Beschallungsanlagen in Räumen Teil 3 (Messtechnik und STI)

Anselm Goertz

Alfred Schmitz

DEGA Akademie Raumakustik und Beschallung
am 26.Sept.2012 14:45 – 16:15

Übersicht (Messtechnik und STI)

Messungen von Pegelwerten und Sprachverständlichkeit

Grundlagen

1. Definition der Sprachverständlichkeit und Messverfahren *3-8*
2. STI, RASTI, STIPA, ... *9-11*
3. Indirekte Messung über die Impulsantwort *12-21*

Praktische Ausführung

5. Messverfahren *22-23*
6. Messgeräte *24-36*
7. Durchführung einer Messung *37-48*
8. Beispiele *49*

Definition und Feststellung der Sprachverständlichkeit

- Subjektive Messung mit Hilfe von Sprechern und Zuhörern mit definierten Sätzen, Wortfolgen, Silben o.ä.
  Beispiel: TNO Satztest
- Vorhersage anhand messtechnischer Werte
  Nachhallzeit RT *(ca. 1s)*
  Deutlichkeitsmaß C_{50} *(>0dB)*
  Störabstand S/N *(>10dB)*
  Bandbreite f_o, f_u *(min. 300 Hz – 3 kHz)*
  Verzerrungen THD *(<10%)*
- Objektive Messung mit speziellen Testsignalen → **STI**

Ableitung des STI

- 1970:
  Tammo Houtgast und Herman Steeneken:
  Evaluation of Speech Transmission Channels by physical [quantitative] means
- Acoustica 1971:
  Der Begriff **STI = Speech Transmission Index** wird eingeführt
- Ansatz: Ein der Sprache möglichst ähnliches Testsignal soll die Lautsprecheranlage unter realistischen Bedingungen betreiben
- Ziel: Ein einfacher Einzahlparameter soll die Sprachverständlichkeit unter Berücksichtigung möglichst vieler Kriterien (Nachhall, Störpegel, Echos, Pegel, ...) darstellen können.

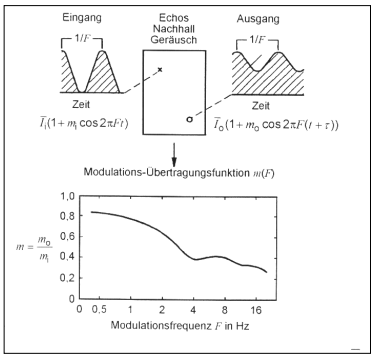
Was ist zu berücksichtigen ?

- Das akustisches Umfeld (Raumakustik)
  Nachhall, Echos
- Störungen (Störschall)
  Umgebungslärm, Fahrzeuglärm, andere Sprecher, ...
- Einsatz von Beschallungsanlagen
  Verzerrungen, Feedback, Frequenzgang, Echos, ...
- Psychoakustische Effekte
  Hörschwelle, Verdeckung, ...

Ansprüche an das Messverfahren ?

- Messung unter realistischen Betriebsbedingungen
- Reproduzierbare Ergebnisse
- Teilmessungen sollen möglich sein
- Ein einfacher Parameter als Ergebnis
- Erfassung aller Einflussgrößen
- Schnelle Durchführung
- Sicherheit gegen Fehlbedienung
- möglichst universell anwendbar

Die Modulationsübertragungsfunktion (MTF)



Objektive messtechnische Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den STI (Speech Transmission Index)

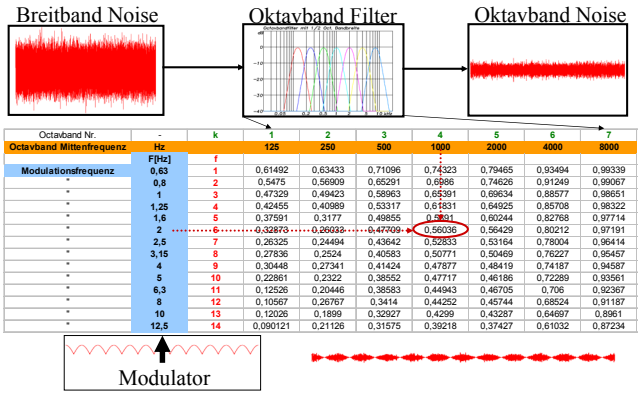
Aus der Messung des Verlustes an Modulationstiefe in 98 Variationen wird der STI Wert berechnet.

