

Frequenzanalyse

**Praktischer Leitfaden zur Anwendung der
Frequenzanalyse**

Einführung und Überblick

Einführung

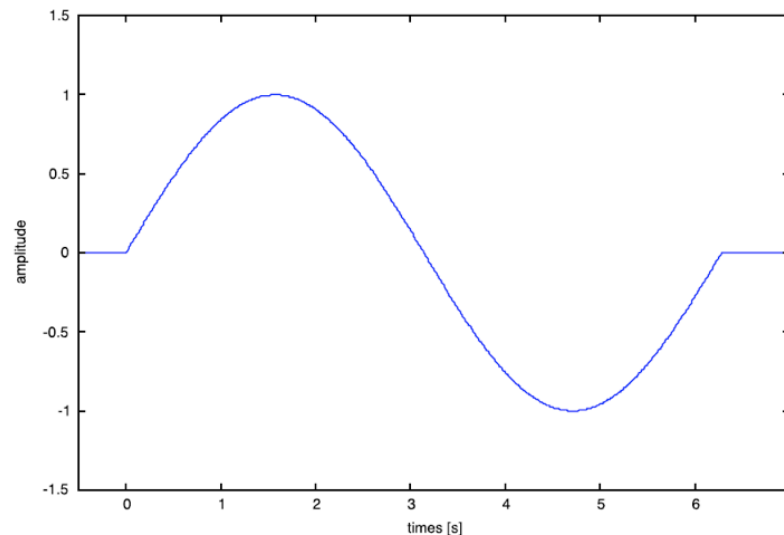
- **DFT / FFT**
- **Filter**
- **Oktav-/Terz- ...** → **ntel-Oktavfilter**
- **Ordnungsanalyse**
- **Pegeldarstellung**
- **Summenpegel / Gesamtpegel**
- **Bewertungskurven**
- **Lautheit**

- **einfaches Mess-System**



Grundgesetz der Nachrichtentechnik

Zu einem Zeitpunkt ist keine Signalanalyse möglich!



DFT / FFT

- **Fourieranalyse**
 - **Jean-Baptiste-Joseph Fourier**
 - **Lösungsansatz zur Wärmeausbreitung in Festkörpern mittels Fourierreihen (ca. 1807)**
 - ➤ **Fourierreihen**

$$\hat{x}_k = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^T x(t) e^{-i\omega_k t} dt \text{ und } x(t) = \sqrt{2\pi} F \sum_{k=-\infty}^{\infty} \hat{x}_k e^{i\omega_k t}$$

- ➤ **diskrete Fourier-Transformation**

$$\hat{x}_k = T \sum_{n=-M}^{N-M-1} x_n e^{-i\omega_k t_n}$$

$$x_n = F \sum_{k=-L}^{N-L-1} \hat{x}_k e^{i\omega_k t_n}$$



DFT / FFT

- ➤ schnelle Fourier-Transformation - FFT

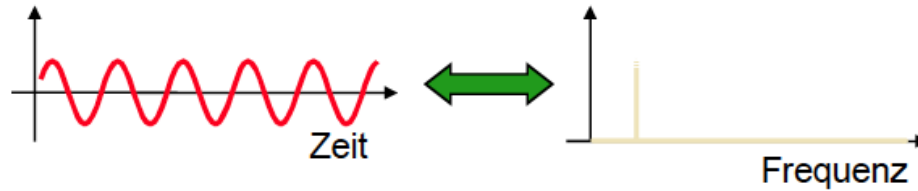
$$f_m = \sum_{k=0}^{n-1} x_{2k} e^{-\frac{2\pi i}{2n} m(2k)} + \sum_{k=0}^{n-1} x_{2k+1} e^{-\frac{2\pi i}{2n} m(2k+1)}$$

- allgemein handelt es sich hierbei um die Transformation aus dem Zeitbereich $x(t)$ in den Frequenzbereich $X(j\omega)$
- Annahme, dass sich alle Signale aus unendlich vielen Sinus- und Kosinusschwingungen zusammensetzen lassen
- Ergebnis besteht aus einem Real- und Imaginär-Teil
- für die praktische Anwendung sind weitere Rechenschritte erforderlich

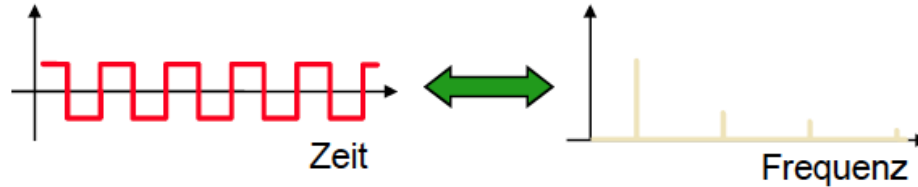


DFT / FFT

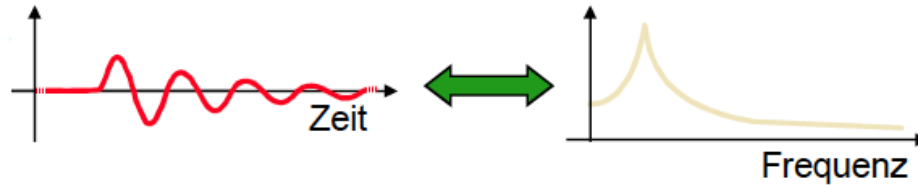
Sinus



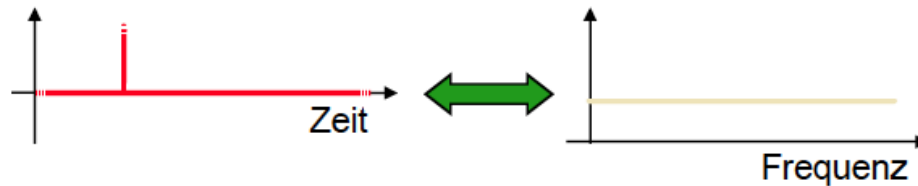
Rechteck



transientes
Signal



Impuls



Filter

- **Wirkung im Zeitbereich**
- **Hochpass**
- **Tiefpass**
- **Bandpass**
- **Bandsperre**
- **Ausführung als analoges Filter mit Bauelementen wie Kondensatoren, Spulen, Widerständen oder Operationsverstärker**
- **Ausführung als digitales Filter mit Logikbausteinen, Signalprozessoren und unter Nutzung von Programmcode**

