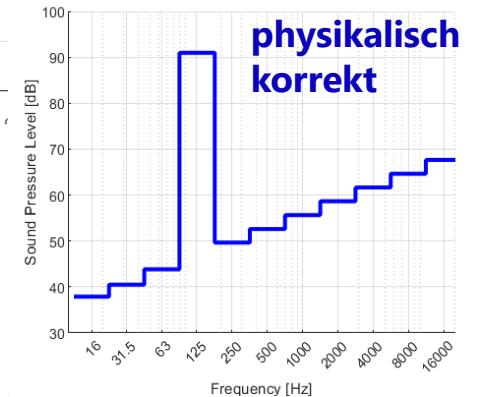
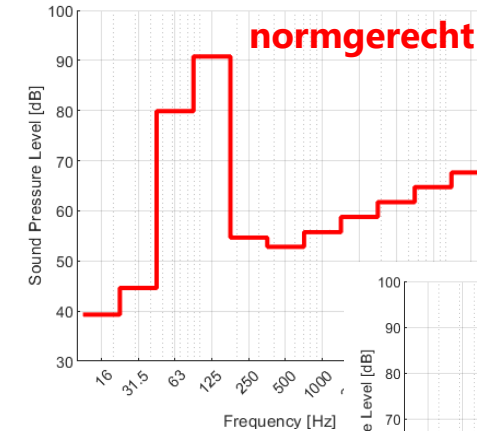
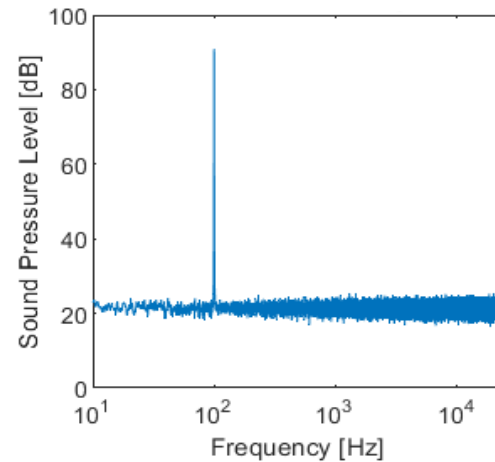
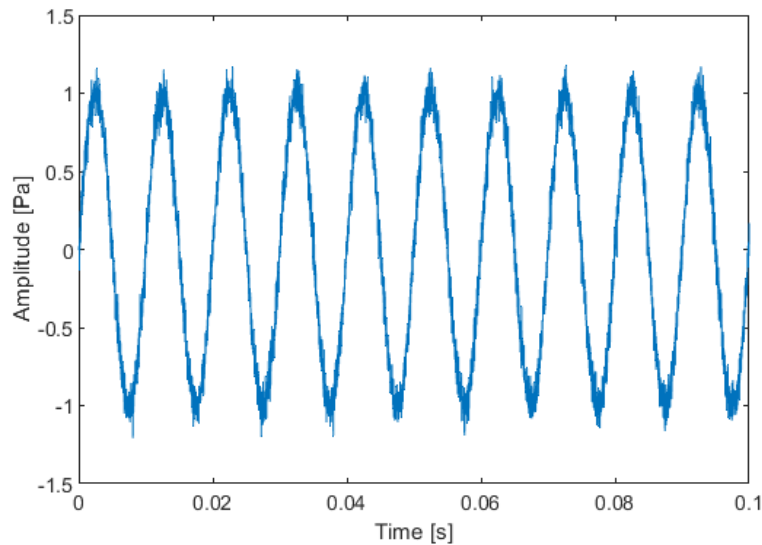


# Normgerechte Nachbildung analoger Terzfilter mit digitaler Technik – ein Auslaufmodell?

- Implementierung mithilfe der MATLAB Signal Processing Toolbox
  - Verifizierung und Auswertung von Oktavspektren