Dabei werden berücksichtigt:

- **Nachhall**
- **Signal-/Störabstand**
- **Hörschwelle**
- **Maskierung**
- **div. Andere Effekte ...**

STI Wertebereich zwischen 0 und 1

Messverfahren mit moduliertem Rauschen



Octaband Nr.	-	k	1	2	3	4	5	6	7
Octaband Mittenfrequenz	Hz		125	250	500	1000	2000	4000	8000
	F[Hz]	f							
Modulationsfrequenz	0,63	1	0,61492	0,63433	0,71096	0,74323	0,79465	0,93494	0,99339
"	0,8	2	0,5475	0,56909	0,65291	0,6986	0,74626	0,91249	0,99067
"	1	3	0,47329	0,49423	0,58963	0,65391	0,69634	0,88577	0,98651
"	1,25	4	0,42455	0,40989	0,53317	0,61831	0,64925	0,85708	0,98322
"	1,6	5	0,37591	0,3177	0,49855	0,5831	0,60244	0,82768	0,97714
"	2	6	0,32873	0,26033	0,47009	0,56036	0,56429	0,80212	0,97191
"	2,5	7	0,26325	0,24494	0,43642	0,52833	0,53164	0,78004	0,96414
"	3,15	8	0,27836	0,2524	0,40583	0,50771	0,50469	0,76227	0,95457
"	4	9	0,30448	0,27341	0,41424	0,47877	0,48419	0,74187	0,94587
"	5	10	0,22861	0,2322	0,38552	0,47717	0,46186	0,72289	0,93561
"	6,3	11	0,12526	0,20446	0,38583	0,44943	0,46705	0,706	0,92367
"	8	12	0,10567	0,26767	0,3414	0,44252	0,45744	0,68524	0,91187
"	10	13	0,12026	0,1899	0,32927	0,4299	0,43287	0,64697	0,8961
"	12,5	14	0,090121	0,21126	0,31575	0,39218	0,37427	0,61032	0,87234

STI, RASTI, STIPA

STI = Speech Transmission Index

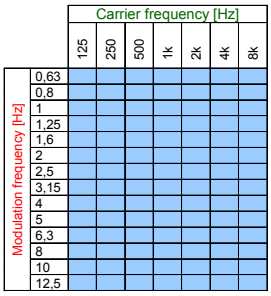
- 7 Oktaven (125 Hz bis 8 kHz)
- 14 Modulationsfrequenzen (0,63 Hz bis 12,5 Hz)
- 98 Kombinationen

Vorteil

- genaues Verfahren

Nachteil

- lange Messzeit (bei Einzelauswertung)



STI, RASTI, STIPA

RASTI = Room Acoustic Speech Transmission Index

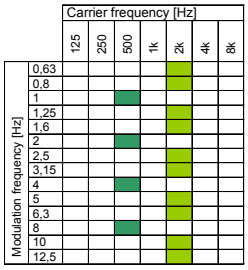
- 2 Oktaven (500 Hz und 2 kHz)
- 4 + 5 Modulationsfrequenzen
- 9 Kombinationen

Vorteil

- schnelles Verfahren

Nachteile

- Anwendung nur wenn,
  - kein impulsartiges Störgeräusch
  - kein tonhaltiges Störgeräusch
  - glatter Frequenzgang
  - relativ frequenzkonstante Nachhallzeit
  - keine Amplitudenverzerrung (Kompression)



STI, RASTI, STIPA

STIPA = Speech Transmission Index Public Address

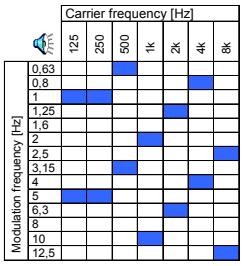
- Alle Oktavbänder (125 Hz bis 8 kHz)
- 2 Modulationsfrequenzen je Oktavband
- 14 Kombinationen

Vorteile

- Guter Kompromiss
- Schnelle Messung, da Modulationssignale parallel ausgesandt werden

Nachteile

- Anwendung nur wenn,
  - kein impulsartiges Störgeräusch
  - keine starken nichtlinearen Verzerrungen



