdaten vor Ort und im Labor	Ein leistungsfähiger FFT-Analysator zur Analyse von Maschinenschwingungen, einschließlich Zustandsüberwachung, Fehlerdiagnose und Auswuchten
Beschleunigung Geschwindigkeit	Beschleunigung, Geschwindigkeit, Schwingweg (analog)
0,3 Hz bis 16 kHz 1	0,3 Hz bis 20 kHz (–1 dB)[1]
LLF 0,3, 1 und 10 Hz —	UGF 0,3 Hz oder 3 Hz OGF - 8 wählbare Werte abhängig von der Meßart
—	Gesamteffektivwert mit Frequenzanalyse
Einschub-Batteriebehälter Externe Gleichspannung	Interne Batterie Externe Gleichspannung
Ladung	Ladung, Spannung, "Line-Drive"-Eingang
1. Abhängig von der Bandgeschwindigkeit	1. Folgende Meßarten stehen zur Verfügung: Analyse mit konstanter Relativbandbreite (6% und 23%), Schmalbandanalyse, Frequenzlupenanalyse (ZOOM), Analyse mit gleitendem Zeitfenster, Cepstrumanalyse, Drehzahlkompensation, Spektrenvergleich, Massenspeicher

T00943D0



Obere und untere Grenzfrequenzen (10%) sowie Übertragungsfaktor für Universal-Beschleunigungsaufnehmer. ▲ kennzeichnet einen Ladungs-Strom-Wandler, für den der Übertragungsfaktor in $\mu A/ms^{-2}$ angegeben ist.



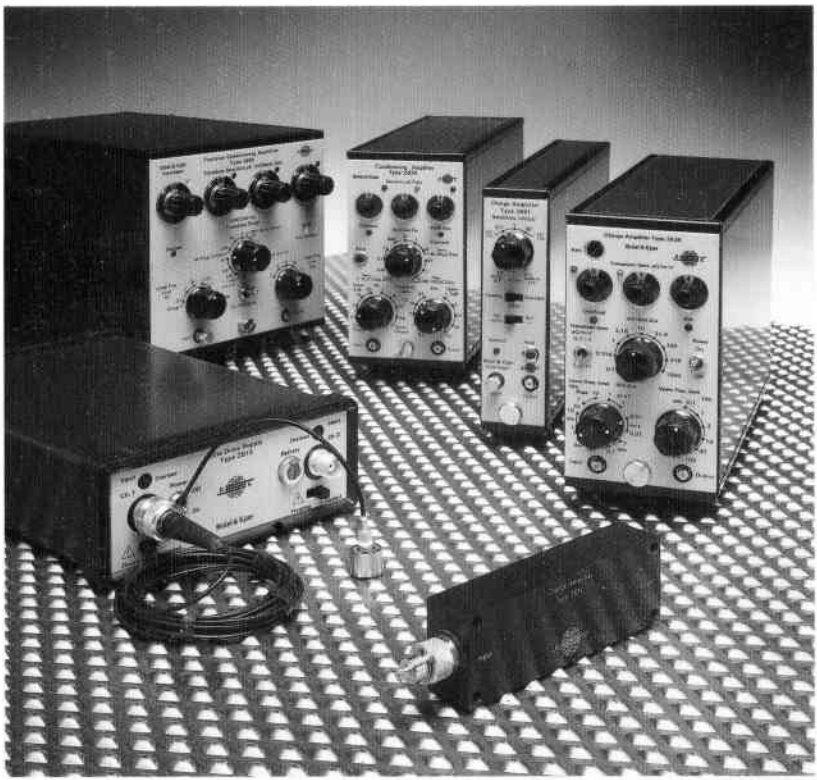
Ober- und Untergrenzen des Dynamikbereiches sowie Gewicht der Beschleunigungsaufnehmer. Die Obergrenzen (C= kontinuierliche Sinusschwingung, S= Schock) sind Scheitelwerte. Die Untergrenzen (A= Terzbandbreite bis zur 10%-oberen Grenzfrequenz des einzelnen Beschleunigungsaufnehmers, L= Breitbandpegel 2 Hz bis 22 kHz) sind Effektivwerte. Bei den angegebenen Dynamikgrenzen handelt es sich um typisch noch meßbare Schwingungspegel unter Verwendung des Beschleunigungsaufnehmers und eines Brüel & Kjær-Ladungsverstärkers Typ 2635. † bedeutet ausschließlich Kabelgewicht.

