

**DIN EN 15433-4**

ICS 55.180.01

Ersatz für  
DIN 30787-4:2002-09

**Transportbelastungen –  
Messen und Auswerten von mechanisch-dynamischen Belastungen –  
Teil 4: Datenauswertung;  
Deutsche Fassung EN 15433-4:2007**

Transportation loads –  
Measurement and evaluation of dynamic mechanical loads –  
Part 4: Data evaluation;  
German version EN 15433-4:2007

Charges de transport –  
Mesurage et analyse des charges mécaniques dynamiques –  
Partie 4: Evaluation des données;  
Version allemande EN 15433-4:2007

Gesamtumfang 60 Seiten

Normenausschuss Verpackungswesen (NAVp) im DIN

## **Nationales Vorwort**

Dieses Dokument wurde ursprünglich vom NA 115-01-04 AA „Anforderungen und Prüfung“ erarbeitet und im Jahr 2002 als DIN 30787-4 veröffentlicht.

Deutschland stellte dann bei CEN den Antrag, das Thema „Transportbelastungen – Messen und Auswerten von mechanisch-dynamischen Belastungen“ auf europäischer Ebene zu normen.

Das Technische Komitee CEN/TC 261 „Verpackung“, dessen Sekretariat vom AFNOR (Frankreich) gehalten wird, hat die DIN 30787-4 mit redaktionellen Änderungen übernommen und als EN 15433-4 veröffentlicht.

Die Arbeiten wurden auf europäischer Ebene durch CEN/TC 261/SC 5/WG 14 „Test methods and test schedules“ und auf nationaler Ebene durch das bereits o. g. zuständige Gremium, NA 115-01-04 AA „Anforderungen und Prüfung“, betreut.

## **Änderungen**

Gegenüber DIN 30787-4:2002-09 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Übernahme der Europäischen Norm (EN) als DIN EN;
- b) normative Verweisungen gestrichen;
- c) redaktionelle Änderungen.

## **Frühere Ausgaben**

DIN 30787-4: 2002-09

**Deutsche Fassung**

**Transportbelastungen —  
Messen und Auswerten von mechanisch-dynamischen  
Belastungen —  
Teil 4: Datenauswertung**

Transportation loads —  
Measurement and evaluation of dynamic  
mechanical loads —  
Part 4: Data evaluation

Charges de transport —  
Mesurage et analyse des charges  
mécaniques dynamiques —  
Partie 4: Evaluation des données

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 28. Oktober 2007 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG  
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION  
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

**Management-Zentrum: rue de Stassart, 36 B-1050 Brüssel**

## Inhalt

|                                                                      | Seite |
|----------------------------------------------------------------------|-------|
| Vorwort .....                                                        | 5     |
| Einleitung.....                                                      | 6     |
| 1 Anwendungsbereich .....                                            | 7     |
| 2 Normative Verweisungen.....                                        | 7     |
| 3 Gemessene Signale .....                                            | 8     |
| 3.1 Momentanwerte.....                                               | 8     |
| 3.2 Mittelwerte .....                                                | 8     |
| 3.2.1 Allgemeines.....                                               | 8     |
| 3.2.2 Instrumente und Softwareprogramme.....                         | 9     |
| 3.2.3 Arten von Mittelungen.....                                     | 9     |
| 3.2.4 Mittelungszeit und Abtastfehler .....                          | 9     |
| 3.3 Synchronisierte Mittelung.....                                   | 10    |
| 3.3.1 Allgemeines.....                                               | 10    |
| 3.3.2 Instrumente und Software .....                                 | 11    |
| 3.3.3 Auslöseverfahren.....                                          | 11    |
| 3.3.4 Verbesserung des Signal-Stör-Abstandes.....                    | 11    |
| 3.4 Gefilterte Signale .....                                         | 12    |
| 3.4.1 Allgemeines.....                                               | 12    |
| 3.4.2 Analoge Filterung .....                                        | 12    |
| 3.4.3 Digitale Filterung.....                                        | 13    |
| 4 Datenklassifizierung.....                                          | 13    |
| 4.1 Allgemeines.....                                                 | 13    |
| 4.2 Zeitabhängigkeit .....                                           | 13    |
| 4.2.1 Allgemeines.....                                               | 13    |
| 4.2.2 Stationäre oder quasistationäre Daten.....                     | 13    |
| 4.2.3 Instationäre Daten.....                                        | 14    |
| 4.2.4 Transiente Daten.....                                          | 15    |
| 4.2.5 Physikalische Überlegungen.....                                | 15    |
| 4.3 Stochastizität.....                                              | 16    |
| 4.3.1 Allgemeines.....                                               | 16    |
| 4.3.2 Erkennen periodischer Komponenten.....                         | 16    |
| 4.3.3 Trennung von stochastischen und periodischen Komponenten ..... | 16    |
| 4.4 Normalität .....                                                 | 17    |
| 4.4.1 Allgemeines.....                                               | 17    |
| 4.4.2 Prüfung auf Normalität.....                                    | 17    |
| 4.4.3 Pseudo-Abweichungen von der Normalverteilung .....             | 17    |
| 5 Einkanal-Spektralanalyse/Periodische und stochastische Daten ..... | 17    |
| 5.1 Algorithmen der Fourier-Transformation.....                      | 18    |
| 5.1.1 Allgemeines.....                                               | 18    |
| 5.1.2 Anzahl von Datenwerten .....                                   | 18    |
| 5.1.3 Redundante Komponenten.....                                    | 19    |
| 5.1.4 Übersprechen und Abflachen.....                                | 19    |
| 5.1.5 Spektrale Bandbreite .....                                     | 20    |
| 5.2 Periodische Daten.....                                           | 21    |
| 5.2.1 Allgemeines.....                                               | 21    |
| 5.2.2 Instrumente und Software .....                                 | 21    |
| 5.2.3 Anti-Aliasing-Filter.....                                      | 22    |
| 5.2.4 Übersprechen und Abflachen.....                                | 22    |
| 5.2.5 Frequenzauflösung.....                                         | 22    |
| 5.2.6 Korrektur der Auflösungsfehler .....                           | 22    |
| 5.2.7 Statistische Abtastfehler.....                                 | 23    |
| 5.2.8 Aufzeichnen.....                                               | 24    |

