

Computerunterstützte Messdatenerfassung und -verarbeitung - Grundlagen der Akustik und Schwingungstechnik -

Frank Kameier*) Bernd Virnich**)

*)Institute of Sound and Vibration Engineering, ISAVE, Düsseldorf University of Applied Sciences,
Josef-Gockeln-Str. 9, 40474 Düsseldorf, frank.kameier@hs-duesseldorf.de

**Müller BBM VibroAkustik Systeme GmbH, Planegg bei München, BVirnich@MuellerBBM-vas.de

Einleitung

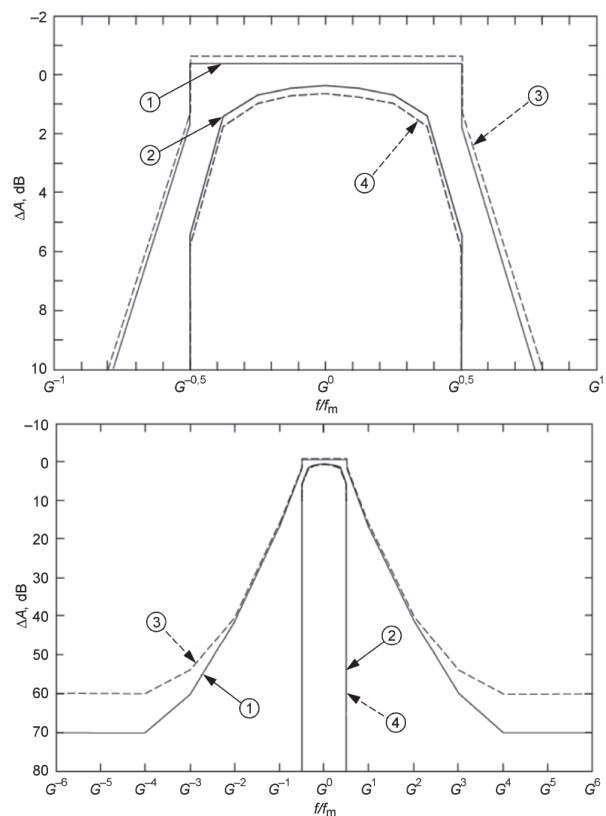
Aus dem Wahlpflichtfach Strömungsakustik der Diplomstudiengänge des Fachbereichs Maschinenbau und Verfahrenstechnik entstand im Rahmen der Umsetzung des Bologna-Prozesses die Master-Lehrveranstaltung „Computerunterstützte Messdatenerfassung und -verarbeitung“. Nach gut 10 Jahren Erfahrung kann man die Inhalte der Lehrveranstaltung zu den wichtigen Grundlagen der Masterstudiengänge des Fachbereichs zählen. Neben einer umfangreichen Matlab-Einarbeitung anhand akustischer Fragestellungen erfolgt die Erläuterung der anschaulichen Physik über die Schulversion DASYlab (grafische Programmierung)(2014)/1/. Abgerundet und angewandt werden die Lehrinhalte unter Einbindung einer industriellen Software für Akustik und Schwingungstechnik insbesondere an Prüfständen. Intensiv werden Grundlagenthemen zur Signalanalyse behandelt, die insbesondere für die berufliche Praxis weit über die Tiefe, die bei gesetzlich vorgeschriebenen Messaufgaben notwendig ist, hinausgeht. Matlab-Befehle wie `fft`, `spectrogram` oder `pwelch` werden detailliert erläutert und hinsichtlich einer Validierung anhand des Theorems von Parseval motiviert. Behandelt werden Themenkomplexe zu negativen Frequenzen und wann man bei der Signal-Analyse von „geschätzten“ (estimated) Schmalbandanalysen spricht. Eine wichtige Rolle spielen Grundlagen wie Clipping, Aliasing, Leakage (Fensterung mit Formfaktor, Coherent Gain, Noise Gain), Terz- oder Oktavanalyse, A-Bewertung und die in der Praxis oft unterschätzte Mittelung von Frequenzspektren in Akustik und Schwingungstechnik. Gelehrt wird in einem Team aus der Praxis und der Hochschule.

