

Schwingungsmeßeinrichtungen

Allgemeine Anforderungen und Prüfung

DIN
45662

ICS 17.160

Ersatz für Ausgabe 1964-08

Deskriptoren: Schwingungsmessung, Meßeinrichtung, Anforderung, Prüfung

Vibration measuring instrumentation – Fundamental requirements and verification

Inhalt

	Seite		Seite
Vorwort	2	8 Zusätzliche Anforderungen	22
Änderungen	2	8.1 Meßabweichungen durch nichtideale Signalverarbeitung	22
Frühere Ausgaben	2	8.2 Meßabweichungen durch signalunabhängige Störeinflüsse	24
1 Anwendungsbereich	2	8.3 Schutz- und Sicherheitsanforderungen	24
2 Normative Verweisungen	2	9 Hinweise auf weitere Festlegungen	25
3 Begriffe, Größen	3	9.1 Notwendige weitere Festlegungen	25
4 Gesamtkonzept, Grundfestlegungen	3	9.2 Empfohlene weitere Festlegungen	25
4.1 Signallauf, Gerätefunktionen	3	9.3 Abweichende Festlegungen	25
4.2 Allgemeine Anforderungen, Fehlergrenzen	5	10 Vom Hersteller geforderte Angaben	25
4.3 Umfang der Prüfungen	5	Anhang A (informativ) Frequenzbandbegrenzung, Frequenzbewertung, Normierung	26
5 Signalpfad	5	Anhang B (informativ) Frequenzanalysen	27
5.1 Meßgrößenwandlung	5	Anhang C (informativ) Statistische Verfahren	29
5.2 Lineare Signalverarbeitung	7	Anhang D (informativ) Illustrationen zu Bereichs- definitionen, Toleranzfeldern und Skalen	30
5.3 Nichtlineare Signalverarbeitung	12	Anhang E (informativ) Literaturhinweise	31
5.4 Datenpräsentation	17	Anhang F (informativ) Erläuterungen	32
6 Hilfseinrichtungen	19	Stichwortverzeichnis	32
6.1 Meßbereichsumschalter	19		
6.2 Übersteuerungsmelder	19		
6.3 Kalibrier- und Justiereinrichtung	19		
6.4 Signal-Ein- und -Ausgänge, Meßpunkte	20		
6.5 Start-, Stopp-, Pausen- und Löscheinrichtungen	21		
7 Referenzbedingungen, Referenzfehlergrenzen	22		

Fortsetzung Seite 2 bis 35

Normenausschuß Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI
Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE)

Vorwort

Die vorliegende Norm für Schwingungsmeßeinrichtungen, erarbeitet vom Gemeinschaftsausschuß NALS/VDI C 2 "Schwingungsmeßtechnik", ersetzt nicht nur die frühere Ausgabe August 1964, sondern sie stellt einen erstmaligen Ansatz dar, für ein ganzes Fachgebiet gemeinsame Anforderungen an – je nach Anwendungsbereich – unterschiedliche Meßeinrichtungen zu normen, ohne die notwendige Gestaltungsfreiheit mehr als zweckdienlich einzuengen. In erster Linie ist sie als Angebot an andere Normenausschüsse – auch und gerade in anderen Fachgebieten – anzusehen, durch Bezugnahme auf diese Norm anwendungsspezifische Meßvorschriften für mechanische Schwingungen von gerätetechnischen Festlegungen zu entlasten und die gewünschten speziellen Eigenschaften mit geringstmöglichem Aufwand umfassend und zweckdienlich zu formulieren.

Diese Norm zielt sowohl auf Überarbeitungen bestehender Normen als auch auf noch zu erstellende Normen, z. B. für die Maschinenzustandsüberwachung oder die Leistungsflußmessung. Darüber hinaus läßt sich die Struktur dieser Norm durchaus auch auf verwandte Fachgebiete, z. B. die Messung akustischer Größen, übertragen.

Die vorliegende Norm wurde als internationales Normungsprojekt im Technischen Komitee ISO/TC 108 "Mechanische Schwingungen und Stöße" begonnen, doch mangels hinreichend schnellen Fortschritts von der International Organization for Standardization (ISO) wieder eingestellt und nur als Deutsche Norm zu Ende geführt. Es ist aber beabsichtigt, der ISO die vorliegende Norm in englischer Übersetzung als Vorlage für eine entsprechende Internationale Norm vorzuschlagen.

Änderungen

Gegenüber der Ausgabe August 1964 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Der Titel der Norm wurde geändert.
- b) Die Norm wurde von Grund auf neu erarbeitet und legt die Eigenschaften von Schwingungsmeßeinrichtungen wesentlich umfassender fest als zuvor. Dabei wurde nicht nur der technischen Entwicklung Rechnung getragen, indem weitere Anforderungen und kleinere Fehlergrenzen festgelegt wurden, sondern es wurden auch neue Meßverfahren berücksichtigt sowie Prüfverfahren aufgenommen, um die Einhaltung der Anforderungen nachzuweisen.

Frühere Ausgaben

DIN 45662: 1964-08

1 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für Einrichtungen zur Messung von kinematischen Größen mechanischer Schwingungen und Stöße (Schwingungsmeßeinrichtungen, Schwingungsmesser). Sie ist vorgesehen als Grundlage für anwendungsspezifische Normen und andere Festlegungen. Zweck dieser Norm ist es, anwendungsübergreifende Anforderungen festzulegen, nämlich Eigenschaften, Fehlergrenzen und Prüfverfahren, die für Meßeinrichtungen in unterschiedlichen Anwendungsbereichen brauchbar sind. Damit soll eine möglichst weitgehende Vereinheitlichung als Voraussetzung für eine breitere Anwendung solcher Meßeinrichtungen erreicht werden.

Diese Norm beschreibt eine Meßeinrichtung notwendigerweise nicht vollständig, sondern erlaubt und erfordert ergänzende Festlegungen innerhalb bestimmter Vorgaben je nach Anwendungsbereich oder Meßaufgabe (wie z. B. Beurteilung der Schwingungseinwirkung auf Menschen, Gebäude oder Sachen – oder Beurteilung der von Maschinen, Fahrzeugen, Naturereignissen oder Sprengungen ausgehenden Schwingungen).

Darin ist festzulegen oder zu vereinbaren, welche der hier angebotenen Alternativen gelten sollen und welche der hier offengelassenen Anforderungen erfüllt sein müssen, um die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der Meßergebnisse innerhalb vorgegebener Abweichungen sicherzustellen.

Derartige, in dieser Norm durchgehend ausdrücklich so benannte "weitere" oder "abweichende Festlegungen" können erfolgen durch

- andere Normen, die sich auf diese Norm stützen;
- Maßgaben von Legislative, Exekutive, Prüfstellen, Vertragspartnern usw., die sich direkt auf diese Norm beziehen.

Die notwendigen oder empfohlenen **weiteren** Festlegungen über diese Norm hinaus (Checkliste in 9.1 bzw. 9.2) betreffen insbesondere die Auswahl der Eingangsgröße und der Verfahrensschritte zur Signalverarbeitung, Zahlenwerte für freie

Parameter, die Ergebnisdarstellung, die Genauigkeitsklasse sowie Prüfgrundsätze. Weiterhin gehören dazu eventuelle Mindestanforderungen an die Ausstattung, an die Umweltverträglichkeit sowie an die Bemessung von Einsatz- und Arbeitsbereichen, innerhalb derer die hier festgelegten Fehlergrenzen eingehalten werden. Solche Mindestanforderungen sind in dieser Norm nicht enthalten, um kostengünstige Lösungen für spezielle Anwendungen nicht auszuschließen. Statt dessen werden entsprechende Angaben von den Herstellern verlangt.

Die erlaubten **abweichenden** Festlegungen (Checkliste in 9.3) eröffnen abgegrenzte Möglichkeiten, um Sonderfällen gerecht zu werden und um die Vereinbarkeit mit bestehenden Normen zu erleichtern.

Die in dieser Norm enthaltenen und die von den Herstellern verlangten Angaben ermöglichen es, die gerätebedingte Unsicherheit von Meßergebnissen abzuschätzen. Drei verschiedene Genauigkeitsklassen – bei stets gleichen Soll-Eigenschaften – erlauben die Anpassung an unterschiedliche Bedürfnisse. Weiterhin werden Prüfverfahren angegeben, mit denen Hersteller, Anwender und Prüfstellen die Eigenschaften der Meßeinrichtung nachprüfen können.

Der Hauptteil der Norm enthält die grundlegenden, eigentlich in jeder Meßeinrichtung so oder anders realisierten Gerätefunktionen und die ihnen zugrundeliegenden Verfahrensschritte.

In Anhängen werden weitergehende, vielbenutzte Verfahren – ohne Festlegung von Fehlergrenzen – insoweit beschrieben, wie es zur Vereinheitlichung und eindeutigen Kennzeichnung von Verfahrensvarianten zweckmäßig erscheint.