|        |                                                 |    |
|--------|-------------------------------------------------|----|
| 5.3    | Stationäre stochastische Daten .....            | 24 |
| 5.3.1  | Allgemeines .....                               | 24 |
| 5.3.2  | Instrumente und Software .....                  | 26 |
| 5.3.3  | Anti-Aliasing-Filter .....                      | 26 |
| 5.3.4  | Übersprechen und Abflachen .....                | 26 |
| 5.3.5  | Frequenzauflösung .....                         | 26 |
| 5.3.6  | Korrektur der Auflösungsfehler .....            | 28 |
| 5.3.7  | Statistische Abtastfehler .....                 | 28 |
| 5.3.8  | Überlappende Verarbeitung .....                 | 29 |
| 5.3.9  | Zoom-Transformierte .....                       | 30 |
| 5.3.10 | Aufzeichnen .....                               | 30 |
| 5.4    | Instationäre Daten .....                        | 30 |
| 5.4.1  | Allgemeines .....                               | 30 |
| 5.4.2  | Stochastische Signale .....                     | 31 |
| 5.4.3  | Zeitcodes .....                                 | 31 |
| 5.5    | Proportionale Bandbreitenspektren .....         | 32 |
| 5.5.1  | Allgemeines .....                               | 32 |
| 5.5.2  | Terzband-Spektren .....                         | 32 |
| 5.5.3  | Andere proportionale Bandbreitenspektren .....  | 33 |
| 6      | Einkanal-Spektralanalyse/transiente Daten ..... | 33 |
| 6.1    | Allgemeines .....                               | 33 |
| 6.2    | Fourier-Spektren .....                          | 33 |
| 6.2.1  | Allgemeines .....                               | 33 |
| 6.2.2  | Instrumente und Software .....                  | 34 |
| 6.2.3  | Anti-Aliasing-Filter .....                      | 34 |
| 6.2.4  | Übersprechen und Abflachen .....                | 34 |
| 6.2.5  | Frequenzauflösung .....                         | 35 |
| 6.2.6  | Korrektur der Auflösungsfehler .....            | 35 |
| 6.2.7  | Statistische Abtastfehler .....                 | 35 |
| 6.2.8  | Aufzeichnen .....                               | 35 |
| 6.3    | Energiespektren .....                           | 36 |
| 6.3.1  | Allgemeines .....                               | 36 |
| 6.3.2  | Instrumente und Software .....                  | 36 |
| 6.3.3  | Anti-Aliasing-Filter .....                      | 36 |
| 6.3.4  | Übersprechen und Abflachen .....                | 36 |
| 6.3.5  | Frequenzauflösung .....                         | 37 |
| 6.3.6  | Korrektur der Auflösungsfehler .....            | 37 |
| 6.3.7  | Statistische Abtastfehler .....                 | 37 |
| 6.3.8  | Aufzeichnen .....                               | 37 |
| 6.4    | Schockantwortspektren (SAS) .....               | 37 |
| 6.4.1  | Allgemeines .....                               | 37 |
| 6.4.2  | Auswertung von SAS-Ergebnissen .....            | 39 |
| 6.4.3  | Darstellung von SAS-Ergebnissen .....           | 40 |
| 6.4.4  | Instrumente und Software .....                  | 40 |
| 6.4.5  | Anti-Aliasing-Filter .....                      | 40 |
| 6.4.6  | Abtastrate .....                                | 40 |
| 6.4.7  | Abbruchfehler .....                             | 40 |
| 6.4.8  | Ausgangsbedingungen .....                       | 41 |
| 6.4.9  | Frequenzauflösung .....                         | 41 |
| 6.4.10 | Korrektur der Auflösungsfehler .....            | 41 |
| 6.4.11 | Statistische Abtastfehler .....                 | 41 |
| 6.4.12 | Aufzeichnen .....                               | 41 |
| 6.4.13 | Andere SAS-Berechnungen .....                   | 41 |
| 7      | Zweikanal-Analyse .....                         | 42 |
| 7.1    | Allgemeines .....                               | 42 |
| 7.2    | Kreuzspektren .....                             | 42 |
| 7.2.1  | Allgemeines .....                               | 42 |

|                                                           | Seite |
|-----------------------------------------------------------|-------|
| 7.2.2 Instrumente und Software .....                      | 43    |
| 7.2.3 Anti-Aliasing-Filter.....                           | 43    |
| 7.2.4 Übersprechen und Abflachen.....                     | 44    |
| 7.2.5 Frequenzauflösung.....                              | 44    |
| 7.2.6 Korrektur der Auflösungsfehler .....                | 44    |
| 7.2.7 Systematischer Zeitverzögerungsfehler .....         | 44    |
| 7.2.8 Systematischer Mehrwegfehler (Nachhallfehler) ..... | 45    |
| 7.2.9 Statistische Abtastfehler.....                      | 45    |
| 7.2.10 Überlappende Verarbeitung.....                     | 46    |
| 7.2.11 Zoom-Transformierte .....                          | 46    |
| 7.2.12 Aufzeichnen.....                                   | 46    |
| 7.3 Kohärenz.....                                         | 46    |
| 7.3.1 Allgemeines.....                                    | 46    |
| 7.3.2 Instrumente und Software .....                      | 47    |
| 7.3.3 Anti-Aliasing-Filter.....                           | 47    |
| 7.3.4 Übersprechen und Abflachen.....                     | 47    |
| 7.3.5 Frequenzauflösung.....                              | 47    |
| 7.3.6 Systematischer Zeitverzögerungsfehler .....         | 47    |
| 7.3.7 Systematischer Mehrwegfehler (Nachhallfehler) ..... | 48    |
| 7.3.8 Statistische Abtastfehler.....                      | 48    |
| 7.3.9 Überlappende Verarbeitung.....                      | 49    |
| 7.3.10 Zoom-Transformierte .....                          | 49    |
| 7.3.11 Aufzeichnen.....                                   | 49    |
| 7.4 Frequenzantwort.....                                  | 49    |
| 7.4.1 Allgemeines.....                                    | 49    |
| 7.4.2 Instrumente und Software .....                      | 50    |
| 7.4.3 Anti-Aliasing-Filter.....                           | 50    |
| 7.4.4 Übersprechen und Abflachen.....                     | 50    |
| 7.4.5 Frequenzauflösung.....                              | 50    |
| 7.4.6 Statistische Abtastfehler.....                      | 50    |
| 7.4.7 Überlappende Verarbeitung.....                      | 51    |
| 7.4.8 Zoom-Transformierte .....                           | 51    |
| 7.4.9 Aufzeichnen.....                                    | 51    |
| 7.5 Kreuzkorrelation .....                                | 51    |
| 7.5.1 Allgemeines.....                                    | 51    |
| 7.5.2 Instrumente und Software .....                      | 52    |
| 7.5.3 Anti-Aliasing-Filter.....                           | 52    |
| 7.5.4 Übersprechen und Abflachen.....                     | 52    |
| 7.5.5 Zeitauflösung .....                                 | 52    |
| 7.5.6 Systematischer Zeitverzögerungsfehler .....         | 52    |
| 7.5.7 Statistische Abtastfehler.....                      | 53    |
| 7.5.8 Überlappende Verarbeitung.....                      | 53    |
| 7.5.9 Aufzeichnen.....                                    | 53    |
| 7.6 Korrelationskoeffizient.....                          | 53    |
| 7.7 Einheitsimpulsantwort .....                           | 54    |
| 8 Andere Auswertungen .....                               | 54    |
| 8.1 Allgemeines.....                                      | 54    |
| 8.2 Wahrscheinlichkeitsdichte .....                       | 54    |
| 8.2.1 Allgemeines.....                                    | 54    |
| 8.2.2 Momentane Wahrscheinlichkeitsdichte .....           | 54    |
| 8.2.3 Spitzen-Wahrscheinlichkeitsdichte .....             | 55    |
| Literaturhinweise .....                                   | 58    |