Gesamtpegelberechnung

Auch im Jahre 2016 gibt es noch keine Berechnungsvorschrift gemäß DIN zur Bestimmung eines Gesamtpegels oder Gesamtschalldruckpegels aus einem Schmalbandspektrum, obwohl inzwischen vermutlich sämtliche Schallpegelmesser das Zeitsignal zunächst in ein Schmalbandspektrum zerlegen, um daraus Terz- und Oktavspektren zu berechnen. Analogfilter, wie sie noch in DIN EN61260 „Elektroakustik – Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven“ beschrieben werden (2014)/2/, vgl. Abb. 1, dürften heute eigentlich keine technische Relevanz mehr haben, da auch bei einer Güte der Klasse 1 der n-tel Oktavfilter durch die nicht unendlich steilen und damit überlappenden Filterflanken das Theorem von Parseval verletzt wird. Das Theorem von Parseval wird im Folgenden detailliert erörtert. Die gesamte Normung um DIN 1320 (2009)/3/, DIN 45641 (1990)/4/, EN ISO 266 (1997)/5/ oder DIN EN ISO 1683 (2015)/6/ ist eher als veraltet (auch

Veröffentlichungen aus 2015) und nicht praktikabel anzusehen.

Die Thematik Gesamtpegelberechnung oder die Überprüfung des Theorems von Parseval (Energiegleichheit bei Wechselgrößen im Zeit- und Frequenzbereich) ist insofern interessant, da z.B. unter Matlab Befehle wie „`pwelch`“ oder „`spectrogram`“ eine zentrale Grundlage zur Bestimmung von gemittelten Spektren (`spectrogram`) oder Spektraldichten (`pwelch`) darstellen – für mathematische Korrektheit muss der Anwender aber selber sorgen. Auch LabView bietet umfangreich fertige VIs. Mit DasyLab kann die mathematische Prozedur didaktisch sehr gut visualisiert werden, vgl. Kameier (2014)/1/.



Legende

x-Achse: normierte Frequenz f/f_m in logarithmischem Maßstab

y-Achse: relative Dämpfung ΔA in dB

① untere Grenze der Dämpfung von Filtern der Klasse 1

② obere Grenze der Dämpfung von Filtern der Klasse 1

③ untere Grenze der Dämpfung von Filtern der Klasse 2

④ obere Grenze der Dämpfung von Filtern der Klasse 2

Abbildung 1: Untere und obere Grenzen der relativen Dämpfung als Funktion von f/f_m für Oktavfilter der Klassen 1 und 2, DIN EN61260 (2014)/2/.

Auch einschlägige Lehrbücher (vgl. z.B. Möser (2015)/7/ oder Sengpiel (2016)/8/) geben keinen Hintergrund zur

Gesamtpegelbestimmung, wie sie in Profi-Messsystemen wie Pulse, Artemis, PAK usw. verwendet werden. Hier sei insbesondere auf die Verwendung des Bewertungsfensters hingewiesen. Unter Matlab ist dafür erwartungsgemäß ein fundiertes mathematisches Grundwissen notwendig. Im Folgenden wird die Berechnungsvorschrift zur Überprüfung des Theorems von Parseval kurz rekapituliert.

Multipliziert man die komplexe Fouriertransformierte (Beachte die Dimension bezogen auf eine Spannung als Messgröße in eckigen Klammern!)

$$h_1(\omega) = \int_{-T}^T h_1(t) e^{i\omega t} dt \quad [V \cdot s] \quad (1)$$

(Definitionsgleichung Fouriertransformation – Einheit in [V·s])

einer Zeitfunktion $h_1(t)$ mit ihrer konjugiert komplexen Fouriertransformierten $h_1^*(\omega)$ und dividiert durch die betrachtete Zeit $2T$, erhält man die Spektraldichte, die der Fouriertransformierten der Autokorrelationsfunktion entspricht:

$$S_{11}(\omega) = \frac{h_1(\omega) \cdot h_1^*(\omega)}{2T} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{T} \int_0^T h_1(t + \hat{t}) \cdot h_1(t) dt \right] e^{i\omega \hat{t}} d\hat{t} \quad [V^2 \cdot s] \quad (2)$$

Die so definierte Spektraldichte erstreckt sich sowohl über positive wie über negative Frequenzen. In der Literatur ist die Bezeichnung dieser Funktion nicht einheitlich, häufig wird die Spektraldichte auch als Spektrum bezeichnet oder Spektraldichte und Spektrum werden gar gleich gesetzt. Im Hinblick auf messtechnische Anwendungen ist dies alles andere als sinnvoll.