2 Normative Verweisungen

Diese Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt.

Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur dann zu dieser Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation.

ANMERKUNG: Normen, die der weiteren Information dienen, siehe Anhang E.

Normen der Reihe DIN 1311

Schwingungslehre¹⁾

Normen der Reihe DIN 1319

Grundlagen der Meßtechnik

DIN 45402

Effektivwertmessung in der Elektroakustik – Prüfverfahren für Meßgeräte

E DIN 45661

Schwingungsmeßeinrichtungen – Begriffe

DIN 45671-1

Messung mechanischer Schwingungen am Arbeitsplatz – Schwingungsmesser – Anforderungen, Prüfung

DIN EN 60068-2-6

Umweltprüfungen – Teil 2: Prüfungen – Prüfung Fc: Schwingen, sinusförmig (IEC 68-2-6: 1995 + Corrigendum 1995); Deutsche Fassung EN 60068-2-6: 1995

DIN EN 60068-2-27

Umweltprüfungen – Teil 2: Prüfungen – Prüfung Ea und Leitfad: Schocken (IEC 68-2-27: 1987); Deutsche Fassung EN 60068-2-27: 1993

DIN EN 61010-1 [VDE 0411 Teil 1]

Sicherheitsbestimmungen für elektrische Meß-, Steuer-, Regel- und Laborgeräte – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (IEC 1010-1: 1990 + A1: 1992, modifiziert); Deutsche Fassung EN 61010-1: 1993

DIN EN 61260

Elektroakustik – Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven (IEC 1260: 1995); Deutsche Fassung EN 61260: 1995

DIN VDE 0470-1

Schutzarten durch Gehäuse (IP Code); [IEC 529 (1989), 2. Ausgabe]; Deutsche Fassung EN 60529: 1991

VDI 2057

Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen

3 Begriffe, Größen

Die in dieser Norm benutzten spezifischen Begriffe und Größen sind in DIN 1311, DIN 1319 und in DIN 45661 definiert. Soweit darüber hinaus spezielle Begriffe benutzt werden, sind sie in den jeweiligen Sachkapiteln definiert oder kurz erläutert (siehe auch Anhang F "Erläuterungen" Nr. 4).

4 Gesamtkonzept, Grundfestlegungen

4.1 Signallauf, Gerätefunktionen

Die Soll-Eigenschaften einer Meßeinrichtung werden durch miteinander kombinierbare Verfahrensschritte der Signalverarbeitung von der physikalischen Eingangsgröße bis zur Ausgabegröße (Meß-, Kenn- oder Beurteilungsgröße) – vorzugsweise in mathematischer Form – definiert. Zwischen Signalverarbeitung und Auswertung wird dabei nicht unterschieden. Die Realisierungen der entsprechenden Verfahrensschritte in Meßeinrichtungen werden auch als Gerätefunktionen oder Funktionseinheiten bezeichnet.

Eine komplette Schwingungsmeßeinrichtung beinhaltet im Prinzip die Gerätefunktionen des Schemas in Bild 1. Je Block muß wenigstens eine Gerätefunktion vorhanden sein, weitere können hinzukommen. Die gewählte Aufteilung ist jedoch nicht als Vorgabe für die Realisierung anzusehen (siehe auch Bild 2).

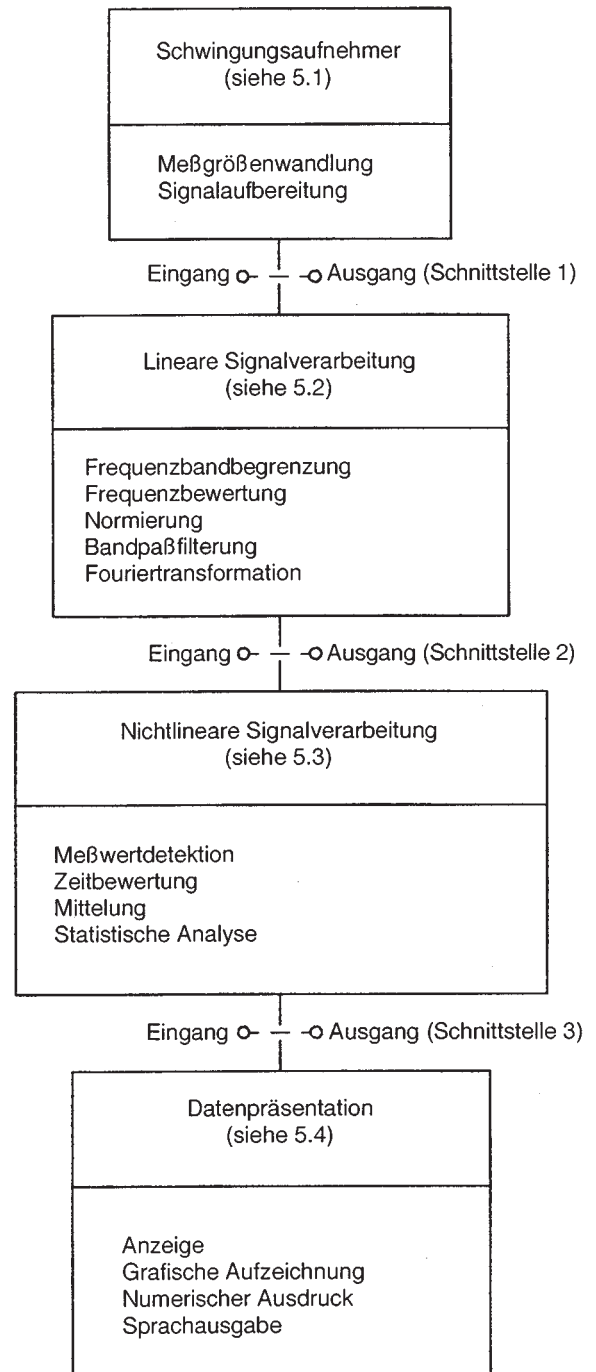


Bild 1: Funktionsschema der Schwingungsmeßeinrichtung, Signallauf

Die dargestellte Aufteilung in Blöcke ist nicht verbindlich für eine reale Schwingungsmeßeinrichtung. Die Ein- und Ausgänge verstehen sich als Empfehlungen für elektrische Anschlüsse zur Einspeisung bzw. Entnahme von Signalen (analog oder digital; siehe 6.4).

¹⁾ Die als Entwurf teilweise schon veröffentlichte Überarbeitung dieser Normenreihe heißt im Haupttitel "Schwingungen".

Tabelle 1: Wichtige Verfahren der Signalverarbeitung
(Nur die mit * markierten Verfahren werden in dieser Norm näher behandelt.)

Verfahren	Ergebnis
1) Spektriformung, Größenumwandlung	Zeitfunktion (nicht oder nur wenig datenreduziert)
1a) Frequenzbandbegrenzung*	Bandbegrenztes Zeitsignal
1b) Frequenzbewertung*	Frequenzbewertetes Zeitsignal
1c) Normierung*	Normiertes Zeitsignal
1d) Integration, Differentiation*	Zeitsignal einer anderen Schwingungsgröße
1e) Synchronmittlung des Zeitsignals	Rauschbefreites periodisches Signal
2) Meßwertdetektion	Einzahl-Kennwert
2a) Effektivwertbildung über festes Zeitintervall*	Intervall-Effektivwert
2b) Integration über 2. oder 4. Potenz	Dosiswert
2c) Spitzendetektion und -speicherung*	Spitzenwert (positiv/negativ/absolut/Spitze – Tal)
2d) Flächengleichrichtung und Mittelung	Betragsmittelwert
2e) Kombination 3a und 2c*	Maximaler Effektivwert
3) Zeitbewertung	Datenreduzierte Zeitfunktion
3a) Exponentiell zeitbewertete Effektivwertbildung*	Gleitender Effektivwert
3b) Exponentiell abfallende Spitzendetektion*	Gleitender Spitzenwert
3c) Selbstrücksetzende Spitzendetektion*	Gedehnter Spitzenwert
3d) Getaktete Spitzendetektion*	Takt-Spitzenwert
3e) Kombination 3a und 3b	Impulsgedehnter Effektivwert
3f) Exponentiell zeitbewertete Flächengleichrichtung	Gleitender Betragsmittelwert
3g) Selektion relativer Extrema (positiv/negativ/absolut)	Folge diskreter Spitzenwerte
4) Nichtproportionale Umformung*	Wie 2), 3), 5) oder 6), je nach Vor- oder Nachverarbeitung
4a) Logarithmierung	Pegel, vorzugsweise in dB
4b) Quadrierung	Energieverwandte Größe
4c) Wirkungsbedingte Skalierung	Wirkungsproportionale Meßwerte
4d) Verteilungsbedingte Skalierung	Normalverteilte Meßwerte
5) Statistische Analyse (eventuell nach 3a bis 3g)	Statistische(r) Parameter/Funktion
5a) Wie 3a bis 3g sowie lineare und quadratische* Mittelung	Standardabweichung, Varianz
5b) Relative Dauer von Schwellenüberschreitungen*	Perzentile, Quantile
5c) Dito als Funktion des Schwellenwertes*	Häufigkeitssummenverteilung
5d) Klassierung, gleiche absolute Klassenbreite*	Häufigkeitsverteilung
5e) Klassierung, gleiche relative Klassenbreite*	Pegelhäufigkeitsverteilung
6) Frequenzanalyse	Frequenzspektren
6a) Schnelle Fouriertransformation FFT*	Spektrum gleicher Linienbreite
6b) Bandpaßfilterung (mehrpoleig) & 2a oder 3a*	Terz-/Oktavbandspektrum, auch in Echtzeit
6c) Bandpaßfilterung (zweipoleig, Resonanzschwinger) & 2c*	Schockantwortspektrum
6d) Fouriertransformation eines Leistungsspektrums	Cepstrum
7) Sonderverfahren	Einzahl-Kennwert/Kennlinie
7a) Schockpolygon-Verfahren (2c angewandt auf Weg, Schnelle, Beschleunigung)	$\max \{ \hat{s}/s_0, \hat{v}/v_0, \hat{a}/a_0 \}$ (s_0, v_0, a_0 = Bezugswerte)
7b) Rating-Verfahren (basierend auf 6a, 6b oder 6c)	Grenzkurven-Parameter (gewichtetes spektrales Maximum)
7c) Kombination 3a – 3b – 2a	Beurteilungs-Schwingstärke (menschbezogen)
7d) Vektorielle Summation*	Betrag des resultierenden Vektors
7e) Koordinatendarstellung*	Kinetische Wellenbahn, Hodograph
7f) Autokorrelation	Autokorrelationsfunktion
7g) Kreuzkorrelation	Kreuzkorrelationsfunktion
7h) Wie 2b oder 5d mit Nachverarbeitung	Kurtosis
7i) Wie 2c und 2a und Division*	Scheitelfaktor
7j) Phasendetektion	Phasenwinkel
7k) Komplexe Multiplikation	Leistung (Wirk-, Blind-, Scheinleistung)
7l) Komplexe Division	Admittanz, Impedanz, Übertragungsfunktion
7m) Demodulation höherfrequenter Oberschwingungen	Störungsarme periodische Signalanteile