## Vorwort

Dieses Dokument (EN 15433-4:2007) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 261 „Verpackung“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom AFNOR gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Juni 2008, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Juni 2008 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN [und/oder CENELEC] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

## Einleitung

Diese Norm wurde ursprünglich im Arbeitsausschuss 1.4 „Anforderungen und Prüfung“ des Normenausschusses Verpackungswesen (NAVp) im Deutschen Institut für Normung (DIN) erarbeitet. Sie ist Teil eines normativen Gesamtkonzeptes zur Erfassung und Beschreibung der Belastungen, die bei Transport, Handhabung und Lagerung von Gütern auftreten und auf diese einwirken können.

Besondere Bedeutung erlangt diese Norm im Rahmen der Umsetzung der Europäischen Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle (Richtlinie 94/62/EG vom 20. Dezember 1994). Diese Richtlinie legt Anforderungen an die Vermeidung bzw. Reduzierung von Verpackungsabfällen fest und erfordert für den angemessenen Schutz der Transportgüter, dass der notwendige Verpackungsaufwand auf die zu erwartenden Transportbelastungen abgestimmt wird. Dies setzt jedoch einige Kenntnisse der beim Versand auftretenden Transportbelastungen voraus.

Derzeit gibt es keine nationalen oder internationalen Grundlagennormen, die auf wissenschaftlich abgesicherten Werten beruhen und die Transportbelastungen, insbesondere im Bereich der mechanisch-dynamischen Belastungen, hinreichend beschreiben und mit technischen Größen charakterisieren. Ursache dafür ist in erster Linie ein Mangel an veröffentlichten Daten sowie eine unzureichende Beschreibung der Messungen oder Einschränkungen bezüglich der Verbreitung dieser Daten.

Diese Norm ermöglicht die Messung und Auswertung der mechanisch-dynamischen Transportbelastungen und somit die Bestimmung genormter und angemessen dokumentierter Belastungswerte.

Die Normenreihe besteht aus den folgenden Teilen:

- *Teil 1: Allgemeine Anforderungen*
- *Teil 2: Datenerfassung und allgemeine Anforderungen an Messeinrichtungen*
- *Teil 3: Datengültigkeitsüberprüfung und Datenaufbereitung für die Auswertung*
- *Teil 4: Datenauswertung*
- *Teil 5: Ableitung von Prüfvorschriften*
- *Teil 6: Transportüberwachung mit automatischen Aufzeichnungsgeräten zur Messung stochastisch auftretender Stöße*

## 1 Anwendungsbereich

Diese Norm enthält Leitlinien für die Instrumente, Verfahren und Parameter, die bei der Auswertung dynamischer Daten eingesetzt werden. Es wird vorausgesetzt, dass die Person, die die Auswertungen durchführt, über geeignete FFT-Signalverarbeitungsprozessoren oder FFT-Rechner verfügt.

Diese Leitlinien gelten auch für andere Arten von Signalverarbeitungsverfahren, solange die Auswertungsparameter gleichwertig sind. Derartige andere Verfahren enthalten Korrelationsalgorithmen (z. B. nach „Blackman-Tuckey“), digitale Bandpassfilter-Algorithmen oder Überlagerungstechniken.

Ein Überblick über die in diesem Teil beschriebenen Datenauswertungsverfahren ist in Bild 1 dargestellt.