In der Messtechnik ist es üblich, die Spektraldichte in das Spektrum und die Kreuzspektraldichte in das Kreuzspektrum zu überführen. Dabei wird folgende Symmetrie der Spektraldichten ausgenutzt, vgl. Bendat und Piersol (1980)/9/:

$$S_{11}(\omega) = S_{11}(-\omega) \quad (3)$$

Unter messtechnischen Gesichtspunkten sind nur die Signalanteile für positive Frequenzen von Interesse, so dass der Faktor 2 in den Gleichungen (2) und (3) entsprechend zu verrechnen ist. Nutzt man noch aus, dass die Bandbreite Δf_B der Frequenzauflösung gerade dem Kehrwert des betrachteten Zeitintervalls T entspricht,

$$\Delta f_B = \frac{1}{T} \quad (4)$$

so folgt für das gemessene Amplitudenspektrum,

$$\begin{aligned} G_{11}(\omega) &= 2 S_{11}(\omega) \Delta f_B \quad \text{für } \omega > 0, \quad [V^2] \\ G_{11}(\omega = 0) &= S_{11}(\omega = 0) \Delta f_B \quad \text{für den Gleichanteil } \omega = 0 \\ G_{11}(\omega) &= 0 \quad \text{für } \omega < 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Der Einzahlenwert einer Schwankungsgröße - in der Regel ist es der rms-Wert - lässt sich im Zeitbereich gemäß

$$f_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f'^2(t) dt} \quad (6)$$

oder nach einer Fouriertransformation aus der Summe der Amplituden aller Frequenzkomponenten berechnen. Die Gleichheit dieser beiden Berechnungsmöglichkeiten nennt

man das Theorem von Parseval: Die Energie einer Schwankungsgröße ist im Zeit- und Frequenzbereich gleich:

$$\frac{1}{T} \int_0^T h(t)^2 dt = \frac{1}{\omega_{max}} \int_0^{\omega_{max}} h(\omega)^2 d\omega \quad (7)$$

Bei der Berechnung des Gesamtpegels ist die Frequenzauflösung und das verwendete Fenster (Formfaktor ϵ des Bewertungsfensters) zu berücksichtigen:

$$GP = \sqrt{\frac{1}{\epsilon} \sum_{i=1}^N A_i^2} \quad (8)$$

Ein Signal geringer Frequenzauflösung (großes Δf) hat hinsichtlich eines Rauschsignals einen höheren Pegel als ein feiner aufgelöstes Frequenzspektrum (kleines Δf), Abb. 2.

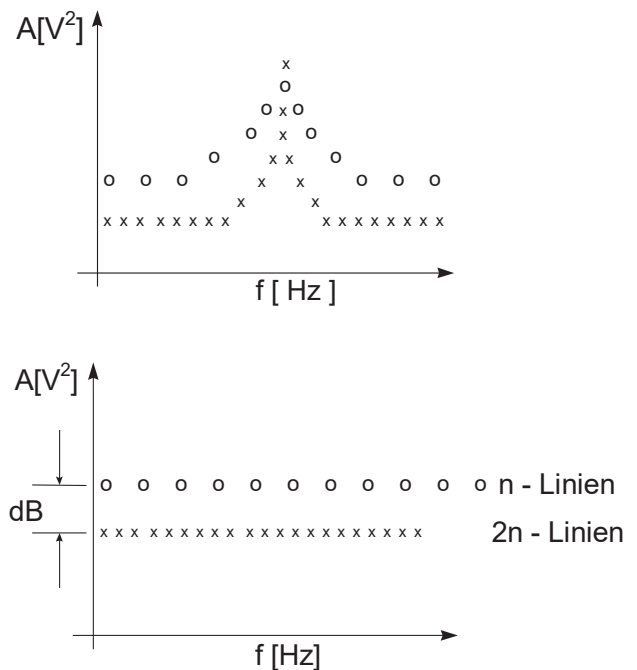


Abbildung 2: Einfluss der Frequenzauflösung auf den Rauschpegel.

Mit den Befehlen spectrogramm oder pwelch lassen sich unter Matlab Spektren aus einem beliebig langen Zeitsignal berechnen. Die Zeitdaten werden in Blöcke eingeteilt und über der Führungsgröße Zeit dargestellt (specgramm) oder gar zu einem Spektrum energetisch gemittelt (pwelch). Bewertungsfenster lassen sich einbinden, um das Rauschen des sogenannten Leakage-Effektes zu reduzieren, vgl. Abb.3 und 4.