In 5.2 und 5.3 werden häufig wiederkehrende Verfahren der Signalverarbeitung – gegliedert in einzelne, miteinander kombinierbare Schritte – zur Auswahl gestellt, jeweils gefolgt von Mindestanforderungen, Fehlergrenzen und Prüfverfahren.

Die Verfahren betreffen insbesondere:

- a) Frequenzbandbegrenzung (siehe 5.2.1);
- b) Frequenzbewertung (siehe 5.2.1);
- c) Bildung datenreduzierter Funktionen wie
 - zeitbewertete, veränderliche Meßgrößen (siehe 5.3.1 und 5.3.2),
 - statistische Funktionen (siehe 5.3.4),
 - gemittelte Frequenzspektren (siehe 5.3.3).
- d) Bildung von Einzahl-Kenngrößen (Beurteilungsgrößen, Meßgrößen, Anzeige Größen; siehe 5.3.1 bis 5.3.5).

Die vorgenannten Signalverarbeitungsschritte sind so formuliert, daß sie auf die mechanischen Größen anwendbar sind, ungeachtet der (etwaigen) vorherigen Umsetzung in elektrische oder numerische Signale (siehe 5.1) oder der Umsetzung an zusätzlichen Ein- und Ausgängen (siehe 6.4).

ANMERKUNG: Die Umsetzung in numerische Signale (A/D-Wandlung) wird nicht behandelt.

Der linearen Signalverarbeitung (siehe 5.2) ist ein Überblick über die dann folgenden Schritte vorangestellt, worin beispielhaft die Zusammenhänge veranschaulicht werden (siehe Bild 2).

Tabelle 1 enthält in systematischer Ordnung die wichtigsten Verfahren und Verfahrensschritte der Signalverarbeitung, von denen sich die meisten in 5.2 und 5.3 wiederfinden – zum Teil in anderer Anordnung unter Verfahrensgesichtspunkten zusammengefaßt.

Die Soll-Eigenschaften und das Idealverhalten gegenüber beliebigen Eingangssignalen sind durch den Frequenzgang des gesamten Signalpfads – vom Schwingungsaufnehmer bis zur Datenausgabe – bei Beaufschlagung mit harmonischen (sinusförmigen) Schwingungen wesentlich mitbestimmt. Die Begriffe Übertragungskoeffizient, Übertragungsfunktion und Frequenzgang beziehen sich in dieser Norm, soweit sie nicht einzelnen Gerätefunktionen ausdrücklich zugeordnet sind, stets auf die Schwingungsmeßeinrichtung als Ganzes. Zum Übertragungskoeffizienten bei einer bestimmten Frequenz, definiert als Quotient Ausgabegröße : mechanische Eingangsgröße, können also neben den linearen Übertragungsgliedern auch die nichtlinearen Glieder, wie Meßwertdetektoren, einen systematischen Beitrag liefern (siehe 5.3.1).

4.2 Allgemeine Anforderungen, Fehlergrenzen

Für alle in dieser Norm behandelten Abweichungen vom Idealverhalten sind drei Genauigkeitsklassen mit unterschiedlichen Fehlergrenzen definiert. Eine Meßeinrichtung entspricht nur dann einer bestimmten Genauigkeitsklasse, wenn sämtliche Fehlergrenzen für diese Klasse eingehalten werden, soweit die betreffenden Meßarten überhaupt vorgesehen sind (siehe hierzu Anhang F). Es wird empfohlen, in weiteren Festlegungen für spezifische Anwendungsbereiche aus den drei Genauigkeitsklassen nur eine oder zwei auszuwählen.

Sämtliche Anforderungen und Fehlergrenzen dieser Norm beziehen sich grundsätzlich auf die Meßeinrichtung als Ganzes, wenngleich sich die Prüfung im Einzelfall auf bestimmte Funktionseinheiten – soweit nur diese in Betracht kommen – beschränken darf.

Falls eine Meßeinrichtung tatsächlich in Teilen (Funktionseinheiten) realisiert wird und diese frei miteinander kombinierbar sein sollen, so ist bei der Aufspaltung der Gesamtfehlergrenzen auf die einzelnen Funktionseinheiten folgendes zu beachten:

- a) Fehlergrenzen, die einer einzigen Funktionseinheit ursächlich zuzuordnen sind, dürfen von dieser voll in Anspruch genommen werden (z. B. Richtungsabhängigkeit des Schwingungsaufnehmers, Effektivwertabweichung des Meßwertdetektors).
- b) Bezüglich aller anderen Einflüsse für Abweichungen sind für die Funktionseinheiten separate Fehlergrenzen so festzulegen, daß ihre Quadratsumme höchstens dem Quadrat der Gesamtfehlergrenzen gleichkommt. Die Aufspaltung der Gesamtfehlergrenzen auf einzelne Funktionseinheiten kann von einem Hersteller, der alle Teile anbietet, vorgenommen werden – sofern sie nicht durch weitere Festlegungen für bestimmte Anwendungsbereiche allgemein geregelt wird.
- c) Für eine Meßeinrichtung, die sich aus einzeln geprüften Funktionseinheiten zusammensetzt, ist durch eine Über-alles-Prüfung sicherzustellen, daß sie unter angenäherten Referenzbedingungen die in Abschnitt 7 festgelegten Fehlergrenzen einhält.

4.3 Umfang der Prüfungen

Die in dieser Norm vorgegebenen Anforderungen und Prüfverfahren sind sehr umfassend formuliert, um den Anwender oder Käufer einer Meßeinrichtung ebenso wie Betroffene und Verursacher von Schwingungen hinsichtlich Meßrichtigkeit und Meßsicherheit gleichermaßen zufriedenzustellen. Wenn aber nach sachverständigem Ermessen oder aufgrund einer Typ- oder Bauartprüfung sichergestellt erscheint, daß sich bestimmte Einflüsse auf den Meßwert nur unerheblich auswirken können oder daß die Einhaltung der Fehlergrenzen auch mit reduziertem Prüfumfang nachzuweisen ist, darf bei der Prüfung – insbesondere bei der Stückprüfung – vereinfacht verfahren werden.

Andererseits kann es in Zweifelsfällen erforderlich sein, für bestimmte Nachweise das vorgegebene Prüfverfahren nicht nur einzuhalten, sondern noch zu verfeinern.

In weiteren Festlegungen können bestimmte Prüfungen zum Gegenstand einer Typ- oder Bauartprüfung anhand einer Anzahl von Prüfmustern erklärt werden. Auch können Einzel- oder Stückprüfungen in ihrem Umfang näher bestimmt werden.