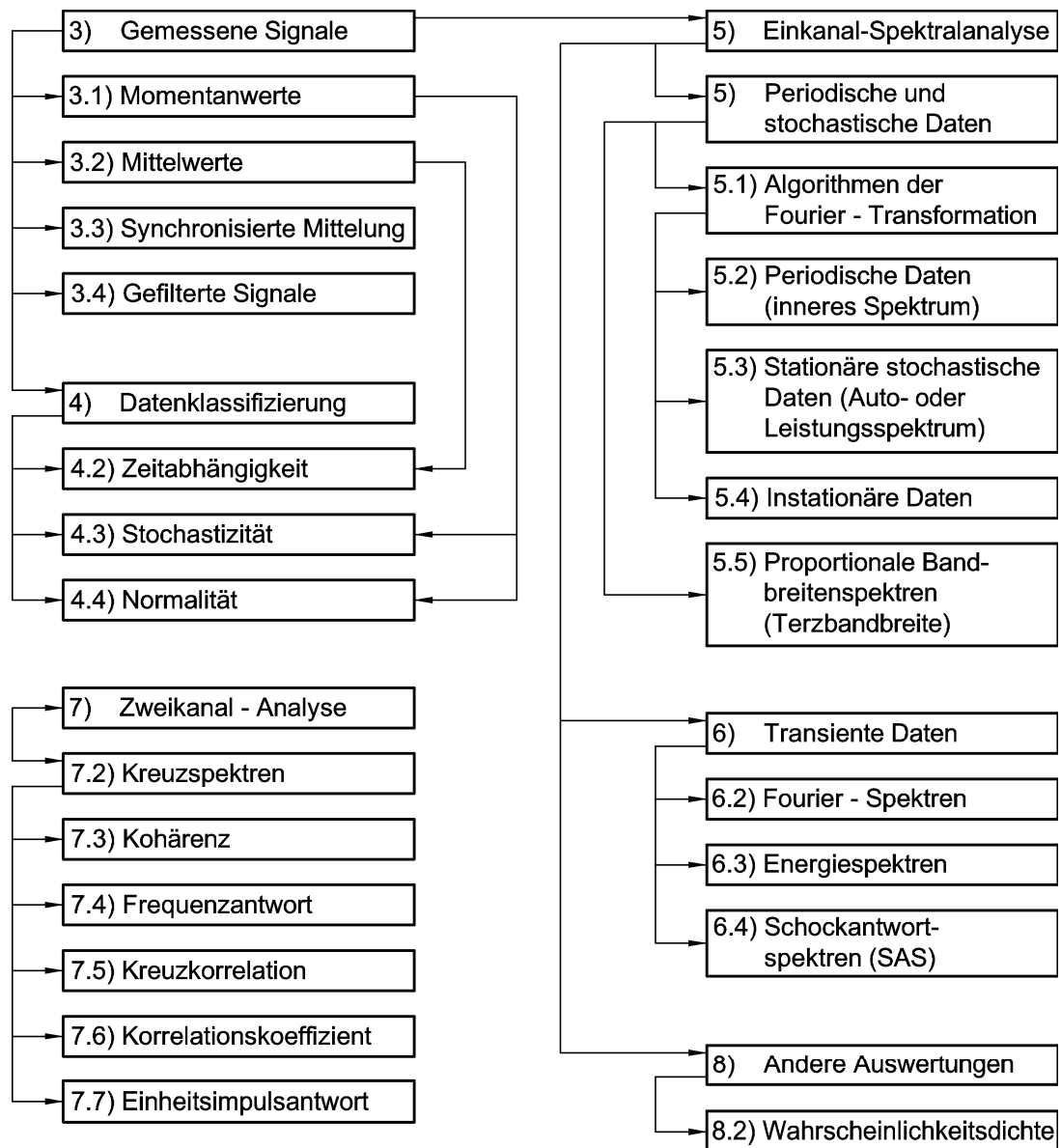


Bild 1 — Überblick über die Daten-Auswertungsverfahren

## 2 Normative Verweisungen

Nicht zutreffend.

### 3 Gemessene Signale

ANMERKUNG Die in Abschnitt 3 beschriebenen Signalauswertungsverfahren gelten zusätzlich zu den in EN 15433-3 beschriebenen Bewertungen für die Datengültigkeitsüberprüfung und -aufbereitung.

#### 3.1 Momentanwerte

Über die Datengültigkeitsüberprüfung und -aufbereitung hinaus können bestimmte Anwendungen die Bewertung von momentanen Signalwerten erfordern. Insbesondere die allgemeine Auslegung von Strukturen für niederfrequente Belastungen beruht gewöhnlich auf den geschätzten Höchstwerten aus Zeitsignalen.

#### 3.2 Mittelwerte

##### 3.2.1 Allgemeines

Die gebräuchlichsten Mittelwerte gemessener stationärer Signale sind der Mittelwert  $\mu_x$  und die Standardabweichung  $\sigma_x$  (oder der Effektivwert  $\psi_x$ ). Schätzungen des Mittelwertes und die Standardabweichung eines Signals  $x(t)$ , bei  $0 \leq t \leq T$ , dürfen mit Hilfe folgender Algorithmen berechnet werden:

a) Mittelwert:

$$\hat{\mu}_x = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n\Delta t) \quad (1)$$

b) Effektivwert:

$$\hat{\psi}_x = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \right\}^{1/2} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2(n\Delta t) \right\}^{1/2} \quad (2)$$

c) Standardabweichung:

$$\hat{\sigma}_x = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \hat{\mu}_x]^2 dt \right\}^{1/2} = \left\{ \frac{1}{(N-1)} \sum_{n=1}^N [x(n\Delta t) - \hat{\mu}_x]^2 \right\}^{1/2} \quad (3)$$

Dabei ist

$T$  die lineare Mittelungszeit für analoge Signale;

$N$  die Anzahl der Datenwerte für digitale Signale ( $T = N\Delta t$ );

( $\wedge$ ) bedeutet „Schätzwert von“.

ANMERKUNG Bei den meisten hochfrequenten dynamischen Messungen misst der Wandler nicht die statische oder Gleichstromkomponente des Signals, während die Gleichstromkomponente bei den meisten niederfrequenten Messungen (unter 50 Hz) eingeschlossen ist.

Ohne die Gleichstromkomponente ist der Mittelwert des Signals gleich null und die Berechnung des Effektivwertes nach Gleichung (2) ergibt die Standardabweichung.

### 3.2.2 Instrumente und Softwareprogramme

Bei der Festlegung der Genauigkeit von Mittelwertschätzungen stochastischer Signale ist die Zeitkonstantenmittelung ein Schlüsselparame-ter. Die Operationen in den Gleichungen (1) bis (3) sind mit Digitalrechnern mit einfachen Softwareprogrammen leicht durchführbar.

**ANMERKUNG** Sowohl Analog- als auch Digital-Gleichstromvoltmeter berechnen im Wesentlichen den Mittelwert eines Signals, während „Voltmeter für den tatsächlichen Effektivwert“ (nicht zu verwechseln mit Effektivvoltmeter) einen Schätzwert des Effektivwertes eines Signals berechnen.

Die meisten Analog- und Digitalvoltmeter berechnen eher das kontinuierliche exponentiell gewichtete (RC-)Mittel als ein einzelnes lineares Mittel.

### 3.2.3 Arten von Mittelungen

Verschiedene Verfahren sind für die Berechnung von Mittelwerten üblich. Für die Durchführung der Berechnung verwendete Verfahren und Parameter sollten beschrieben werden.

Für den Fall von stationären oder quasistationären Signalen (bei denen sich der fragliche Mittelwert während der Messdauer wenig verändert) wird eine lineare Mittelung über der gesamten Messdauer empfohlen.

Im Fall von instationären Signalen (bei denen sich der fragliche Mittelwert während der Messdauer deutlich ändert) wird eine exponentiell gewichtete Mittelung für das Analogsignal und eine schrittweise lineare Mittelung für Digitalsignale empfohlen.

**ANMERKUNG** Eine schrittweise lineare Mittelung (mitunter auch gleitendes Mittel genannt) kann durch Berechnung einer Reihe von  $N$  Datenwerten erzielt werden, indem  $n$  neue Werte am Ende hinzugefügt und  $n$  alte Werte vom Anfang der  $N$  Datenwerte für jeden Mittelwert gelöscht werden. Dies erzeugt jede  $\Delta t$  Sekunden korrelierte geschätzte Mittelwerte. ( $n = 1, N$ ).

### 3.2.4 Mittelungszeit und Abtastfehler

Der Abbruchfehler ist (abgesehen von Kalibrierfehlern) der einzige Fehler beim Schätzen des Mittelwertes eines periodischen Signals, verursacht dadurch, dass der Mittelungsvorgang möglicherweise nicht genau einen ganzzahligen Wert von Signalzyklen abdeckt. Wird die lineare Mittelungszeit im Verhältnis zur Signalperiode lang, kann dieser Abbruchfehler vernachlässigt werden.

Bei stochastischen Signalen tritt jedoch ein weiterer stochastischer Abtastfehler im geschätzten Mittelwert auf, abhängig sowohl von der Mittelungszeit als auch der Frequenzbandbreite des Signals.