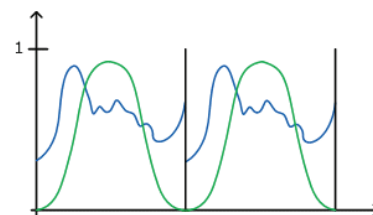


Abbildung 3: Fensterung eines Zeitsignals, schematische Darstellung im Zeitbereich, MüllerBBM VAS, (2016)/10/.

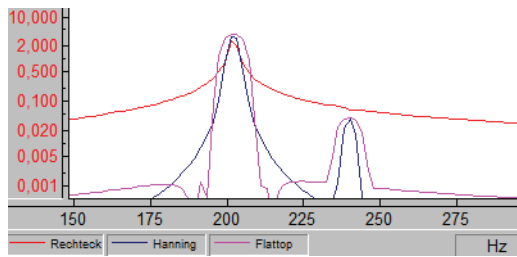


Abbildung 4: Frequenzspektren mit Rechtecke-(ohne), Hanning- und Flattop-Fenster.

Durch Verrechnung in eine Spektraldichte wird mit dem Befehl `pwelch` der Einfluss der Frequenzauflösung zwar kompensiert, aber ohne Berücksichtigung des Formfaktors ϵ des Bewertungsfensters. Dieses ist unter mathematischem Gesichtspunkt mit dem Ziel, das Theorem von Parseval zu erfüllen, unbefriedigend. Hinweise zum Formfaktor ϵ des Bewertungsfensters findet man in der Literatur nun auch wieder nur sehr rudimentär dokumentiert. Schmitt /11/ gibt ein Coherent-Gain (CG) und Noise-Gain (NG) an, siehe auch Tab. 1, aus dem sich das ϵ berechnen lässt:

$$CG = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} w(i) \quad NG = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} w(i)^2 \quad \epsilon = \frac{NG}{CG^2}$$

Mit den Stützstellen $w(i)$ der jeweiligen Fensterfunktion, siehe auch Harris/12/. Das CG ist der arithmetische Mittelwert des Bewertungsfensters und das NG sein quadratisches Mittel. CG kann man auch als Amplitudenkorrektur(DASYlab) oder Normierungsfaktor (Matlab) für das Bewertungsfenster interpretieren. Der Kehrwert des ϵ wird auch als Breitband-Korrekturwert bezeichnet. Interpretieren lässt sich das ϵ als Verlustleistung gegenüber einem Signal nur mit Gleichanteil oder gegenüber dem Rechteckfenster. Zur didaktischen Visualisierung derartiger Zusammenhänge verwenden wir an der Hochschule Düsseldorf DasyLab, siehe, Kameier /13/. Verwendet man unter Matlab den `pwelch` Befehl wird das Hamming-Fenster angewendet – bei der Normierung wird ein ϵ von 1,36 aber nicht berücksichtigt! Die Verwendung einer Fensterfunktion ist der Grund für die Bezeichnung einer Abschätzung der spektralen Verteilung, da mit der Multiplikation von Nullen an beiden Rändern des Fensters Signalanteile aus dem eigentlichen Signal gelöscht werden. Dies ist wiederum der Grund, warum gefensterte Spektren eigentlich stets gemittelt werden sollten, um eine sinnvolle statistische Auswertung präsentieren zu können. In der Industrie hat sich bei Triebwerkshochfahrten dabei eine Anzahl von drei Mittelungen als in der Regel bereits ausreichend herausgestellt. Verwendet man partiell in einem folgenden Fenster Daten des vorherigen (Overlapping) lässt sich die Mittelungszeit annehmbar reduzieren oder der Effekt des Herauslöschens von Daten durch die Fensterung kompensieren. Die Auflösung Δf_B des Frequenzspektrum ist gerade die notwendige reziproke Messdauer eines Fensters – dabei spielt das ϵ der jeweiligen Fensterformen nun keine Rolle.

Tabelle 1: Zusammenstellung von CG, NG und ϵ für gängige Bewertungsfenster.

