

Lässt sich „guter“ Klang messen?

Herausforderungen und Lösungen
bei der messtechnischen Charakterisierung
von Lautsprechern und deren Entwurf

Lässt sich „guter“ Klang messen?

Die subjektive Beurteilung sollte auf der objektiven Messung basieren

Selbstverständlich – werden Sie möglicherweise sagen:

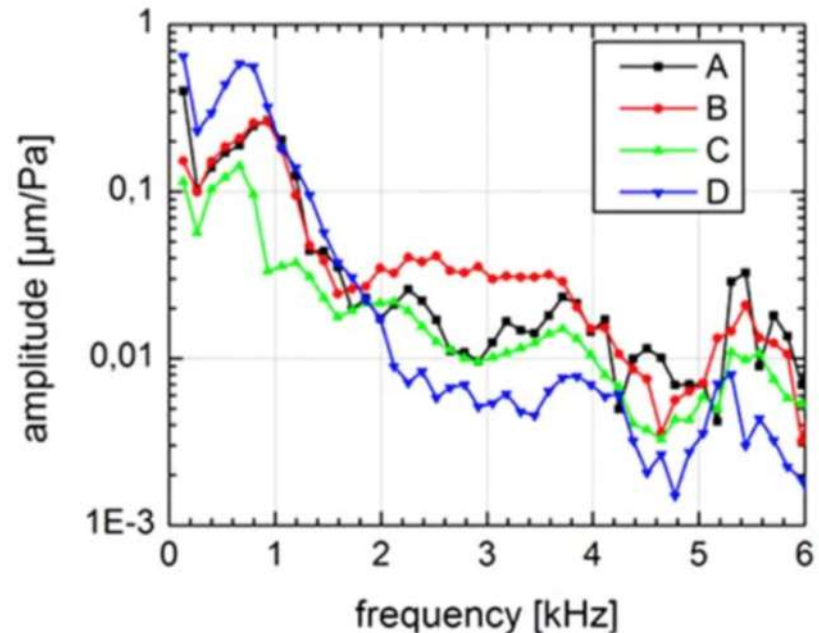
- Es wird der Schalldruck-Frequenzgang gemessen ...
→ In welcher akustischen Umgebung?
Bei welcher Aufstellung des Lautsprechers?
- Es werden die Klirrfaktoren gemessen ...
→ Das ist schon selten. Suchen Sie doch einmal nach einer Klirrspezifikation bei tiefen Frequenzen und größeren Schalldruckpegeln - falls Sie Messwerte finden liegen diese auch bei hochwertigen Lautsprechern oft bei 10 ... 30% - und sind deshalb nicht veröffentlicht.
- Es werden die sehr gut hörbaren und sehr störenden, nicht-harmonischen Intermodulationen gemessen ...
→ Haben Sie das schon einmal gefunden?
- Es wird der Doppler (die Phasenmodulation) gemessen, die jede bewegte Membran erzeugt ...
→ Haben Sie das schon einmal gefunden?

Wenn Sie nun etwas nachdenklich geworden sind und etwas mehr über das schwächste Glied in Ihrer Audio-Wiedergabekette wissen wollen – dann lesen Sie weiter ...

Lässt sich Klang messen?

Aufnahme, Wiedergabe und Hören

- Aufnahme:
Kondensatormikrofon → Membranamplitude (federgehemmt)
bei 30 Hz @ 100 dB(A) = **1 μm**
- Wiedergabe:
Dynamischer Lautsprecher → Membranamplitude
(unterhalb Resonanz, also federgehemmt)
bei 30 Hz = **10 mm**
- Hören:
Ohr → Trommelfellamplitude
bei 30 Hz @ 100 dB(A) = **1 μm**
(10 mm, 100 μm)
- Kurven A ... D entsprechen der Amplitude an verschiedenen Orten auf dem Trommelfell als Funktion der Frequenz



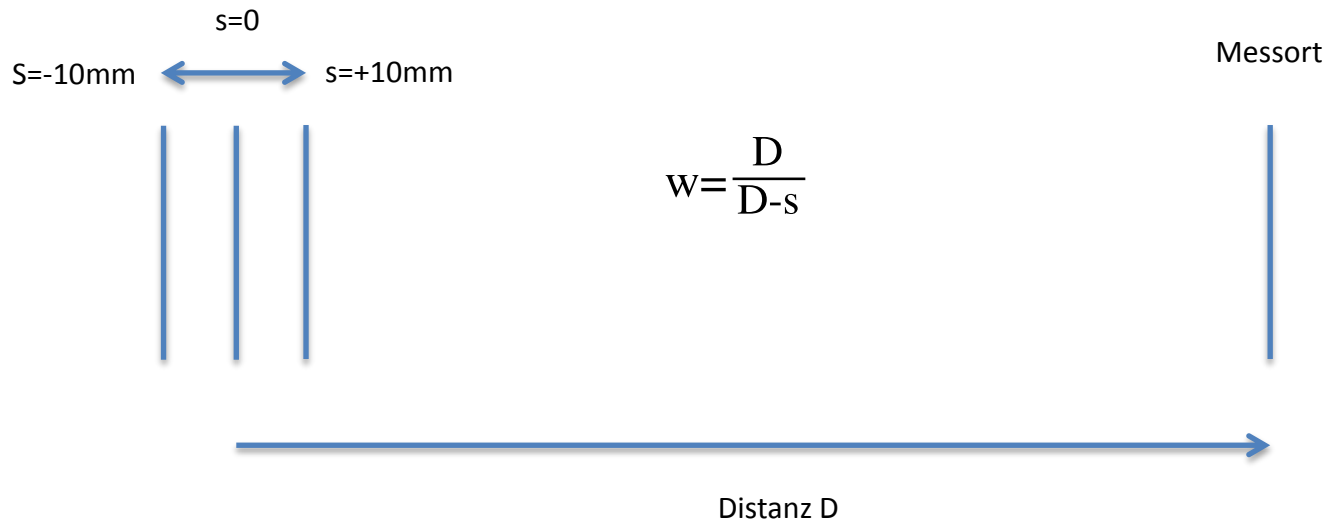
Lässt sich Klang messen?

Aufnahme, Wiedergabe und Hören

- Aufnahme:
Membranamplitude **1 μm** → **quasi weglose Schalldruckmessung**
- Wiedergabe:
Membranamplitude **10 mm** → **wegbehaftete Schalldruckgenerierung**
- Hören:
Trommelfellamplitude **1 μm** → **quasi weglose Schalldruckmessung**
- Im Idealfall müsste ein Lautsprecher sehr große Fläche haben, um mit 1 μm Membranamplitude ausreichenden Schalldruck zu erzeugen.
- In der Praxis führt die Diskrepanz zwischen Schalldruckmessung / Hören und Schalldruckgenerierung, speziell mit „kleinen“ Lautsprechern zu erheblichen Verzerrungen.
- Das ist physikalisch bedingt und hat nichts mit den Verzerrungen eines realen, nichtlinearen Lautsprecherchassis zu tun.

Lässt sich Klang messen? Wiedergabe und Hören

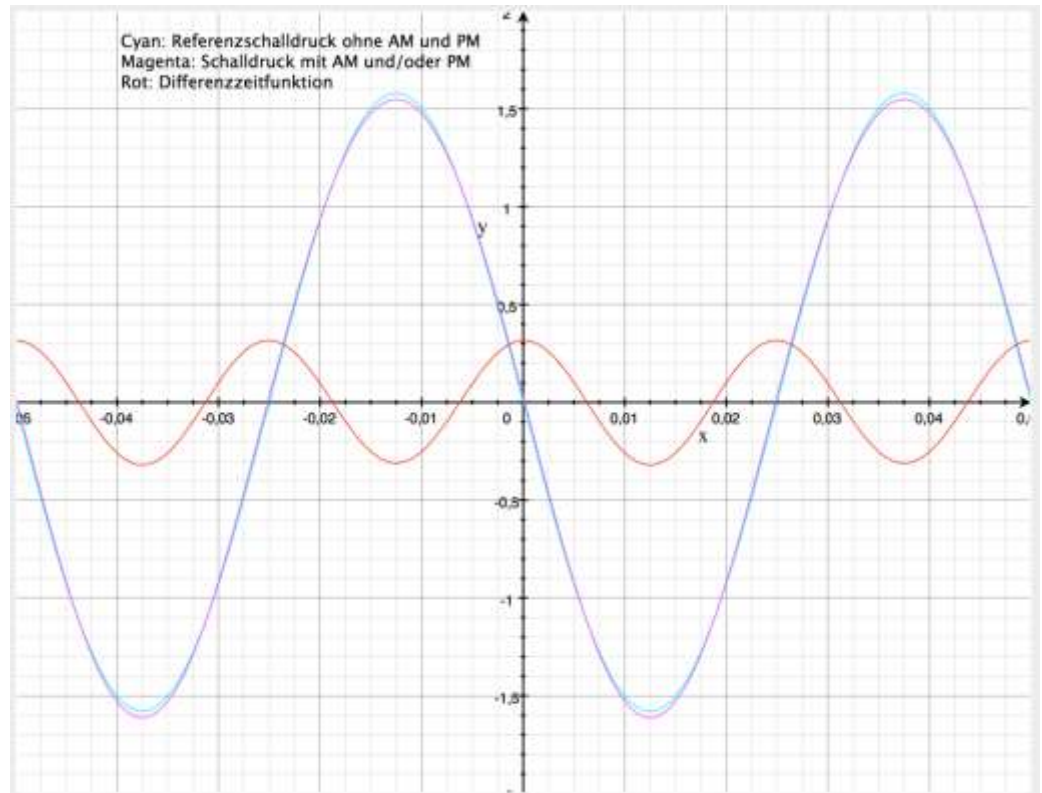
- **Nichtlineare Amplitudenmodulation am Messort (Hörposition).**
- **Schalldruck fällt mit 1/Distanz (Kugelwelle).**
Membranbewegung verändert Schalldruck umgekehrt proportional (also nichtlinear) zur Augenblicks-Distanz zum Messort.
- **Konsequenz: Harmonische und nicht harmonische Frequenzen entstehen.**



Lässt sich Klang messen?