- **Einschwingzeit**
- **Flankensteilheit**

- **Ergebnis: Um die Filterung reduziertes „Zeitsignal“**



ntel-Oktavfilter

- **Bandpassfilter (Zeitbereich)**
- **Filterbank parallelgeschalteter Filter**

- **DIN EN 61260**
 - **festgelegte Grenzfrequenzen f_1 und f_2 , Mittenfrequenz f_0 sowie die Bandbreite B**
 - **Flankensteilheit nicht festgelegt**
- **DIN EN ISO 266**
 - **Normfrequenzen der Reihe b**
 - **$f = 1000$ Hz als Mittenfrequenz**

Nachfolgende Signalverarbeitung i.d.R. Pegelmessung des (ntel-Oktav) gefilterten Zeitsignals.

Transformation vom Zeit- in den Frequenzbereich durch parallele Darstellung der Pegelwerte.



ntel-Oktavfilter

- **1/6 Oktavfilter**
- **1/12 Oktavfilter**
- **1/24 Oktavfilter**
- **gebräuchlich, die Darstellung eines Frequenzspektrums (FFT) als „Terzen“ oder „Oktaven“**
- **„schlampiger“ Sprachgebrauch !**
- **Terz-/Oktav-Darstellung eines Frequenzspektrums auf Basis einer FFT ist die Summierung der Frequenzlinien und weist eine höhere Flankensteilheit sowie ein anderes zeitliches Verhalten auf**

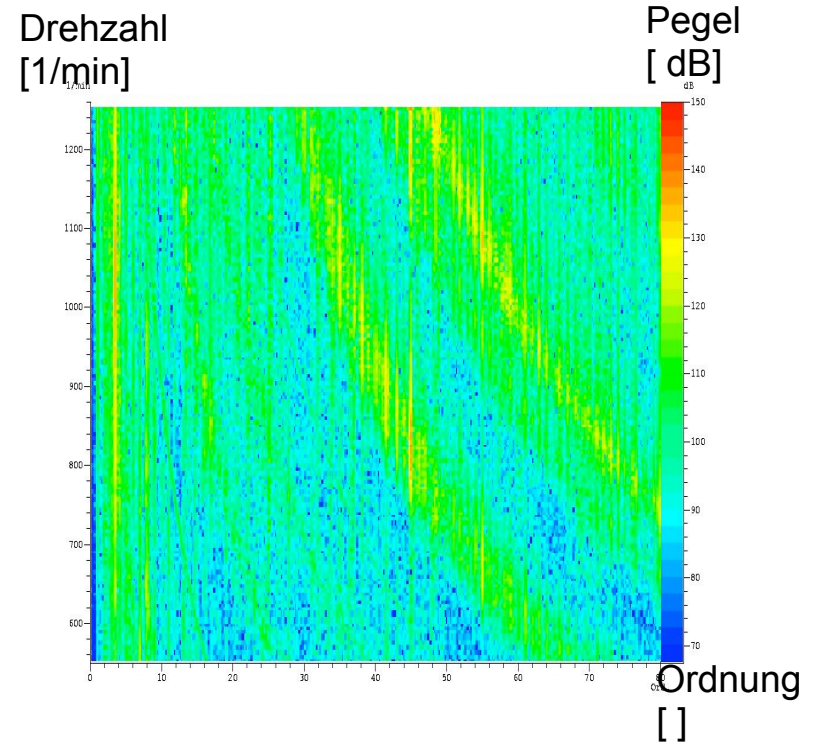
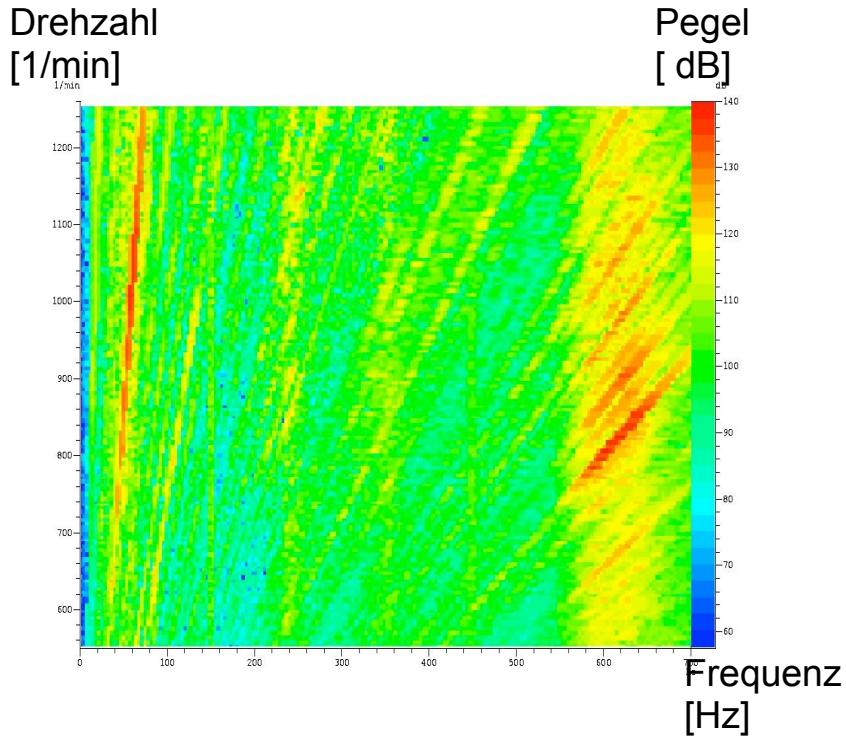