	CG	NG	ϵ	$1/\epsilon$
Window	CG	NG	NG/CG^2	Breitband-Korrektur
Rectangular	1,00	1,00	1,00	1,00
Hamming	0,54	0,40	1,36	0,73
Hanning	0,50	0,38	1,50	0,67
Bartlett	0,50	0,33	1,33	0,75
Blackman-Harris	0,36	0,26	2,01	0,50
Flat Top	0,22	0,18	3,77	0,27

Mit zur Auswahl stehenden Arbeitsbögen werden im Rahmen der Master-Lehrveranstaltung an der HS D derartige Inhalte trainiert. Zur Visualisierung wird u.a. das

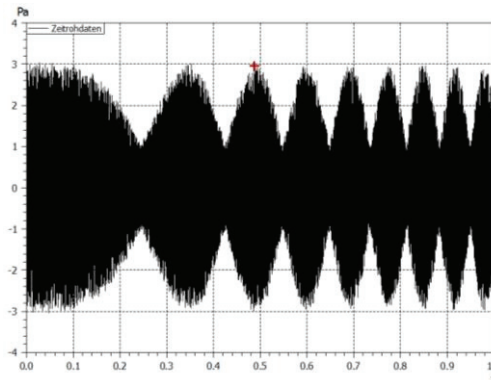


Abbildung 5: Zeitrohdaten z.B. eines Schalldrucksignals.

Prüfstandakustiksystem als industriennahe Umgebung verwendet. Abb. 5 zeigt ein Zeitsignal, dessen Zusammensetzung im Rahmen der Übung zu ermitteln, zu interpretieren und quantitativ zu bewerten ist. Eine erste Übersicht lässt sich gut mittels eines Spektrogramms über der Führungsgröße Zeit darstellen, Abb. 6. Zusammen mit dem gemittelten Amplitudenspektrum (Abb. 7) kann man letztlich erkennen, dass sich das Signal wie folgt zusammensetzt:

- Weißes Rauschen mit etwa 65 dB rms,
- Sinus 1.000 Hz mit etwa 90 dB rms,
- Sweep linear 1.000-1.500 Hz,
- Sinus bei 1.200 Hz mit etwa 65 dB rms.

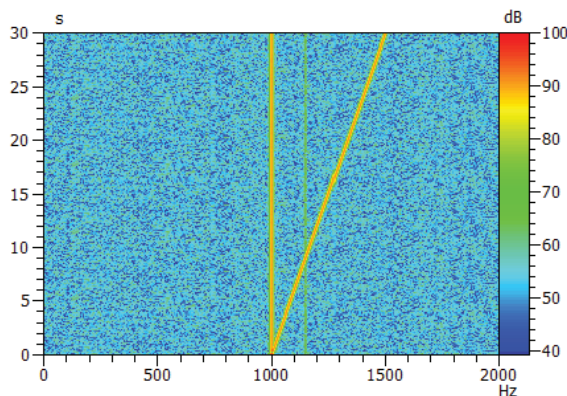


Abbildung 6: Spektrogramm, 3-D Visualisierung oder Campbell-Diagramm des Zeitsignals.

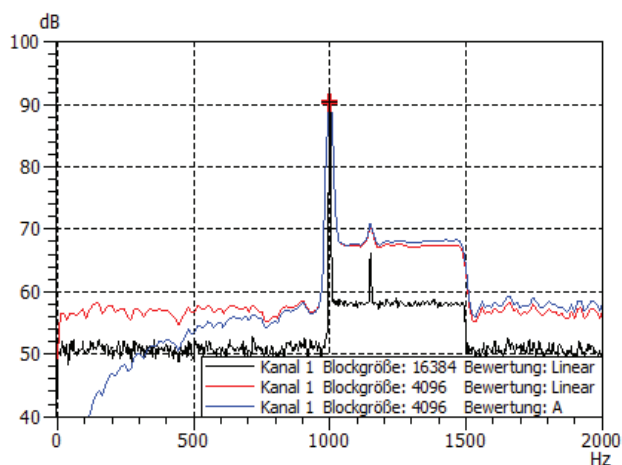


Abbildung 7: Gemittelte Schmalband-, Autopower- oder Amplitudenspektren der Zeitdaten aus Abb. 5. oder des Spektrogramms aus Abb. 6.

Bezüglich der Mittelungsprozedur für Amplitudenspektren gemäß Abb. 7 können Einflüsse von Mittelungszeiten zur Reduzierung von unkorreliertem Rauschen ebenso diskutiert werden wie eine angemessene Frequenzauflösung und eine sinnvolle Auflösung der Führungsgröße (hier die Zeit). Einstellgrößen sind dabei dann die Blockgröße, ein Overlapping der Blöcke und die Anzahl an arithmetischen Mittelungen der Amplitudenspektren mit quadratischer Einheit im Sinne eines RMS-Wertes im Zeitbereich. Die Entwicklung von Industriesoftware hat in den letzten Jahren dazu geführt, dass aus den Zeitrohdaten nur für die grafische Darstellung Auswertungen generiert werden, die nicht mehr separat gespeichert werden müssen, wie es bei alten Frequenzanalysatoren üblich oder erforderlich war. Dies führt u.U. dazu, dass die Software automatisiert Parameter vorgibt oder Default-Werte festlegt und die Anwender die Hoheit über die Messdatenanalyse nur bei großer Aufmerksamkeit behalten.