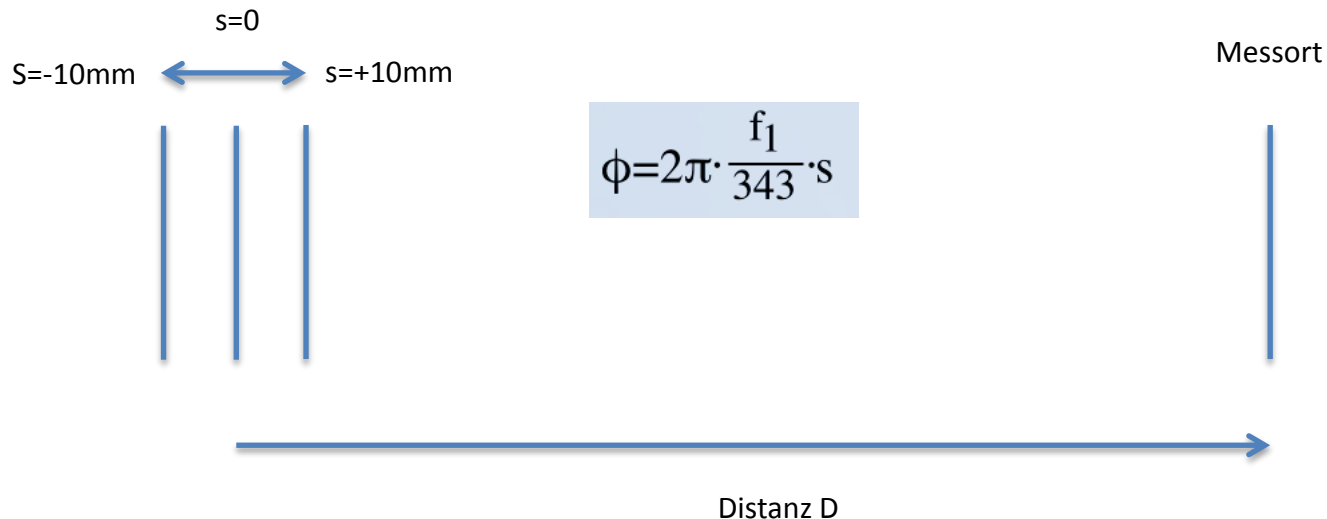
Nichtlineare Amplitudenmodulation (NLAM)

- Entstehung der nichtlinearen AM
- **Ein Ton**
- Membranamplitude = 10mm
- Distanz = 1 m
- Cyan: Idealer Schalldruckverlauf
- Magenta: Realer Schalldruckverlauf (NLAM)
- Differenzzeitfunktion:
Im wesentlichen k_2
bei **-34 dB** unter Referenz



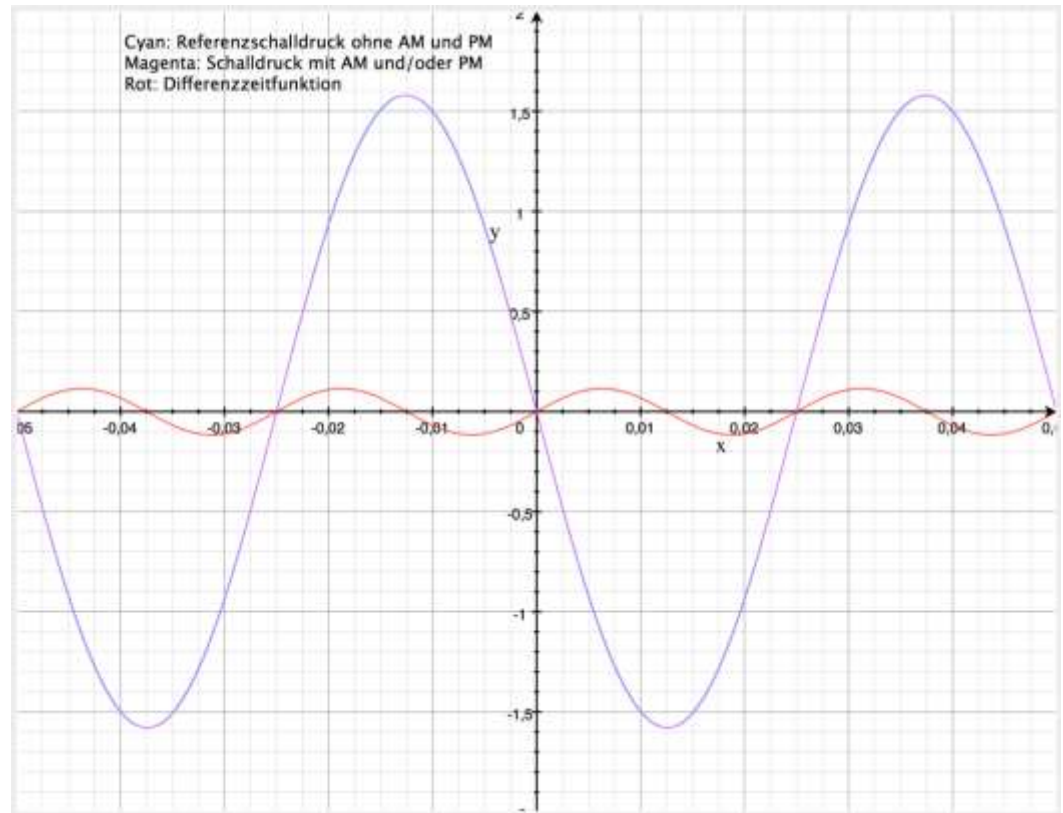
Lässt sich Klang messen? Wiedergabe und Hören

- **Phasenmodulation am Messort (Hörposition)**
- **Membranbewegung verändert Distanz zum Messort und damit proportional die Phase.**
- **Konsequenz: Harmonische und nicht harmonische Frequenzen entstehen.**



Lässt sich Klang messen? Phasenmodulation (PM)

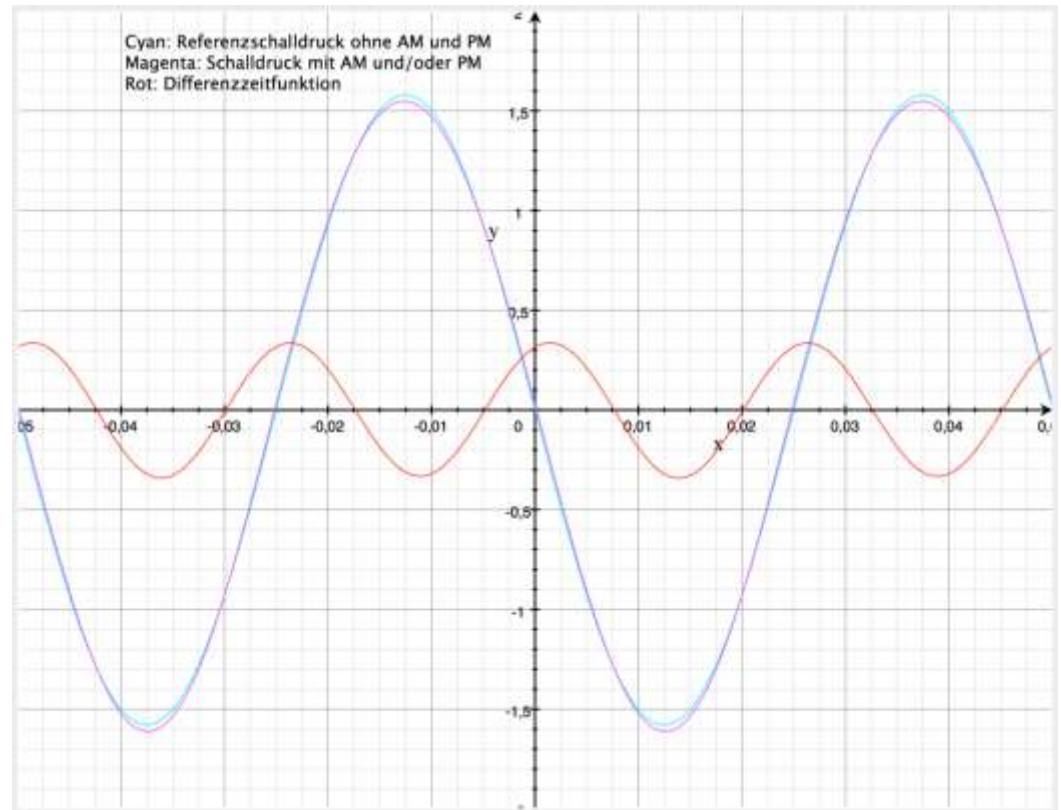
- Entstehung der Phasenmodulation
- „Doppler-Effekt“
- **Ein Ton**
- Membranamplitude = 10mm
- Distanz = 1 m
- Cyan: Idealer Schalldruckverlauf
- Magenta: Realer Schalldruckverlauf (PM)
- Differenzzeitfunktion:
Im wesentlichen k_2
bei **-43 dB** unter Referenz



Lässt sich Klang messen?

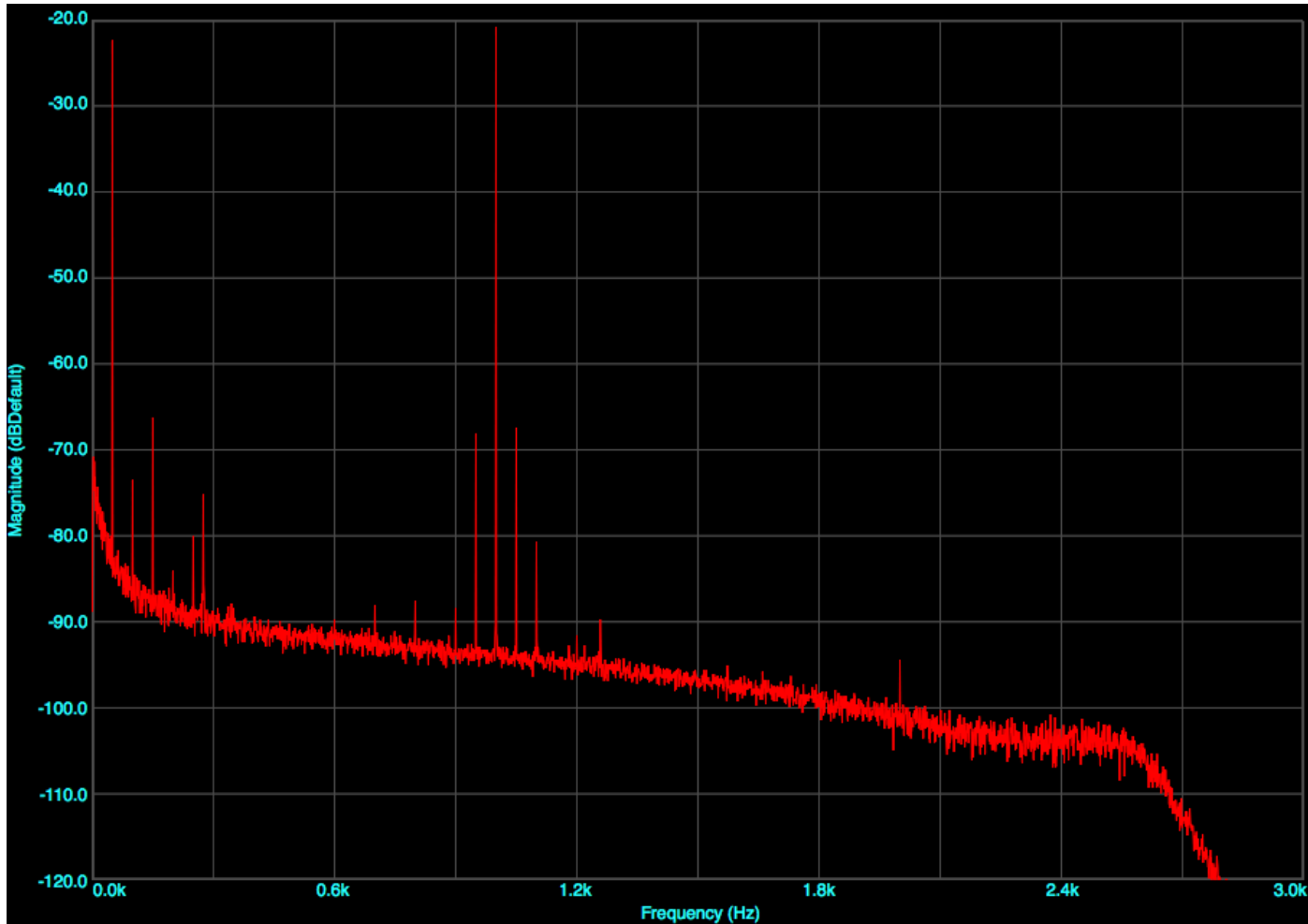
AM und PM an der Hörposition 1 m

- Entstehung der NLAM und PM
- **Ein Ton**
- Membranamplitude = 10mm
- Distanz = 1 m
- Cyan: Idealer Schalldruckverlauf
- Magenta: Realer Schalldruckverlauf
- Differenzzeitfunktion:
Im wesentlichen k_2
bei **-33 dB** unter Referenz
- 90 Grad Phasenlagen
zwischen NLAM und PM



