Maximalpegel bei Lautsprechern

Was kann der Lautsprecher? Dichtung und Wahrheit

Prof. Dr. Alfred Schmitz

Prof. Dr. Anselm Goertz

Vortrag im Rahmen des VPLT Seminars zur PLS 2012

Übersicht

Maximalpegelbestimmung bei Beschallungsanlagen

Grundlagen

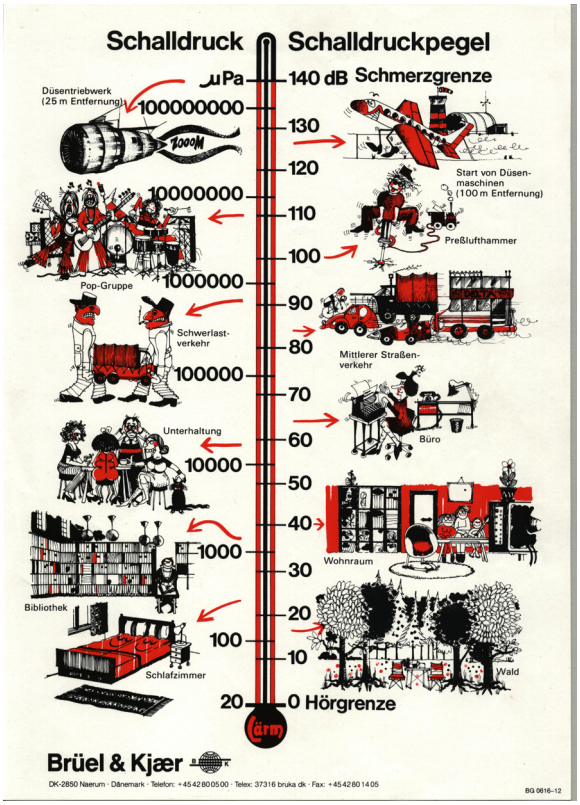
1. Schalldruckwerte 3
2. Eckdaten des Gehörs 4
3. Bewertungsmethoden 5 - 6
4. Messgeräte und Messwerte 7 - 16
5. Nutz- und Störsignalpegel am Beispiel von Sprache 17 - 25

Lautsprecher

5. Sensitivity, Impedanz, ... 26
6. Belastbarkeit, Powercompression, Verzerrungen, ... 27 - 31
7. Maximalpegel 32 - 34

8. Fazit 35 - 36

Schalldruckpegel



Schalldruckpegel

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad \text{mit}$$

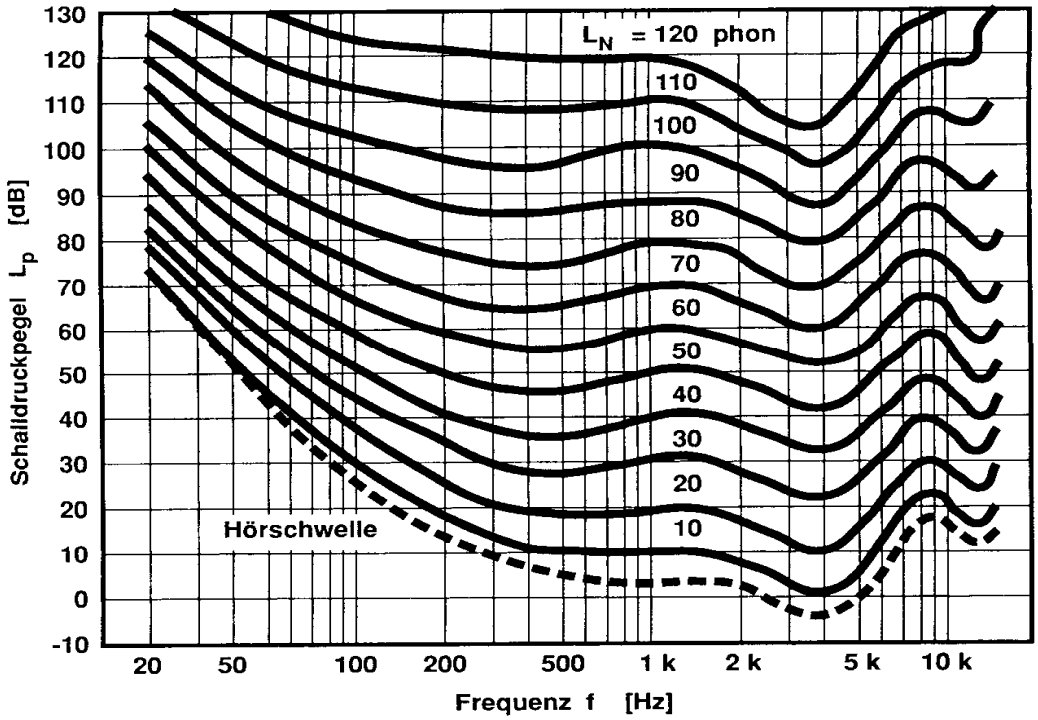
$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \frac{N}{m^2}$$

entspricht ca. der Hörschwelle bei 1 kHz

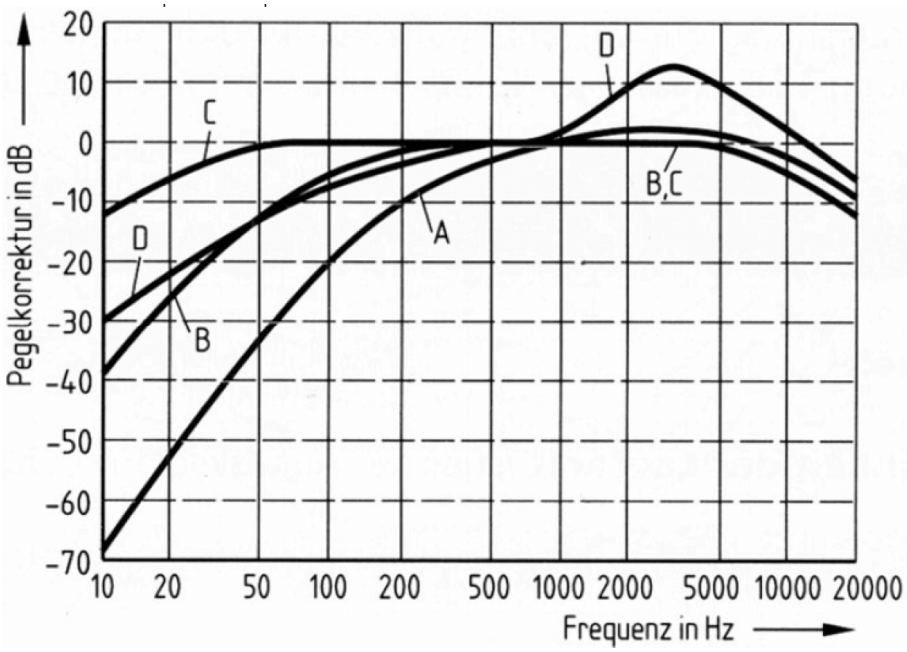
Eckdaten des Gehörs

- Frequenzbereich — 20 Hz – 20 kHz
- Dynamik — ≈ 130 dB
- Hörbarer Dynamikunterschied ≈ 1 dB
  (3 dB im Langzeitgedächtnis)
- Verdopplung oder Halbierung der subjektiven Lautstärke (Stevenssche Potenzfunktion) — ± 10 dB (!)
- Tonhöhenunterschiede
  - < 500 Hz 250/254 — 3,5 Hz
  - > 500 Hz 1000/1007 — 0,7 % von f_0 (Halbton = 6%)