Der normierte stochastische Fehler,  $\varepsilon_r$ , beim Schätzen eines Parameters  $\phi$  wird definiert durch:

$$\varepsilon_r[\hat{\phi}] = \frac{\sigma[\hat{\phi}]}{\phi} \quad (4)$$

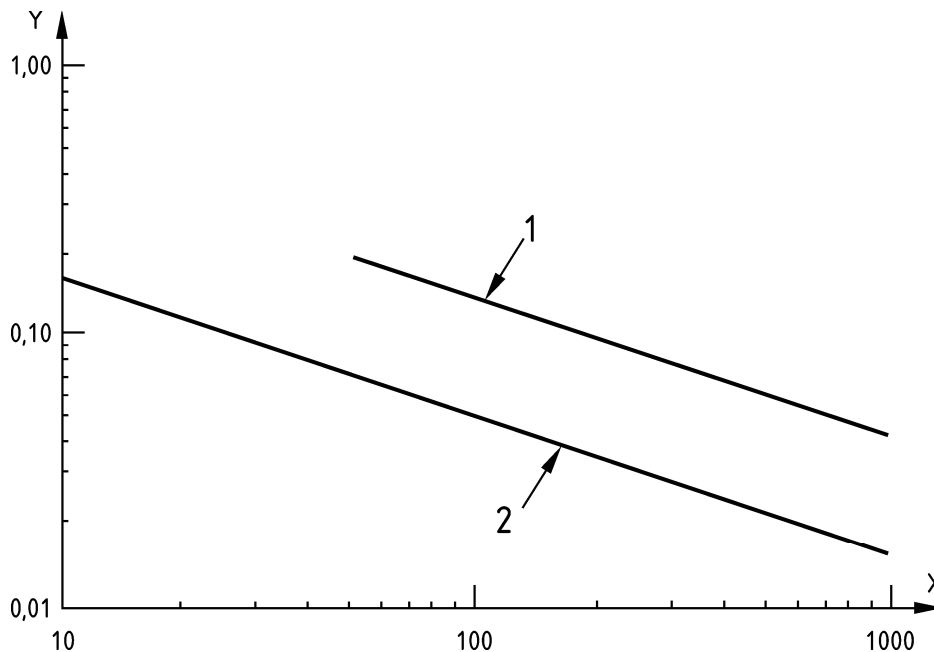
Dabei ist

$\sigma[\phi]$  die Standardabweichung der Schätzung  $\hat{\phi}$ .

**ANMERKUNG** Die stochastischen Fehler für die Schätzwerte der Mittel- und Effektivwerte stochastischer Signale werden in Bild 2 in Form eines normierten stochastischen Fehlers (Variationskoeffizient) zusammengefasst.

In Bild 2 ist die Größe  $B$  die Frequenzbandbreite des Signals (unter Annahme eines gleichmäßigen Spektrums) und  $T$  ist die lineare Mittelungszeit zur Durchführung der Schätzung.

Im Fall exponentiell gewichteter Mittelungen mit einer Zeitkonstanten  $K$  kann aufgrund von Bild 2 angenommen werden, dass  $T = 2K$  ist.



#### Legende

|         |                                                                  |
|---------|------------------------------------------------------------------|
| X-Achse | Bei Mittelwerten: $BT/(\sigma/\mu)^2$ ; Bei Effektivwerten: $BT$ |
| Y-Achse | Normierter stochastischer Fehler: $\varepsilon_r$                |
| 1       | Mittelwert: $\varepsilon_r = (2/BT)^{1/2} (\sigma/\mu)$          |
| 2       | Effektivwert ( $\mu = 0$ ): $\varepsilon_r = 0,5/(BT)^{1/2}$     |

**Bild 2 — Normierte stochastische Fehler für Mittelwert- und quadratische Mittelwert-Schätzungen**

### 3.3 Synchronisierte Mittelung

#### 3.3.1 Allgemeines

Kolben- und Rotationsmaschinen, welche im eingeschwungenen Zustand betrieben werden, erzeugen periodische Komponenten (d. h. Signale, die sich nach einem bestimmten Zeitintervall  $T_1$ , genannt Periode, wiederholen), so dass:

$$p(t) = p(t + iT_1); i = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Mitunter wird das fragliche periodische Signal jedoch durch stochastisches Hintergrundrauschen und/oder unabhängige Datensignale kontaminiert, wodurch ein gemessenes Signal  $x(t) = p(t) + n(t)$  entsteht, wobei  $n(t)$  die Störung und/oder ein anderes unabhängiges Signal ist.

In derartigen Fällen ist der Signal-Stör-Pegel des fraglichen periodischen Signals durch das Verfahren der synchronisierten Mittelung zu erhöhen, wobei die Messung in eine Reihe von Segmenten  $x_i(t)$ ;  $i = 1, 2, \dots, q$ , aufgeteilt wird, bei der jedes Segment genau beim gleichen Phasenwinkel während einer Periode  $p(t)$  beginnt.

Durch Ensemble-Mittelung der Reihe von Segmenten werden  $p(t)$  sowie andere periodische Komponenten, die mit  $p(t)$  in keinem harmonischen Zusammenhang stehen, wie folgt aus dem Hintergrundrauschen gewonnen:

$$p(t) \approx \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q x_i(t) \quad (6)$$

### 3.3.2 Instrumente und Software

Viele moderne Spezialrechner für Signalverarbeitung sind für die Auswertung dynamischer Daten ausgelegt und mit einer Betriebsart der synchronisierten Mittelung ausgerüstet.

Für das Auswertungsgerät sollte ein Auslösesignal vorgesehen sein, das neue Signalsegmente zu einem gewünschten Zeitpunkt während einer Periode von  $p(t)$  auslöst. Die Mittelung kann direkt an den Signalsegmenten oder im Frequenzbereich an den Fourier-Transformierten der Segmente durchgeführt werden.

### 3.3.3 Auslöseverfahren

Synchronisierte Mittelung ist am wirksamsten, wenn das Auslösesignal ein störungsfreier Indikator der Phase während jeder Periode  $p(t)$  ist.

Die Genauigkeit der Zeitbasis des Auslösesignals bestimmt die Genauigkeit der Amplitude des aus der synchronisierten Mittelung resultierenden Signals, d. h., Fehler in der Zeitbasis des Auslösesignals verursachen mit steigender Frequenz eine Verringerung der angezeigten Signalamplitude.

### 3.3.4 Verbesserung des Signal-Stör-Abstandes

Die Vergrößerung des Signal-Stör-Abstandes für ein aus synchronisierter Mittelung resultierendes Signal geht aus Bild 3 hervor, wobei  $q$  die für die Mittelung verwendete Anzahl Segmente ist.