Indirekte STI Bestimmung über die Impulsantwort

- Messung der **Übertragungsfunktion** der zu prüfenden Strecke in Form der **Impulsantwort *h(t)***
- Nach Schröder:

$$m(f)=\frac{\int_0^\infty h^2(t)e^{-j2\pi ft}dt}{\int_0^\infty h^2(t)dt}$$

← ***FT der quadr. IR***

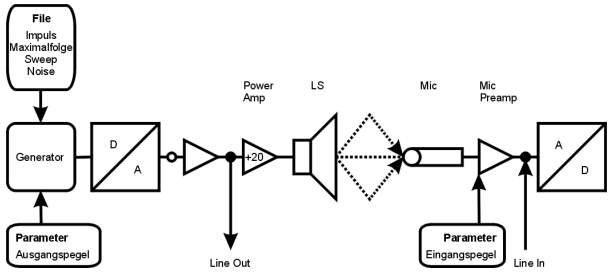
← ***Energie der IR***

- ***m(f)*** ist die komplexe **Modulationsübertragungsfunktion** (C **MTF**) für LTI-Systeme (lineare zeitinvariante Systeme)
- Die Messung der IR erfolgt typischer Weise mit MLS oder Sweep Signalen

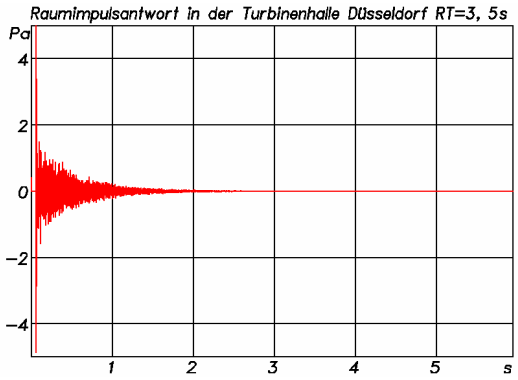
Messung der Impulsantwort (Schröder Methode)

- Das Messsignal sollte unkritisch gegenüber Zeitvarianzen durch Luftströmungen (Klimaanlagen, Thermische Strömung, Wind) sein
- Die Länge der erfassten Impulsantwort muss mindestens der Nachhallzeit des gemessenen Objektes entsprechen
- Die Frequenzauflösung muss mindestens 0,6 Hz betragen
- Die Abtastrate sollte bei 44,1 kHz liegen
- **Standard: Sweeps vom Grad 18 bei 44,1 kHz**
- IR Länge = 5,94 s ; Auflösung der MTF = 0,168 Hz

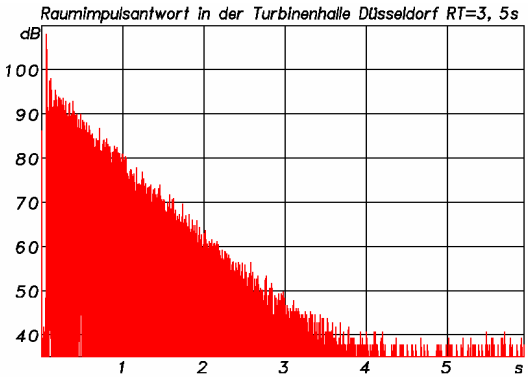
Messaufbau mit PC



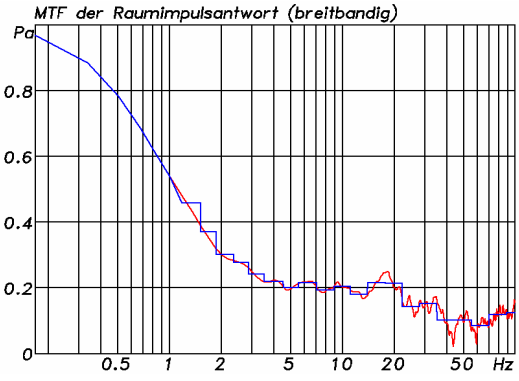
Auswertung der Impulsantwort (Messung)



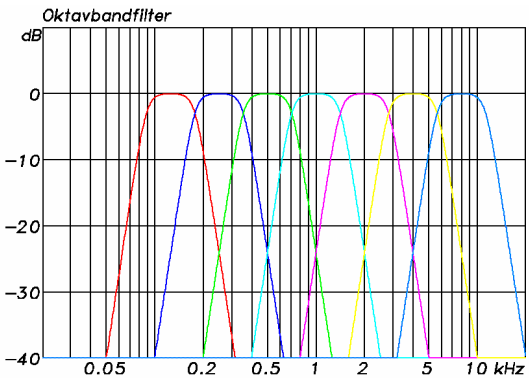
Auswertung der Impulsantwort (Störabstand)