Lässt sich Klang messen? Wiedergabe und Hören

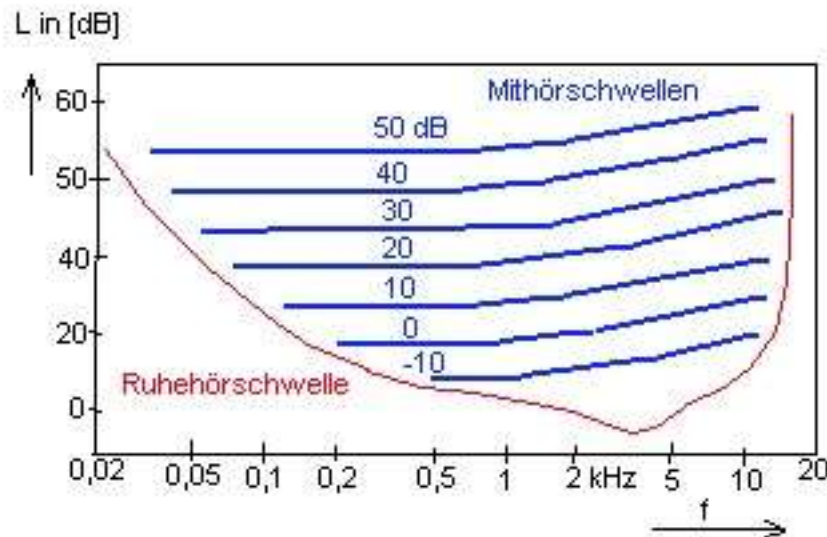
Zwei Töne: 1 kHz und 50 Hz: AM und PM Seitenlinien bei ca. - 45 dB



Lässt sich Klang messen?

AM und PM an der Hörposition 1 m

- Ein Ton → Klirrfaktoren harmonisch
- Zwei Töne → Seitenlinien nicht harmonisch
- Viele Töne → „Auffüllen des Spektrums“ „Nichtharmonisch, Rauschen“



Mithörschwelle steigt: Verlust von Transparenz und musikalischem Detail

Lässt sich Klang messen? Wiedergabe und Hören

- *Meine persönliche Wertung:*
- *Die Generierung von harmonischen Frequenzen verfälscht das Klangbild nur unwesentlich, solange deren Amplituden hinreichend klein sind.*
- *Begründung: Jedes Instrument erzeugt harmonische Oberwellen.*
- *Die Generierung von nicht-harmonischen Modulationsprodukten verfälscht das Klangbild erheblich.*
- *Begründung: Nicht-harmonische Frequenzen sind bei gleicher Amplitude (wie oben) gut hörbar und reduzieren bei ausreichender Zahl die Transparenz des Klangbildes. Das Spektrum wird „aufgefüllt“ und die Mithörschwelle steigt an. Musikalische Details gehen verloren.*

Lässt sich Klang messen? Wiedergabe und Hören

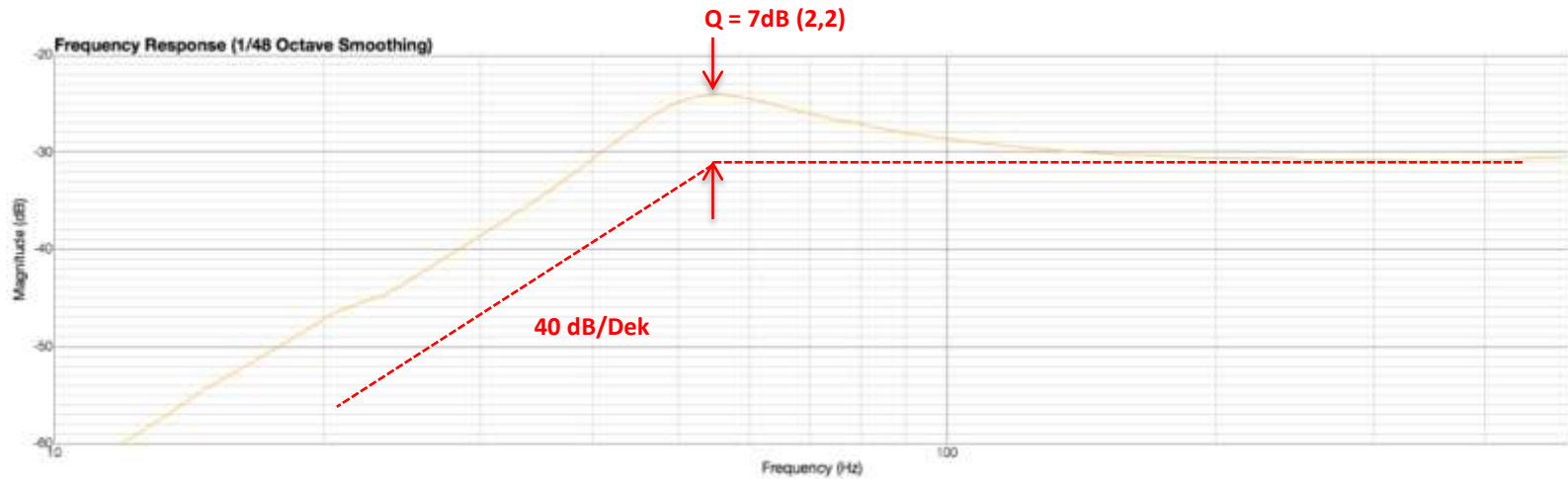
Bisher wurde nur von physikalischen Effekten gesprochen

—

nicht von Nichtlinearitäten der realen Schallwandler.

Lässt sich Klang messen? Wiedergabe

Der Lautsprecher – Feder & Masse & Dämpfung
→ Schalldruck hat Hochpassverhalten vom Grad 2



Magnetantrieb arbeitet
gegen die Feder

Nichtlinear

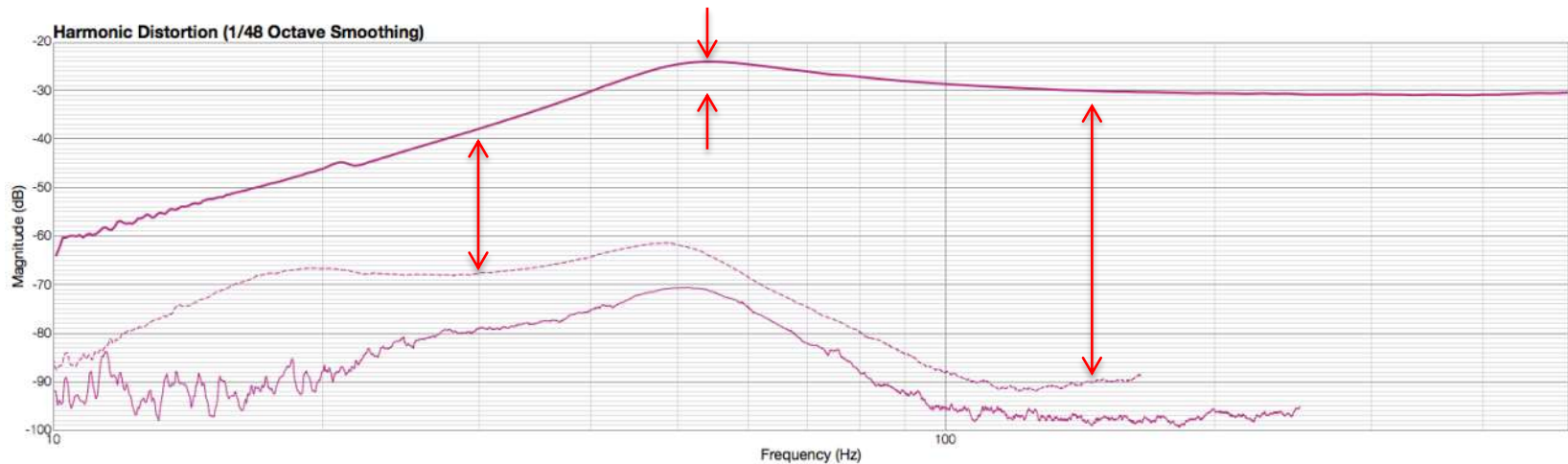
R
E
S
O
N
A
N
Z

Magnetantrieb
arbeitet gegen die
Masse

Linear

Lässt sich Klang messen? Wiedergabe

Der Lautsprecher – Feder & Masse & Dämpfung → Nichtlinearitäten



Nichtlinear
@30 Hz

K2 = -40 dB

K3 = -30 dB

R
E
S
O
N
A
N
Z

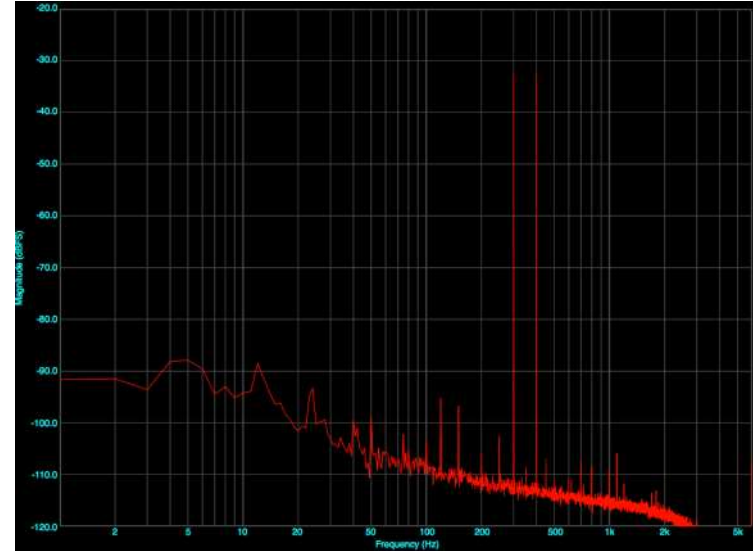
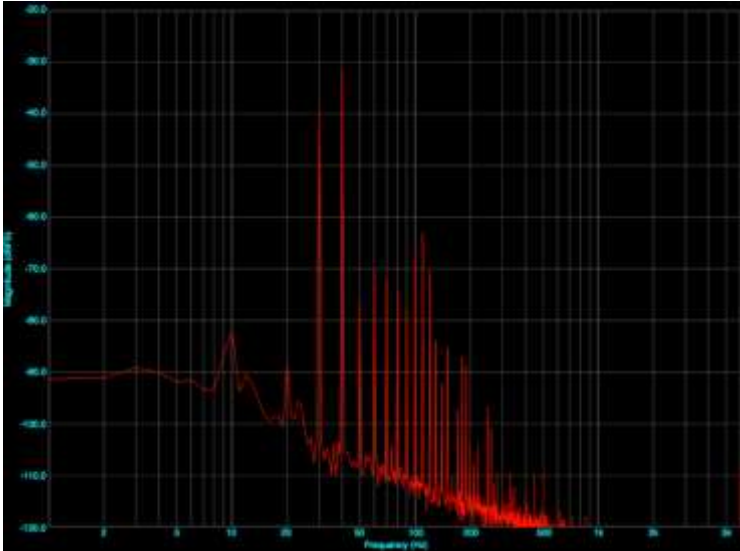
Nahezu Linear
> 100 Hz