ANHANG H

Typ	Gewicht (Gramm)	Übertragungsfaktor Spannung mV/ms^{-2} (mV/g)	Übertragungsfaktor Ladung pC/ms^{-2} (pC/g)	Frequenzbereich +10% -Grenze (kHz)	Spezielle Eigenschaften	Anwendungsbereich
4374	0,65 (ausschließlich Kabel)	≈ 0,18 (≈ 1,8)	≈0,11 (≈ 1,1)	26	Miniatur-Beschleunigungsaufnehmer in Plan-Scher-Konstruktion von extrem niedrigem Gewicht mit hoher Resonanzfrequenz. Integriertes Aufnehmerkabel. Uni-Gain®-Übertrangungsfaktor	Messung von Schwingungen hoher Beschleunigung und hoher Frequenz Schockmessungen Schwingungsmessungen an leichten Strukturen und in beengter Umgebung
4393	2,4	≈ 0,48 (≈ 4,8)	0,316 ± 2% (3,10 ± 2%)	16,5	Miniatur-Beschleunigungsaufnehmer in Delta-Scher®-Ausführung mit geringem Gewicht und hoher Resonanzfrequenz.	
4375	2,4 (ausschließlich Kabel)	≈ 0,48 (≈ 4,8)	0,316 ± 2% (3,10 ± 2%)	16,5	Miniatur-Beschleunigungsaufnehmer in Delta-Scher®-Ausführung mit geringem Gewicht und hoher Resonanzfrequenz. Integriertes Aufnehmerkabel.	
4391	16	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	12	Delta-Scher®-Konstruktion mit Uni-Gain®-Übertragungsfaktor, elektrisch isolierter Basis und TNC-Buchse am Deckel	Für allgemeine Schock- und Schwingungsmessungen
4371	11	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	12,6	Seitlicher Anschluß	
4384	11	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	12,6	Deckelanschluß	
4382	17	≈ 2,6 (≈ 26)	3,16 ± 2% (31,0 ± 2%)	8,4	Deckelanschluß	Delta-Scher®-Aufnehmer mit Uni-Gain®-Übertragungsfaktor zur einfachen Systemkalibrierung
4383	17	≈ 2,6 (≈ 26)	3,16 ± 2% (31,0 ± 2%)	8,4	Seitlicher Anschluß	
4390	17	3,16 ± 2% μA/ms^{-2} (31,0 ± 2% μA/g)		8,4	Beschleunigungsaufnehmer mit Ladungs-Strom-Wandler in Delta-Scher®-Ausführung mit Uni-Gain®-Übertragungsfaktor	Für allgemeine Schwingsmessungen sowie zum direkten Anschluß an die Zweikanal-Signalanalysatoren von Brüel & Kjær
4370	54	≈ 8 (≈ 80)	10 ± 2% (98,1 ± 2%)	4,8	Deckelanschluß	Allgemeine Schwingungsmessungen höhere Empfindlichkeit für niedrige Pegel
4381	43	≈ 8 (≈ 80)	10 ± 2% (98,1 ± 2%)	4,8	Deckelanschluß	Delta-Scher®-Beschleunigungsaufnehmer mit höherem Uni-Gain®-Übertragungsfaktor
4378	175	≈ 26 (≈ 260)	31,6 ± 2% (310 ± 2%)	3,9	Seitlicher Anschluß	Wo nur Schwingungen mit niedrigem Pegel zu erwarten sind
4379	175	≈ 26 (≈ 260)	31,6 ± 2% (310 ± 2%)	3,9	Seitlicher Anschluß	Hochempfindliche Uni-Gain®-Beschleunigungsaufnehmer in Delta-Scher®-Ausführung
8318	470	316 ± 2% μA/ms^{-2} (3100 ± 2% μA/g)		1	Delta-Scher®-Beschleunigungsaufnehmer mit eingebautem Ladung-Strom-Wandler mit sehr hoher Empfindlichkeit, Uni-Gain®-Übertragungsfaktor	Messung von Schwingungen mit sehr niedrigem Pegel. Definierte obere Grenzfrequenz durch eingebautes Tiefpaßfilter
8309	3 (ausschließlich Kabel)	≈ 0,04 (≈ 0,4)	≈ 0,004 (≈ 0,04)	54	Geringe Baugröße. Fester 5 mm-Gewindestift. Integriertes Aufnehmerkabel	Schockmessungen bis zu 1 Million ms^{-2}. Messung hochfrequenter Schwingungen
4321	55	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	12	Dreifacher Delta-Scher®-Beschleunigungsaufnehmer mit identischen Uni-Gain®-Übertragungsfaktoren in einem gemeinsamen Gehäuse	Zur räumlichen Schwingungsmessung in 3 zueinander senkrechten Richtungen
4322	350	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	0,1 in Gummikissen	Dreifacher Delta-Scher® Uni-Gain® Beschleunigungsaufnehmer montiert in einem Gummikissen	Typ 4322 wird zusammen mit Human-Schwingungsmesser Typ 2512 zur Messung von Ganzkörperschwingungen eingesetzt
8305	40	–	≈ 0,125 (≈ 1,25)	5,3 (2% Grenze)	Quarzaufnehmer von sehr hoher Stabilität mit weitem Temperaturbereich. Laserkalibriert mit ± 0,6% Genauigkeit	Aufnehmer-Bezugsnormal zur Rücken-an-Rücken-Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern
8310	100 (ausschließlich Kabel)	≈ 1,0 (≈ 10)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	9	Integriertes Aufnehmerkabel mit rostfreiem Stahlmantel für Hochtemperaturanwendungen bis 400°C. Uni-Gain®-Übertragungsfaktor	Industrie-Beschleunigungsaufnehmer zum Einsatz unter extremen Umgebungsbedingungen, vielfach verwendet in Systemen zur permanenten SchwingungsÜberwachung
8315	102	≈ 2,5 (≈ 25)	10 ± 2% (98,1 ± 2%)	8,1	Symmetrischer und elektrisch isollerter Aufbau zur Messung bei starken elektromagnetischen Störfeldern	
8317	112	3,16 ± 2% μA/ms^{-2} (31,0 ± 2% μA/g)		7,5	Beschleunigungsaufnehmer mit eingebautem Ladungs-Strom-Wandler. Eigensicher für explosionsgefährdete Umgebung. Uni-Gain®-Übertragungsfaktor	

T00720D0

Zusammenstellung der gegenwärtig bei Brüel & Kjær lieferbaren Beschleunigungsaufnehmer. Vollständige Details findet man in den aktuellen Datenblättern für Universal-Beschleunigungsaufnehmer, Industrie-Beschleunigungsaufnehmer und das Aufnehmer-Bezugsnormal



Brüel & Kjær

DK-2850 Naerum · Dänemark
Telefon: +45 42 80 05 00 · Telex: 37316 bruka dk · Fax: +45 42 80 14 05 / 42 80 21 63

German DK BB 0696–11