Kurven gleicher Lautheit



Bewertungskurven



Pegel	Bew.
40 dB	A
60 dB	B
80 dB	C

Pegeladdition

- Kohärente (zusammenhängende) Signale
  - Beispiel (Sinussignale, monophon abstrahlende Lautsprecher)
  - „interferenzfähig“ (können sich völlig auslöschen)
  - Addition der Schalldrücke (x2 = +6dB)
- Inkohärente (unabhängige) Signale
  - Beispiel (Rauschen, Musik, Störgeräusch usw.)
  - Gleichermaßen konstruktive und destruktive Interferenz
  - können sich nicht gegenseitig auslöschen
  - Addition der Signalenergien (x2 = +3dB)

Pegeländerung und Pegeladdition

Schalldruck-pegeländerung	Leistungs-änderung um Faktor	Schalldruck- bzw. Spannungs-änderung um Faktor
+ 1 dB	1,25	1,12
+ 3 dB	2	1,41
+ 6 dB	4	2
+10 dB	10	3,13
+ 20 dB	100	10
-1 dB	0,79	0,89
- 3 dB	0,5	0,707
- 6 dB	1/4 = 0,25	0,5
- 10 dB	1/10 = 0,1	0,33
- 20 dB	1/100 = 0,01	10

$$L_{ges} = 10\log(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + \ldots + 10^{\frac{Ln}{10}})$$

<u>Beispiele für Pegeladdition bei nicht kohärenten Signalen</u>
<u>(z.B. Lärmquellen in einer Halle)</u>

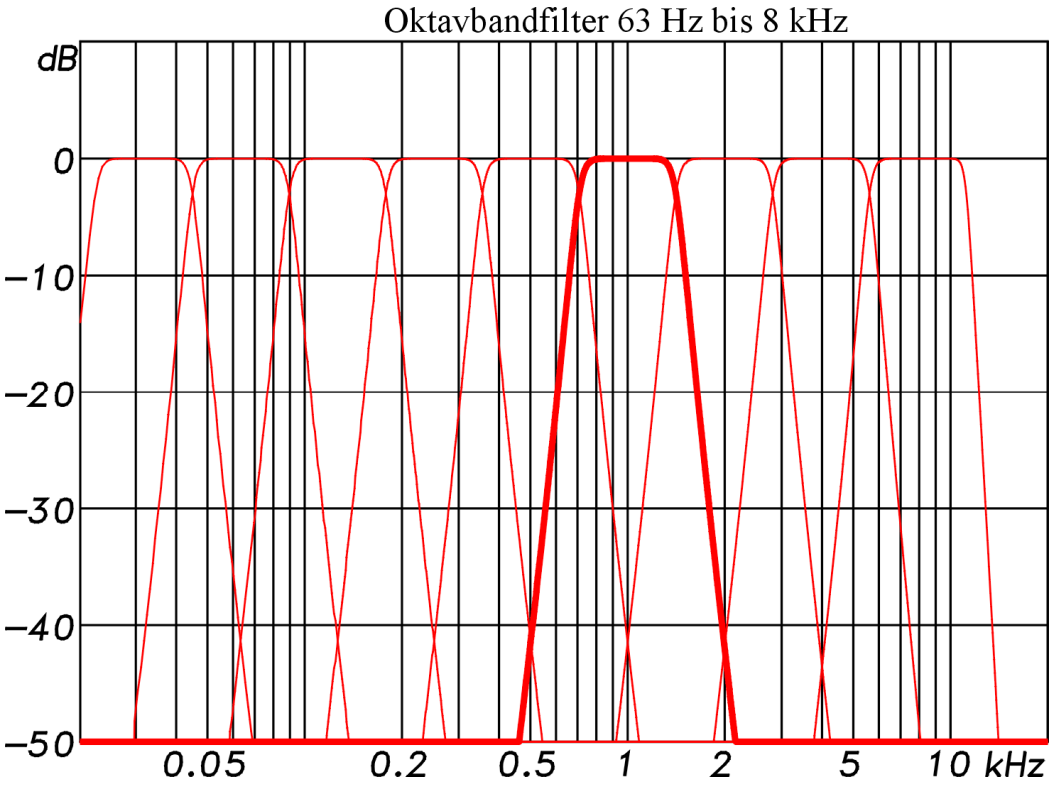
- 60 dB und 60 dB Summe: 63 dB
- 75 dB, 75 dB und 78 dB Summe: 81 dB
- ....

<u>Beispiele für Pegeladdition bei kohärenten Signalen</u>
<u>(z.B. zwei Sinussignale aus gleicher Quelle)</u>

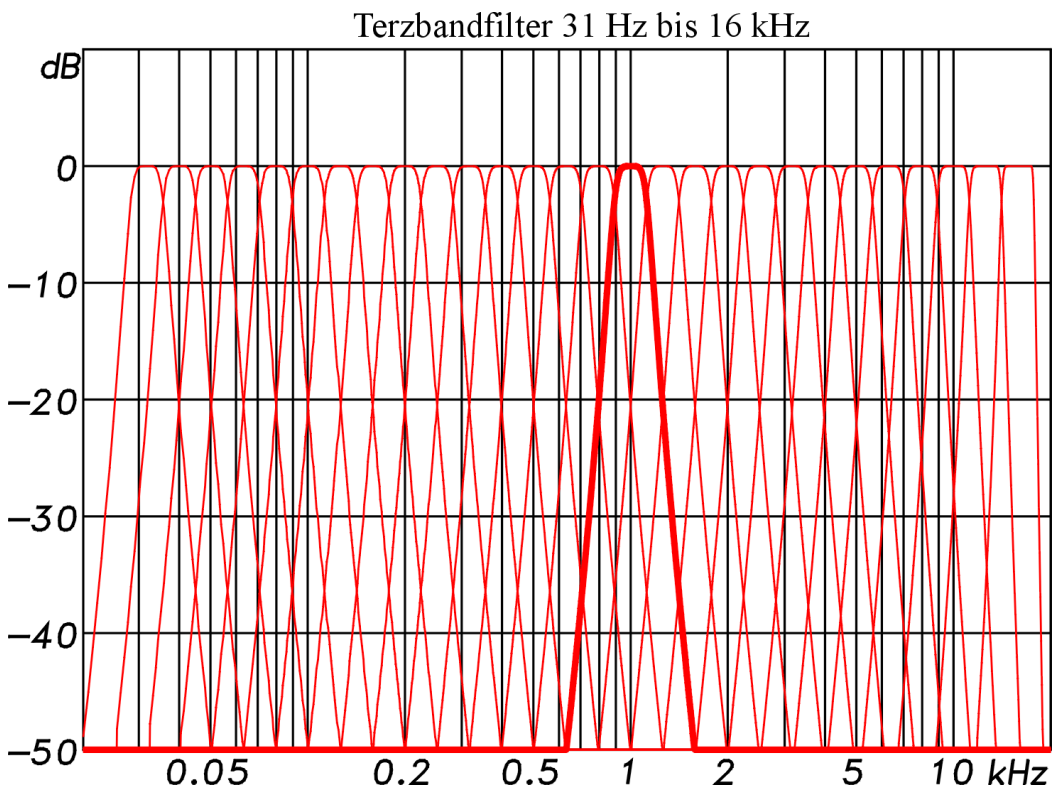
- 0 dB und 0 dB Summe: +6 dB
- 0 dB, 0 dB und +6 dB Summe: +12 dB
- ....