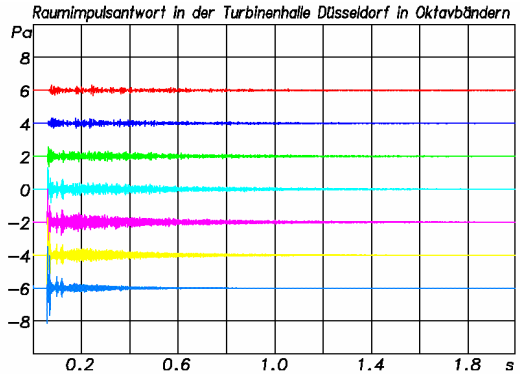
Auswertung der Impulsantwort (MTF)



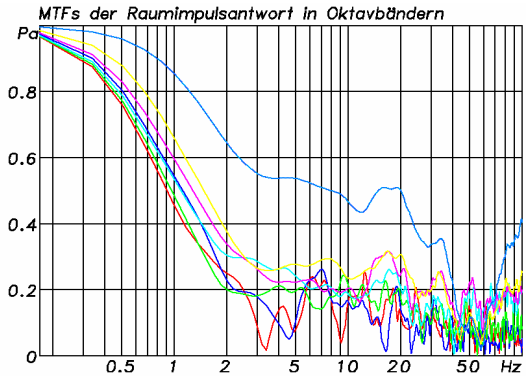
Auswertung der Impulsantwort (Oktavfilter)



Auswertung der Impulsantwort (gefilterte IR)



Auswertung der Impulsantwort MTF in Oktaven



Auswertung der Impulsantwort MTF Matrix

MTF table

Correction — SNR : no/yes — Masking : no/yes — T-thresh. : no/yes

Selection — Display : Full/STIPA — Channel : 0

Octave band	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
m-correction	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
630 mHz	0.658	0.710	0.676	0.704	0.756	0.812	0.926
800 mHz	0.554	0.622	0.577	0.616	0.676	0.737	0.889
1 Hz	0.450	0.537	0.479	0.530	0.594	0.655	0.842
1.25 Hz	0.361	0.450	0.377	0.446	0.507	0.565	0.784
1.6 Hz	0.292	0.336	0.267	0.357	0.410	0.462	0.710
2 Hz	0.252	0.227	0.199	0.300	0.337	0.374	0.640
2.5 Hz	0.199	0.192	0.185	0.295	0.293	0.299	0.579
3.15 Hz	0.047	0.169	0.185	0.277	0.251	0.259	0.540
4 Hz	0.141	0.094	0.211	0.262	0.222	0.262	0.533
5 Hz	0.000	0.111	0.196	0.239	0.222	0.275	0.531
6.25 Hz	0.236	0.233	0.147	0.201	0.227	0.276	0.515
8 Hz	0.162	0.169	0.178	0.204	0.201	0.291	0.495
10 Hz	0.161	0.164	0.215	0.186	0.202	0.233	0.463
12.5 Hz	0.251	0.151	0.195	0.183	0.193	0.256	0.435
Quit MTI	0.333	0.355	0.359	0.397	0.411	0.445	0.597