Ordnungsanalyse

- **Analyse von Drehfrequenzen und deren Vielfache**
- **Wellendrehzahl $n = 1200 \text{ min}^{-1}$**
- **1. Ordnung: $f = 20 \text{ Hz}$**
- **2. Ordnung: $f = 40 \text{ Hz}$**
- **3. Ordnung: $f = 60 \text{ Hz}$**
- **Mathematisch:
Ordnungsspektrum = Frequenzspektrum / Drehfrequenz**
- **Signalanalytisch:**
 - **Resampling der zeitequidistanten Messwerte in drehwinkelequidistante Messwerte**
 - **FFT mit den drehwinkelequidistanten Messwerten**



Ordnungsanalyse



FFT * 1/ Drehfrequenz = Ordnungs-FFT

Frequenzanalyse \longrightarrow Ordnungsanalyse

Pegeldarstellung

$$Q_{(P)} = \lg \frac{P_1}{P_2} \text{ B} = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} \text{ dB}$$

- **Kennzeichnung des dekadischen Logarithmus des Verhältnisses zweier gleichartiger Leistungs- bzw. Energiegrößen P_1 und P_2**

$$Q_{(F)} = 10 \lg \frac{F_1^2}{F_2^2} \text{ dB} = 20 \lg \frac{F_1}{F_2} \text{ dB}$$

- **Die Leistungsgrößen P verhalten sich proportional zu den Quadraten der Effektivwerte der einwirkenden Feldgrößen F wie z.B. elektrische Spannung, Schalldruck**
- **Bel: Maßeinheit (Pseudomaß) für logarithmische Verhältniswerte - Alexander Graham Bell (1847 - 1922)**



Pegeldarstellung

Einheiten	Bedeutung	Schreibweise gem. DIN, IEC, ISO
dBu	Spannungspegel mit der Bezugsgröße $\approx 0,7746 \text{ V}$	L_u (re $0,775 \text{ V}$) = ... dB
dBV	Spannungspegel mit der Bezugsgröße 1 V	L_V (re 1 V) = ... dB
dBA	A-bewerteter Schalldruckpegel / Schalleistungspegel	L_{PA} (re $20 \mu\text{Pa}$) = ... dB L_{WA} (re 1 pW) = ... dB
dBm	Leistungspegel mit der Bezugsgröße 1 mW	L_P (re 1 mW) = ... dB
dBW	Leistungspegel mit der Bezugsgröße 1 W	L_P (re 1 W) = ... dB
dB μ	Pegel der elektrischen Feldstärke mit der Bezugsgröße $1 \mu\text{V/m}$	L_E (re $1 \mu\text{V/m}$) = ... dB



Pegeldarstellung

- **Der menschliche Sinneseindruck verläuft etwa logarithmisch zur Intensität des physikalischen Reizes (Weber-Fechner-Gesetz)**
- **In der Akustik und Nachrichtentechnik haben die verwendeten Größen Wertebereiche über etliche Zehnerpotenzen. Die Angabe als logarithmische Verhältnisgröße erlaubt dabei die schnelle und anschauliche Interpretation von Größen(verhältnissen)**
- **Körperschall in dB sieht die Normung nicht vor**



Pegeldarstellung

Q	40 dB	20 dB	10 dB	6 dB	3 dB	1 dB	0 dB	-1 dB	-3 dB	-6 dB	-10 dB	-20 dB	-40 dB
P_1/P_2	10000	100	10	≈ 4	≈ 2	≈ 1,26	1	≈ 0,79	≈ 0,5	≈ 0,25	0,1	0,01	0,0001
F_1/F_2	100	10	≈ 3,16	≈ 2	≈ 1,41	≈ 1,12	1	≈ 0,89	≈ 0,71	≈ 0,5	≈ 0,25	0,1	0,01