# Intro: Zwei Methoden zur Berechnung von Oktavspektren

- Sinuston (100 Hz) überlagert mit weißem Rauschen



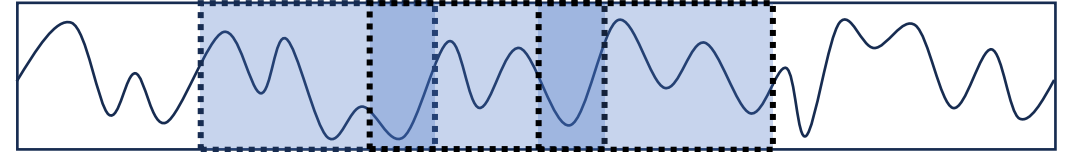
- **Ist-Zustand** DIN-EN 61260-1: Analoge Filter werden mit digitaler Technik nachgebildet
- Zeitgemäße Methode über FFT-Berechnungen wird nicht explizit erwähnt
- Thema: **Implementierung** beider Methoden und **systematischer Vergleich**
  - Theorem v. Parseval, Auswertung von Oktavspektren
  - Erweiterung für tiefe Frequenzen (DIN 45680)

# Methode über FFT-Berechnungen

Implementierung mithilfe der MATLAB Signal Processing Toolbox

- **Amplitudenspektrum** mit spectrogram(...) – Befehl

- Fensterfunktionen
- Blockweise Mittelung (quadratisch)

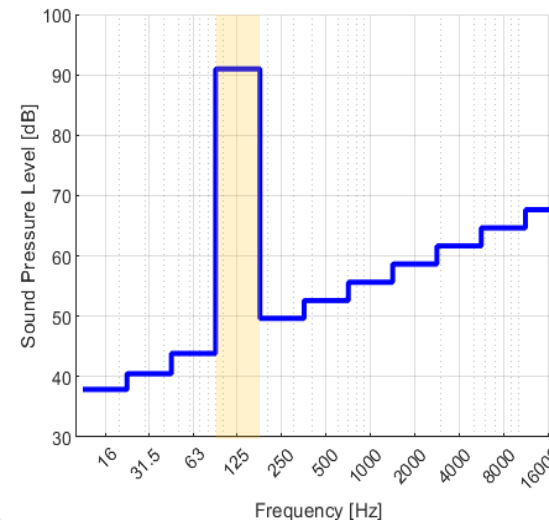
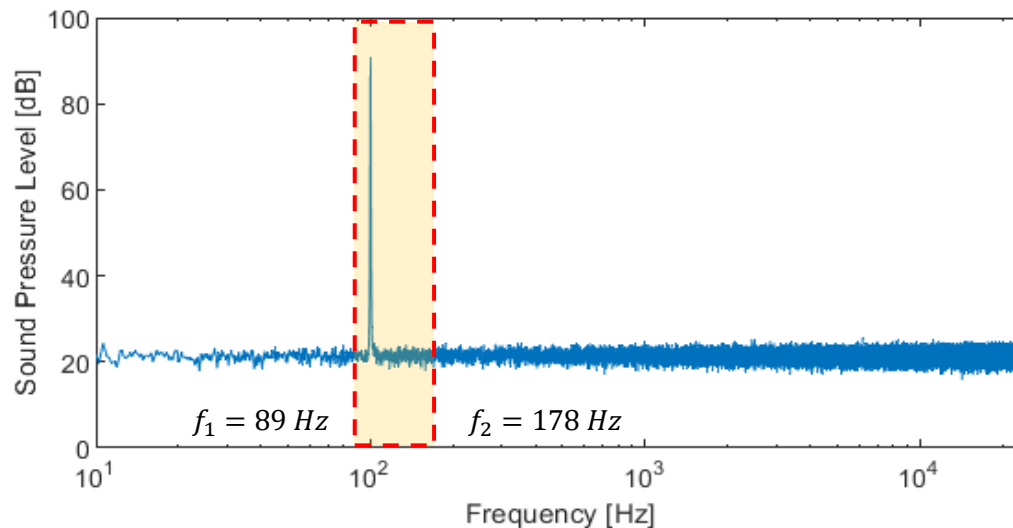


Einteilung eines Signalausschnitts in 3 Zeitfenster (Blöcke)

- **Oktavpegel** Summe aller  $N$  spektralen Komponenten  $A_i$  innerhalb der Grenzfrequenzen  $f_{1,2}$

- Energie-Korrektur  $\varepsilon$

- Bei genügend Block-Mittelungen: Gesamtpegel OAL  $\cong$  RMS im Zeitbereich



$$OAL = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon} \sum_{i=1}^N A_i}$$