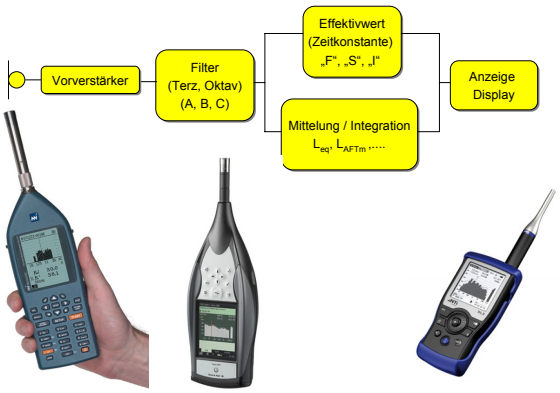
Messung der STI-Werte

- Direkte Methode mit moduliertem Rauschen und Einzelauswertungen
  - Zu zeitaufwendig !
- Vereinfachte Verfahren mit STI-PA Messungen
  - Einfach durchzuführen
  - Meist mehrer Mittelungen erforderlich (Messdauer pro Messung ca. 16 s)
  - Nutz- und Störsignalpegelmessung zusammen mit der STI-PA Messung in einem Messvorgang möglich aber nicht zwingend erforderlich
  - Teilweise kritisch bei Störungen durch Zeitvarianzen
- Indirekte STI Bestimmung über die Impulsantwort (Schröder Methode)
  - Einzelmessung zwingend erforderlich für:
    - Impulsantwort zur Auswertung der MTFs
    - Nutzsignalpegel
    - Störpegel
  - Hohe Genauigkeit der Messung, daher in der Regel keine Mittelungen erforderlich
  - Etwas komplizierter in der Durchführung

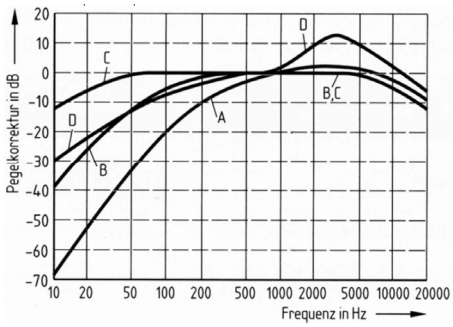
Messung der STI-Werte

- Messung der Modulationsverluste
  - Direkt mit Rauschsignalen (STI-PA Methode)
  - Über die Messung der Impulsantworten
- Nutzsignalpegelmessung
  - Mit einem Sprachsignal
  - Mit einem Sprachersatzsignal
  - Messung in Oktavbändern (lin.-bew.)
  - Als L_{10} oder L_{eq}
- Störpegelmessung
  - Messung in Oktavbändern (lin.-bew.)
  - Als L_{eq} über einen zu definierenden Zeitraum

Schallpegelmesser mit erweiterten Funktionen



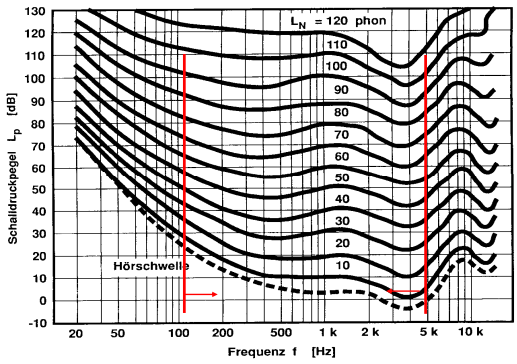
Bewertungskurven



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

Kurven gleicher Lautheit

In der Raum- und Bauakustik relevanter Frequenzbereich



Addition von Signalen

- Kohärente (zusammenhängende) Signale
  - Beispiel (Sinussignale, monophon abstrahlende Lautsprecher)
  - „interferenzfähig“
  - Addition der Schalldrücke
- Inkohärente Signale
  - Beispiel (Rauschen, Musik, Störgeräusch usw.)
  - Gleichermaßen konstruktive und destruktive Interferenz
  - Addition der Signalenergien

Pegeländerung und Pegeladdition

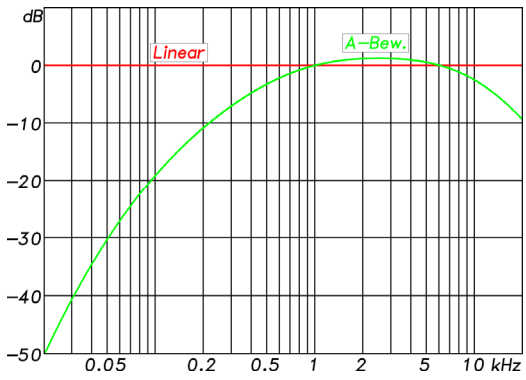
Schalldruck-pegeländerung	Leistungs-änderung um Faktor	Schalldruck- bzw. Spannungs-änderung um Faktor
+ 1 dB	1,25	1,12
+ 3 dB	2	1,41
+ 6 dB	4	2
+10 dB	10	3,13
+ 20 dB	100	10
-1 dB	0,79	0,89
- 3 dB	0,5	0,707
- 6 dB	1/4 = 0,25	0,5
- 10 dB	1/10 = 0,1	0,33
- 20 dB	1/100 = 0,01	10