Summenpegel / Gesamtpegel

- **Summenpegel / Gesamtpegel:
Energetische Summe eines Spektrums**

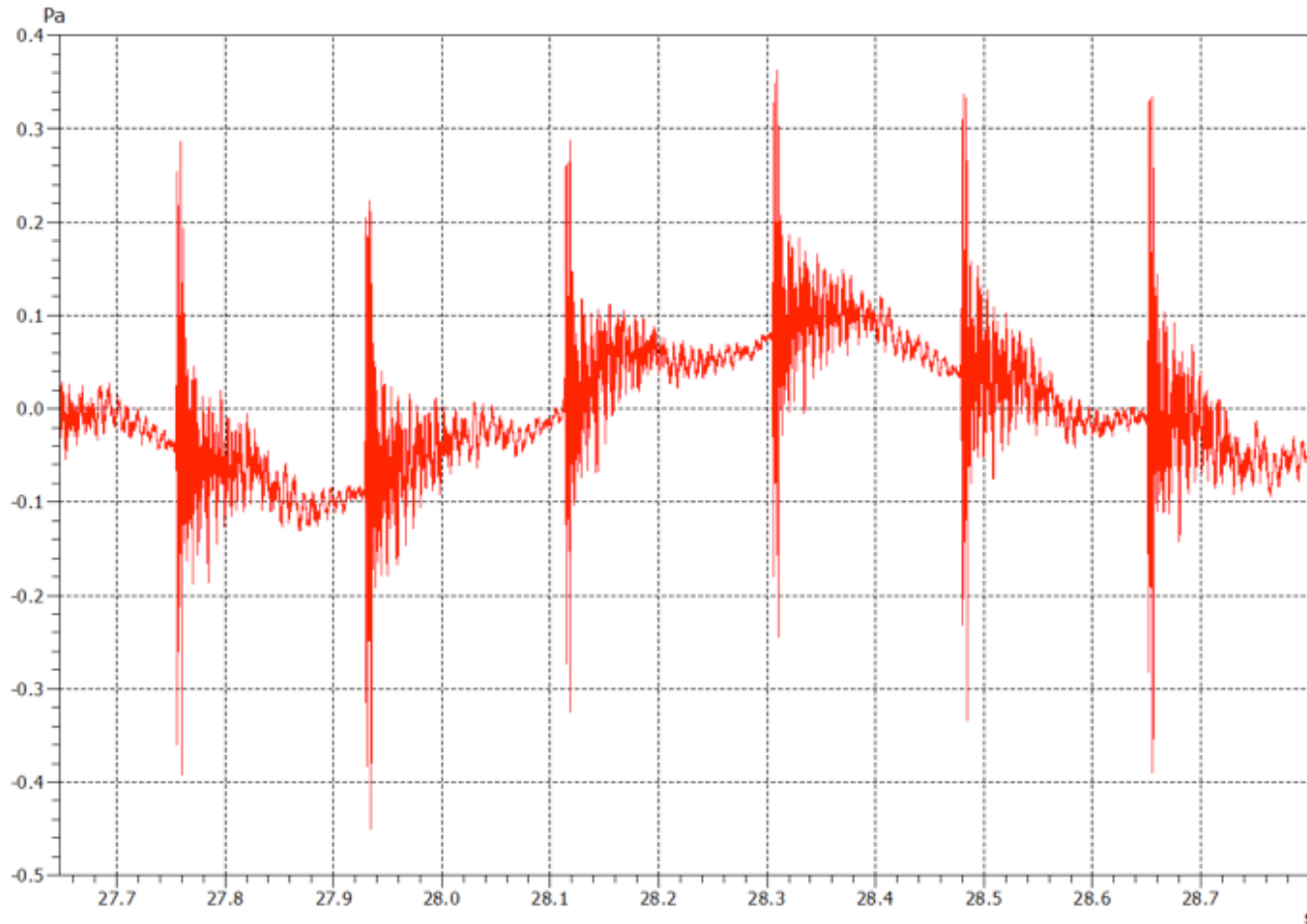
$$L_{PGes} = 10 \lg \Sigma (P_i/P_0)^2 \text{ [dB]}$$

$$\text{Bei } i = 2 \text{ und } P_1 = P_2 \quad L_{PGes} = L_P + 3 \text{ dB}$$

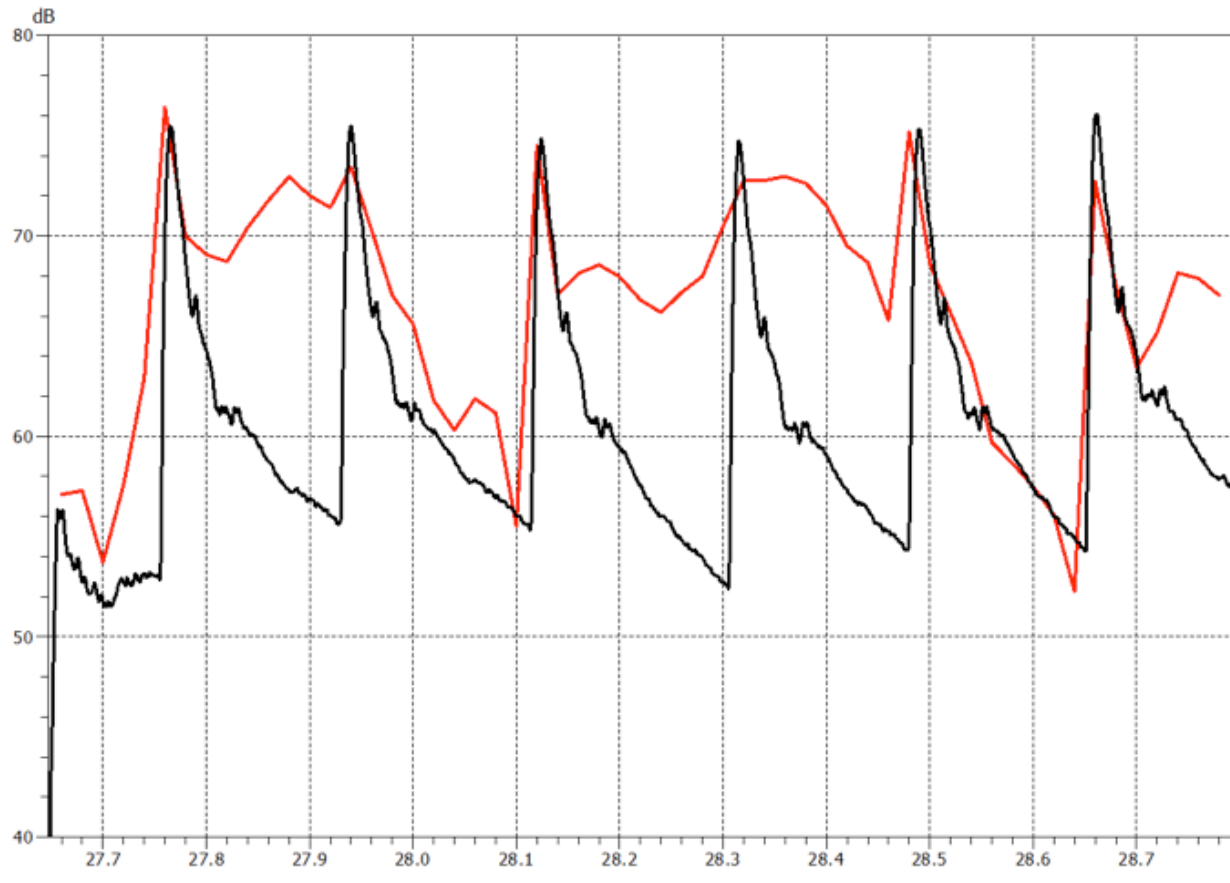
- **Gesamtpegel / Detektor**
 - **Pegelmessgerät IEC 61672:2003**
 - **Umhüllende des Zeitsignals (Gleichrichter)**
 - **Zeitkonstante**