	$\varepsilon$
<b>Rechteck</b>	<b>1</b>
<b>Hanning</b>	<b>1.5</b>

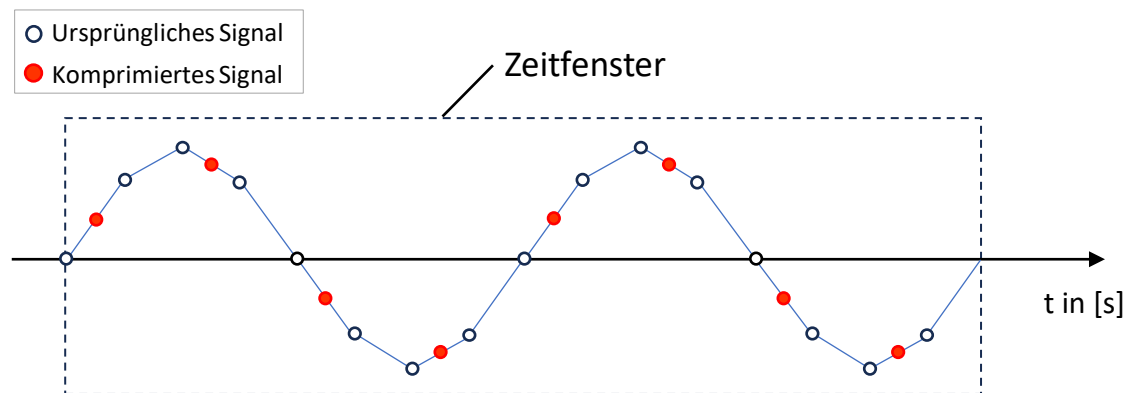
Energie-Korrektur für Fensterfunktionen

OAL eines Frequenzbandes (z.B. Mittenfrequenz  $f_m = 125$  Hz)

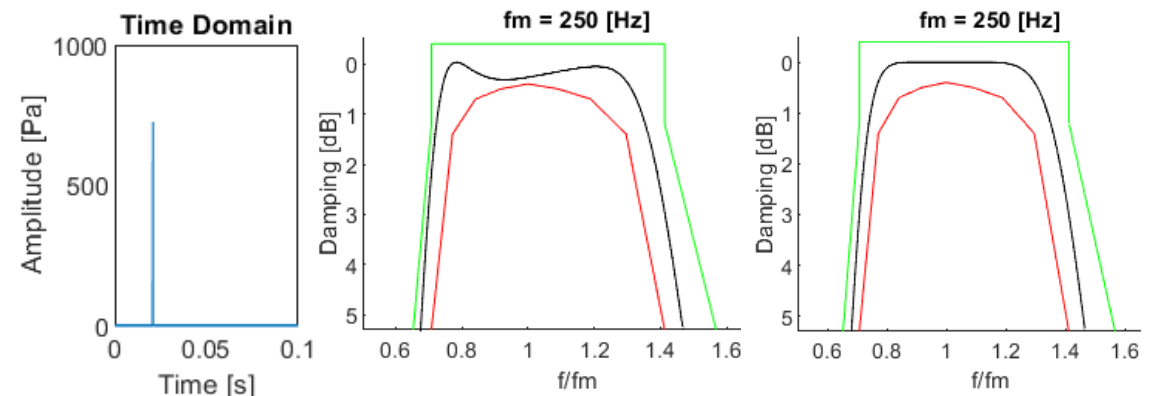
# Nachbildung analoger Filter

Implementierung mithilfe der MATLAB Signal Processing Toolbox

- Zeitdaten werden innerhalb der Grenzfrequenzen  $f_{1,2}$  bandpassgefiltert (*Butterworth Filter*)
- **Oktavpegel** folgen aus RMS über die gesamte Zeitspanne
- Dämpfungskurven zur Überprüfung der Grenzwerte nach DIN-EN 61260-1
- Impulsantwort wird „**instabil**“ bei hoher Filterordnung und geringer Bandbreite
- Maßnahme: **Resampling** – Abtastrate wird reduziert, indem Zeitdaten komprimiert werden
  - Tiefpassfilter gegen Aliasing notwendig