Schallpegelmesser

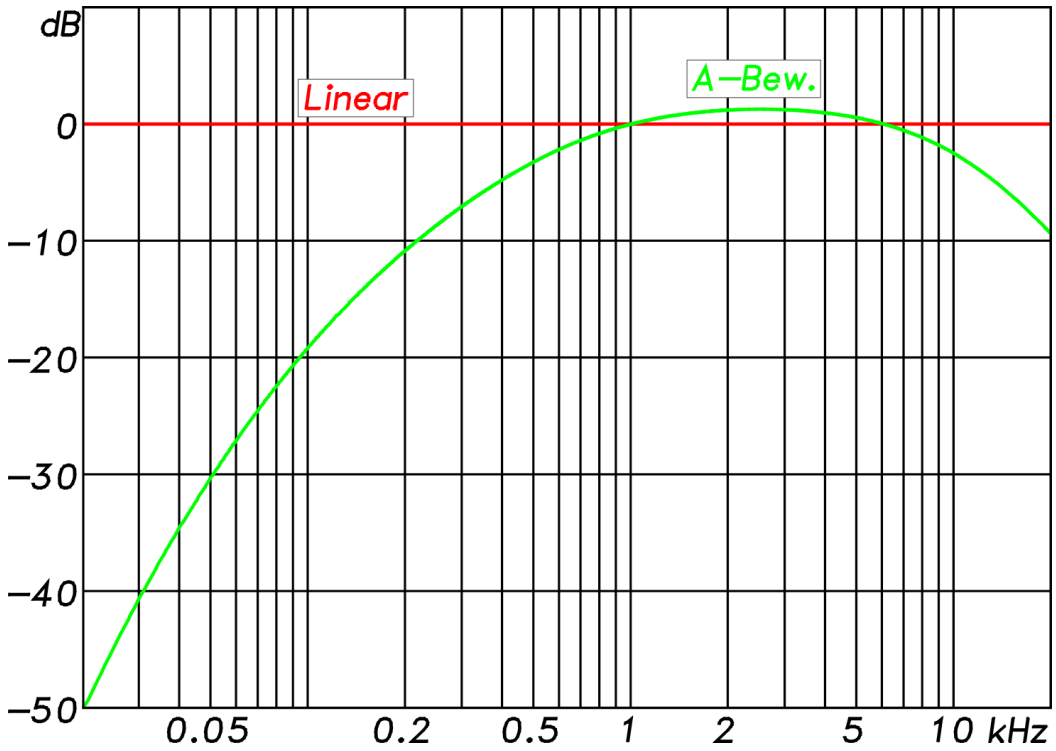
Oktavband Bandpassfilter



Terzband Bandpassfilter



Bewertungsfilter



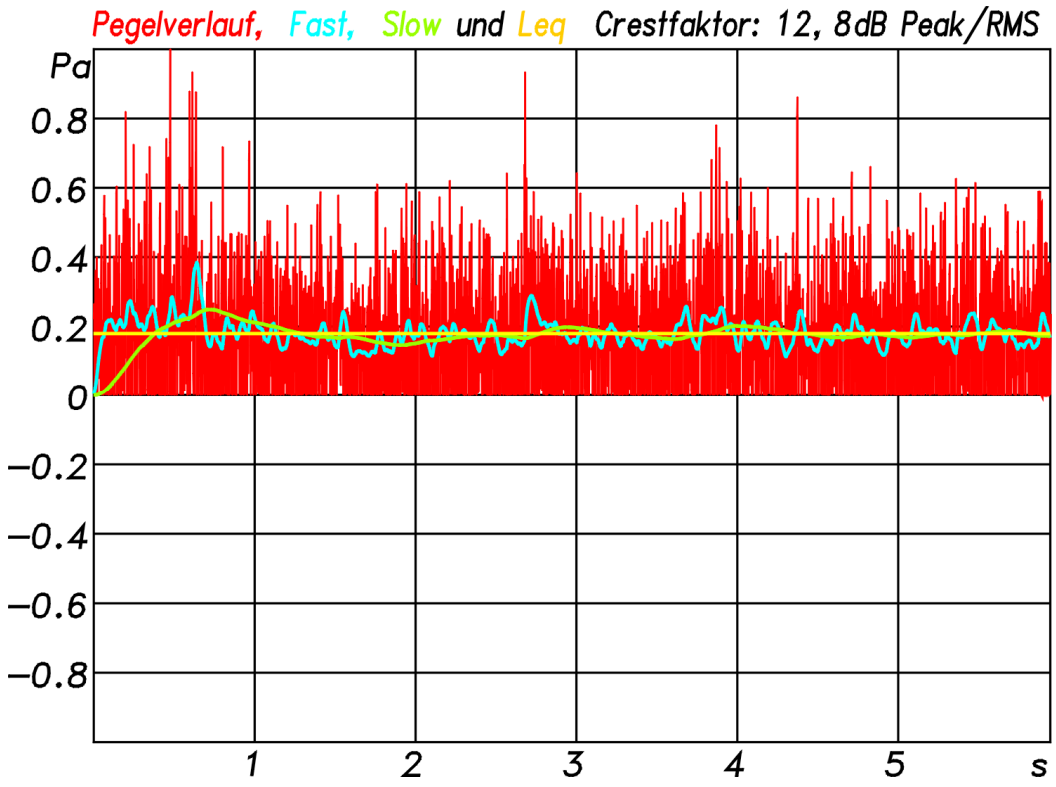
Zeitkonstanten

- „F“ Fast
  - Kurzzeitmittelung mit Exponentialfunktion als Gewichtungskurve
  - Zeitkonstante T = 125 ms
  - Kennzeichnung (z.B. L_{AF}, L_{CF})
- „S“ Slow
  - Kurzzeitmittelung mit Exponentialfunktion als Gewichtungskurve
  - Zeitkonstante T = 1 s
  - Kennzeichnung (z.B. L_{AS}, L_{CS})
- „I“ Impuls
  - Kurzzeitmittelung mit zwei Zeitkonstanten
  - Anstieg schnell T = 35 ms, Abfall langsam T = 1,5 s
  - Kennzeichnung (z.B. L_{AI}, L_{CI})