Summenpegel / Gesamtpegel



Summenpegel / Gesamtpegel



rot:

Summenpegel aus APS
Frequenzauflösung 50 Hz,
Blockdauer 0,02 s

schwarz:

Detektor, Zeitkonstante 0,001 s



Bewertungskurven

- **Ziel der Verwendung von Bewertungskurven ist es einen Pegelwert zu erhalten, der mit dem menschlichen Hörempfinden korreliert.**
- **Bewertungskurven (Frequenzbewertungen) werden bei der Messung von Geräuschen verwendet.**
- **Die Messgrößen werden durch ein Filter gewichtet, das den Frequenzgang des menschlichen Gehörs berücksichtigen soll.**
- **Die Frequenzbewertung kann als Übertragungsfunktion eines Filters oder als frequenzabhängiger Abzug vom ermittelten Pegel realisiert werden.**
- **Gebräuchlich ist die Verwendung der A-Bewertung**

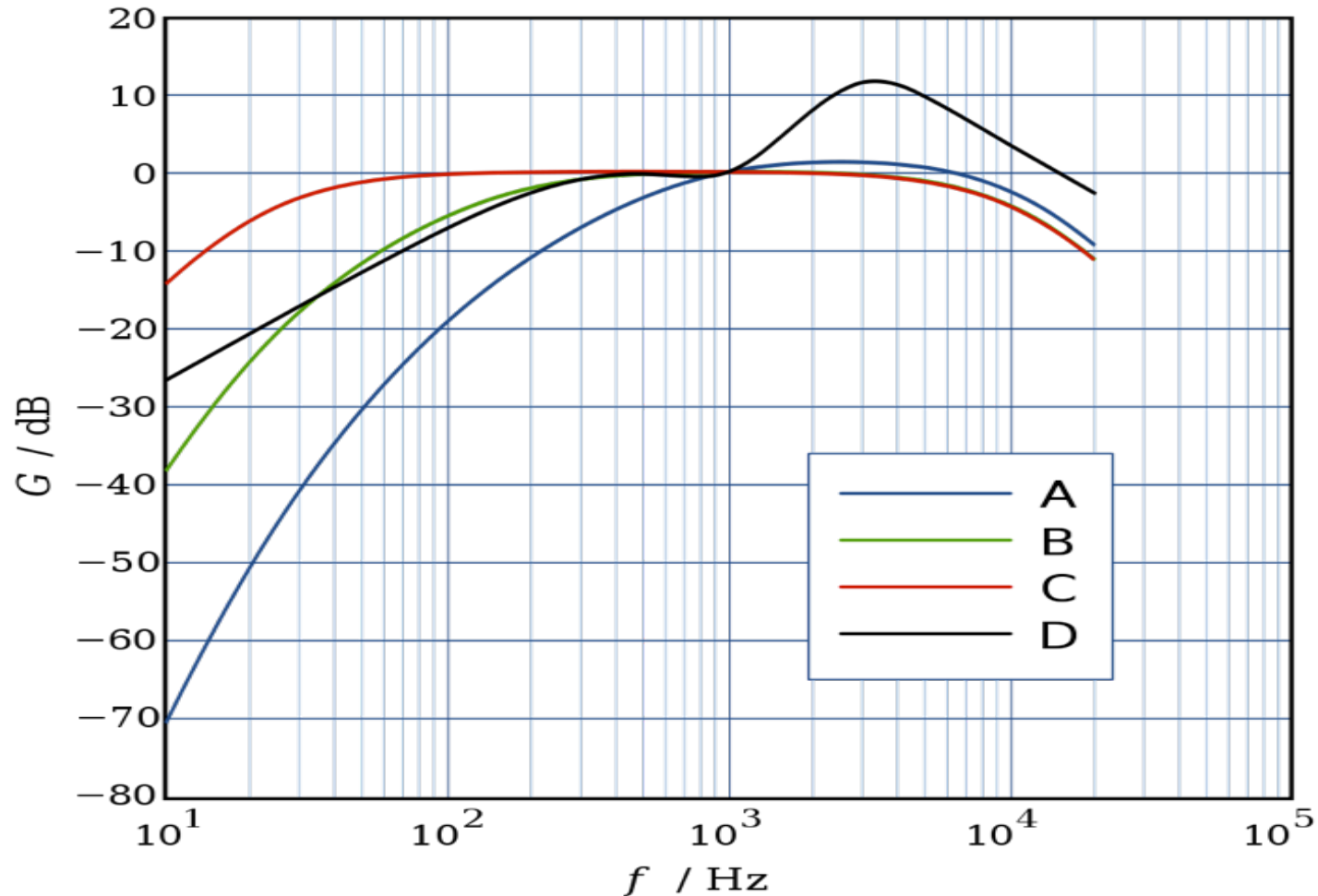


Bewertungskurven

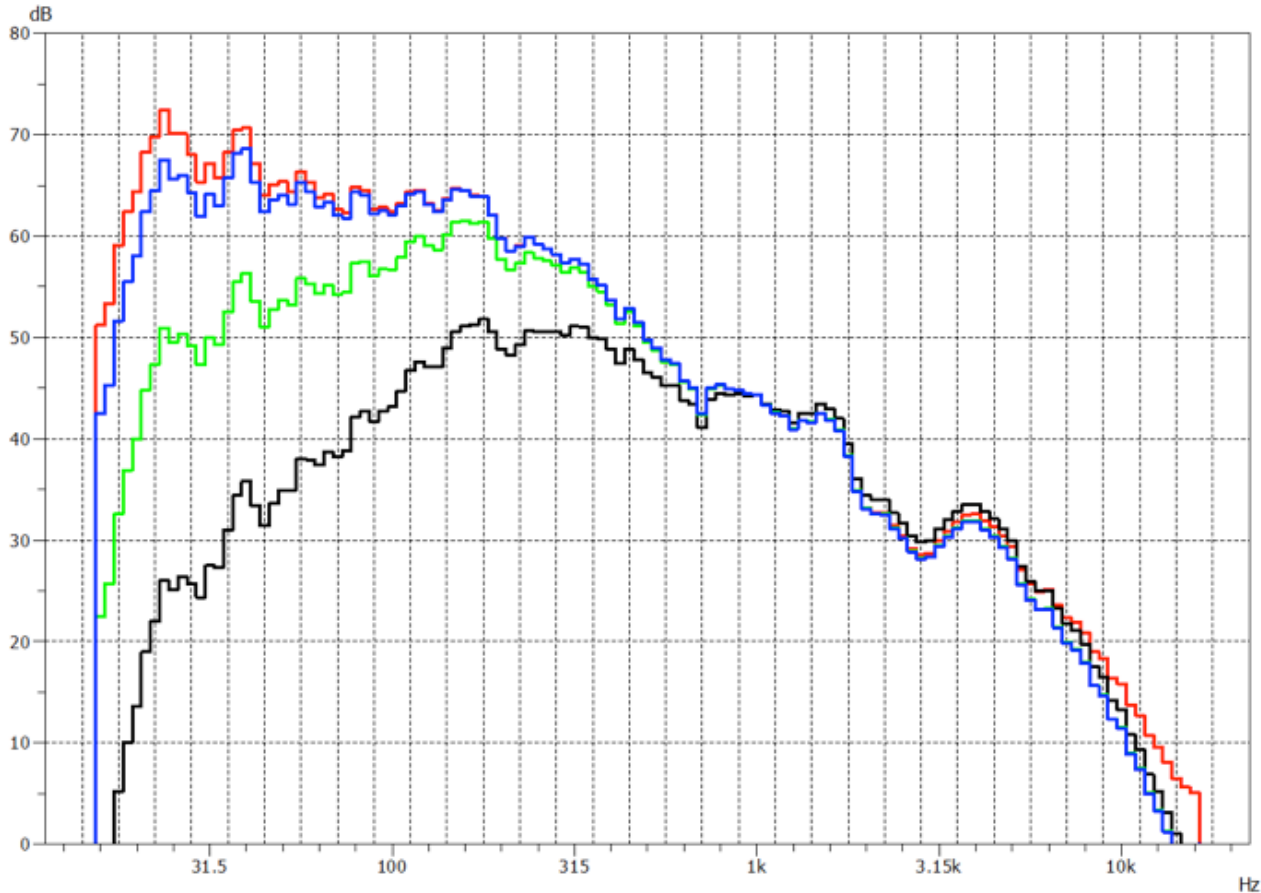
- **A-Bewertung entspricht den Kurven gleicher Lautstärkepegel bei niedrigen Schalldrücken**
- **B-Bewertung entspricht den Kurven gleicher Lautstärkepegel bei mittleren Schalldrücken**