Halbieren der Abtastrate bestehender Zeitdaten

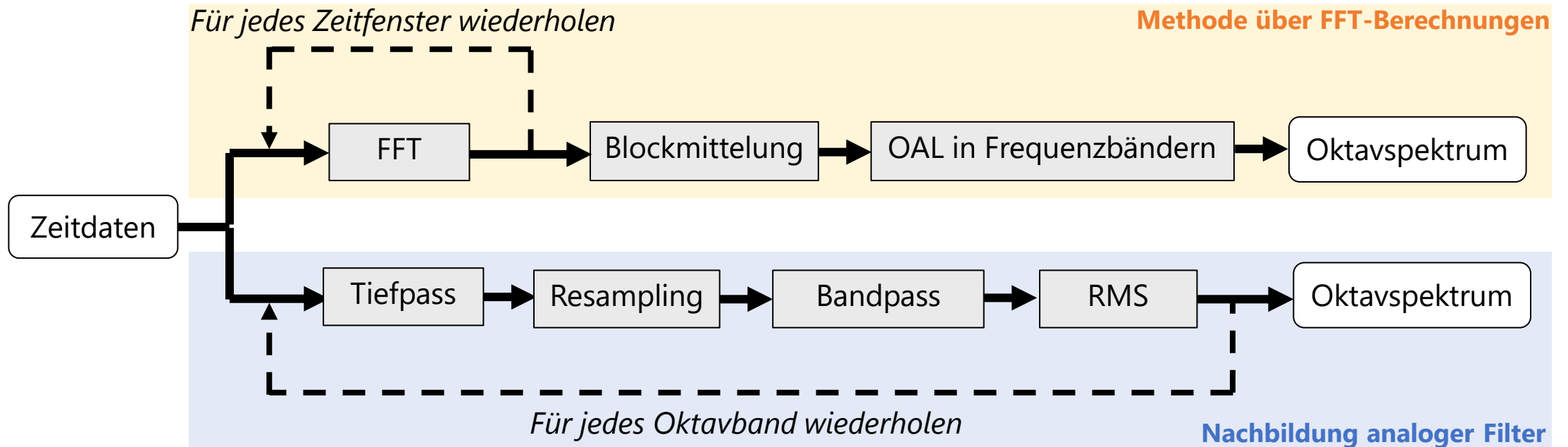


Dämpfungskurven – Impulsantwort  
vor und nach einem Resampling, Filterordnung 4



# Überblick

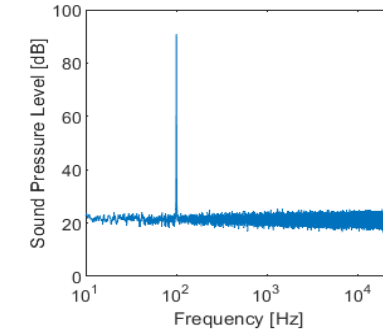
Implementierung mithilfe der MATLAB Signal Processing Toolbox



# Parseval's Theorem bei variierender Signal-Frequenz

Verifizierung und Auswertung von Oktavspektren

- **FFT-Methode:** Fehler ist unabhängig von der Signal-Frequenz
  - Parseval's Theorem wird in der dritten Nachkommastelle in dB erfüllt
- **Berechnung mit Filter:** Fehler ist abhängig von Signal und Filterordnung
  - Parseval's Theorem wird in der ersten Nachkommastelle in dB erfüllt

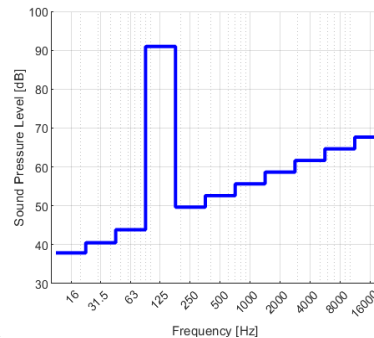


$$\text{Fehler [dB]} = \text{OAL [dB]} - \text{RMS [dB]}$$

Summe aller Oktavpegel
RMS im Zeitbereich

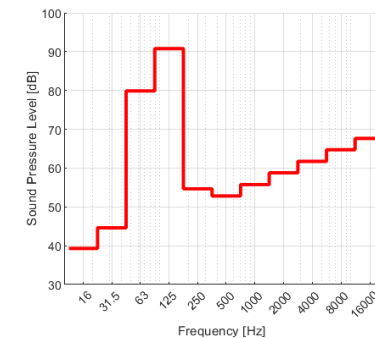
## FFT-Methode

Signaltyp	SR-Verhältnis	RMS [dB]	OAL [dB]	Fehler
	[dB]			[dB]
Rauschen	-	90.7	90.7	<b>0.00</b>
24 Hz Sinus	40	99.3	99.3	<b>0.00</b>
24 Hz Sinus	50	93.8	93.8	<b>0.00</b>
31.5 Hz Sinus	40	99.3	99.3	<b>0.00</b>
31.5 Hz Sinus	50	93.8	93.8	<b>0.00</b>