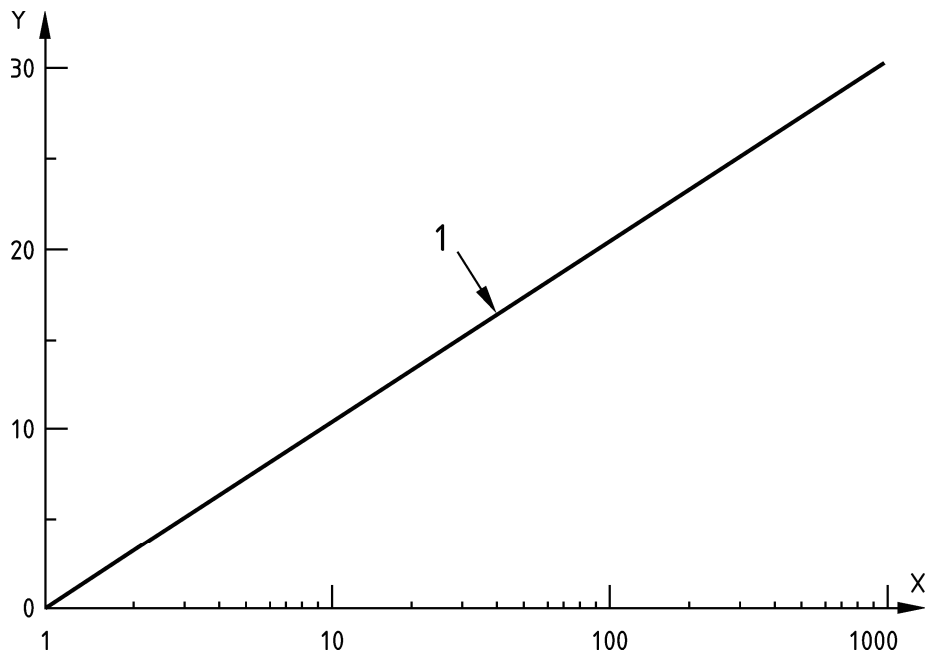
Sind  $\sigma_x$  und  $\sigma_n$  die entsprechenden Standardabweichungen von Signal bzw. Störung, wird die Verbesserung des Signal-Stör-Abstandes in Dezibel definiert durch:

$$S/N_e = 10 \log_{10}[SNR_a/SNR_b] \quad (7)$$

Dabei ist

$SNR_a$   $(\sigma_x/\sigma_n)^2$  nach der synchronisierten Mittelung;

$SNR_b$  das gleiche Verhältnis vor der synchronisierten Mittelung.



#### Legende

X-Achse Anzahl der Segmente,  $q$   
Y-Achse Erhöhung des Signal-Stör-Pegels, dB  
1  $S/N = 10 \log_{10} q$

**Bild 3 — Erhöhung des Signal-Stör-Pegels mit synchronisierter Mittelung**

### 3.4 Gefilterte Signale

#### 3.4.1 Allgemeines

Die detaillierten Eigenschaften der bevorzugten Filter sollten bekannt sein und deren möglicher Einfluss auf die Interpolationen der resultierenden Signale sollte sorgfältig bewertet werden.

**ANMERKUNG** Schwingungsdaten werden oft über einen breiteren Frequenzbereich erfasst als möglicherweise für bestimmte Anwendungen erforderlich. Bei derartigen Anwendungen ist eine Tiefpass-Filterung der Signale üblich, um Zeitsignale nur aus dem unteren Frequenzbereich des Signals zu erhalten. In vielen Fällen werden die niederfrequenten Signale digitalisiert und als Eingangssignale für Finite-Elemente-Berechnungen benutzt.

Die Vorgehensweise der Festlegung der höchsten niederfrequenten Belastungen unter Verwendung tiefpassgefilterter Signale ist mit einer subjektiven Beurteilung verbunden, da das resultierende Signal wesentlich von der Eckfrequenz, der Flankensteilheit und der Phasenverschiebung der Tiefpass-Filter abhängig ist.

Gelegentlich werden dynamische Datensignale auch hochpassgefiltert, damit die Daten frei von einer Gleichstromkomponente sind.

#### 3.4.2 Analoge Filterung

Die einfachste Art der Begrenzung des Frequenzbereiches eines Signals ist eine direkte Tiefpass-Filterung des Analogsignals.

Wird das Signal später digitalisiert, kann die Tiefpass-Filterung einfach mit dem Anti-Aliasing-Filter des A/D-Wandlers erfolgen.

**ANMERKUNG** Viele analoge Anti-Aliasing-Filter verursachen in der Nähe der Eckfrequenz eine nichtlineare Phasenverschiebung, die das Zeitsignal verzerren kann.

### 3.4.3 Digitale Filterung

Eine bessere Herangehensweise an die Tiefpass-Filterung ist die Filterung nach der Digitalisierung durch ein digitales Tiefpass-Filter. Digitale Filter sind äußerst stabil und einfach zu programmieren.

## 4 Datenklassifizierung

### 4.1 Allgemeines

Vor einer detaillierten Auswertung müssen bestimmte grundlegende Eigenschaften der erfassten dynamischen Signale ermittelt werden, die die Auswertungsverfahren beeinflussen. Die wichtigsten der zu bestimmenden Eigenschaften sind:

- a) dass die Signale stationär, instationär oder transient sind;
- b) dass die Signale deterministisch, stochastisch oder eine Mischung von beidem sind;
- c) dass die stationären stochastischen Signale eine normale (Gauß'sche) Verteilung aufweisen.

**ANMERKUNG** In vielen Fällen können die grundlegenden Signaleigenschaften aufgrund der Kenntnis der Versuchsbedingungen, unter denen diese Daten erzeugt wurden, bestimmt oder angenommen werden.

In anderen Fällen sind möglicherweise zur vollständigen Bestimmung der grundlegenden Signaleigenschaften spezifische Bewertungen oder Prüfungen entsprechend EN 15433-3:2007, Abschnitten 7 und 8 erforderlich.

### 4.2 Zeitabhängigkeit

#### 4.2.1 Allgemeines

Die wichtigste Frage bei der Auswertung dynamischer Daten ist die mögliche Zeitabhängigkeit der Signale, d. h. ob die Signale stationär, instationär oder transient sind.