- **C-Bewertung entspricht den Kurven gleicher Lautstärkepegel bei hohen Schalldrücken**
- **D-Bewertung entspricht den Kurven gleicher Lautstärkepegel bei sehr hohen Schalldrücken**



Bewertungskurven



Bewertungskurven



Windgeräusch
1/12tel Oktav,
lin-Mittelung

rot: Linear-Bewertet
schwarz: A-Bewertet
grün: B-Bewertet
blau: C-Bewertet



Lautheit

- Die Lautheit ist eine von Stanley Smith Stevens und durch Normen festgelegte Größe zur proportionalen Abbildung des menschlichen Lautstärkeempfindens.
- Die Lautheit definiert die empfundene Lautstärke eines Schallereignisses.
- 1 Sone entspricht einem Schallereignis, das so laut wahrgenommen wird wie ein 1 kHz Sinuston mit einem Schalldruckpegel von 40 dB.
- Die Lautheit verdoppelt sich, wenn der Schall als doppelt so laut empfunden wird.
- Bei einem Sinuston von 1 kHz führt eine Pegelerhöhung um 10 dB zum Gefühl der Verdoppelung der Lautheit.
- Bei niedrigeren Schalldruckpegeln führen jedoch bereits geringere Erhöhungen als 10 dB zum Gefühl der Verdoppelung der Lautheit.