ANMERKUNG: Die Prüfverfahren sind – um den Gebrauch der Norm zu erleichtern und Wiederholungen zu vermeiden – jeweils zusammen mit den Soll-Eigenschaften und Fehlergrenzen einzelnen Verfahrensschritten zugeordnet und nicht zu einem separaten Abschnitt zusammengefaßt.

5 Signalpfad

5.1 Meßgrößenwandlung

5.1.1 Allgemeines

Die mechanische Bewegung wird durch den Schwingungsaufnehmer in ein verarbeitungsfähiges Signal umgesetzt. Dieser Vorgang an sich ist mit einer Reihe von Unvollkommenheiten behaftet, die in den folgenden Abschnitten separat behandelt werden. Ungeachtet dessen beziehen sich alle Anforderungen auf die Meßeinrichtung als Ganzes. Auch kann der Schwingungsaufnehmer Teile der Signalverarbeitung beinhalten oder untrennbarer Bestandteil der Meßeinrichtung sein. Die Umsetzung der mechanischen Eingangsgröße in eine andere Größenart wird nur relevant an Schnittstellen mit externen Geräten, siehe Bilder 1 und 2 sowie 6.4.

Je nach Anwendungsbereich und weiterer Festlegung dürfen die Schwingungsaufnehmer – wenn nicht ausnahmsweise anders spezifiziert – im wesentlichen nur für eine von drei Arten mechanischer Bewegung empfindlich sein: translatorische Bewegung, rotatorische Bewegung oder deformatorische Bewegung (insbesondere Dehnung), und zwar nur für die in der Meßrichtung des Schwingungsaufnehmers wirk-same Vektor- bzw. Tensorkomponente. Vom Hersteller ist das Arbeitsprinzip anzugeben sowie, ob es sich um einen Absolut- oder Relativaufnehmer handelt. Der Hersteller muß sicherstellen, daß der zu einer bestimmten Meßeinrichtung gehörende Aufnehmer unverwechselbar ist.

ANMERKUNG: Deformatorische Bewegung ist gemeint als Oberbegriff für Dehnung und Scherung (bedingen sich gegenseitig) sowie für Krümmung und Torsion (bedingt durch örtlich inhomogene Dehnung und Scherung). Aufnehmer für deformatorische Bewegungen werden in dieser Norm nicht näher behandelt, ebensowenig Kraftaufnehmer (wegen der Beschränkung dieser Norm auf kinematische Größen). Gleichwohl sind die sonstigen Festlegungen ebenso auf solche Eingangsgrößen anwendbar.

Von der Vielzahl möglicher unbeabsichtigter Empfindlichkeiten gegen andere Bewegungsarten in jeweils verschiedenen Richtungen bzw. Hauptachsen sowie gegen andere als in der Meßrichtung liegende Komponenten der gleichen Art sind nur wenige von praktischem Interesse und in Gerätespezifikationen gebräuchlich. Diese sind in 5.1.2 bis 5.1.5 behandelt. 5.1.6 bis 5.1.11 betreffen weitere aufnehmertypische Unvollkommenheiten.

Gewöhnlich ist die elektrische Ausgangsgröße eines Aufnehmers einer bestimmten Eingangsgröße innerhalb festgelegter Frequenz- und Amplitudengrenzen mit festgelegten Fehlergrenzen proportional. Da Nichtproportionalitäten jedoch durch die nachfolgende Signalverarbeitung kompensiert werden können, sind die Anforderungen an die Frequenz- und Amplitudenlinearität nur für die gesamte Meßeinrichtung festgelegt.

Für einen Schwingungsaufnehmer ist diejenige mechanische Größenart als Eingangsgröße anzugeben, auf die sich seine – sofern vorgesehen – elektrischen Ausgangsgrößen beziehen. Das kann auch implizit in der Maßeinheit des Übertragungskoeffizienten (Ausgangsgröße : Eingangsgröße) zum Ausdruck kommen, falls Proportionalität herrscht.

Ein Signal gilt im Sinne dieser Norm als proportional zu einer bestimmten Eingangsgröße, wenn für harmonische Schwingungen (Sinussignale) das Verhältnis seiner Amplitude zur Amplitude der Eingangsgröße innerhalb eines spezifizierten Frequenzbereiches bis auf festgelegte Grenzabweichungen konstant ist.

Für die verschiedenen Arten von Bewegungen und Schwingungsaufnehmern sind folgende Eingangsgrößen und Basis-einheiten gebräuchlich:

Translatorische Bewegung, Translationsaufnehmer:

Auslenkung (Schwingweg)	m	} Zeitliche Ableitungen bzw. Integrale
Geschwindigkeit (Schnelle)	m/s	
Beschleunigung	m/s ²	

Rotatorische Bewegung, Rotationsaufnehmer:

(Dreh-)Winkel	rad	} Zeitliche Ableitungen bzw. Integrale
Winkelgeschwindigkeit	rad/s	
Winkelbeschleunigung	rad/s ²	

Deformatorische Bewegung, Deformationsaufnehmer:

Dehnung m/m

5.1.2 Richtungsabhängigkeit, Querempfindlichkeit

Nach DIN 45661 wird die Empfindlichkeit eines Translations-(Rotations-)Aufnehmers gegenüber Bewegungen der gleichen Art, die er messen soll, jedoch in einer Richtung (Achsenrichtung) rechtwinklig zur Meßrichtung (Meßachse), durch den Richtungsfaktor (Verhältnis der Übertragungskoeffizienten in der Schwingungsrichtung/-achse und in der Meßrichtung/-achse) beschrieben.

Der maximale Richtungsfaktor bei der Referenzfrequenz darf die in Tabelle 2 festgelegten Werte nicht überschreiten. Die Prüfung darf in Winkelschritten von höchstens 30° erfolgen (Drehung des Aufnehmers um seine Meßrichtung bzw. Meßachse, die ihrerseits senkrecht zur Schwingungsrichtung bzw. -achse steht).

Der Richtungsfaktor ist auch bei der höchstmöglichen Frequenz – abhängig von den Prüfmitteln – innerhalb des Arbeitsfrequenzbereiches zu prüfen. Dabei vergrößern sich die Grenzwerte linear mit der Frequenz bis zum Dreifachen der in Tabelle 2 genannten Werte an der oberen Frequenzbandgrenze nach 5.2.1.2.

ANMERKUNG: Auf eine Prüfung der gesamten Richtcharakteristik in einer oder mehreren Ebenen (cos-Gesetz, 8förmiges Polardiagramm) kann üblicherweise verzichtet werden.

Lageabhängige Aufnehmer (siehe 5.1.6) sind stets in der vorgesehenen Orientierung zum Schwerfeld zu prüfen. Es wird empfohlen, am Aufnehmer die Richtung des minimalen Richtungsfaktors in einer Ebene senkrecht zur Meßrichtung bzw. -achse zu markieren.

Tabelle 2: Maximaler Richtungsfaktor bei der Referenzfrequenz

	Genauigkeitsklasse		
	1	2	3
Maximaler Richtungsfaktor (90° zur Meßrichtung)	0,04	0,08	0,16

5.1.3 Dehnungsempfindlichkeit von Translationsaufnehmern

Die Empfindlichkeit eines Absolutaufnehmers für Translationsschwingungen gegenüber Wechseldeformationen des Meßobjekts in der Ankopplungsfläche – flächenhafte Ankopplung vorausgesetzt – ist vom Hersteller als Dehnungsempfindlichkeit (Basisdehnungsempfindlichkeit) anzugeben. Das ist der Quotient aus dem maximalen vorge-täuschten Meßwert und der in der Ankopplungsfläche – in ungünstigster Richtung – applizierten Dehnung, wobei sich der Schwingungsaufnehmer in Meßrichtung nicht bewegen darf. Da die Dehnung üblicherweise durch Biegung eines Probestabes erzeugt wird, spielt auch die Krümmung eine Rolle. Sie wird jedoch gewöhnlich außer acht gelassen. Im übrigen werden Referenzbedingungen vorausgesetzt. Die maximale Dehnungsempfindlichkeit ist vom Hersteller anzugeben.

5.1.4 Translationsempfindlichkeit von Rotationsaufnehmern

Die Empfindlichkeit eines Rotationsaufnehmers gegen eine rein translatorische Schwingung, appliziert in Richtung des größten Effektes, ist vom Hersteller anzugeben. Maßgeblich ist der Quotient des maximalen (im Arbeitsfrequenzbereich) vorgetäuschten rotatorischen Meßwertes und des gleichartig gebildeten translatorischen Meßwertes, anzugeben in rad/m. Die Richtung der Meßachse und die ungünstigste Richtung von Translationsschwingungen sind mitanzugeben.