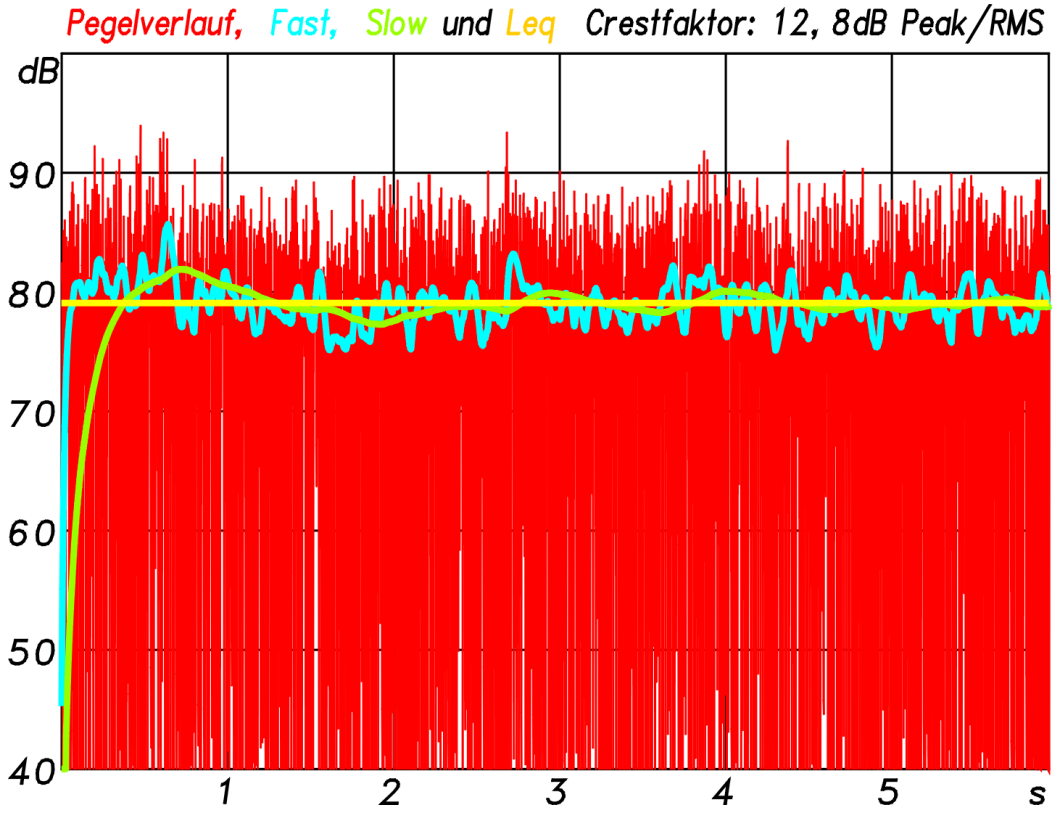
Mittelung und Perzentilpegel

- „eq“ Energieäquivalenter Dauerschallpegel
  - Mittelwert beliebiger Dauer
  - keine zeitliche Gewichtung (Rechteckfensterung)
  - Mittelungsdauer je nach Messvorschrift bzw. Anforderung
  - Kennzeichnung mit Sekundenangabe (z.B. L_{Aeq30}, L_{Ceq60})
  - ➢ **L_{eq30} in Oktav- oder Terzbändern für Störpegelmessungen**
- „%“ Perzentilpegel
  - Pegel, der in der Messzeit zu x % der Messdauer erreicht oder überschritten wurde
  - Kennzeichnung (z.B. L_{A10})
  - ➢ **$L_{\%10}$ in Oktav- oder Terzbändern für Sprachpegelmessungen**

Verschiedene Zeitkonstanten linear skaliert



Verschiedene Zeitkonstanten in dB skaliert

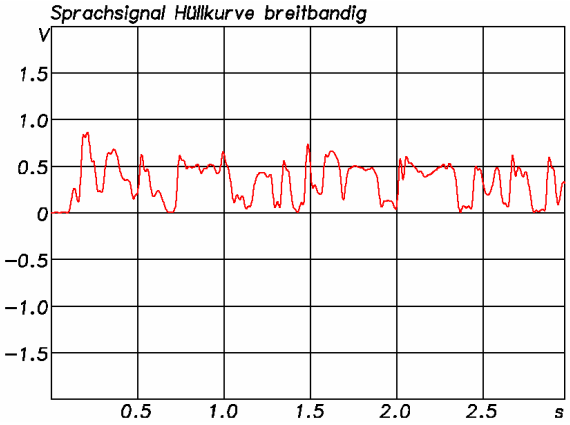


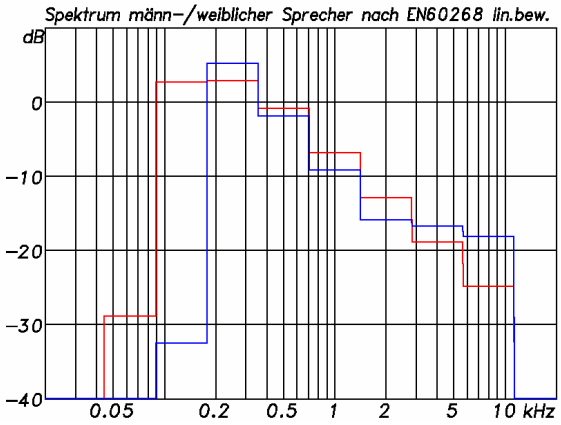
Die Beschallungsanlage

- Nur zur Information und Unterhaltung
- Sprachalarmanlage (SAA) oder Notfallwarnsystem (ENS)
- Gemeinsames minimales Ziel:
  Eine hinreichende Sprachverständlichkeit
- Störende Einflüsse:
  - Störgeräusche (Signal/Noise respektive Störabstand)
  - Nachhall (Raumakustik)
  - zu niedriger Pegel (Hörschwelle)
  - zu hoher Pegel (Maskierung)

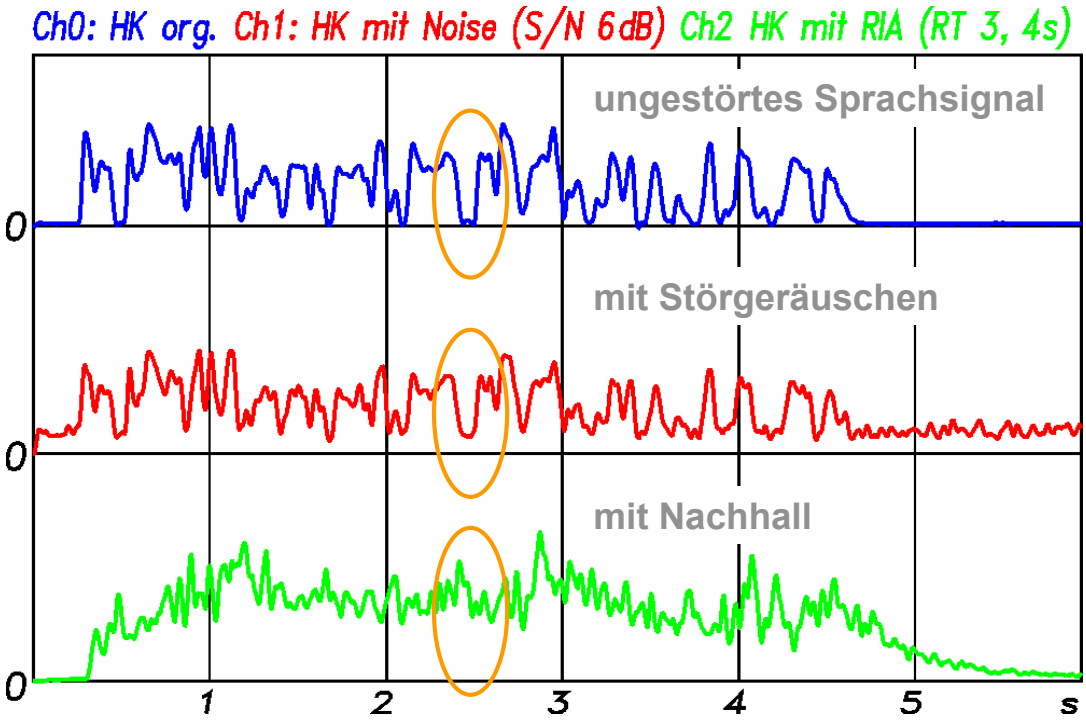
Wann ist Sprache gut verständlich?