## Filter 4. Ordnung

Signaltyp	SR-Verhältnis	RMS [dB]	OAL [dB]	Fehler
	[dB]			[dB]
Rauschen	-	90.7	90.7	<b>0.05</b>
24 Hz Sinus	40	99.3	99.4	<b>0.06</b>
24 Hz Sinus	50	93.8	93.9	<b>0.09</b>
31.5 Hz Sinus	40	99.3	99.4	<b>0.04</b>
31.5 Hz Sinus	50	93.8	93.9	<b>0.02</b>



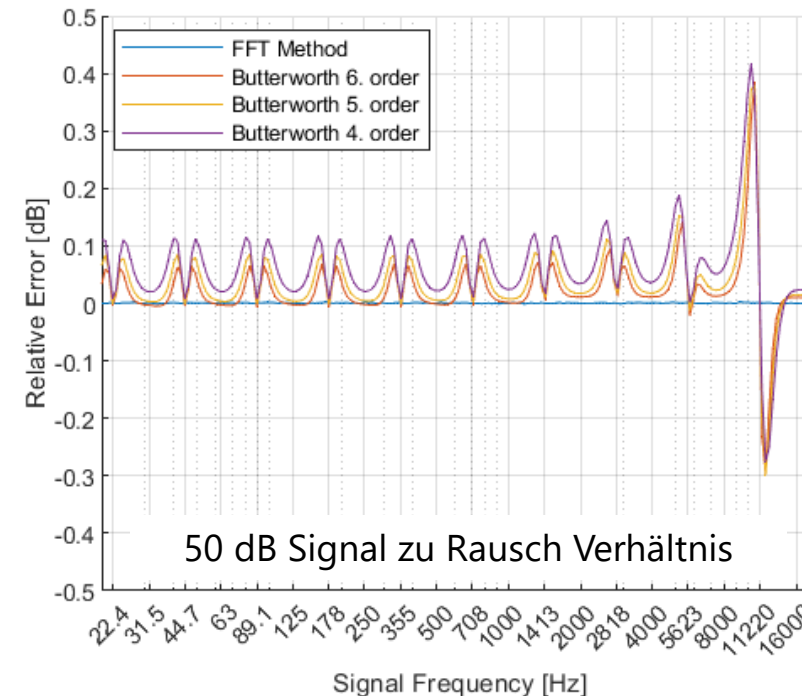
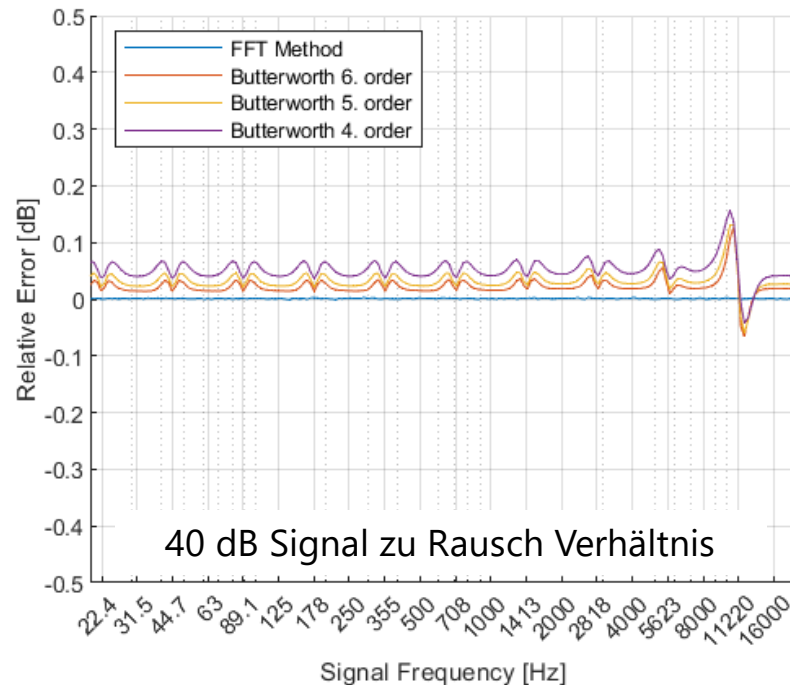
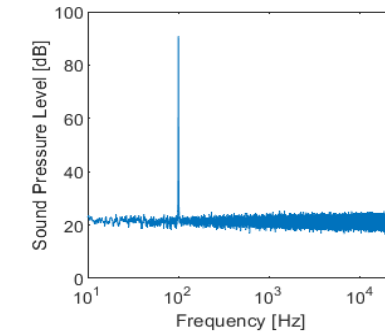
# Parseval's Theorem bei variierender Signal-Frequenz (Forts.)