K2 = -65 dB

K3 = -60 dB

Lässt sich Klang messen? Wiedergabe

Der Lautsprecher – Nichtlineare Feder → Intermodulation



Nichtlinear
30 Hz & 40 Hz

Kges = -15 dB
Mithörschwelle hoch

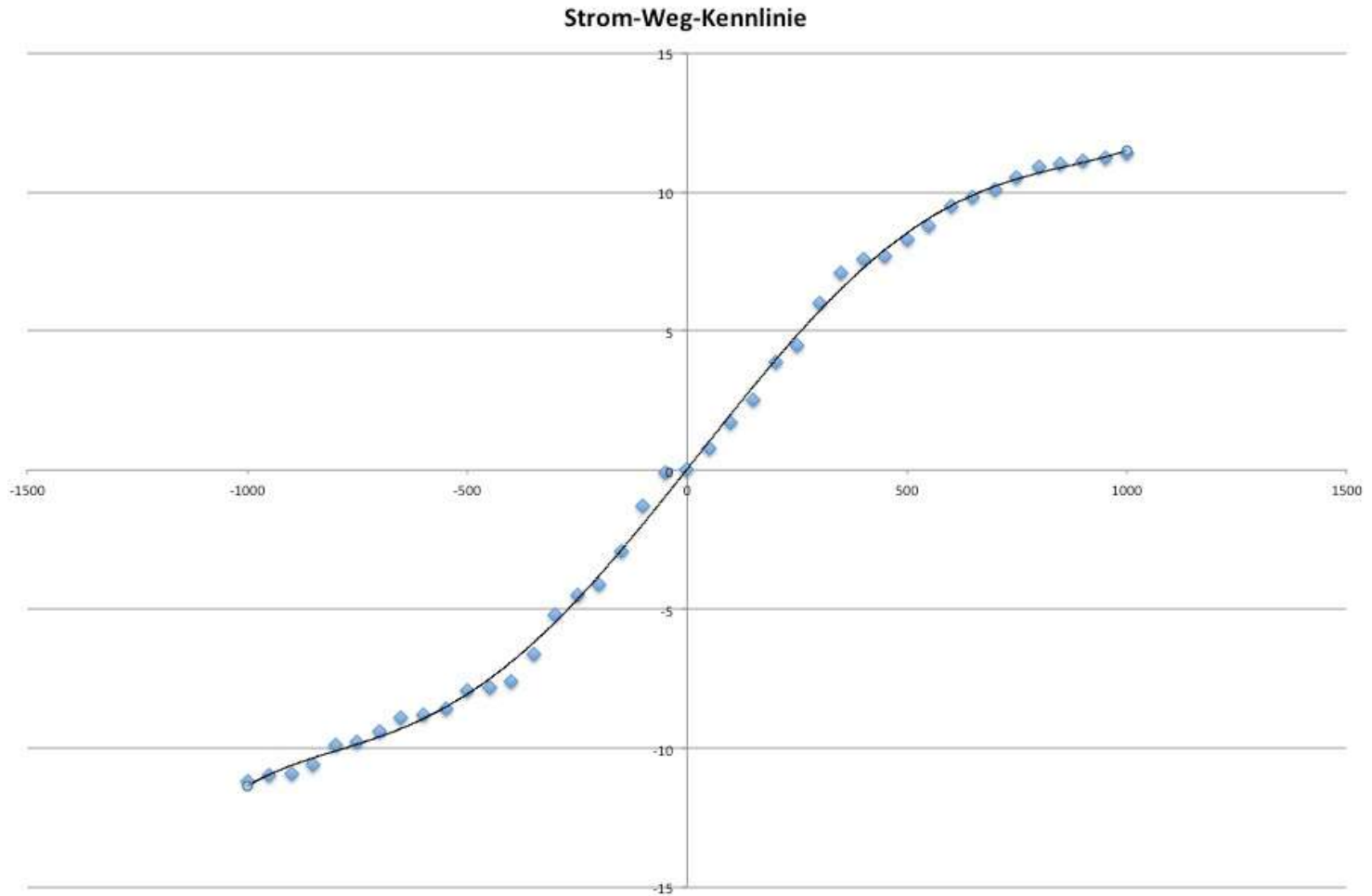
R
E
S
O
N
A
N
Z

Nahezu Linear
300 Hz & 400 Hz

Kges = -65 dB
Transparentes Klangbild

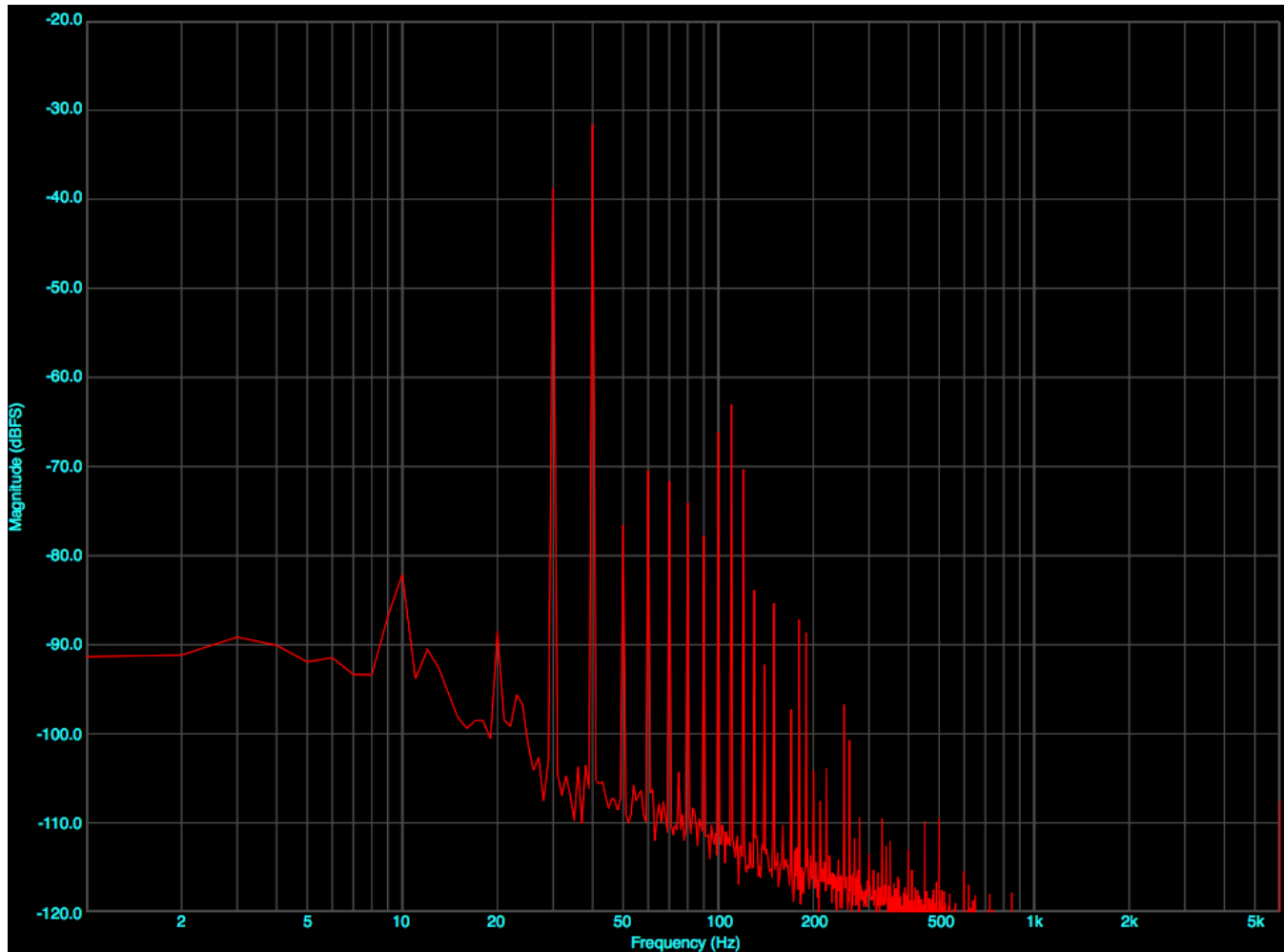
Lässt sich Klang messen? Wiedergabe und Hören

Der Lautsprecher – Nichtlineare Feder → Kennlinie



Lässt sich Klang messen? Wiedergabe und Hören

Konsequenz: 30 Hz & 40 Hz, gleicher elektrischer Pegel → Oberwellen und Intermodulation



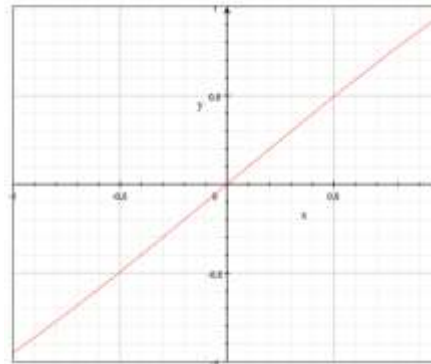
Lässt sich Klang messen? Wiedergabe

„Verstärkung“ von Klirren und Intermodulation: Weg versus Strom

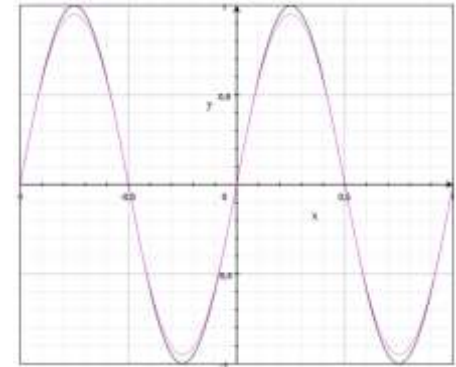
Beispiel

$$y = x - k \cdot x^3$$

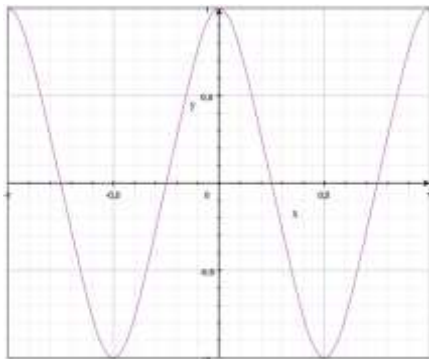
Nichtlinearität des Weges von 5%
erzeugt
Nichtlinearität des Schalldrucks
von 15%