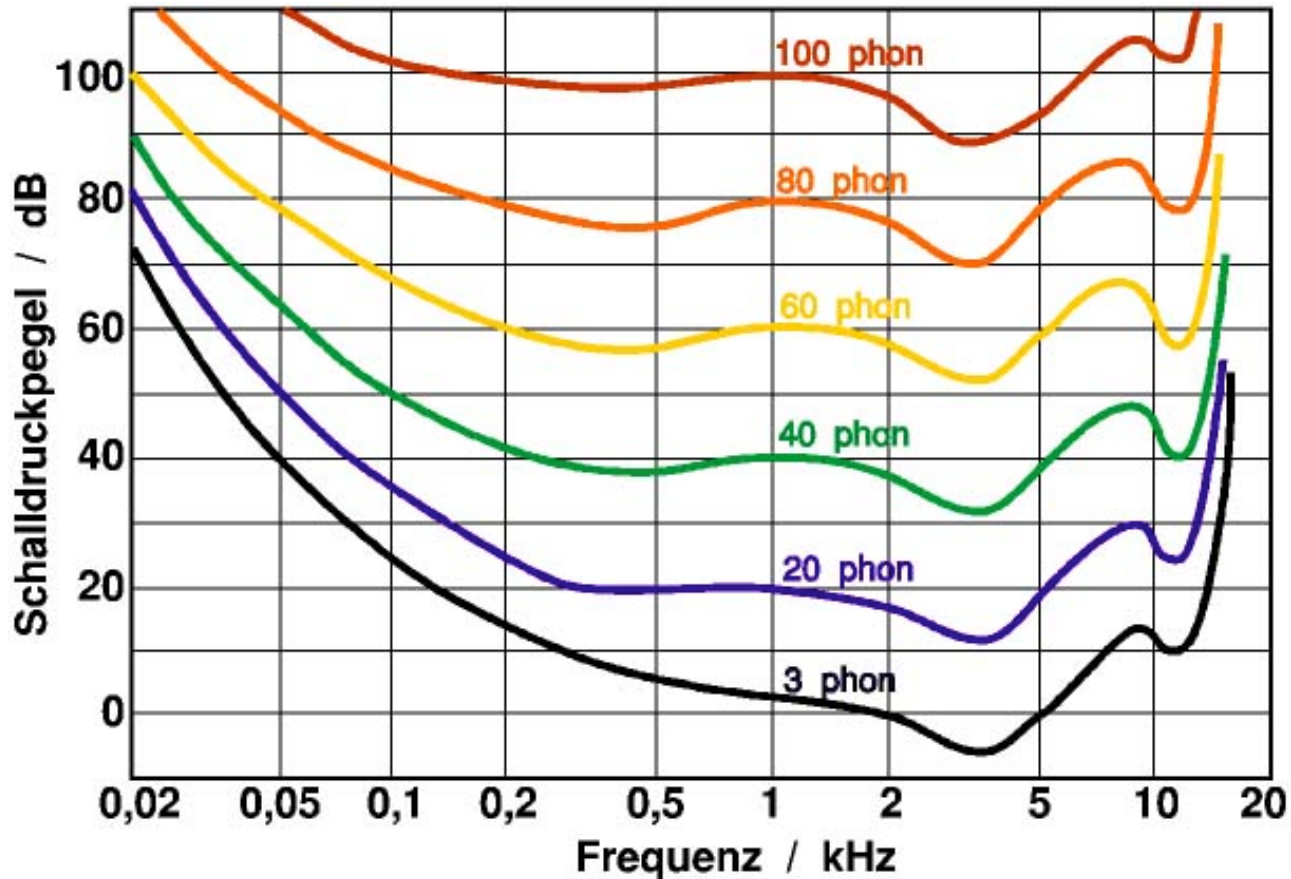
Lautheit

- **Die Lautheit eines Geräusches beeinflusst auch die Wahrnehmung seiner zeitlichen und spektralen Struktur.**
- **Die Lautheit ist abhängig vom Schalldruckpegel, der spektralen Zusammensetzung und dem zeitlichen Verlauf des Schalles.**
- **Die Lautstärkewahrnehmung des Menschen weist Maskierungseffekte in der zeitlichen und spektralen Wahrnehmung auf.**
- **Die Lautheitsberechnung erfolgt anhand gemessener Schallpegeldaten (Spektrum, Zeitfunktion) und führt für gleichförmige, quasistationäre Schalle zu Ergebnissen die der subjektiven Bewertungen entsprechen.**
- **Das Verfahren nach Stanley Smith Stevens verwendet Oktavfilter als Spektralanalysator.**
- **Das Verfahren nach Eberhard Zwicker verwendet zur Näherung für die Frequenzgruppen Terzfilter**



Lautheit

Kurven gleicher Lautstärke



sone	phon
1	40
2	50
4	60
8	70
16	80
32	90
64	100
128	110
256	120
512	130
1024	140



Lautheit

Situation	Schalldruck [Pa]	Schalldruck- pegel [dB]	Lautheit [sone]
Schmerzsschwelle	100	134	ca. 676
Düsenflugzeug in 100 m Entfernung	3,6 - 200	110 - 140	128 - 1024
Presslufthammer 1m Entfernung	2	100	64
Gehörschäden	0,36	85	22
Hauptstraße 10 m Entfernung	0,2 - 0,63	80 - 90	16 - 32
Normale Unterhaltung	$2 \cdot 10^{-3} - 6,3 \cdot 10^{-3}$	40 - 50	1 - 2
Schallmessraum	$2 \cdot 10^{-4} - 6,3 \cdot 10^{-4}$	20 - 30	0,15 - 0,4
Hörschwelle	$2 \cdot 10^{-5}$	0	0