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

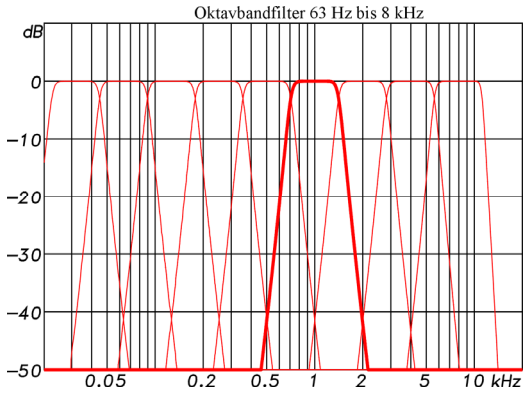
Beispiele für Pegeladdition

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

Bewertungsfilter



Oktavband Bandpassfilter



Terzband Bandpassfilter

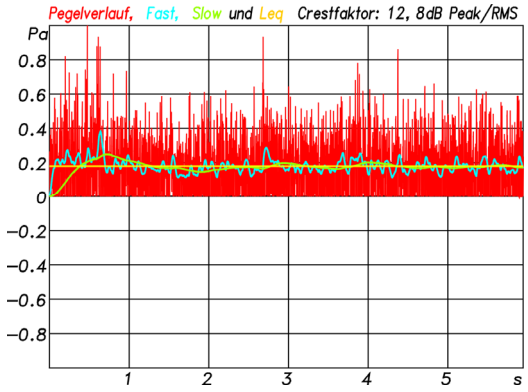
Zeitkonstante

- „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})

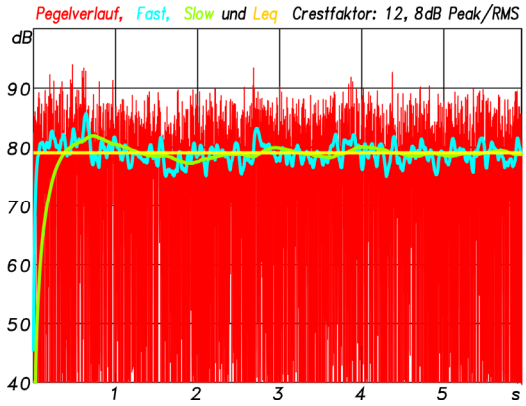
Mittelung und Perzentilpegel

- „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})
- „%“ Perzentilpegel
  - Pegel, der in der Messzeit zu x % der Messdauer erreicht oder überschritten wurde
  - Kennzeichnung (z.B. L_{A10})

Verschiedene Zeitkonstanten linear skaliert

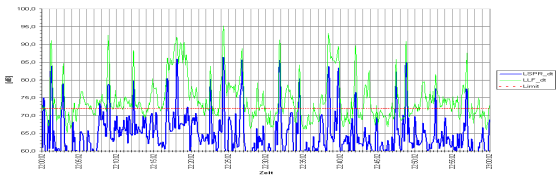


Verschiedene Zeitkonstanten in dB skaliert



Bei Pegelmessungen zu beachten

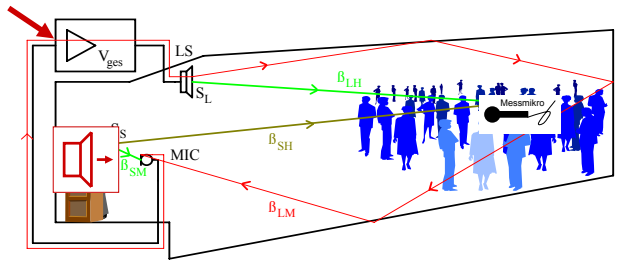
- Messdauer festlegen
- Frequenzbereich festlegen
- Frequenzanalyse festlegen (Terz / Oktav / A- oder C-bewertet)
- Messorte bestimmen
  - die Festlegung der Messorte richtet sich nach den Erfordernissen
- Falls möglich das Signal vollständig aufzeichnen