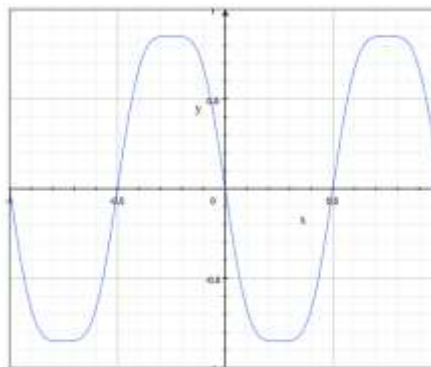
Nichtlinearität Weg versus Strom



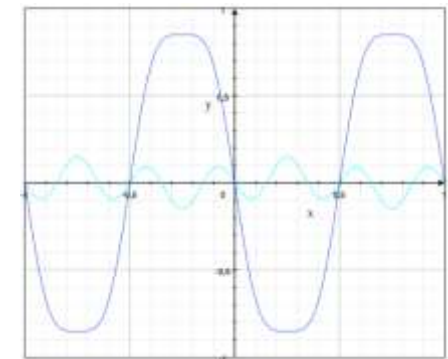
Weg versus Strom



Geschwindigkeit



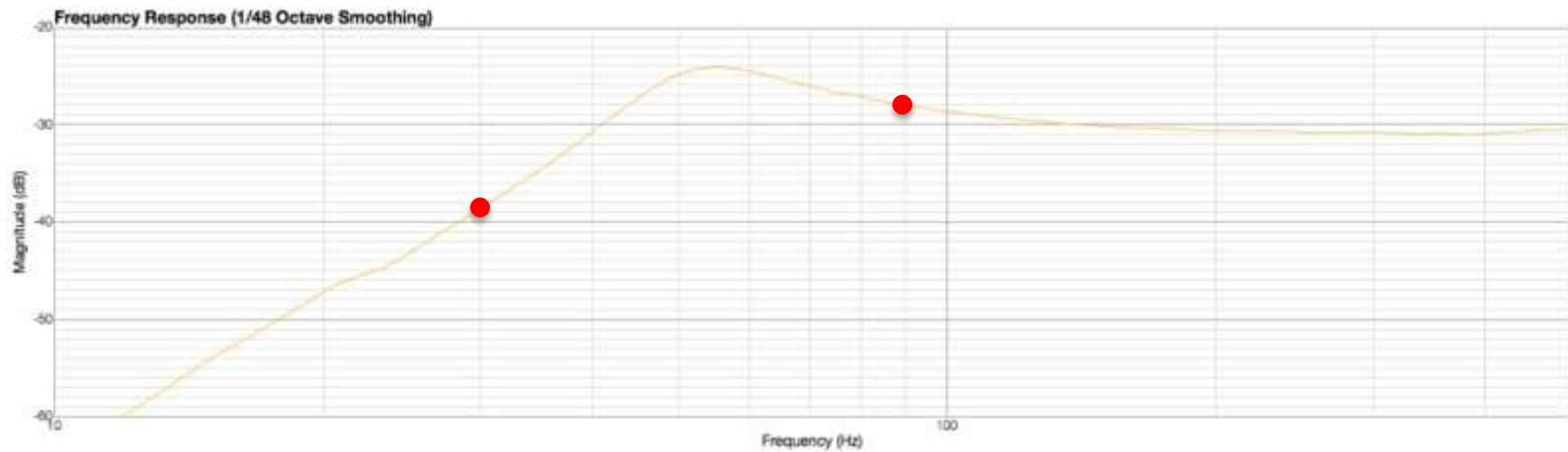
Beschleunigung



Oberwellen

Lässt sich Klang messen? Wiedergabe

„Verstärkung“ von Klirrprodukten und Intermodulation



Grundton
30 Hz
K3 = 10%

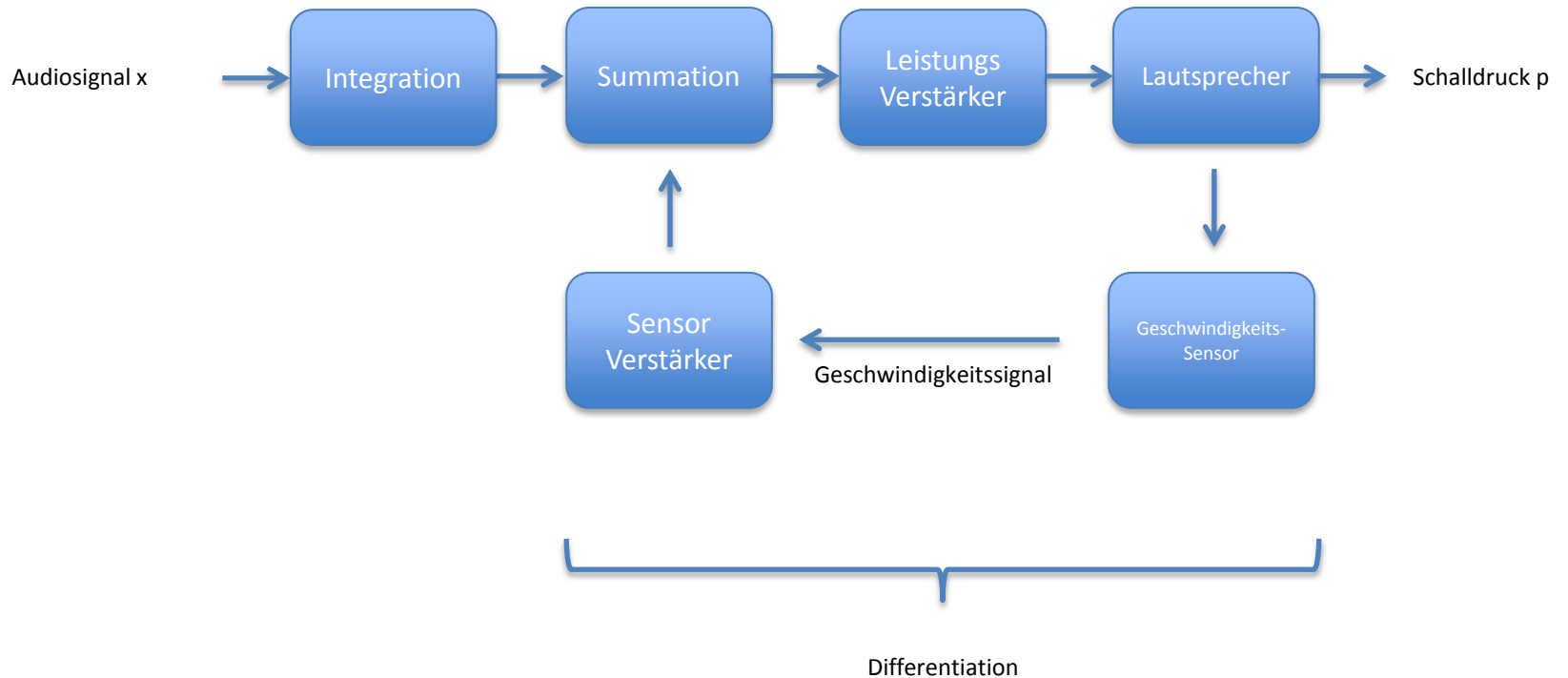
K3
90 Hz
Delta +10 dB



K3
erscheint mit
30%

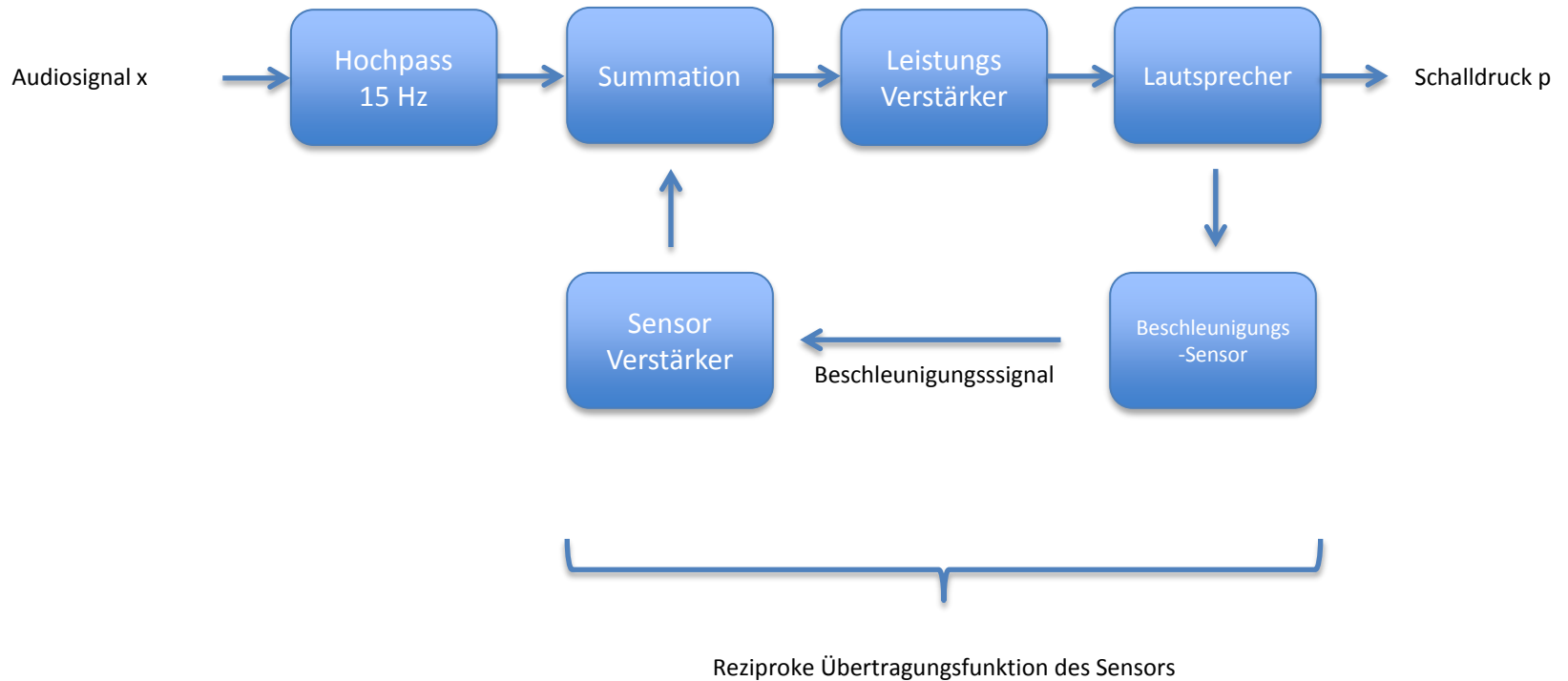
Lässt sich Klang messen? Wiedergabe

Mögliche Gegenmaßnahmen: Regelung der Membran:
Beispiel 1. Bewegungsgegenkopplung (MFB)