5.1.5 Rotationsempfindlichkeit von Translationsaufnehmern

Für tiefabgestimmte Translationsaufnehmer, deren seismische Masse nicht geradlinig geführt ist, sondern um eine Achse rotierend schwingt, muß der Hersteller die Empfindlichkeit gegen rein rotatorische Schwingungen angeben, die um eine Achse durch einen festen Referenzpunkt des Aufnehmers in Richtung des größten Effektes appliziert werden. Maßgeblich ist der Quotient des maximalen (im Arbeitsfrequenzbereich) vorgetäuschten translatorischen Meßwertes und des gleichartig gebildeten rotatorischen Meßwertes, anzugeben in der Einheit m/rad. Die Lage des Referenzpunktes und die ungünstigste Richtung der Rotationsachse sind mitanzugeben.

Falls ein experimenteller Nachweis zu aufwendig ist, genügt es, den Effekt anhand des Konstruktionsprinzips abzuschätzen.

5.1.6 Lageeinfluß

Falls ein Schwingungsaufnehmer nur für eine bestimmte Lage (Orientierung seiner Meßrichtung bzw. -achse in bezug auf das Schwerfeld) vorgesehen ist, muß der Hersteller die Grenzabweichungen für Winkel angeben, innerhalb der sämtliche Spezifikationen und Anforderungen dieser Norm eingehalten werden.

5.1.7 Einfluß von Meßleitungen

Eine Meßleitung – falls vorhanden – zwischen dem Schwingungsaufnehmer und der übrigen Meßeinrichtung kann den Meßwert auf verschiedene Weisen beeinflussen, von denen die meisten durch die Anforderungen an die Gesamt-Meßeinrichtung erfaßt sind. Die folgenden sind aber speziell dem Schwingungsaufnehmer und seiner Anschlußleitung zuzurechnen:

- Schwingbewegungen der Meßleitung relativ zum Schwingungsaufnehmer beaufschlagen diesen mit Kräften, die unerwünschte Ausgangssignale hervorrufen. Doch lassen sich hierfür nur schwerlich Grenzwerte und Prüfverfahren festlegen. Deshalb sollte – falls überhaupt problematisch – der Hersteller für die Meßeinrichtung und den jeweiligen Einsatzbereich Anweisungen geben, wie der Effekt zu minimieren ist.
- Schwingungsbeanspruchung der Meßleitung selbst (z. B. durch Biegen) kann durch triboelektrische Effekte oder Kapazitätsänderungen Störsignale hervorrufen. Da Grenzwerte und Prüfverfahren noch nicht hinreichend erprobt sind, wird das Problem – vorbehaltlich weiterer Festlegungen – ebenfalls dem Hersteller überantwortet.
- Statische Kräfte, die die Meßleitung auf den Aufnehmer ausübt. Der Hersteller sollte gegebenenfalls auf den Effekt hinweisen.

Der Hersteller muß die Beschaffenheit und maximal zulässige Länge einer Meßleitung angeben, gegebenenfalls anwendungsbezogen.

5.1.8 Rückwirkung auf das Meßobjekt

Die Masse eines mitbewegten Schwingungsaufnehmers – gegebenenfalls seiner mitbewegten Teile – einschließlich notwendiger Teile für mechanische Ankopplung und elektrischen Anschluß ist vom Hersteller anzugeben. Für berührungslose Aufnehmer sind gegebenenfalls übertragene Kräfte anzugeben. Weitere Festlegungen können konkrete Grenzen bezüglich Masse oder Kraft setzen.

ANMERKUNG: Die Angaben dienen dem Anwender zum Abschätzen der Rückwirkung auf die zu mes-

sende Schwingung (Verschiebung von Resonanzfrequenzen, Änderung von Betrag und Phase einer Schwingung).

5.1.9 Ankopplung, Befestigungsmittel

Der Hersteller muß Ankopplungsarten und Befestigungsmittel für den Schwingungsaufnehmer angeben, die sicherstellen, daß die Anforderungen dieser Norm eingehalten werden.

5.1.10 Stoßverträglichkeit

Die Stoßverträglichkeit der Meßeinrichtung als Ganzes wird in 8.3.2 behandelt. Darüber hinaus wird empfohlen: Der Schwingungsaufnehmer sollte Stöße in jeder Richtung bis zum 10fachen der Beschleunigung entsprechend der oberen Meßbereichsgrenze ohne Schaden ertragen. Die Stöße sollten halbsinusförmig sein und sich in ihrer Dauer an dem 10fachen des Kehrwertes der oberen Frequenzbandgrenze orientieren.

5.1.11 Temperatursprung-Empfindlichkeit

Die Empfindlichkeit des Schwingungsaufnehmers gegenüber plötzlichen Temperaturänderungen wird durch den Quotienten aus dem maximalen vorgetäuschten Meßwert und der applizierten Temperaturdifferenz beschrieben. Zwecks Prüfung muß der unbewegte Schwingungsaufnehmer schnellstmöglich von 50 °C auf 0 °C abgekühlt werden, möglichst durch nachhaltiges Benetzen seiner Oberfläche mit Eiswasser. Falls verschiedene untere Frequenzgrenzen der Meßeinrichtung wählbar sind, muß bei der Prüfung die niedrigste genommen werden. Der Hersteller muß den Quotienten in mechanischen Einheiten je Kelvin angeben.

5.1.12 Zusätzliche Anforderungen an den Schwingungsaufnehmer

Je nach Anwendungsbereich können weitere Festlegungen für den Schwingungsaufnehmer notwendig sein, z. B. bezüglich der Maße oder der Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse.

5.2 Lineare Signalverarbeitung

Lineare Signalverarbeitung im Sinne dieser Norm bezeichnet die von einem linearen Übertragungssystem bewirkte Signalverarbeitung.

ANMERKUNG: Ein lineares Übertragungssystem ist dadurch gekennzeichnet, daß die Überlagerung (Linearkombination) mehrerer Funktionen (Signale) zum gleichen Ergebnis führt, einerlei ob die Überlagerung vor oder nach der Übertragung erfolgt. Sinusfunktionen sind Eigenfunktionen linearer Systeme und bleiben als solche erhalten.

Alle anderen Verfahrensschritte sind zur nichtlinearen Signalverarbeitung (siehe 5.3) zusammengefaßt, auch wenn sie lineare Elemente enthalten (z. B. Tiefpaßfilterung oder arithmetische Mittelung nach Quadrierung). Davon abgesehen ist die Reihenfolge grundsätzlich: erst lineare, dann nichtlineare Verfahrensschritte.

Die Meßgrößenwandlung zählt zwar eigentlich auch zu den linearen Verfahrensschritten, ist aber in separaten Abschnitten behandelt (siehe 5.1 und 6.4), da sie zur Beschreibung des Signalpfades von der mechanischen Eingangsgröße bis zur Datenausgabe nicht benötigt wird und nur an abzweigenden Signalausgängen und -eingängen (im linearen wie im nichtlinearen Teil) nach außen in Erscheinung tritt. Die Zuordnung der einzelnen Schritte ist in Bild 2 beispielhaft als Verfeinerung von Bild 1 verdeutlicht.