einfaches Mess-System



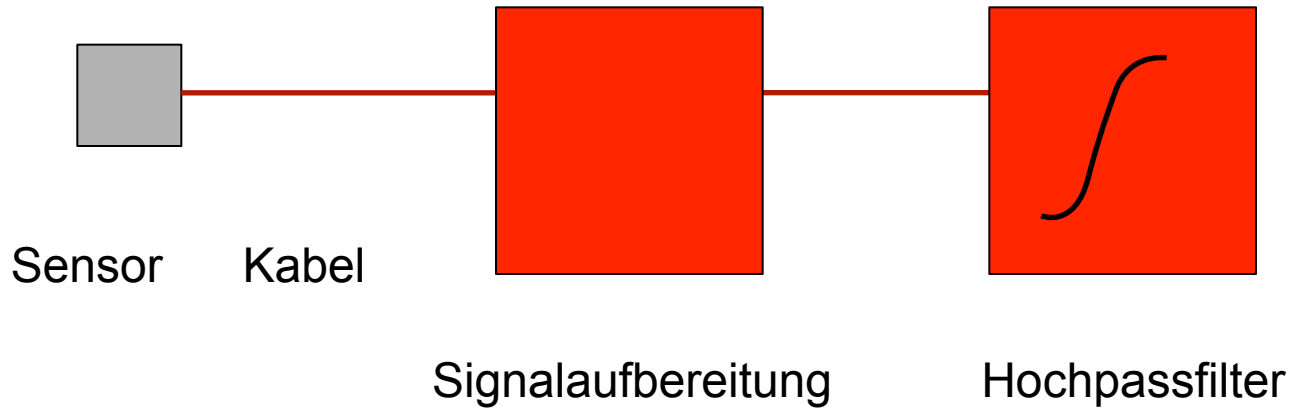
Sensor:

- Schalldruck (mV je Pa)
- Beschleunigung (mV je m/s^2)
- ... (mV je physikalische Einheit)

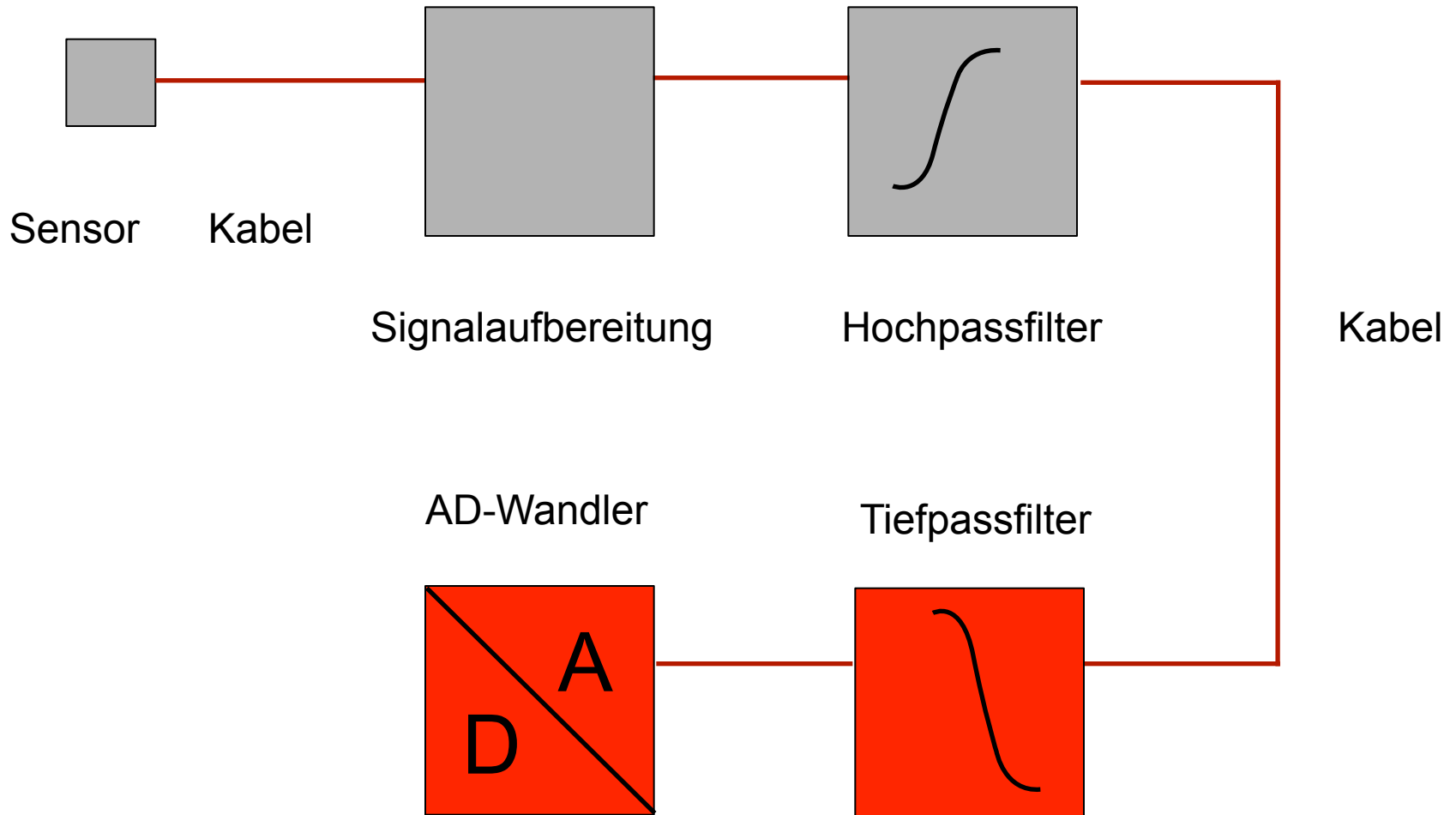
Wandlung von physikalischer Größe in Spannung



einfaches Mess-System



einfaches Mess-System



einfaches Mess-System