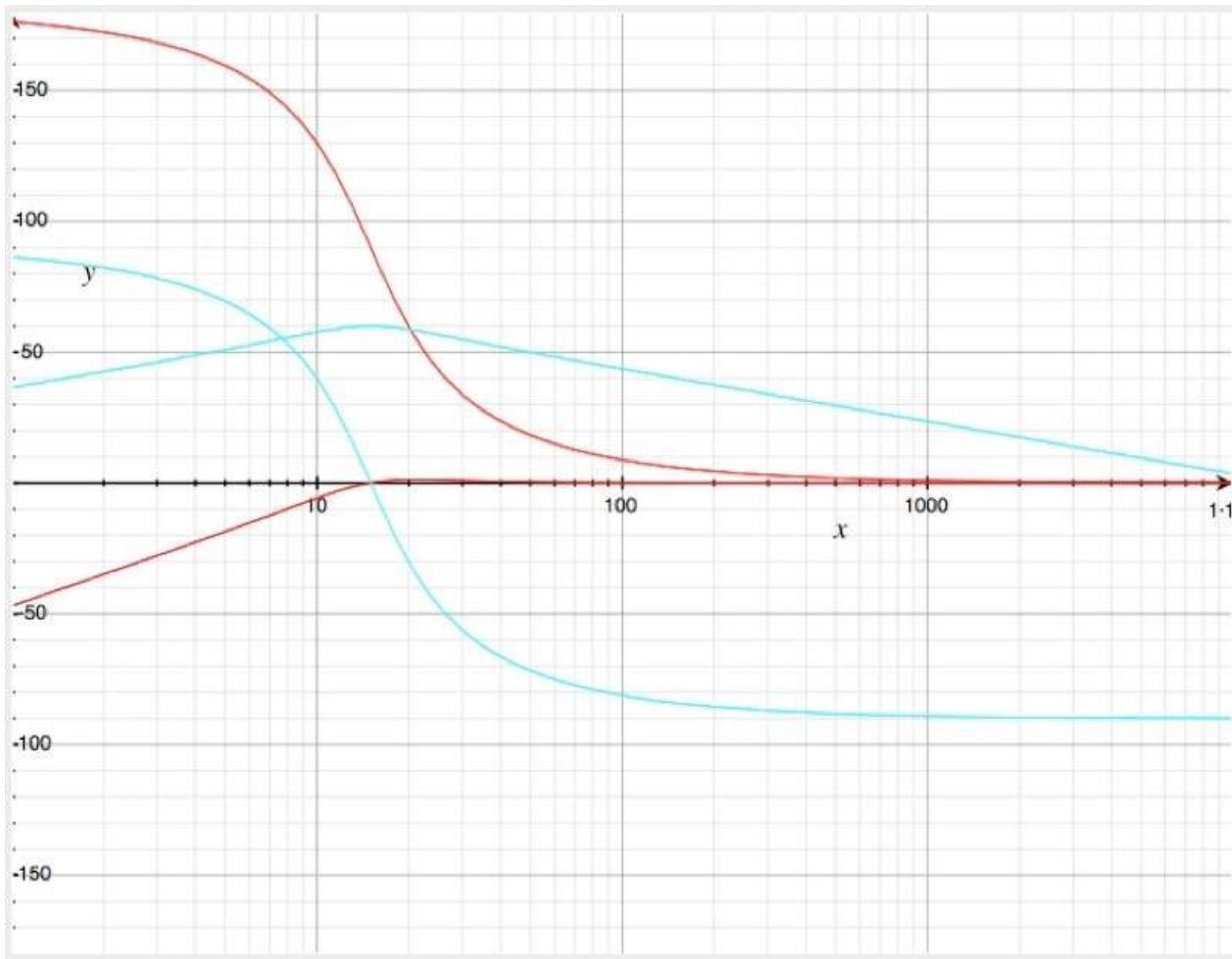
Lässt sich Klang messen? Wiedergabe

Mögliche Gegenmaßnahmen: Regelung der Membran:
Beispiel 2. Bewegungsgegenkopplung (MFB)



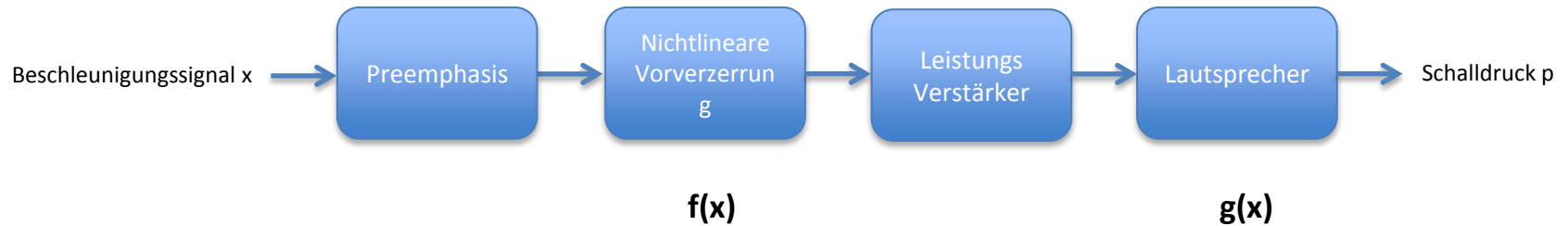
Lässt sich Klang messen? Wiedergabe

Mögliche Gegenmaßnahmen: Regelung der Membran: 1. Beispiel v-Regelung
Betrag (dB) und Phase (Grad): Rot Durchgangsverstärkung, Cyan Kreisverstärkung



Lässt sich Klang messen? Wiedergabe

Mögliche Gegenmaßnahmen: Nichtlineare Vorverzerrung (Stellsystem)