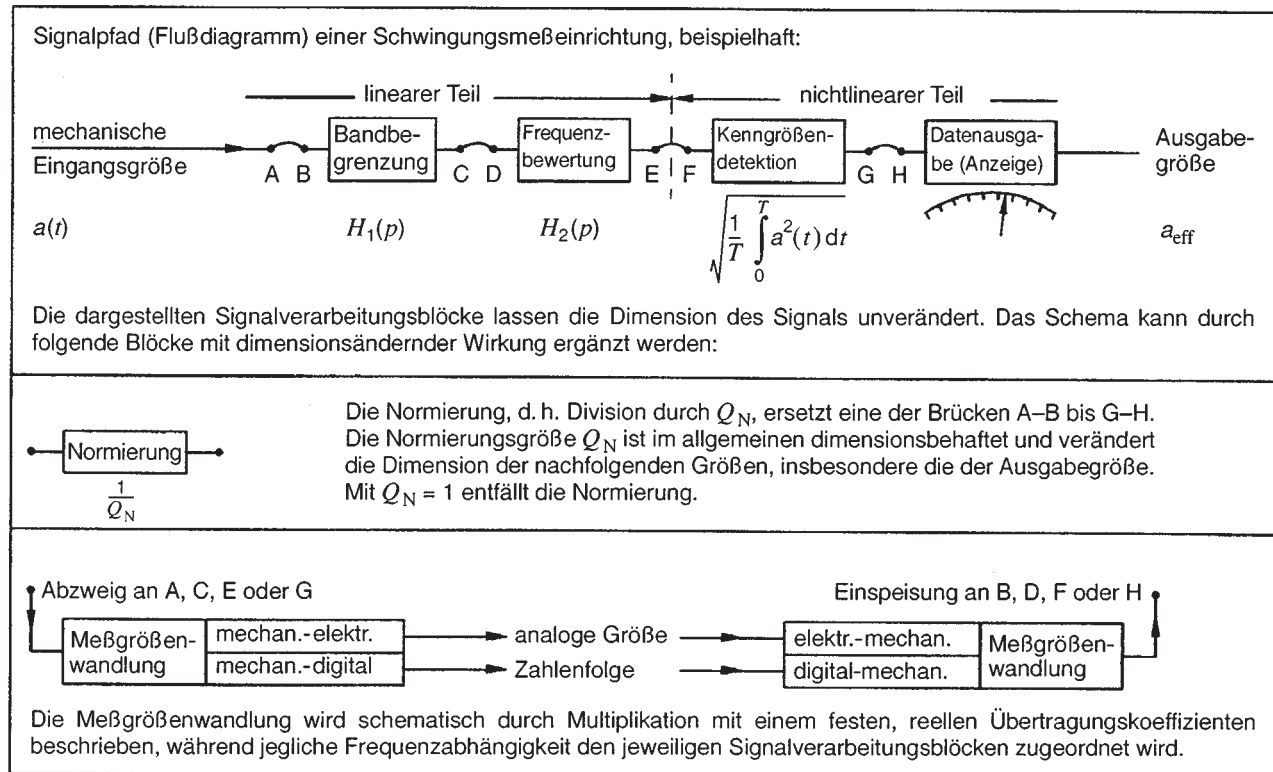


Bild 2: Zuordnung einzelner Verfahrensschritte

5.2.1 Umformung des Frequenzspektrums

5.2.1.1 Soll-Frequenzgang

Das Frequenzspektrum, das jedem Schwingungszeitsignal eigen ist, wird durch den Frequenzgang der Meßeinrichtung vor der nichtlinearen Signalverarbeitung umgeformt. Maßgeblich sind die Frequenzgänge (Übertragungsfunktionen) der Frequenzbandbegrenzung und der Frequenzbewertung, und zwar ist die Gesamt-Übertragungsfunktion gleich dem Produkt der drei Übertragungsfunktionen für die untere und obere Frequenzbandbegrenzung (Hoch- bzw. Tiefpaßfilter) und die Frequenzbewertung (siehe aber 5.3.1, Gleichung 7). Der Frequenzgang ist eine dimensionslose Funktion der Frequenz mit Betrag und Phasenverschiebungswinkel, die auch separat als Amplituden- und Phasenfrequenzgang angegeben werden. Die Beträge, d. h. die Funktionswerte des Amplitudenfrequenzganges, werden entweder als Übertragungsfaktoren (multiplikativ) oder als Übertragungsmaße (additiv) angegeben.

ANMERKUNG 1: Wie üblich bezeichnet das Wort "Frequenzspektrum" nur die Beträge der spektralen Komponenten als Funktion der Frequenz, während das "komplexe Frequenzspektrum" auch Phasenverschiebungswinkel beinhaltet. Letztere sind ohne Bedeutung für Effektivwerte (hinreichend lange Mittelung vorausgesetzt), können aber Spitzenwerte erheblich beeinflussen.

Die Soll-Frequenzgänge sollten in weiteren Festlegungen üblicherweise mit Bezug auf die Beschleunigung als Eingangsgröße (bei translatorischen Bewegungen) angegeben werden, und zwar – getrennt für Bewertung, Hoch- und Tiefpaßfilterung – vorzugsweise als komplexe Übertragungsfunktion in der Form

$$H(p) = \frac{Z_0 + Z_1 p + Z_2 p^2 + \dots + Z_n p^n}{N_0 + N_1 p + N_2 p^2 + \dots + N_n p^n} \quad (1)$$

Dabei ist:

$$p = i\omega = i2\pi f \quad \text{komplexe Kreisfrequenz.}$$

In abweichenden Festlegungen darf auch auf andere Eingangsgrößen, z. B. die Schnelle, Bezug genommen werden.

ANMERKUNG 2: Die ausschließliche Bezugnahme auf die Eingangsgröße Beschleunigung in dieser Norm dient der Vereinheitlichung und erspart die Festlegung zusätzlicher Frequenzgangfunktionen.

ANMERKUNG 3: Solche Funktionen lassen sich durch einfache Anlogschaltungen nachbilden oder durch einfache Algorithmen digital approximieren (rekursive Filter). Die Funktionswerte lassen sich auch zur rechnerischen Umformung analysierter Spektren verwenden.

Die Koeffizienten $Z_0, Z_1, \dots, Z_n$ und $N_0, N_1, \dots, N_n$ für die Frequenzbewertung sind als freie Parameter weiteren Festlegungen vorbehalten; für die Bandbegrenzung enthält diese Norm einengende Vorgaben. (Näheres im folgenden und in den Abschnitten A.1 und A.2.) Ergänzende Darstellungen in Tabellen- und Kurvenform eignen sich zur Übernahme in Geräte-Handbücher und zur Information der Benutzer.

5.2.1.2 Frequenzbandbegrenzung, Frequenzbewertung

Die **Frequenzbandbegrenzung** unterdrückt Frequenzkomponenten im Schwingungssignal außerhalb des interessierenden Frequenzbereiches mit dem Ziel einheitlicher, reproduzierbarer Meßergebnisse. Sie ist stets notwendig, wenn die Frequenzbewertung selbst keine hinreichende Bandbegrenzung enthält. Im Hinblick auf die meistens unscharfen Frequenzgrenzen der verschiedenen Wirkungen mechanischer Schwingungen sowie auf den technischen Aufwand sollten die Bandbegrenzungen nicht zu scharf einsetzen. Vorbehaltlich abweichender Festlegungen muß die Bandbegrenzung durch Hoch- und Tiefpaßfilter 2. Ordnung mit Butterworth-Charakteristik erfolgen (Übertragungsfunktionen H_h bzw. H_t). In diesem Fall genügt als weitere Festlegung die Angabe der

Hochpaß-Eckfrequenz f_h und der Tiefpaß-Eckfrequenz f_t . (Näheres in Abschnitt A.1.) Das Intervall zwischen den Frequenzen f_h und f_t wird als Arbeitsfrequenzbereich bezeichnet.

ANMERKUNG 1: Gelegentlich wird unter Arbeitsfrequenzbereich der um die beiden äußeren Terzintervalle verringerte Frequenzbereich zwischen f_h und f_t verstanden.

Um aber steilere Filterflanken als 12 dB/Oktave nicht auszuschließen – mit Rücksicht auf mehrfache Wechselspannungskopplung im Signalpfad oder auf Anti-Aliasing-Filter vor einer A/D-Wandlung – öffnen sich die Frequenzgang-Toleranzfelder nach 5.2.1.3 in hinreichendem Abstand von den Bandgrenzen (Bereich 3 der Tabelle 3) nach unten. Ist keine untere Frequenzbandbegrenzung beabsichtigt, sollen also Gleichkomponenten miterfaßt werden (geeignete Aufnehmer vorausgesetzt), so ist f_h gleich 0 und folglich die Hochpaßfunktion gleich 1.

Die **Frequenzbewertung** gewichtet die im Schwingungssignal enthaltenen Frequenzkomponenten mit dem Ziel wirkungsorientierter Meßergebnisse. Empfehlungen für die Festlegung von Bewertungsfunktionen (Übertragungsfunktion H_b) enthält Abschnitt A.2. Weitere Festlegungen bezüglich der Parameterwerte und eventuell Kombination verschiedener Funktionen sind in jedem Fall erforderlich, abweichende Festlegungen sind möglich. Ist keine Frequenzbewertung beabsichtigt, so ist die Bewertungsfunktion gleich 1 zu setzen.

ANMERKUNG 2: Häufig wird nicht zwischen Frequenzbewertung und Frequenzbandbegrenzung unterschieden, sondern letztere in ersterer inbegriffen, die dann den Soll-Frequenzgang allein bestimmt. Wegen der unterschiedlichen Zielsetzung, der übersichtlicheren Definitionsgleichungen und der einfacheren Realisierung werden beide Begriffe in dieser Norm streng getrennt. Gemeinsamer Oberbegriff ist "Umformung des (Frequenz-)Spektrums".

Die Umformung des Frequenzspektrums mit der Gesamt-Übertragungsfunktion $H = H_h \cdot H_t \cdot H_b$ läßt sich auf mehrere Weisen durchführen, aus denen in weiteren Festlegungen ausgewählt werden kann:

- Filterung der Signal-Zeitfunktion entsprechend den gegebenen Bewertungs- und Bandbegrenzungsfunktionen nach Betrag und Phase mit Hilfe von Analog- und Digitalfiltern – ohne spektrale Zerlegung;
- Zerlegung der Zeitfunktion in schmalbandige spektrale Anteile durch parallele Bandpaßfilterung; Abschwächung oder Verstärkung der gefilterten Zeitfunktionen entsprechend dem Soll-Amplitudenfrequenzgang an den Bandmittelfrequenzen; Addition der Zeitfunktionen (Equalizing);
- Fouriertransformation; Multiplikation des komplexen Frequenzspektrums (Betrag und Phase) mit der komplexen Soll-Frequenzgangfunktion (Betrag und Phase); Fourier-Rücktransformation in den Zeitbereich.