Verifizierung und Auswertung von Oktavspektren

- **FFT-Methode:** Fehler ist unabhängig von der Signal-Frequenz
  - Parseval's Theorem wird in der dritten Nachkommastelle in dB erfüllt
- **Berechnung mit Filter:** Fehler ist abhängig von Signal und Filterordnung
  - Parseval's Theorem wird in der ersten Nachkommastelle in dB erfüllt

$$\text{Fehler [dB]} = \text{OAL [dB]} - \text{RMS [dB]}$$

- Höhere Genauigkeit, wenn Signal-Frequenz  $\approx$  Mittenfrequenz  $f_m$  (z.B. 31.5 Hz)

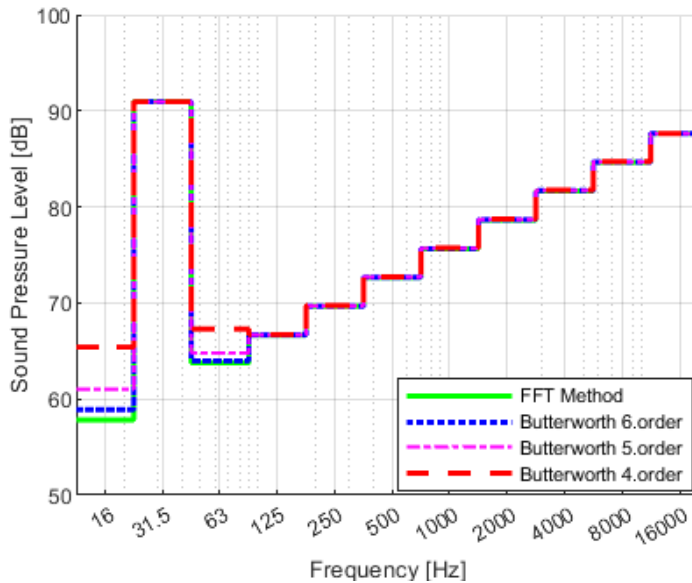
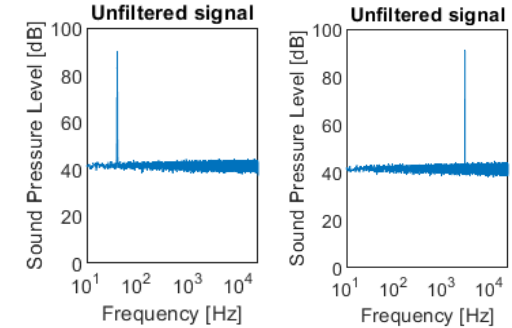




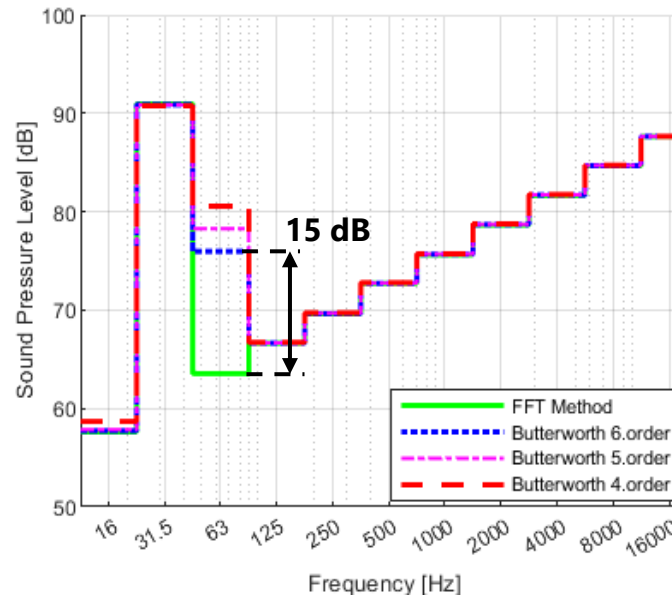
# Oktavspektren im gewöhnlichen Frequenzbereich