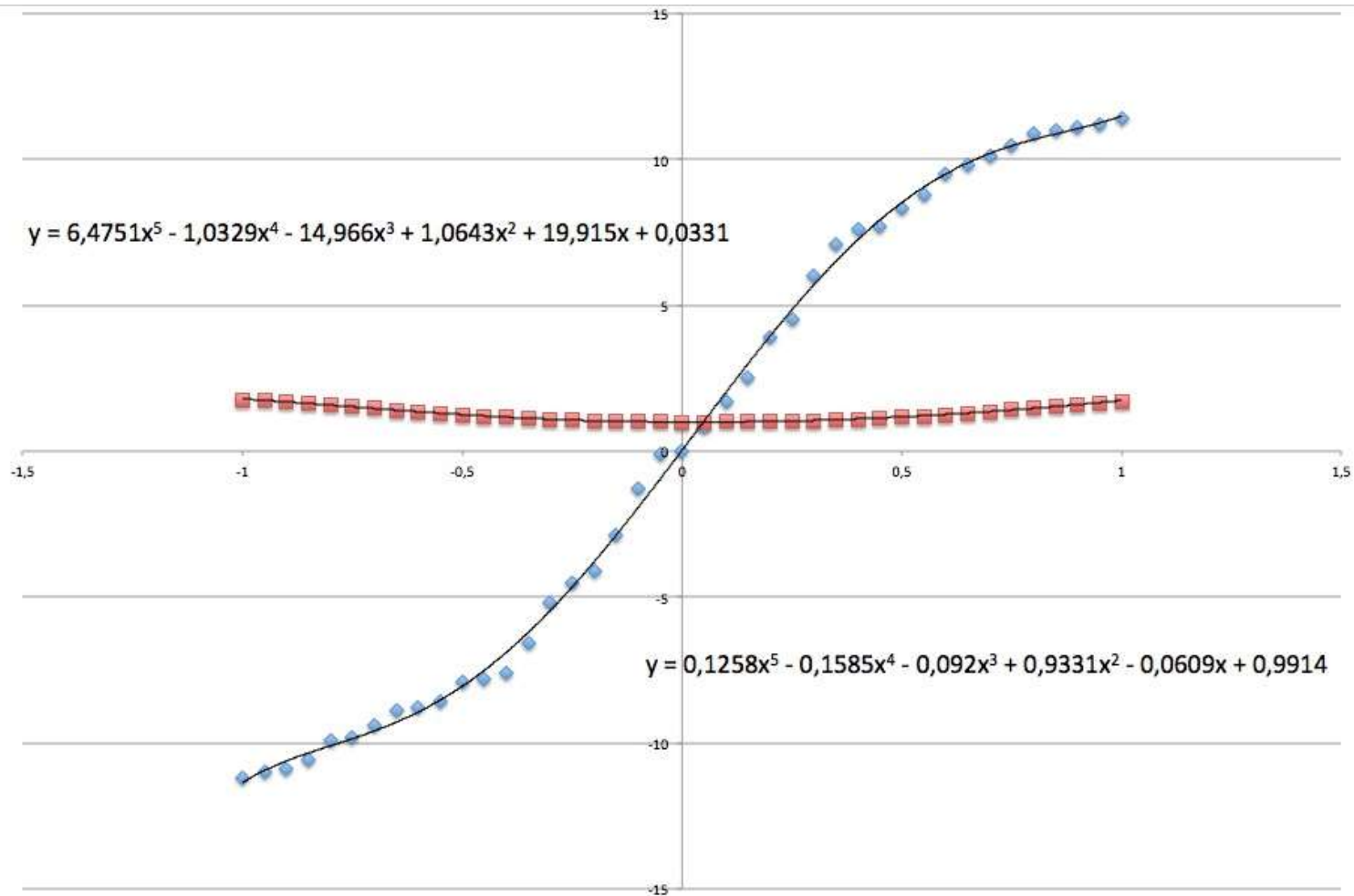


$$g(f(x)) \neq x$$

Sehr gute Näherung möglich

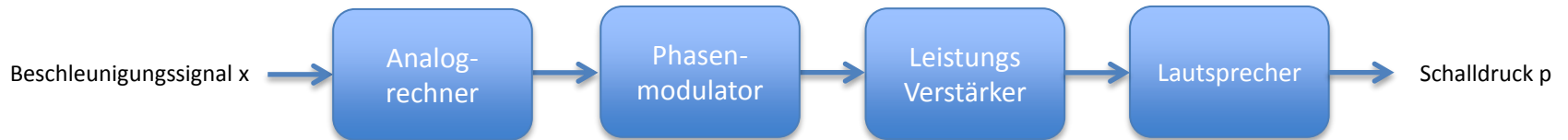
Lässt sich Klang messen? Wiedergabe

Modellierung Membranweg in mm versus Strom in A, Rot Korrekturfunktion



Lässt sich Klang messen? Wiedergabe

Dopplerkompensation

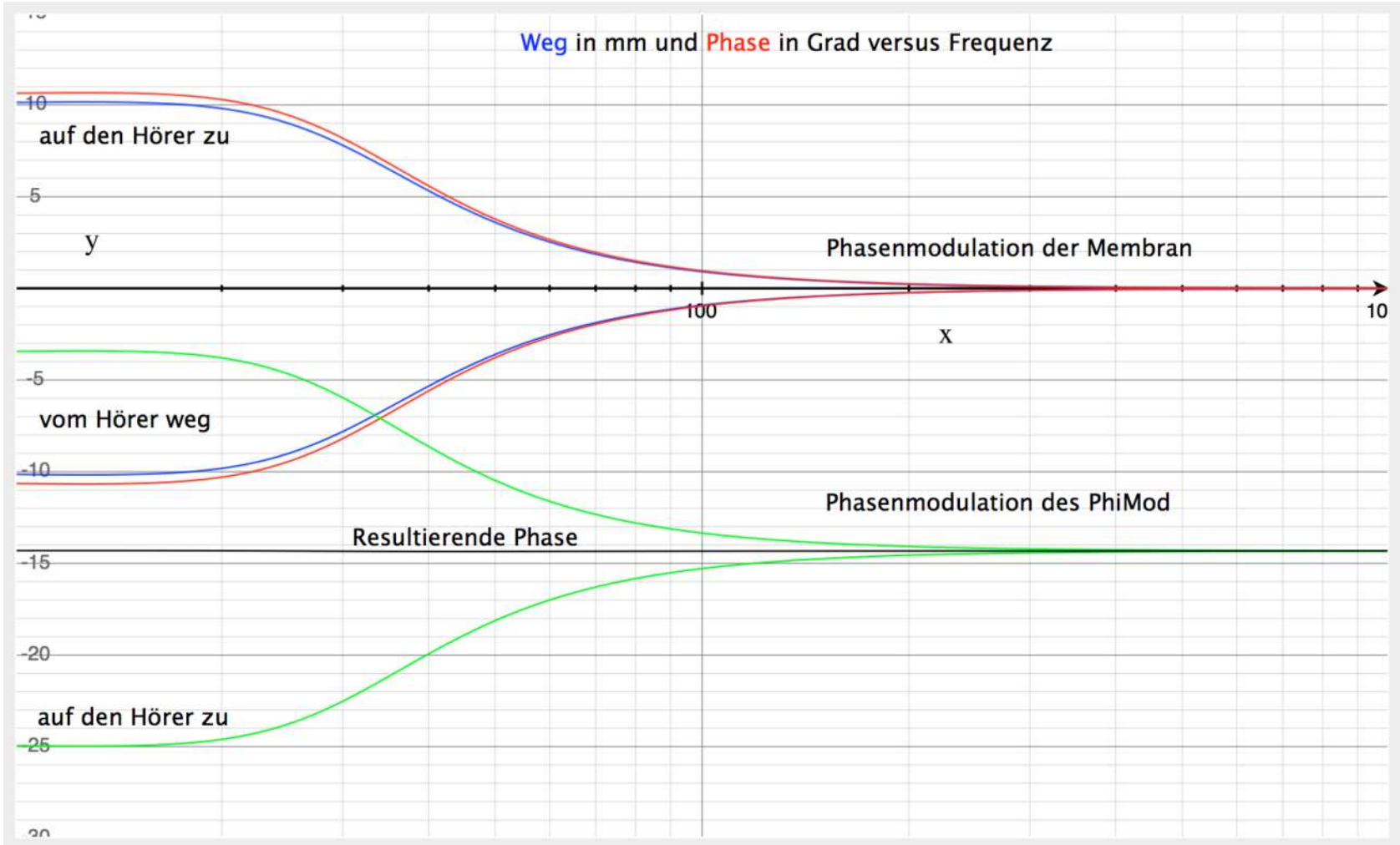


**Der Phasenmodulator kompensiert die Phasenmodulation
durch die Bewegung der Lautsprechermembran**

**Resultat: Phasenzentrum trotz bewegter Membran fix
„Lautsprecher ohne Membranhub“**

Lässt sich Klang messen? Kompensation des Dopplereffektes

Dopplerkompensation



Lässt sich Klang messen? Wiedergabe und Hören

Was haben wir erfahren:

1. Es existieren unerwünschte physikalische Effekte durch die große Membranamplitude bei der Wiedergabe von (tiefen) Tönen im Vergleich zur Messung (Hören) des Schallsignals: $1\mu\text{m}$ versus 10 mm → **Faktor 10000**
2. Die Nichtlineare AM nimmt mit zunehmender Distanz zum Lautsprecher ab
3. Die Phasenmodulation (Doppler) ist unabhängig von der Distanz
4. Beide Effekte erzeugen nicht nur harmonische Frequenzen, sondern auch nicht harmonische Frequenzen – die das Ohr quälen ...
5. Der Lautsprecher ist ein merklich nichtlineares System, dies insbesondere unterhalb seiner Resonanzfrequenz und bei großen Amplituden. Es tritt zudem eine „Verstärkung“ der Verzerrungsprodukte auf → harmonische und nicht harmonische Verzerrungsprodukte entstehen
6. Das „Zuschmieren“ des Spektrums mit Verzerrungsprodukten erhöht die Mithörschwelle und lässt musikalische Details unhörbar werden → Verlust der Transparenz des Klangbildes

Lässt sich Klang messen? Wiedergabe und Hören

Abhilfe:

1. Intelligente Ansteuerung des Lautsprecher-Chassis mit einer adaptierten Impedanz verbessert die Eigenschaften substantiell → AC-PAZ75
2. Membranregelung (MFB) vermindert alle Nichtlinearitäten des Lautsprechers erheblich und lässt beliebig tiefe Grenzfrequenzen zu. Ein neues Verfahren verbessert die Regelung substantiell → AC-PAR75
3. Nichtlineare Vorverzerrung kompensiert erheblich die Nichtlinearität des Lautsprechers – einfacher, kostengünstiger, bleibt aber der Regelung unterlegen → Realisiert → Anfrage an AudioChiemgau
4. Die Phasenmodulation (Doppler) kann elegant elektronisch eliminiert werden → „virtuell feststehende“ Lautsprechermembran → AC-AAZ

Lässt sich Klang messen? Hören

Wermutstropfen:

Auch das menschliche Gehör ist nichtlinear - nicht unerwartet - bei größeren Lautstärken:

Das könnte man eventuell durch nichtlineare Vorverzerrung reduzieren ... aber das ist noch in Entwicklung

Intelligente Ansteuerung 4 Maßnahmen



1. Frequenzbereich linear entzerrt → Neue gewählte unter Grenzfrequenz z.B. 25 Hz (-3 dB)
Lautsprecher-Eigenresonanz eliminiert
2. Nichtlinearität korrigiert → Klirren und Intermodulation stark reduziert
3. Phasenmodulation kompensiert → Dopplereffekt vollständig eliminiert
4. Adaptierte Treiber Impedanz → Thermischer Kompression stark reduziert / eliminiert

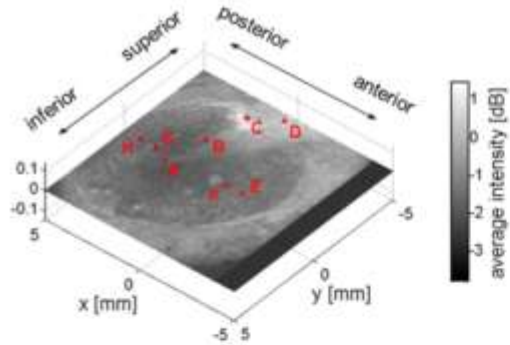
Lässt sich Klang messen? Wiedergabe und Hören

- **Quellen:**

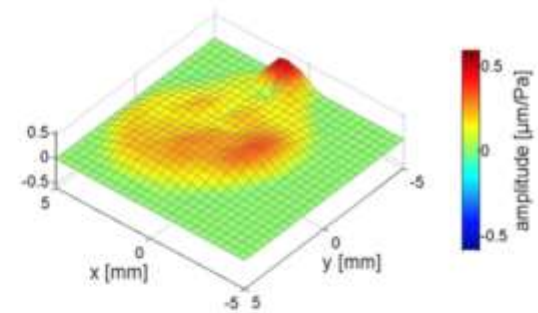
- Microphone Handbook , Vol.1: Theory: **Brüel & Kjær**
- Ars Auditus: Martina Kremer
Universität Wuppertal
Fachbereich Elektrotechnik, Informationstechnik, Medientechnik
- Investigation of the human tympanic membrane oscillation ex vivo by Doppler optical coherence tomography
Anke Burkhardt, Lars Kirsten, Matthias Bornitz, Thomas Zahnert, and Edmund Koch
Dresden University of Technology, Faculty of Medicine Carl Gustav Carus, Department Clinical Sensing and Monitoring,
and Clinic of Otorhinolaryngology
- v-Regelung: Diskussionen, Veröffentlichungen und Messprotokolle: Friedrich Müller, Silbersand
- Nichtlineare Vorverzerrung: Dr. R. Lutz
- Dopplerkompensation: Idee und Patentschrift: Friedrich Müller, Silbersand, Entwicklung / Realisierung: Dr. R. Lutz
- Copy Right: Weitergabe und Veröffentlichung dieser Präsentation, oder von Teilen davon, sind nur mit Zustimmung des Autors gestattet

Anhang

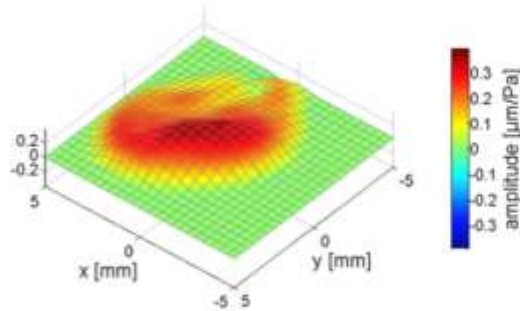
Lässt sich Klang messen? Hören: TM-Moden