Vorgehensweise bei der STIPA Messung

1. Funktionsprüfung der Anlage
2. Signalquelle festlegen (direkte Einspeisung / Mikrofon)
3. Signalquelle auf- und einstellen
   - typ. maximale Aussteuerung bei direkter Einspeisung
   - 60 dB(A) in 1 m Entfernung bei Einspeisung über Mikrofon
4. Störgeräusch messen
   - Bei störgeräuschfreier STIPA Messung muss Störsignal in jedem Frequenzband mind. 15 dB geringer sein als Nutzsignal
   - soll STIPA mit Störgeräusch ermittelt werden, sicherstellen, dass das nominelle Störgeräusch bei der Messung vorhanden ist
5. Messraster und Anzahl der Messpunkte festlegen
   - typ. 6m x 6m, jedoch immer der Situation angemessen
6. Durchführung der notwendigen Messungen je Messposition (siehe 833-4 Anhang F.7)
7. Auswertung der Messung und Anfertigen des Messprotokolls

Genereller Messaufbau



- Messmikrophon im Publikumsbereich
- Messsignal als Line-Signal einspeisen
- Bei Sprechstellen ggf. über eine Sprechernachbildung einspeisen

1. Funktionsprüfung der Anlage

- Sprechprobe durchführen
  - Qualitativer Funktionstest der Lautsprecher
  - auf Verzerrungen o.ä. achten, die auf einen möglichen Defekt der Anlage schließen lassen
- STIPA Signal einspeisen
  - bei direkter Einspeisung Verzerrungsfreiheit bei maximaler bzw. Nennaussteuerung prüfen

2. Signalquelle wählen

- Direkte Einspeisung
  - Einspielen des Messsignals von der CD oder eines anderen Speichermediums des Messgerätes (nur das zum Messgerät zugehörige Messsignal verwenden)
- Akustische Einspeisung
  - Sprechernachbildung positionieren (Lautsprecher mit Membrandurchmesser von 10 cm)

- Mouth Simulators nach ITU-T Rec. P.51

- Vergleichbare Richtwirkung zu einem Sprecher
- Linearer Frequenzgang durch Entzerrung (±1dB 88...11300 Hz)

3. Signalquelle auf- und einstellen

- Direkte Einspeisung
  - Maximal mögliche Aussteuerung wählen, wenn diese auch im Notfallbetrieb erreicht wird
  - zwingend auf Verzerrungsfreiheit achten
  - Signalpegel in Oktavbändern messen
- Einspeisung über Lautsprecher
  - Pegel von 60 dB(A) in 1 m Entfernung bei Einspeisung über Mikrofon mit Hilfe des STIPA Signals einstellen
  - Abstand des Lautsprechers zum Mikrofon so wählen, wie er bei der Notfallwarnansage auch gewählt wird (!!)
  - Signalpegel in Oktavbändern messen

Anmerkung:
Die akustischen Randbedingungen des Senderaumes können bei indirekter Einspeisung erheblichen Einfluss auf das Gesamtergebnis der STIPA Messung haben.

4. Störgeräusch berücksichtigen / messen

Variante 1

Das nominelle Störgeräusch ist bei der STIPA Messung vorhanden

- STIPA Messung mit nominellem Störgeräusch durchführen
- Messergebnis ist direkt der endgültige STIPA Wert
- Keine späteren Änderungen oder Einzelbetrachtungen mehr möglich

Variante 2

Der nominelle Störpegel liegt in allen Frequenzbändern immer 15 dB oder mehr unter dem Signalpegel

- STIPA Messung ohne Störgeräusch durchführen
- Messergebnis ist direkt der endgültige STIPA Wert

4. Störgeräusch berücksichtigen / messen

Variante 3

Der nominelle Störpegel ist bei der Messung nicht vorhanden und liegt in einem oder mehreren Frequenzbändern weniger als 15 dB unter dem Signalpegel

- STIPA Messung ohne Störgeräusch durchführen
- Störgeräuschpegel in Messgerät oder Excel Tabelle eintragen und STI mit Störgeräusch berechnen