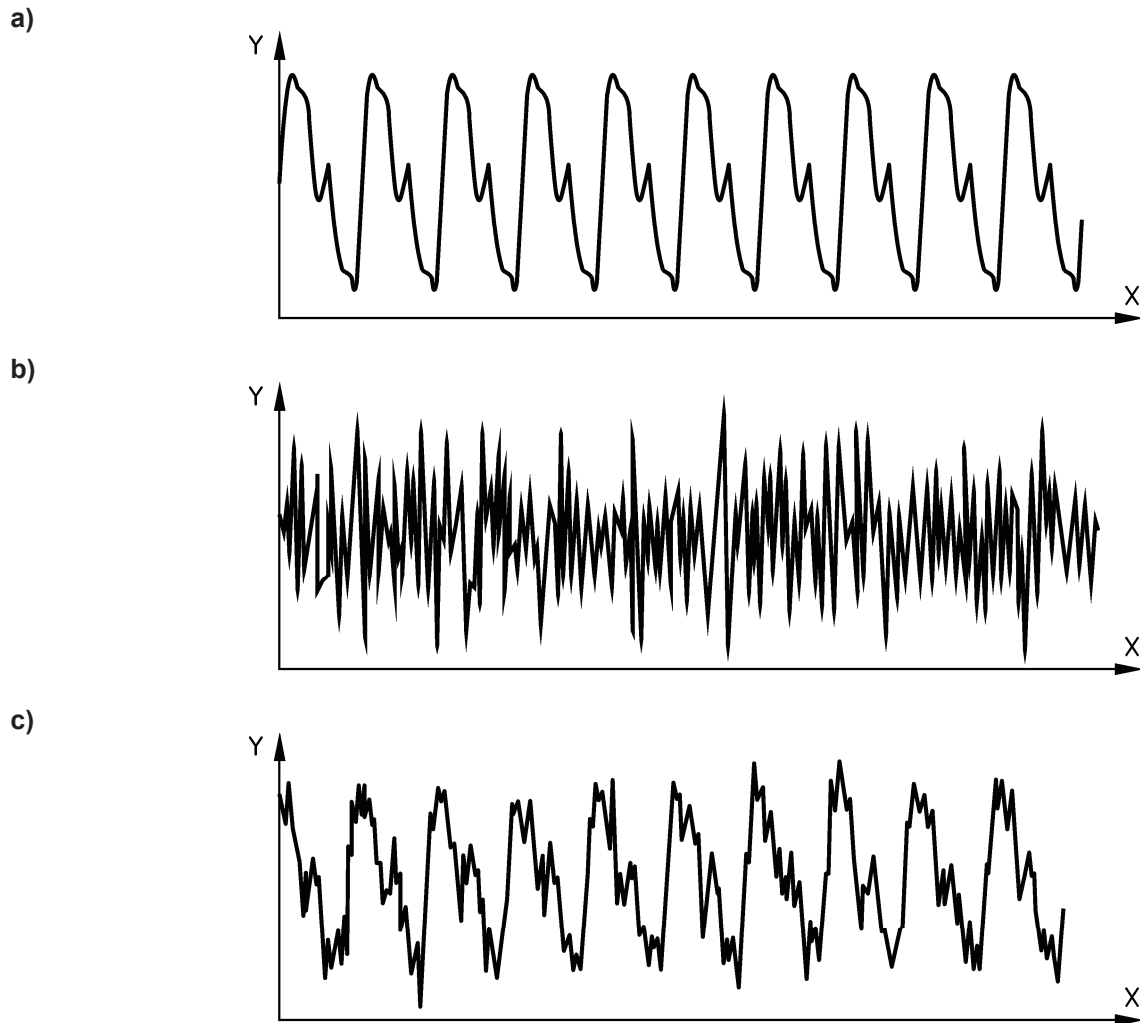
Um das gemessene Signal in zeitabhängige Kategorien nach 4.2.2 bis 4.2.5 einzuteilen, sollte jede Messung mit spezifischen physikalischen Ereignissen in Zusammenhang gebracht werden.

#### 4.2.2 Stationäre oder quasistationäre Daten

Stationäre oder quasistationäre Signale sind die, deren mittlere Eigenschaften sich über der Zeit nicht ändern, zumindest nicht während der Messdauer, wie in Bild 4 dargestellt.

Alle Bedingungen, die das Signal während der Messung beeinflussen können, müssen möglichst konstant gehalten werden.

Es gibt jedoch Fälle, bei denen die Notwendigkeit langsam veränderlicher Prüfbedingungen wichtiger sein kann als die Überlegungen zur Datenauswertung, z. B. eine Gleitsinusprüfung zur Identifizierung von Struktur-Resonanzfrequenzen.



#### Legende

X-Achse      Zeit,  $t$   
Y-Achse      Momentanwert  $x(t)$

**Bild 4 — Periodische (a), stochastische (b) und gemischte Signale (c)**

#### 4.2.3 Instationäre Daten

In den meisten Fällen ist die Zeitabhängigkeit eines Signals fraglich und somit eine statistische Prüfung auf Stationarität erforderlich. Zu diesem Zweck ist der Mittelwert gleitend über der Messdauer zu ermitteln.

**ANMERKUNG** Wie in Bild 5 b) dargestellt, sind instationäre Signale fortlaufend, haben jedoch mindestens eine wichtige mittlere zeitveränderliche Eigenschaft.

In vielen Fällen kann eine zeitveränderliche Eigenschaft eines gemessenen Signals aufgrund der Eigenschaften des signalerzeugenden Versuchs erwartet werden.