Zusammenfassung

Im Rahmen einer Grundlagenlehrveranstaltung für Masterstudiengänge im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik werden Parameter der Frequenzanalyse studiert, die in der gängigen Normung zur Messung und Bewertung von Geräuschen keine Rolle spielen, obwohl sie von digitalen Schallpegelmessern oder Softwarepaketen wie selbstverständlich benutzt werden. Erläutert werden Bewertungsfenster und ihr Einfluss auf die Gesamtpegelbestimmung. Dabei wird die Sichtweise von Maschinenbauingenieuren berücksichtigt und über das Theorem von Parseval wird eine Validierungsmöglichkeit für eigene Programmieransätze in Matlab und DASYlab vermittelt. Die Matlab Befehle `pwelch` und `spectrogram` decken derart umfangreich signalanalytische Details ab, wie sie auch per Mausklick in Prüfstandsystemen wie Pulse, Artemis, PAK etc. nutzerfreundlich abgearbeitet werden. Die substantielle Kenntnis, wie eigentlich verrechnet wird, muss beim Anwender nicht vorhanden sein, solange man innerhalb einer Auswertephilosophie bleibt. Für Vergleiche unterschiedlicher Verfahrensweisen ist es bei

schmalbandigen Frequenzanalysen aber unumgänglich, dass vollständige algorithmische Vorgehen zu durchschauen. Schmalbandige Frequenzanalysen sind heute unumgänglich, wenn es um Quellenlokalisierung und Geräuschminderung an Industrieanlagen oder bei Anlagen zur Energiewandlung geht. Dass bei Anwohnerbeschwerden immer noch Gutachten ausschließlich auf Basis von Terz- oder gar Oktavspektren nicht unüblich sind, kann vermutlich nur über ein vollständiges Neudenken der Normung im Bereich der Akustik verändert werden. Ein zeitgemäßer Stand der Technik auf Basis der digitalen Fourieranalyse gehört eigentlich längst in akustische Lehrbücher und Normen. Vielleicht gehört diese im Wesentlichen doch überschaubare Theorie gar in die mathematische Grundlagenausbildung von Bachelor-Studiengängen.

Literatur

- /1/ Kameier, F., Akustische Experimente und Signalanalyse für Studierende des Maschinenbaus in einer grafischen Programmierumgebung, DAGA Oldenburg, 2014.
- /2/ DIN EN 61260, Elektroakustik – Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven – Teil 1: Anforderungen, Oktober 2014.
- /3/ DIN 1320, Akustik – Begriffe, Dezember 2009.
- /4/ DIN 45641, Mittelung von Schallpegeln, Juni 1990.
- /5/ EN ISO 266, Normfrequenzen, August 1997.
- /6/ DIN EN ISO 1683, Akustik – Bevorzugte Bezugswerte für Pegel in der Akustik und Schwingungstechnik, September 2015.
- /7/ Möser, Michael, Technische Akustik, Berlin, 2015.
- /8/ Sengpiel, <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-spl.htm>, 2016.
- /9/ Bendat, Julius S., Piersol, Allan G., Engineering applications of correlation and spectral analysis, New York, 1980.
- /10/ Müller BBM VibroAkustikSysteme GmbH, PAK-Hilfe, PrüfstandsAkustikSystem, 2016.
- /11/ Schmid, Hanspeter, How to use the FFT and Matlab's `pwelch` function for signal and noise simulations and measurements, University of Applied Sciences, Northwestern Switzerland, 2012.
<http://www.fhnw.ch/technik/ime/publikationen/2012/how-to-use-the-fft-and-matlab2019s-pwelch-function-for-signal-and-noise-simulations-and-measurements>
- /12/ Harris, F. J., On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform, Proceedings of the IEEE, vol. 66, no. 1, pp. 51–83, Jan. 1978.
- /13/ Kameier, Frank, Computerunterstützte Messdatenerfassung und -verarbeitung, VL-Skript, Hochschule Düsseldorf, 2015. http://ifs.mv.fh-duesseldorf.de/Vorlesung/master_SET/computer_messdaten/skript_computer051015.pdf