Variante 4

Der Störpegel ist nicht bekannt

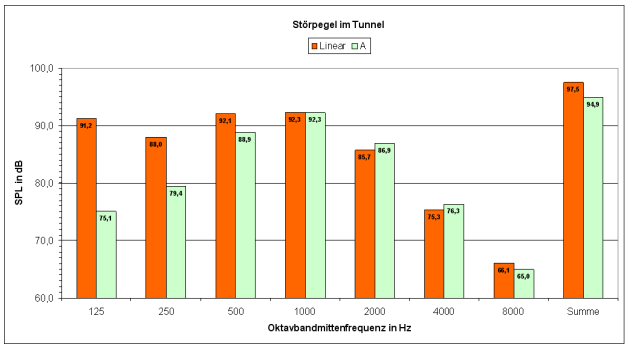
- STIPA Messung ohne Störgeräusch durchführen
- Störgeräuschpegel messen
- Frequenzabhängigen Störgeräuschpegel als L_{eq} bestimmen
- Störgeräuschpegel in Messgerät oder Excel Tabelle eintragen und STI mit Störgeräusch berechnen

Die Festlegung / Messung des Störgeräuschniveaus kann maßgeblich den erzielbaren STI bestimmen!!

4. Störgeräusch berücksichtigen / messen

4. Störgeräusch berücksichtigen / messen

Störgeräuschmessung mit Oktavbandpegel und Summenpegeln mit linearer und mit A-Bewertung



5. Messrater festlegen

- Geringe Raumgrößen < 200 m²
  - Messraster entsprechend der Problemstellung wählen (typ. 6m x 6m)
  - In Hotelzimmern o.ä. reicht meist eine Messposition aus
  - Festlegung in der Norm ist eine Hilfestellung, keine zwingende Anforderung
  - Messhöhe
    - 1,0 m -1,2 m für sitzende Personen
    - 1,5 m -1,7 m für stehende Personen
- Größere Räume
  - Messraster an die zu erwartenden räumlichen Änderungen anpassen
    - Wenn nur geringe Pegeländerungen und nur geringe Änderung der Geometrien (Sportstadien, Open-Air-Veranstaltung o.ä.) kann Messraster vergrößert werden (bis zu 25 m x 25 m).
    - Wenn starke Pegelabhängigkeiten und Änderungen der Reflexionsgeometrie vorhanden sind, muss ein kleineres Messraster gewählt werden (z.B. 4 m x 4 m).
    - Messraster in Prüfbericht angeben und ggf. begründen

6. Messdurchführung

- Aufstellung / Handhabung des Messgerätes
  - Messgerät oder Mikrophon auf Stativ setzen oder mit ausgestrecktem Arm halten
  - Das Schallfeld nicht mit dem Körper abdecken.
  - Typ. 2-3 m Abstand zum Messgerät einhalten
- Messwert nach jeder Messung kontrollieren
  - Wegen systembedingter Schwankungen der Messergebnisse
    - 3 Messungen je Position
    - maximale Abweichung > 0,03: drei weitere Messungen
    - maximale Abweichung > 0,05: Ursache suchen
    - arithmetischer Mittelwert der 3 bzw. 6 Einzelmessungen
    - 1 Messung ausreichend, wenn STI > 0,63 bei erster Messung

7. Messfehler

- Mögliche Ursachen
  - Abschattung des Mikrofons
  - Anlage läuft nicht konstant
  - Störgeräuschniveau ist nicht konstant
  - Nichtlinearitäten – und Zeitvarianzen der Anlage
  - Zeitvarianzen durch Wind oder thermische Strömungen
  - Falsches Messsignal
- Prüfung
  - Gerät auf Stativ aufstellen (nicht in der Hand halten)
  - Pegel der Anlage reduzieren und Messung testweise wiederholen
  - Messung in der unmittelbaren Nähe der Lautsprecher durchführen
    - Wenn große Abweichungen bleiben, ist die Anlage vermutlich defekt
    - Wenn Abweichungen gering, ist die Konstanz der raumakustischen Bedingungen bzw. des Störgeräusches zu prüfen

Vorführung: Messung der STI-Werte

- Messung der Modulationsverluste
  - Direkt mit Rauschsignalen (STI-PA Methode)
  - Messsignal prüfen
- Nutzsignalpegelmessung
  - Pegelmesser kalibrieren (zu Beginn und am Ende)
  - Mit einem Sprachsignal (L_{10} (Perzentilpegel) in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz)
  - Mit einem Sprachersatzsignal (L_{eq} in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz)
    - Ersatzsignal mit einer spektralen Verteilung entsprechend Sprache und ca. 14 dB Crestfaktor
- Störpegelmessung
  - Messung in Oktavbändern (lin.-bew.)
  - Als L_{eq} über einen zu definierenden Zeitraum
- Alle Messwerte zusammen verarbeiten und auswerten