## Verifizierung und Auswertung von Oktavspektren

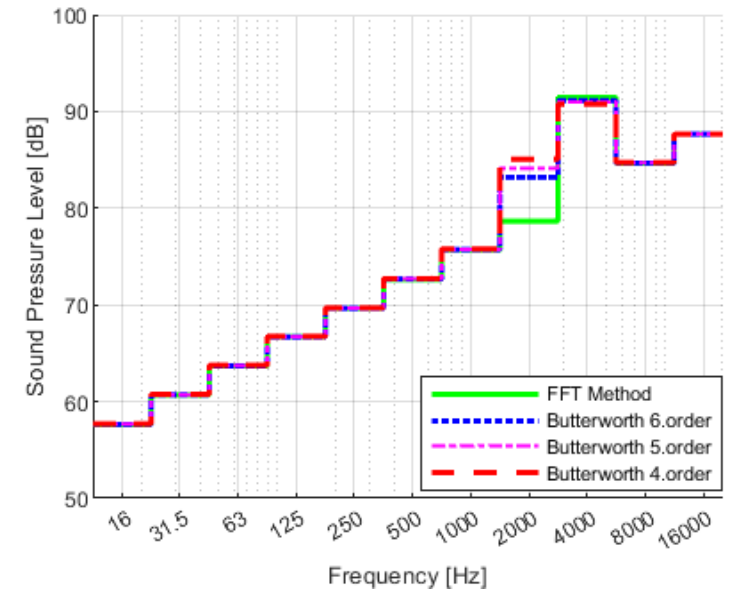
- **FFT-Methode:** Sinuston wirkt sich im entsprechenden Oktavband aus
  - Nachbaroktaven werden geringfügig durch Leakage beeinflusst
- **Berechnung mit Filter:** Sinuston beeinflusst mehrere Oktavbänder
  - Hohe Diskrepanz, wenn Sinus-Frequenz zwischen zwei Oktaven liegt