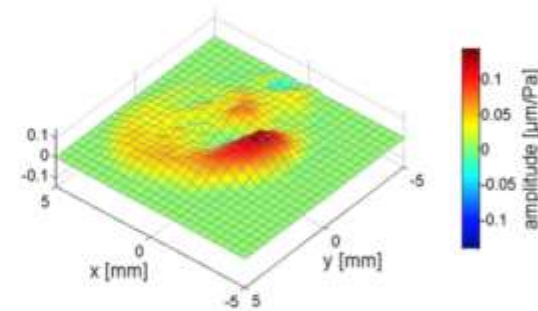
OCT image



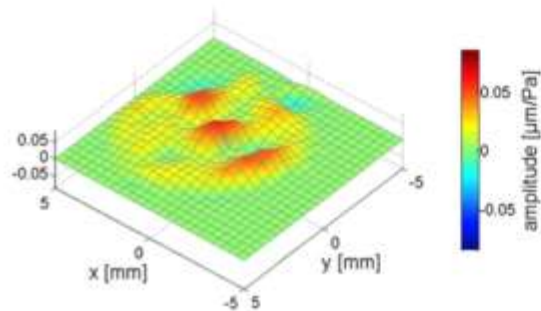
frequency: 531 Hz



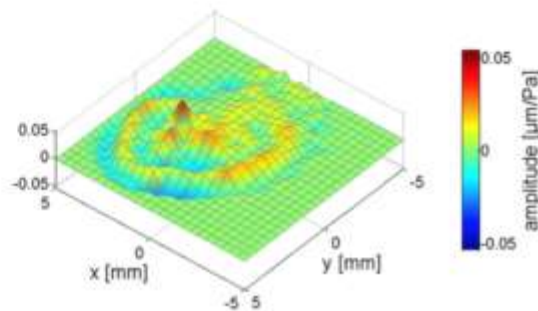
frequency: 1062 Hz



frequency: 1592 Hz



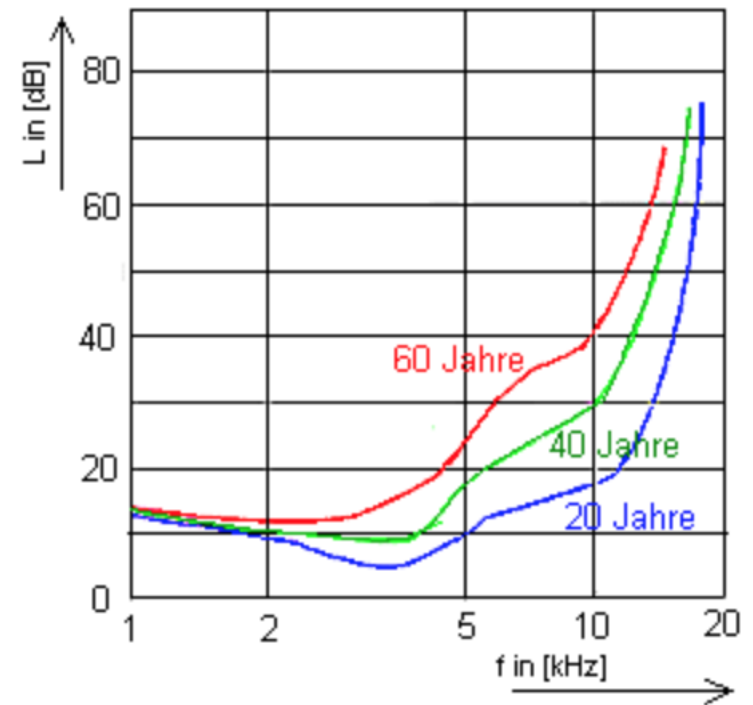
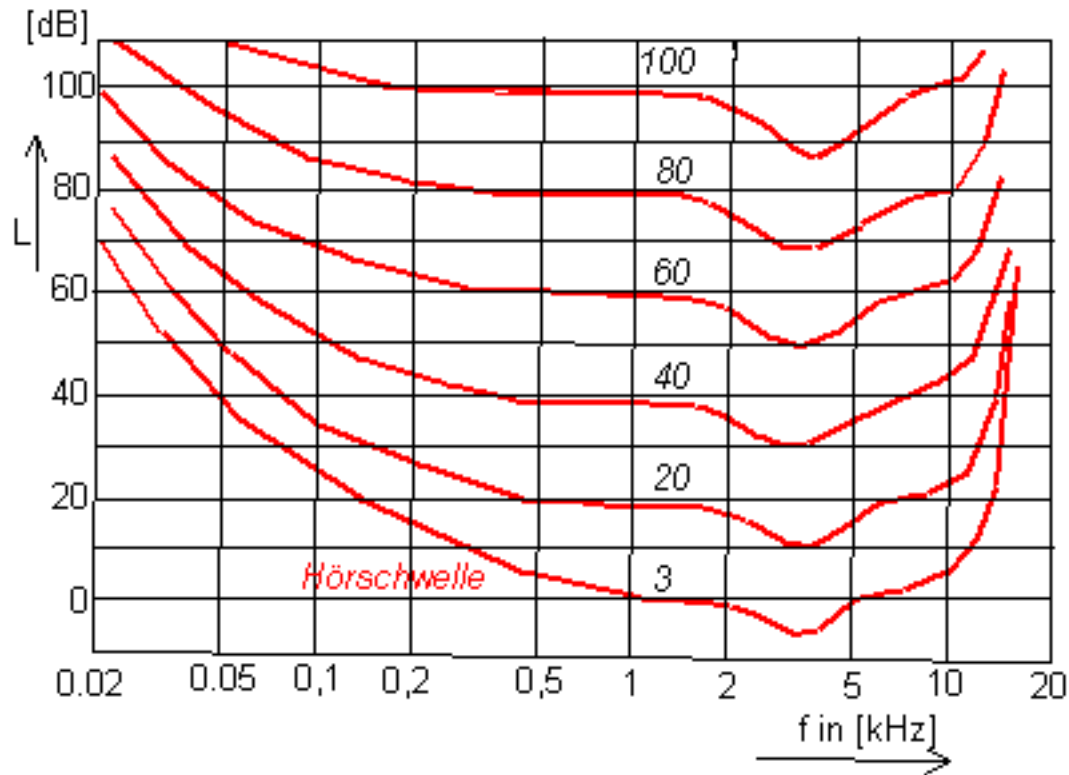
frequency: 2388 Hz



frequency: 5175 Hz

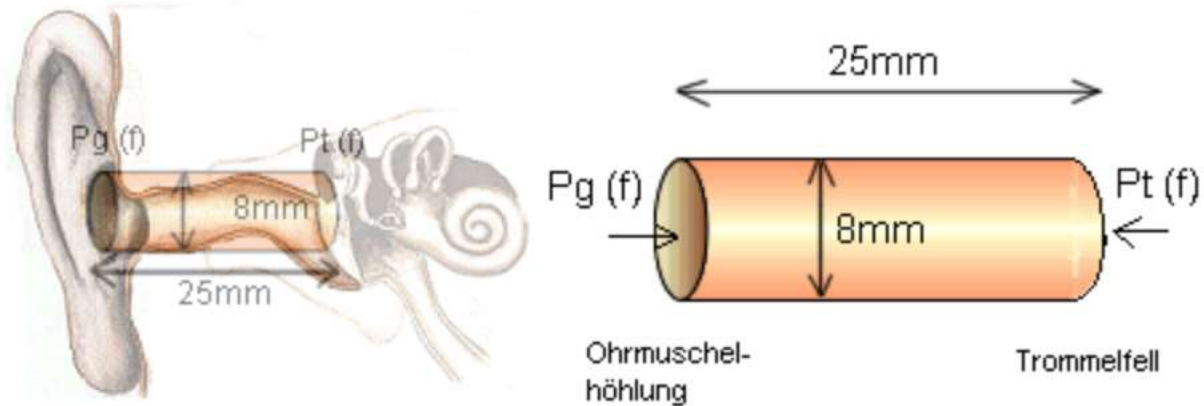
Lässt sich Klang messen? Wiedergabe und Hören

Isophone



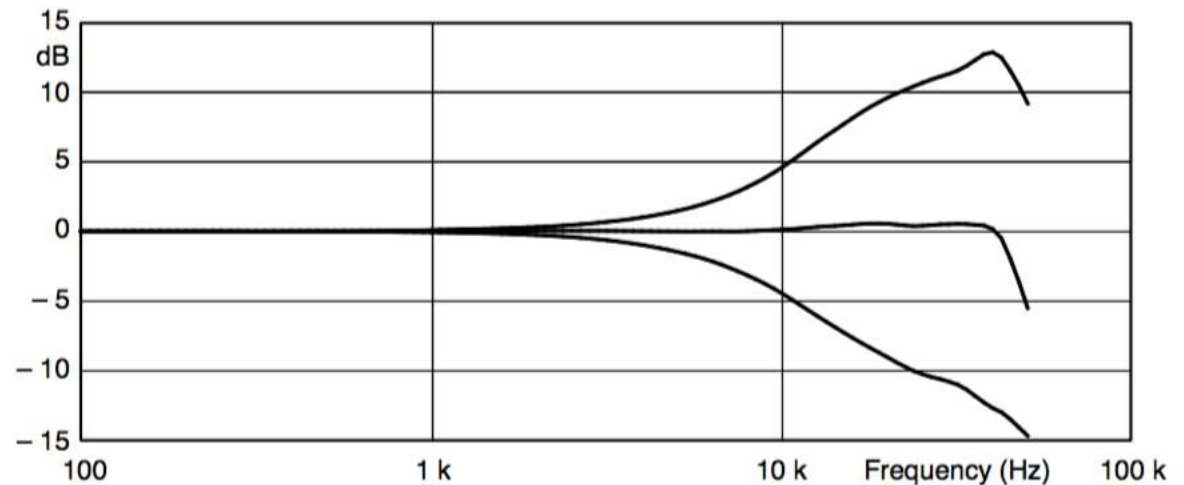
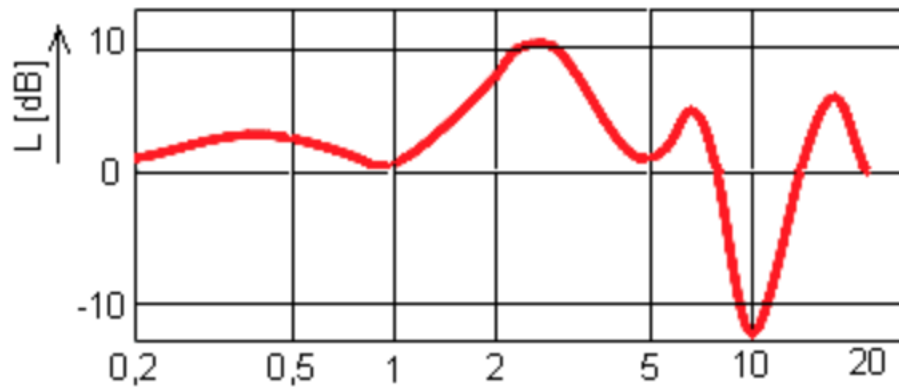
Lässt sich Klang messen? Wiedergabe und Hören

Modell Außenohr



Lässt sich Klang messen? Wiedergabe und Hören

Freifeld-Übertragungsfunktion (frontale Beschallung):
Links Ohr, rechts B&K Messmikrofon (frontal = obere Kurve)



Lässt sich Klang messen? Wiedergabe und Hören

Zur unteren Grenzfrequenz von geschlossenen Boxen
Güte = 0.5, $1/\sqrt{2}$, 0.95