Im Vorgriff auf die nichtlineare Signalverarbeitung kommt hinzu:

- Frequenzanalyse, d.h. Zerlegung des Spektrums in schmalbandige Anteile mit Bildung des Effektivwertes oder der Spektraldichte als quadratisches Zeitmittel; rechnerische Bewertung der Anteile entsprechend dem Soll-Amplitudenfrequenzgang an den Bandmittelfrequenzen; energetische Addition der bewerteten Anteile.

ANMERKUNG 3: Das Verfahren a) wird überwiegend angewandt und dient als Basis für die Festlegungen dieser Norm. Die Verfahren b) und d) sind sehr flexibel, verfälschen bzw. ignorieren aber die für Spitzen-

wertmessungen wichtigen Phasenbeziehungen, und d) liefert darüber hinaus nur energetische Mittelwerte (Effektivwerte), während die Zeitstruktur verlorengeht. Außerdem führen größere Filterbandbreiten und nichtideale Durchlaßkurven zu systematischen Abweichungen, da die Umformung des Spektrums nur für diskrete Frequenzen exakt sein kann. Die Fehlergrenzen für den Soll-Amplitudenfrequenzgang (siehe 5.2.1.3) werden schwerlich einzuhalten sein. Das Verfahren c) ist sehr aufwendig und wird kaum angewandt.

Fehlergrenzen und Prüfhinweise für den Soll-Amplitudenfrequenzgang folgen in 5.2.1.3. Gegebenenfalls sind auch die Anforderungen an den Phasenfrequenzgang nach 5.2.1.4 zu beachten.

5.2.1.3 Amplitudenfrequenzgang

Ausgehend von der Referenzfrequenz, bei der die Fehlergrenzen definitionsgemäß gleich Null sind, muß der tatsächliche Amplitudenfrequenzgang mit dem Soll-Amplitudenfrequenzgang innerhalb der Fehlergrenzen nach Tabelle 3 übereinstimmen. Das heißt:

$$1 - \frac{G_u}{100\%} \leq \frac{R(f)}{R(f_r)} \cdot \frac{M(f_r)}{M(f)} \cdot \frac{H(f_r)}{H(f)} \leq 1 + \frac{G_o}{100\%} \quad (2)$$

Dabei ist:

- f Frequenz;
- f_r Referenzfrequenz;
- M mechanische Eingangsgröße (Effektivwert);
- R Reaktion der Meßeinrichtung (Anzeige²) oder Ausgangseffektivwert;
- H Soll-Amplitudenfrequenzgang (Funktionswert nach 5.2.1.2);
- G_o obere Fehlergrenze nach Tabelle 3;
- G_u untere Fehlergrenze nach Tabelle 3.

Die Fehlergrenzen bei $f = f_r$ sind definitionsgemäß gleich Null (Einschnürung des Toleranzfeldes), siehe Bild D.2. Das Toleranzfeld erweitert sich an den Grenzen des Arbeitsfrequenzbereiches und öffnet sich weiter außerhalb unbeschränkt nach unten (wo nämlich der Soll-Frequenzgang aufgrund der notwendigen Frequenzbandbegrenzung so weit abgefallen ist, daß eventuell dort vorhandene Frequenzkomponenten den Meßwert in der Regel nicht nennenswert beeinflussen werden). Die Fehlergrenzen für den Amplitudenfrequenzgang sind in Tabelle 3 angegeben, wobei drei Bereiche unterschieden werden:

Bereich 1:

Innerer Frequenzbereich von 2 Terzen über der unteren Bandgrenze bis 2 Terzen unter der oberen Bandgrenze, ausgenommen die Referenzfrequenz;

Bereich 2:

Oberer und unterer Randbereich von jeweils 2 Terzen innerhalb bis 2 Terzen außerhalb der Bandgrenzen;

Bereich 3:

Oberer und unterer Sperrbereich außerhalb der durch Bereich 2 gegebenen Grenzen.

²⁾ Wenn die nichtlineare Signalverarbeitung Nichtproportionalität erzeugt (beabsichtigt oder fehlerhaft), muß M so geregelt werden, daß R konstant bleibt. Wenn der maximale gleitende Effektivwert angezeigt wird, kann dadurch der Amplitudenfrequenzgang systematisch verändert werden. (Näheres siehe 5.3.1.)

Tabelle 3: Fehlergrenzen für den Amplitudenfrequenzgang

	Genauigkeitsklasse					
	1		2		3	
	Fehlergrenzen in %					
	G_o	G_u	G_o	G_u	G_o	G_u
Referenzfrequenz	0	0	0	0	0	0
Bereich 1	5	5	10	10	15	15
Bereich 2	10	10	20	20	25	25
Bereich 3	20	100	25	100	30	100

Die Einhaltung der oberen Fehlergrenze G_o im Bereich 3 muß außerhalb des Arbeitsfrequenzbereichs nur so weit nachgewiesen werden, wie der Soll-Übertragungskoeffizient (bezogen auf die Beschleunigung als Eingangsgröße) noch größer ist als

- 1 % (–40 dB) seines absoluten Höchstwertes oder
- 31,6 % (–10 dB) seines Wertes bei f_i oder
- 31,6 % (–10 dB) seines Wertes bei f_h .

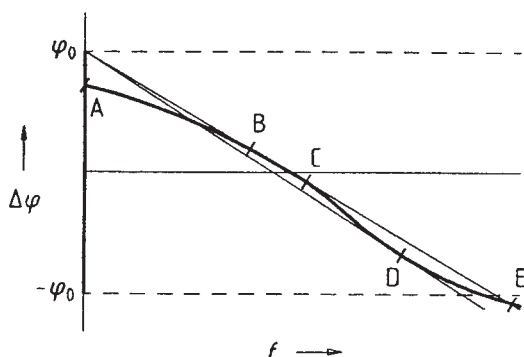
Die Prüfung ist in Frequenzmaßintervallen von höchstens 1 Terz auszuführen.

Darüber hinaus ist die Prüfung an der unteren und oberen Grenze des Arbeitstemperaturbereiches zu wiederholen. Dabei addieren sich die Fehlergrenzen aufgrund des Frequenz- und Temperaturganges (siehe Tabellen 3 und 22).

ANMERKUNG: Die kombinierte Prüfung des Frequenz- und Temperatureinflusses ist besonders wichtig für Aufnehmer, deren Eigenfrequenz im oder nahe beim Arbeitsfrequenzbereich liegt.

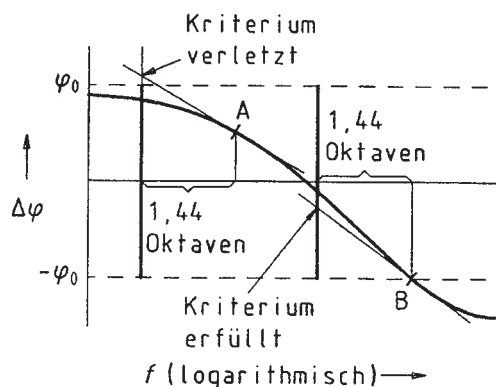
5.2.1.4 Phasenfrequenzgang

Der Phasenfrequenzgang und die diesbezüglichen Anforderungen sind nur zu beachten, wenn der Zeitverlauf wiedergegeben oder der Spitzenwert bestimmt werden soll. Letzterer ist nur bei Vorgabe eines Amplituden- und Phasenfrequenzganges eindeutig definiert und in seiner Genauigkeit durch die Fehlergrenzen des Phasengangs mitbestimmt. Um die daraus resultierende größtmögliche Spitzenwertabweichung zu begrenzen, muß die über der Frequenz als Kurve aufgetragene Abweichung zwischen Ist- und Soll-Phasenwinkel einer der folgenden Bedingungen genügen, wobei für φ_0 Werte nach Tabelle 4 einzusetzen sind:



A-B und D-E: Tangentenkriterium a offensichtlich erfüllt
B-C: Bereich maximaler Toleranzausnutzung
C-D: Tangentenkriterium a verletzt, weil Kurve zu steil (aber unerheblich, wenn die Frequenzen bei E und C im Verhältnis < 3:1 stehen)

a) für lineare Frequenzachse



In A ist das Tangentenkriterium b verletzt.
In B ist das Tangentenkriterium b erfüllt.

b) für logarithmische Frequenzachse

Bild 3: Beispiele zum Tangentenkriterium für Fehlergrenzen des Phasengangs

a) Wird die Abweichung $\Delta\varphi = \varphi_{\text{ist}} - \varphi_{\text{soll}}$ über der linearen Frequenzachse aufgetragen, so müssen alle Tangenten an die Kurve die $\Delta\varphi$ -Achse zwischen $-\varphi_0$ und $+\varphi_0$ schneiden (Tangentenkriterium a).

b) Wird die Abweichung $\Delta\varphi = \varphi_{\text{ist}} - \varphi_{\text{soll}}$ über der logarithmischen Frequenzachse aufgetragen, so dürfen alle Tangenten an die Kurve bei einer Frequenz von 1,44 Oktaven (1/e-fache) unterhalb ihres Berührungspunktes höchstens um $\pm\varphi_0$ von der Frequenzachse entfernt sein (Tangentenkriterium b).