Signal-Frequenz = 31.5 Hz



Signal-Frequenz = 40 Hz



Signal-Frequenz = 3000 Hz

# Oktavspektren im tieffrequenten Bereich

Verifizierung und Auswertung von Oktavspektren

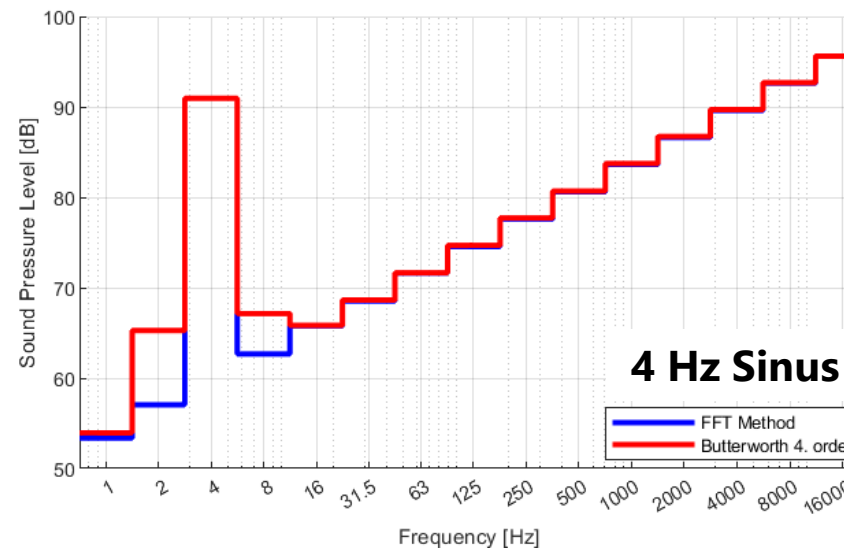
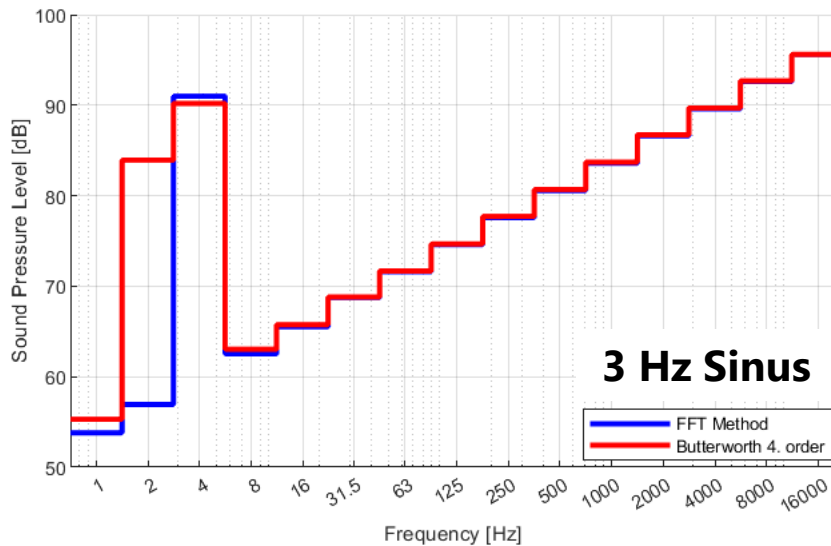
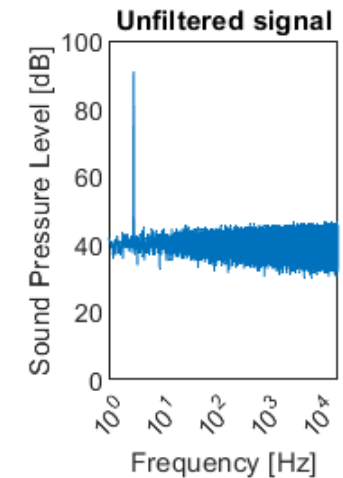
## Einstellungen

- 1024 Unterteilungen der Abtastrate notwendig für „stabile“ Impulsantwort bei 1 Hz Oktave
- Stützstellen nach dem Resampling  $N = 2048$  ( $\rightarrow 2^{21}$  im ursprünglichen Signal)

Oktavband	$f_m$ [Hz]	1	2	4	8
Unterteilungen	$d$	1024	512	256	128

$d = 1024 \rightarrow$  Neue Abtastrate beträgt 46.9 Hz statt 48000 Hz

- Erweiterung z.B. für **Terzspektren** ist analog hierzu möglich



Signaltyp	FFT Methode	Filter 4. Ord.
	[dB]	[dB]
Rauschen	0.00	0.05
3 Hz Sinus	0.00	0.06
4 Hz Sinus	0.00	0.05

Fehler des Gesamtpegels in dB

# Ergebnisse

---

- **FFT-Berechnungen:**

- Physikalisch genau – Parseval's Theorem wird in der dritten Nachkommastelle erfüllt
- Oktavspektrum auch mit Infraschallbereich leicht darstellbar

- **Nachbildung analoger Filter:**

- Genauigkeit ist abhängig vom Signal – Parseval's Theorem wird in der ersten Nachkommastelle erfüllt
- Signalfrequenzen zwischen Oktaven verfälschen Nachbaroktaven deutlich
- u.U. hohe Signallängen und mehrfaches Resampling für vollständiges Oktavspektrum mit Infraschallbereich

- **Die FFT-Methode erfüllt die Vorgaben der DIN EN 61260-1. Es stellt sich die Frage, ob sie explizit in der Norm erwähnt werden sollte.**
- **Die Filterung im Zeitbereich erfordert eine angepasste Abtastrate an die gewünschte Filterordnung unter Berücksichtigung der Frequenzspanne.**
- **Die vorliegende Untersuchung hat gezeigt, dass die Nachbildung analoger Filter vom Implementierungsaufwand her anspruchsvoller ist als die FFT-Methode.**
- **Ziel war es eigentlich, alte Handschallpegelmesser mit analoger Technik weiter zu erlauben. Erlaubt die Norm dafür nicht zu viel Raum für Frequenzen zwischen zwei Oktaven?**