- Sprache ist ein moduliertes Signal
  - ⇒ Der Informationsgehalt wird großteils über die Modulation transportiert
  - ⇒ Nachhall, Störgeräusche und Bandbegrenzungen führen zum Verlust von Modulationstiefe im Signal und somit zum Informationsverlust, d.h. zur einer reduzierten Sprachverständlichkeit
  - ⇒ Modulationsfrequenzen bis 20 Hz
  - ⇒ Spektrale Zusammensetzung in den 7 Oktavbänder von 125 Hz bis 8 kHz





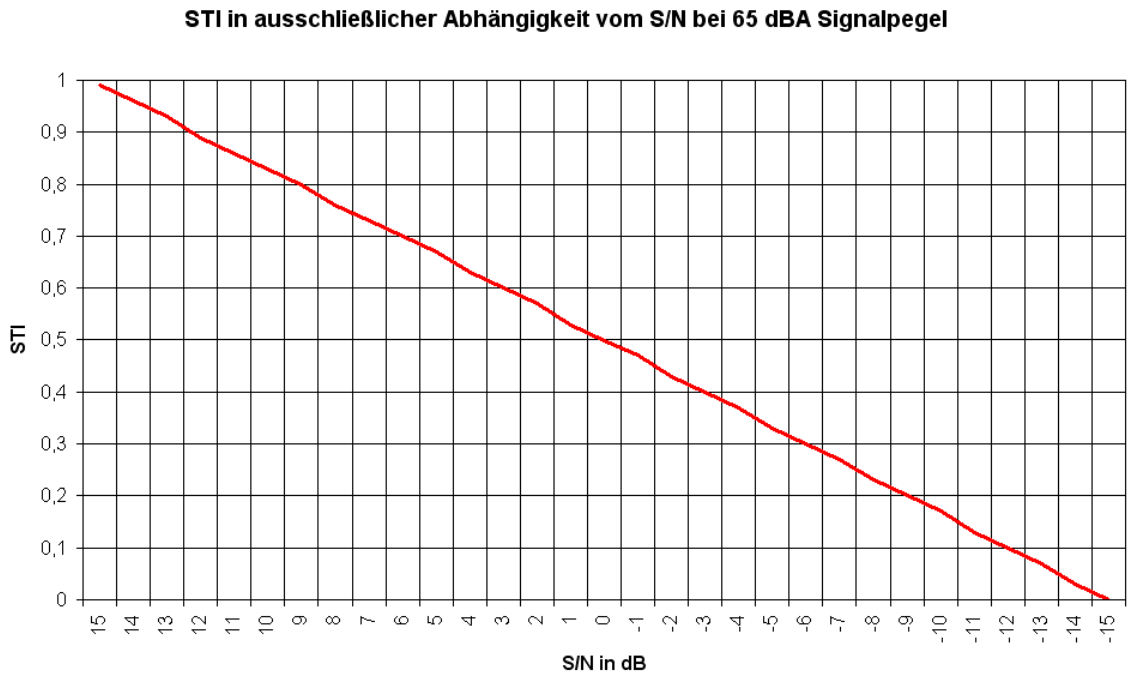
Modulationsverlust durch Störgeräusche



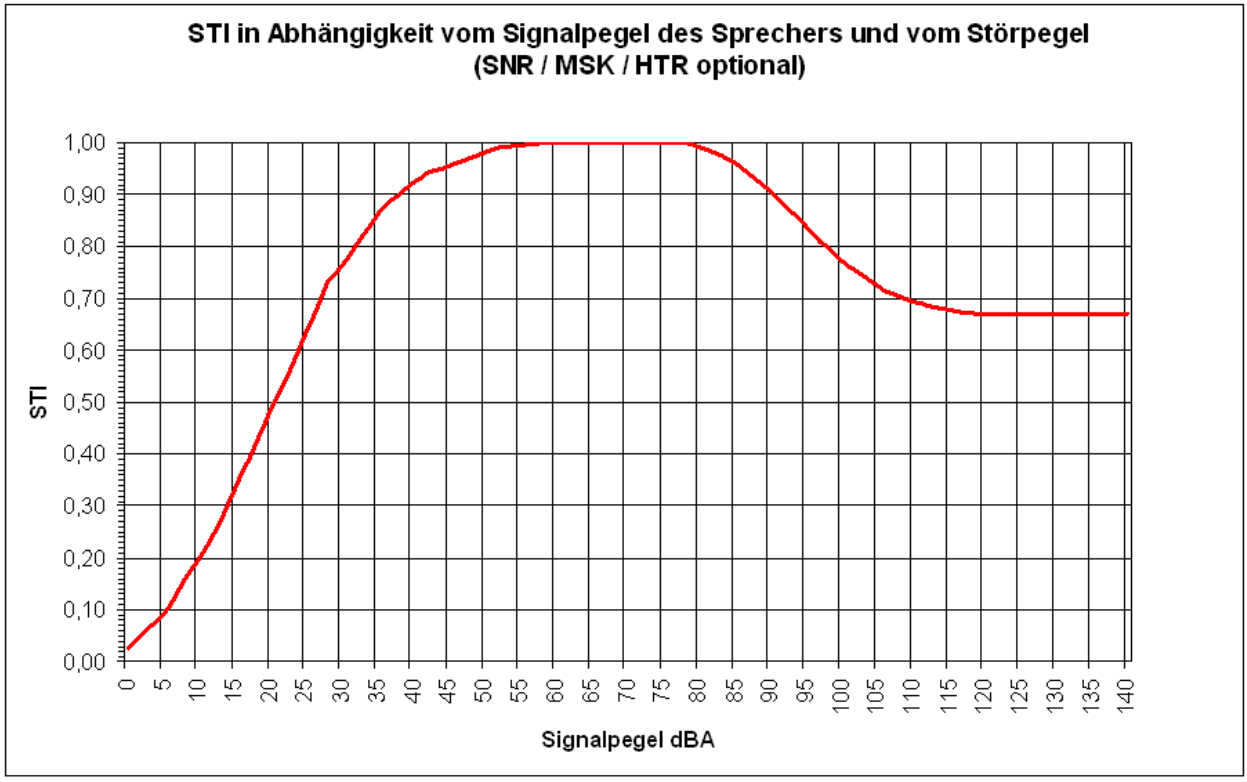
Problem Störgeräusche

- Störgeräusche sind meist sowohl zeitlich wie auch in der der spektralen Zusammensetzung stark schwankend und damit nur schwer eindeutig zu definieren
- Anhaltspunkt: ... bis zu 65, 75, 85, … dBA
- Entscheidend ist nicht das Störgeräusch als solches, ...
- ... sondern das Verhältnis vom Sprachsignalpegel zum Störpegel
- Lösung: hinreichend laute Sprachwiedergabe, aber ...
  - ab einem gewissen Pegel wird die Verständlichkeit durch den Maskierungseffekt wieder schlechter
  - Zeitlich schwankender Störpegel erfordert auf jeden Fall eine automatische Pegelnapassung, da die Anlage sonst zumindest zeitweise viel zu laut wäre
  - der Aufwand für die Beschallungsanlage sollte in einem angemessenen Verhältnis bleiben (z.B. Köln HBF: ca. 3 kW Leistung pro Bahnsteig)