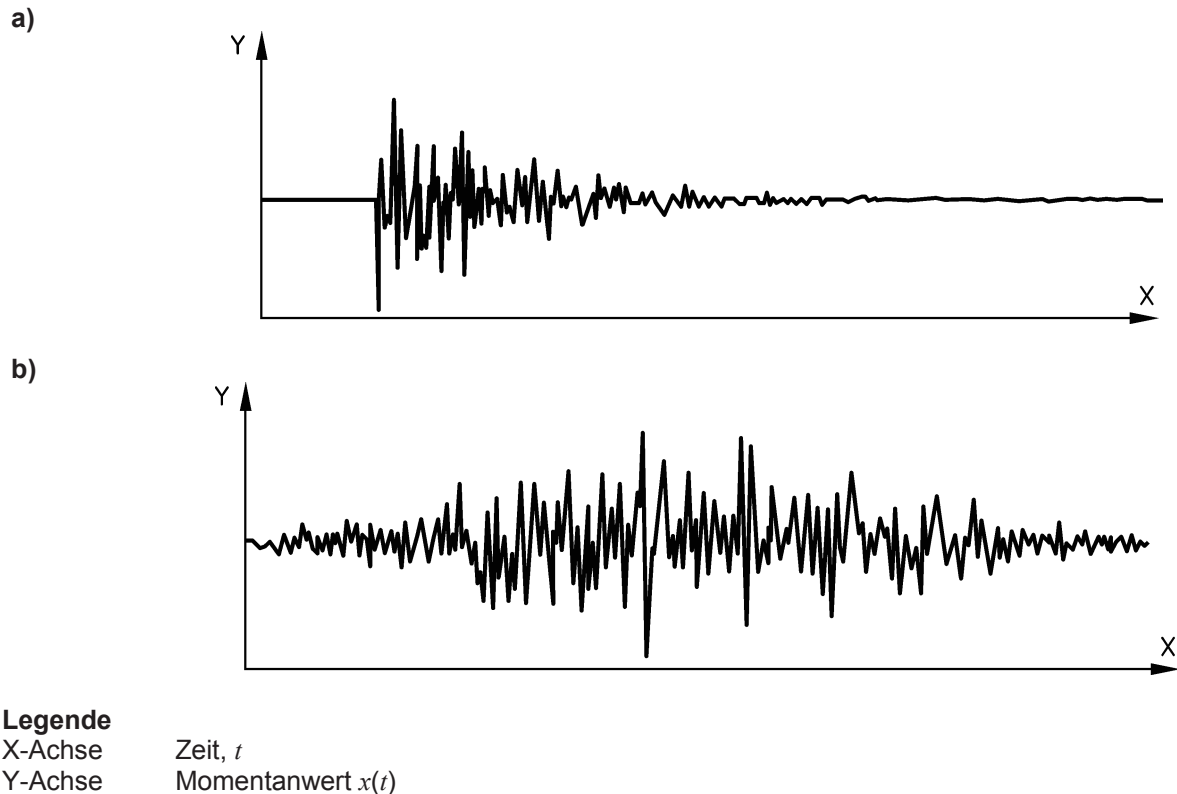


**Bild 5 — Transiente (a) und instationäre stochastische Signale (b)**

#### 4.2.4 Transiente Daten

Wie in Bild 5 a) dargestellt, werden transiente Signale als die definiert, deren Beginn und Ende deutlich und die von relativ kurzer Dauer sind.

#### 4.2.5 Physikalische Überlegungen

In den Fällen, in denen die abschließende Anwendung der Auswertung dynamischer Daten die Bestimmung dynamischer Prüfanforderungen ist, sollte die Unterscheidung zwischen instationären und transienten Daten eher physikalisch beurteilt werden.

Speziell instationäre dynamische Umgebungsbedingungen werden für Prüfzwecke üblicherweise durch stationäre Anregung simuliert, die den maximalen Pegeln bei instationären dynamischen Ereignissen entspricht. Daraus folgt, dass die Unterscheidung zwischen instationären und transienten Daten in diesem Fall von den Antworteigenschaften des Prüflings abhängig ist.

Eine Art, die Antworteigenschaften des Prüflings auf eine instationäre Anregung zu schätzen, erfolgt in Form der quadratischen mittleren Reaktionszeit eines Systems mit einem Freiheitsgrad auf stochastische Sprunganregung, gegeben durch:

$$\tau \approx \frac{1}{4\zeta f_n} \quad (8)$$

Dabei ist

- $\tau$  die Zeit, die ein System mit einem Freiheitsgrad (SDF) benötigt, um 95 % der gesamten quadratischen mittleren Antwort zu erreichen;
- $\zeta$  der Dämpfungsfaktor eines SDF-Systems;
- $f_n$  die ungedämpfte Eigenfrequenz eines SDF-Systems.

Für die Anwendung von Gleichung (8) sind die niedrigste Eigenfrequenz und der Dämpfungsfaktor des Prüflings zu schätzen und daraus die Ansprechzeit zu ermitteln.

Bei z. B.  $f_n \approx 50$  Hz und  $\zeta \approx 0,025$  wird  $\tau \approx 0,2$  s.

Ändert sich der zeitveränderliche Mittelwert eines instationären Signals in weniger als 0,2 s von einem Mindest- zu einem Höchstwert, sollte das Signal für Prüfzwecke als Transiente betrachtet und als solche dementsprechend ausgewertet werden.

**ANMERKUNG** Damit sich die Prüflingsantwort im Wesentlichen zu jedem Zeitpunkt des instationären Umfeldes wie bei der stationären Prüfung voll entwickeln kann, ist ein derartiges Prüfverfahren nur dann gültig, wenn die zeitlichen Variationen im instationären Umfeld im Vergleich zur Prüflingsantwort langsam sind.

### **4.3 Stochastizität**

#### **4.3.1 Allgemeines**

Dynamische Signale können entweder stochastischer oder deterministischer Art oder häufig eine Kombination beider sein. Bei instationären oder transienten dynamischen Signalen ist die Unterscheidung zwischen stochastischen oder deterministischen Eigenschaften gewöhnlich nicht kritisch, da die Datenauswertungsverfahren in beiden Fällen ähnlich sind. Allerdings ist für stationäre stochastische und quasistationäre (gewöhnlich periodische) deterministische Signale diese Unterscheidung wichtig, da:

- a) sie hilft, die gemessenen physikalischen Mechanismen zu definieren, die dieses dynamische Umfeld erzeugen;
- b) die erforderlichen Datenauswertungsverfahren verschieden sind.

#### **4.3.2 Erkennen periodischer Komponenten**

Gewöhnlich sind deterministische Komponenten in stationären dynamischen Daten periodisch oder quasiperiodisch und werden von Kolben- oder Rotationsmaschinen erzeugt.

Derartige Periodizitäten treten in einem Schmalbandspektrum als scharfe Spitzen bei den Frequenzen der periodischen Komponenten auf. Daher ist es gewöhnlich mit ausreichender Kenntnis der potenziellen periodischen Quellen möglich, die scharf definierten Spektralspitzen den spezifischen physikalischen Quellen zuzuordnen und die Spektralspitzen somit als periodische Komponenten zu identifizieren.

Die Identifizierung von Spektralspitzen, die periodische Komponenten repräsentieren, sollte während der Datengültigkeitsüberprüfungs- und -aufbereitungsprozesse durchgeführt werden.

Ist dies nicht möglich, wird die Identifizierung als Anfangsschritt vor einer detaillierten Datenauswertung empfohlen.

**ANMERKUNG** Periodische Quellen sind auch durch Signalverarbeitungsverfahren erkennbar.

#### **4.3.3 Trennung von stochastischen und periodischen Komponenten**

Da die Auswertung von stochastischen gegenüber periodischen Signalen verschiedene Rechenverfahren und Daten-Darstellungsarten umfasst, sind Anstrengungen erforderlich, um die stochastischen und periodischen Signalanteile für gesonderte Auswertungen mittels Digitalfiltern und/oder mit synchronisierten Mittelungen physikalisch zu trennen.

Ist für die endgültige Anwendung der Auswertung ein Spektrum ausreichend, ist eine derartige physikalische Trennung nicht erforderlich. Stattdessen kann die Spektralanalyse durchgeführt werden, indem sowohl ein für periodische Signale geeignetes lineares Spektrum als auch ein für stochastische Signale geeignetes Autospektrum berechnet werden und anschließend das entsprechende Spektrum bei den spezifischen Frequenzen der periodischen und stochastischen Teile des Signals ausgewertet wird.