Die Kriterien sind in den Bildern 3a) und 3b) beispielhaft illustriert.

In Tabelle 4 sind neben den Werten für φ_0 auch die daraus höchstens etwa resultierenden (je nach spektraler Verteilung des Signals) Spitzenwertabweichungen ΔS_{max} angegeben. Die Bereiche 1, 2 und 3 sind die gleichen wie in 5.2.1.3.

Voraussetzungen für eine derartige Prüfung des Phasengangs sind:

- Die Schnittstelle 2 nach Bild 1 existiert und ist zugänglich.
- Die Spitzenwertdetektion nach dieser Schnittstelle darf die Phase nicht drehen.

Tabelle 4: Kennwerte φ_0 für die Tangentenkriterien a und b sowie die daraus höchstens etwa resultierenden Spitzenwertabweichungen ΔS_{max}

		Genauigkeitsklasse		
		1	2	3
Kennwert φ_0	Bereich 1	6°	12°	26°
	Bereich 2	12°	26°	beliebig
	Bereich 3	keine Festlegung		
Spitzenwertabweichungen ΔS_{max} in %	Bereich 1	± 5	± 10	± 20
	Bereich 2	± 10	± 20	± 40
	Bereich 3	keine Festlegung		

ANMERKUNG: Der Phasenfrequenzgang ist über die komplexe Frequenzgangfunktion indirekt durch den Amplitudenfrequenzgang festgelegt, der sich wiederum an wirkungs- oder anwendungsbezogenen Vorgaben orientiert. Ein frequenzproportionaler Phasenverschiebungswinkel (konstante Gruppenlaufzeit) wäre in der Regel weder von der Anwendung noch vom Aufwand her zu rechtfertigen.

Bei der Prüfung des Phasengangs nach den obengenannten Kriterien darf die Frequenz in Stufen von höchstens 1 Terz variiert werden, wobei die Tangenten in Sekanten durch benachbarte Kurvenpunkte übergehen.

Alternativ können abweichende Festlegungen – beispielsweise in Anlehnung an 5.4.2 – eine implizite Prüfung des Phasenganges dadurch vorsehen, daß für bestimmte überschwingungshaltige mechanische Prüfsignale die nach dem komplexen Soll-Frequenzgang theoretisch zu erwartenden Soll-Spitzenwerte sowie Fehlergrenzen angegeben werden.

5.2.1.5 Nichtlineare Verzerrungen

Die folgenden Anforderungen gelten grundsätzlich für alle Ausgangssignale vor der nichtlinearen Signalverarbeitung, die zur Speicherung oder externen Weiterverarbeitung bereitgestellt werden, sowie für Frequenzspektren, die in der Meßeinrichtung analysiert werden.

ANMERKUNG 1: Die Anforderungen betreffen nur Unvollkommenheiten der linearen Signalverarbeitung und haben nichts zu tun mit der sich anschließenden nichtlinearen Signalverarbeitung oder der nichtproportionalen Umformung von Meßwerten.

Die lineare Signalverarbeitung setzt ein lineares Verhalten der Meßeinrichtung voraus. Nichtlinearitäten sind besonders einfach erkennbar und quantifizierbar anhand einer harmonischen Eingangsgröße (sinusförmiges Eingangssignal) durch folgende Effekte:

- a) Nichtproportionaler Zusammenhang zwischen Meßwert und Eingangsamplitude;
- b) Entstehung signalfremder Frequenzkomponenten, dadurch gekennzeichnet, daß sie in der Amplitude vom Signal abhängig, in der Frequenz aber vom Signal verschieden sind.

Der Effekt a) ist durch die Festlegungen in 8.1.1 berücksichtigt. Die hier folgenden Festlegungen wie auch in 5.3.3 beziehen sich nur auf den Effekt b). Als Maß für die nichtlinearen Verzerrungen bei sinusförmigem Eingangssignal wird definiert:

Verzerrungsindex = Verhältnis des Effektivwertes aller signalabhängigen, frequenzungleichen Komponenten zum Gesamteffektivwert.

Das heißt: Der Verzerrungsindex I_V ist gleich

$$I_V = \frac{\sqrt{a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + \dots}}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + \dots}} \quad (3)$$

Dabei ist:

- a_1 Effektivwert der Komponente mit Signalfrequenz;
- $a_2, a_3, a_4, \dots$ Effektivwerte aller anderen von a_1 abhängigen spektralen Komponenten zwischen den Bandgrenzen sowie je drei Oktaven darüber und darunter.

ANMERKUNG 2: Neben harmonischen Verzerrungsprodukten mit ganzzahligen Vielfachen der Signalfrequenz können auch Mischprodukte mit internen Hilfsfrequenzen (Überlagerungsfilter, Stichprobenkontakt bei A/D-Wandlung) zum Verzerrungsindex beitragen. Fehlen solche Mischprodukte, so ist der Verzerrungsindex gleich dem Klirrfaktor.

Der so definierte Verzerrungsindex I_V darf für Aussteuerungen unterhalb der oberen Meßbereichsgrenze und ohne Ansprechen einer Übersteuerungsanzeige die Werte nach Tabelle 5 nicht überschreiten. Die Prüfung ist mindestens bei der Referenzfrequenz sowie an der unteren und oberen Grenze des Arbeitsfrequenzbereichs auszuführen. Die Ein-

gangsamplitude muß einmal der oberen Meßbereichsgrenze entsprechen und einmal dem Dreifachen der unteren Meßbereichsgrenze.

Tabelle 5: Höchstwert für den Verzerrungsindex I_V

	Genauigkeitsklasse		
	1	2	3
Höchstwert für den Verzerrungsindex I_V	2 %	5 %	8 %

Steil ansteigende Bewertungskurven können die Einhaltung der Anforderungen wie auch den Nachweis erschweren und abweichende Festlegungen erfordern.

Da die Erzeugung hinreichend verzerrungsarmer Schwingungen schwierig ist, genügt es nachzuweisen, daß der durch das Eingangssignal möglicherweise verfälschte Verzerrungsindex der zu beurteilenden Meßeinrichtung den mit einer anerkannt verzerrungsarmen Meßeinrichtung gemessenen Verzerrungsindex um nicht mehr als die Werte nach Tabelle 5 überschreitet.

5.2.2 Normierung

Die Normierung (Division durch eine festgelegte Normierungsgröße) kann an beliebiger Stelle im Signalpfad erfolgen (siehe Bild 2), auch z.B. durch geeignete Skalierung der Anzeige oder rechnerisch nach Ablesung einer nichtnormierten Größe. Sie dient dazu, um

- a) eine dimensionsbehaftete Eingangsgröße (gegebenfalls frequenzbewertet und gleichgerichtet) dimensionslos zu machen (z.B. zwecks Bildung eines Pegels oder anderer nichtlinearer Kennwerte), oder weil durch die Frequenzbewertung die Maßeinheit ohnehin von der Größenart entfremdet wird;
- b) unterschiedlich frequenzbewertete Kennwerte auf ein wirkungsäquivalentes Niveau zu bringen (z.B. K-Werte für Schwingungsbelastung von Menschen nach DIN 45671-1 oder VDI 2057).

Der (Soll-)Frequenzgang und die Normierung bestimmen den Zusammenhang zwischen mechanischer Eingangsgröße (in der Regel Beschleunigung) und Ausgabegröße bei einer diskreten Frequenz (Sinus) wie folgt:

$$\text{Ausgabegröße} = \frac{\text{Übertragungsfaktor}}{\text{Normierungsgröße}} \left\{ \begin{array}{l} \text{Effektivwert} \\ \text{der mecha-} \\ \text{nischen} \\ \text{Eingangs-} \\ \text{größe} \end{array} \right\} \quad (4)$$

ANMERKUNG: Für breitbandige Signale läßt sich ein entsprechender Zusammenhang nicht generell angeben, da die Kombination der einzelnen Frequenzkomponenten oder der zeitlich aufeinanderfolgenden Signalanteile sowohl vom Phasengang der linearen Signalverarbeitung als auch von der nichtlinearen Signalverarbeitung ganz unterschiedlich abhängen kann.

Die Festlegungen der Frequenzgangfunktion und der Normierungsgröße bedingen einander. Auch durch Vorgabe einer Soll-Meßgröße unter Referenzbedingungen kann die Normierungsgröße implizit festgelegt werden. Im Rahmen weiterer Festlegungen empfiehlt es sich, spezielle Bewertungen und Normierungen durch besondere Namen für den resultierenden Meßwert zu kennzeichnen. Empfehlungen zur Festlegung der Normierungsgröße werden in Abschnitt A.3 gegeben. Fehlergrenzen sind nicht vorgesehen.