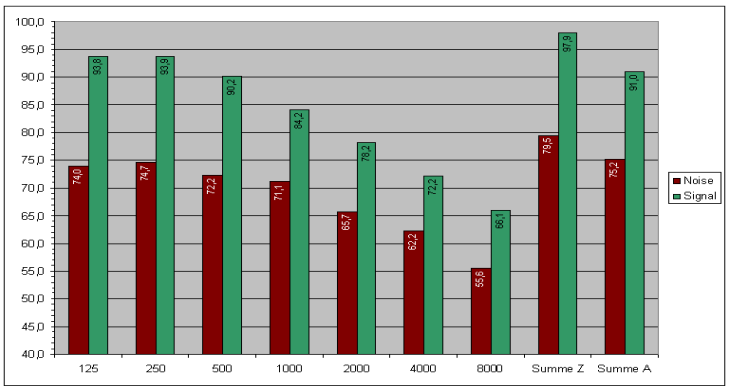
Signal- und Störpegel beim STI



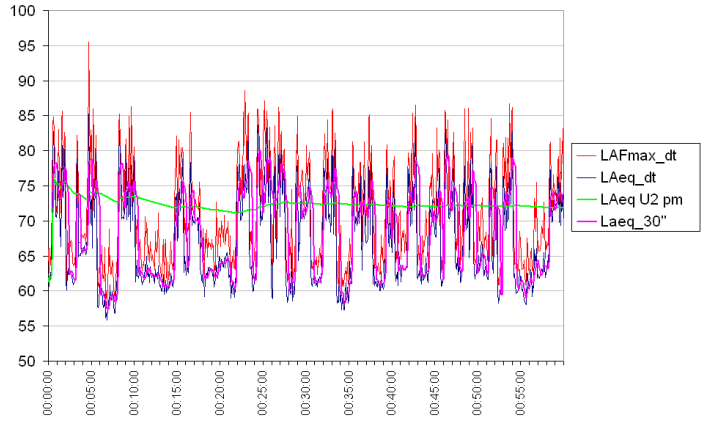
Verdeckung und Hörschwelle beim STI

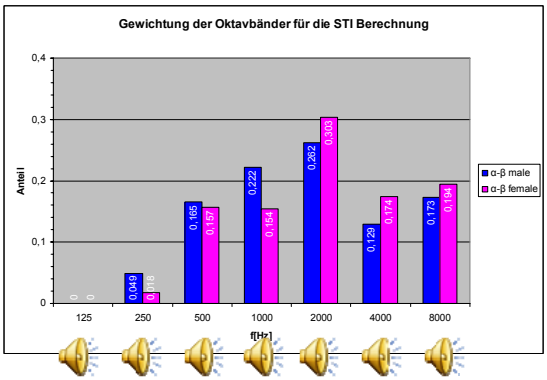


Analyse des Störpegels

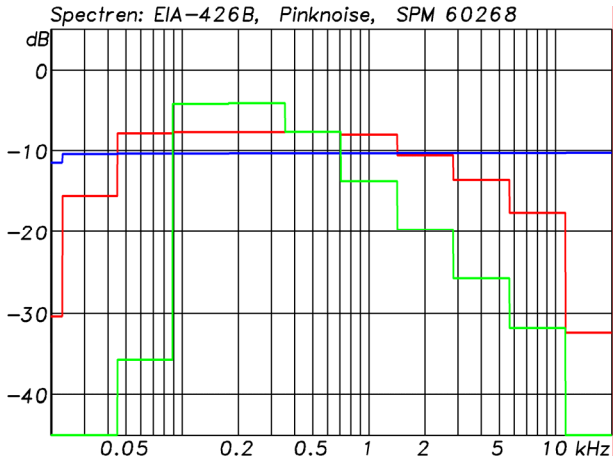


- Mittelungsdauer
- Frequenzselektive Bewertung
- Häufigkeit lauter Ereignisse



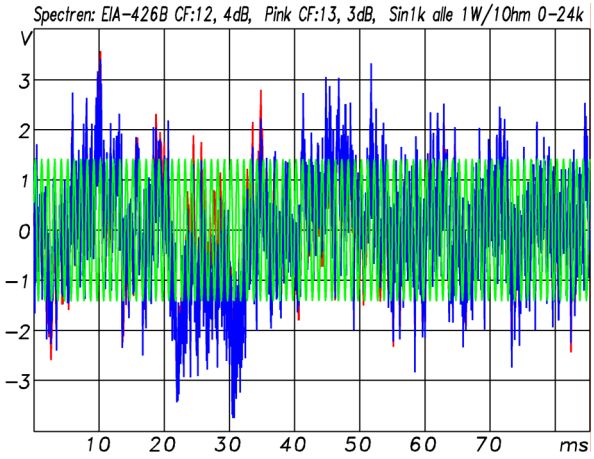


Typische Nutzsignalspektren



- Spektrale Verteilung als Summenpegel in den Oktavbändern gemessen über eine Langzeitmittelung
- Pinknoise
- EIA-426B
- Sprecher nach 60268-16

Zeitlicher Signalverlauf

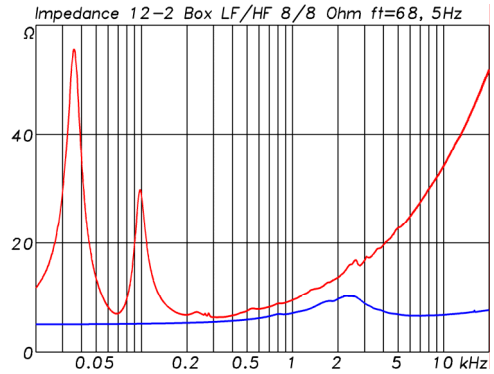


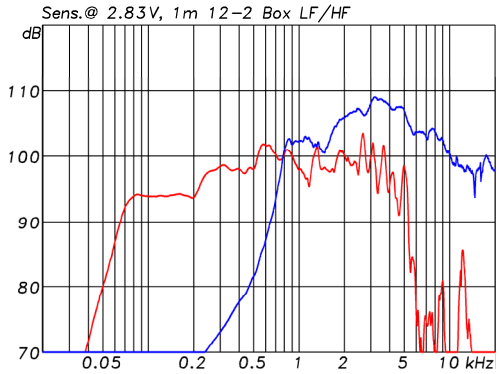
- Der zeitliche Verlauf gibt Auskunft über das Verhältnis vom Spitzenwert zum Mittelwert (Crestfaktor)
- Sinus 3 dB
- Pinknoise 13,3 dB
- EIA-426B Noise 12,4 dB

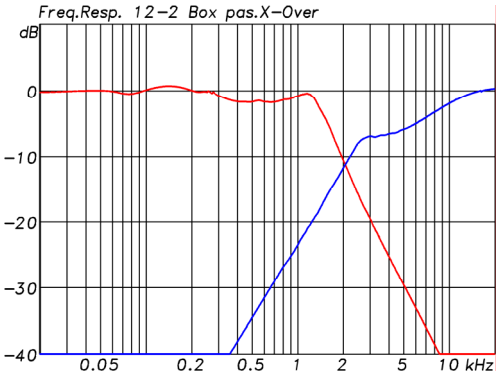
ohne Abbildung

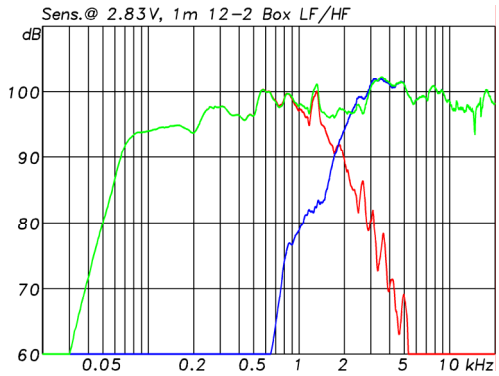
- Rechteck 0 dB
- Sprache 12-20 dB
- Musik 9-20 dB

Der Lautsprecher





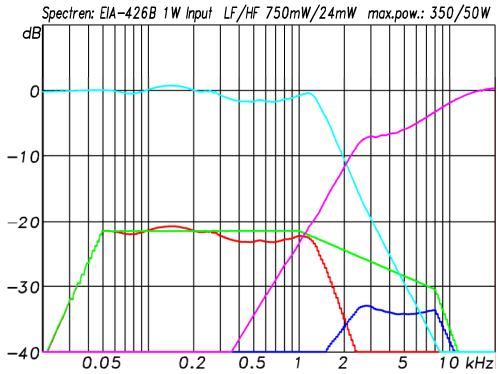


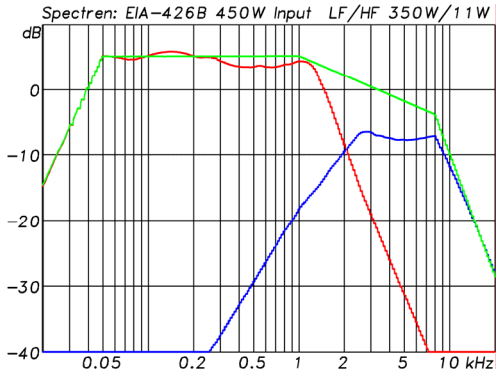


Übersicht der Messvorschriften

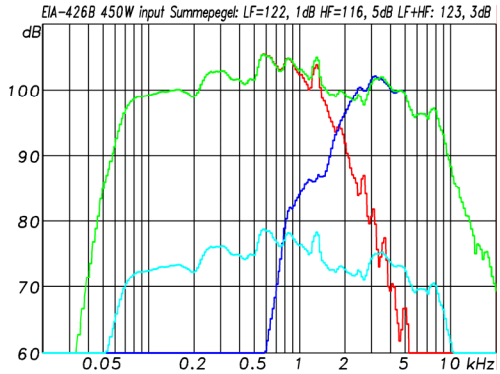
Eigenschaft nach DIN 60268-5	Testsignal	Einschalt-dauer	Pausen	Ableitung Leistung
Nennrauschspannung	60268-1 mit 6 dB Crestfaktor	1 x 100 h	-	Durch Bezug auf Nennimpedanz: Nennleistung, Nennbelastbarkeit
Maximale Kurzzeit-Eingangsspannung	60268-1 mit 6 dB Crestfaktor	60 x 1 s	1 min	Durch Bezug auf Nennimpedanz: Maximale Kurzzeiteingangsleistung
Maximale Langzeit-Eingangsspannung	60268-1 mit 6 dB Crestfaktor	10 x 1 min	2 min	Durch Bezug auf Nennimpedanz: Maximale Langzeiteingangsleistung
Nenn-Sinusspannung	Sinuston im Über-tragungsbereich	1 h	-	Durch Bezug auf Nennimpedanz: Nennsinusleistung
Eigenschaft nach AES2-1984 (r2003)				
„Rated“ Voltage	Bandpass 12 dB Butterworth im Nennüber-tragungsbereich*1 Pink Noise 6 dB Crestfaktor	2 h	-	Durch Bezug auf Nennimpedanz: Rated Power *1 für Einzelchassis

Leistungsverteilung



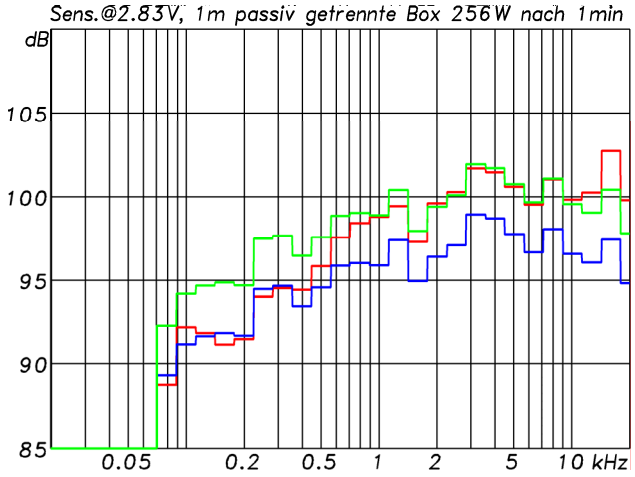


- Belastbarkeiten (thermische Dauerleistung)
  - LF 350 W nach AES
  - HF 50 W nach AES
- Grenzwert für LF wird zuerst erreicht
  - LF 350 W und HF 11 W
- Rechnerischer Pegel: <u>123,3 dB</u>



Powercompression Messung

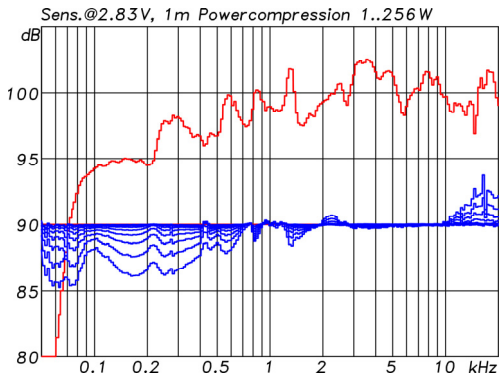
- Messsignale
  - Bandbegrenztes EIA-426B Noise (1,36 s Perioden)
    - Als synchrone Messung !
    - FFT Länge: 64K
  - Crestfaktor ohne Clip ca. 13 dB sonst 6 dB
  - Bandbegrenzung
    - LF: 70 Hz bis 2 kHz
    - HF: 2 kHz bis 20 kHz
- Messwert
  - Frequenzgang mit Sensitivity 1W/1m
- Grenzwerte
  - Bezug: Referenzkurve niedriger Leistung
  - Glättung: 1/3 Oct.
  - Abweichung: max. 3 dB

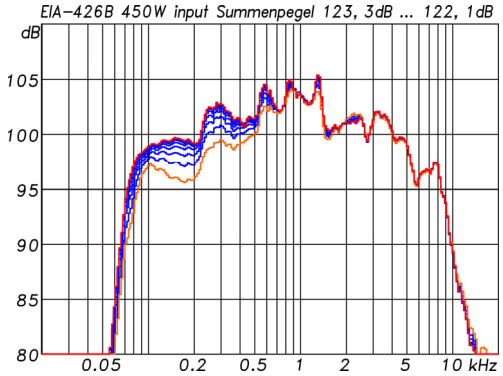


- Messungen LF, HF
  - Sensitivity 1W/1m Referenz (——)
  - -3 dB Toleranzschlauch (-----)
  - Messwert bei gegebener Leistung (——)
  - Limit 256 W (1,2,4,...128,256)

Verluste durch Powercompression

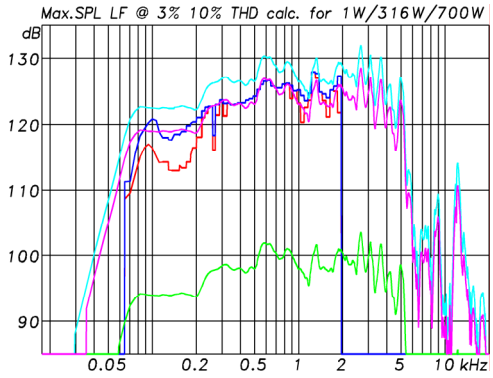
- Sensitivity Verlust durch Powercompression führt zu:
  - Pegelverlust (breitbandig nur 1,2 dB)
- aber auch !
  - tonale Unausgewogenheit (-4 dB unterhalb von 400 Hz)
  - starke Verzerrung im HF-Bereich

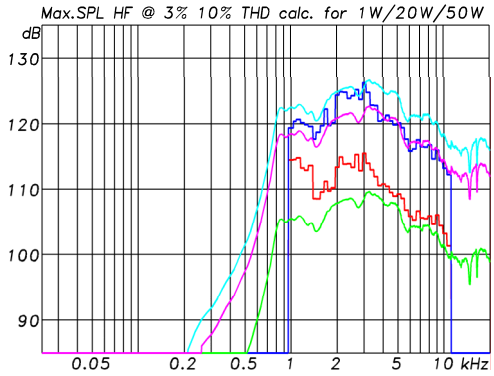




Weiteres Kriterium: THD Messungen

- Messsignale:
  - Sinusburst
    - 171ms (4K FFT) Δf = 11,6 Hz
    - 342ms (8K FFT) Δf = 5,8 Hz
- Grenzwerte
  - THD z.B. 1%, 3%, 10%
  - Leistungslimit
- Messungen LF, HF
  - max. THD 3% (rot)
  - max. THD 10% (blau)
- Sensitivity 1W/1m (grün)
- Calculated Max.SPL
  - LF für 316 W (max. 10% THD) und 700 W
  - HF für 20 W (max. 10% THD) und 50 W

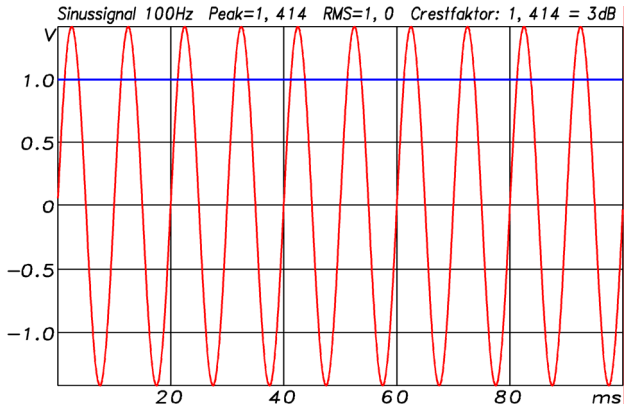


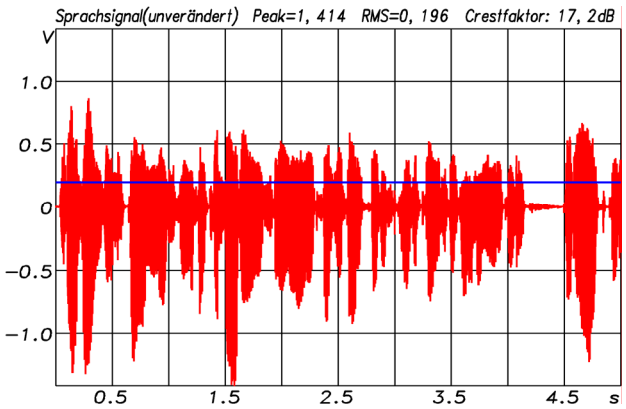


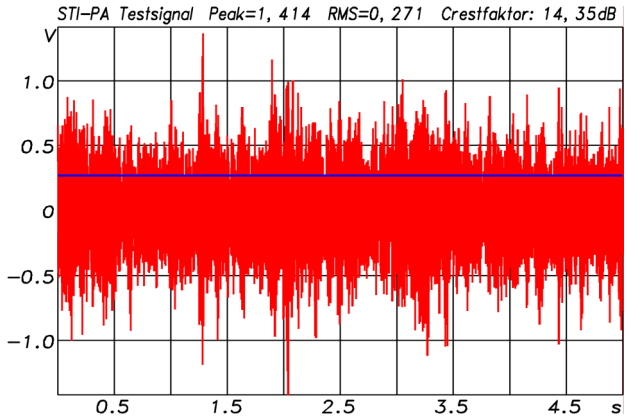
Summa Summarum

- Rechnerisch erreicht der Muster Lautsprecher 123,3 dB Leq mit einem typischen EIA-426B Rauschen mit 450 W RMS-Leistung bezogen auf 8 Ohm.
- Durch Powercompression gehen ca. 1,2 dB verloren und der Frequenzgang verbiegt sich ungünstig.
- Das Signal hat einen Crestfaktor von 12 dB. Das sind 9 dB mehr als bei einem Sinussignal.
- Der Verstärker müsste demnach zumindest kurzzeitig die 8-fache Leistung zur Verfügung stellen können, wenn das Signal nicht komprimiert werden soll.
  D.h. 3600 W an 8 Ohm.
- Vorausgesetzt die Leistung steht zur Verfügung und der Lautsprecher verträgt die hohen Spitzenwerte ohne mechanische Schäden, dann wäre ein Pegel von 134 dB als Peak-Wert messbar.
- Mit einem „normal“ dimensionierten Verstärker mit 450 W an 8 Ohm wäre ein als L_{eq} messbarer Schalldruck von maximal 114,3 dB und ein Peak-Wert von 126,3 dB möglich.
- Die Verzerrungen bleiben mit <10% in einem verträglichen Rahmen. Dieser Werte bezieht sich jedoch nur auf den Sinusmesswert und nicht auf mögliche Verzerrungen der Spitzenwerte.

Messbare Schalldruckwerte



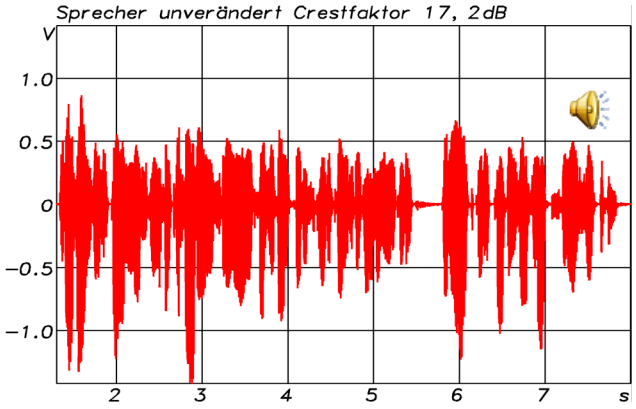


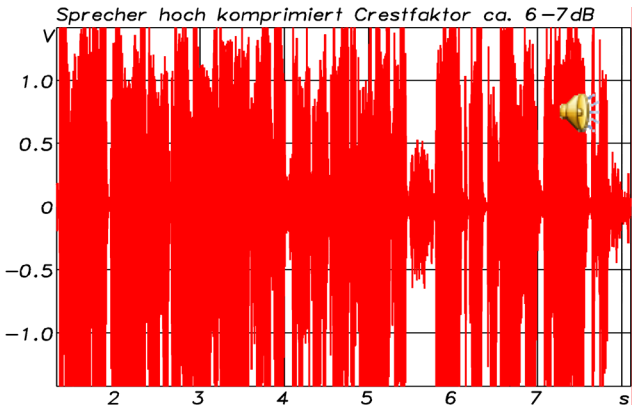


- Beispiel: Lautsprecher A erzeugt mit der maximalen Verstärkerleistung von 10 W in 1 m Abstand einen SPL von 100 dB
- Welche Schalldruckwerte sind dann mit welchen Signalen messbar ?
  SPL-Messwerte bei Vollaussteuerung des Verstärkers bis zur Clipgrenze:
  - mit Sinussignal: 100 dB Leq und 103 dB Peak
  - mit STI-PA Testsignal: 89 dB Leq und 103 dB Peak
  - mit Sprache: 86 dB Leq und 103 dB Peak

Auswege !?

- Größere Verstärker:
  - Um ein Signal mit 14 dB Crestfaktor mit 10 W RMS Leistung unverzerrt zu übertragen, wäre ein Verstärker mit 125 W Leistung erforderlich !
  - ... unverhältnismäßig !
- Alternative: Signal komprimieren
- Zielwert: Crestfaktor 6 dB für SAA
- Der messtechnisch erreichbare Wert ist dann nur noch 3 dB geringer als der <u>Wert aus einer Simulation, die mit 3 dB Crestfaktor rechnet</u>.
- ... oder Verstärker mit 3 dB Peakreserve einsetzen.
- Verlust im STI-Wert durch die Kompression von 1 auf 0,89





Fazit und Zusammenfassung

- Bei der Planung einer Lautsprecheranlage ist der erreichbare Maximalpegel substanziell !
- Wichtig ist der Maximalpegel vor allem in Relation zu einem möglichen Störpegel.
- Planungsfehler sind nur hier nur schwer oder gar nicht zu beheben.
- Störpegel gewissenhaft und umfassend bestimmen
- Maximalpegelanforderungen genau festlegen und die Bedingungen definieren
- Lautsprecherdaten auf Plausibilität prüfen
- Powercompression bedenken
- Verfügbare Verstärkerleistung prüfen
- Signalkompression in Betracht ziehen
- Die messtechnischen Werte genau definieren!

Paper Download

www.ifaa-akustik.de

Manuskript zu diesem Vortrag mit Text und Grafiken als PDF File

Stefan Weinzierl (Hrsg.)

Handbuch der Audiotechnik

Springer Verlag