



**Magisterarbeit**

# **Hörbarkeit und klangliche Bewertung der nichtlinearen Verzerrungen von Kondensatormikrofonen**

Tobias Werner  
[toby\\_werny@gmx.de](mailto:toby_werny@gmx.de)  
Matrikelnr. 301949

Berlin, den 16. März 2010

Erstgutachter: Prof. Dr. Stefan Weinzierl  
Zweitgutachter: Dipl.-Ing. Martin Schneider

Die selbstständige und eigenständige Anfertigung dieser Arbeit versichere ich an Eides statt.

Berlin, den 16. März 2010

*Tobias Werner*

Dieses Werk ist unter einer Creative-Commons-Lizenz lizenziert:

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1	Nichtlineare Verzerrungen . . . . .	5
1.2	Nicht untersuchte Einflüsse . . . . .	6
1.3	Auswahl der Schaltungen . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Messungen</b>	<b>9</b>
2.1	Aufbau . . . . .	10
2.2	Amplitude und Phase . . . . .	12
2.3	Rauschen . . . . .	14
2.4	Nichtlineare Verzerrungen . . . . .	15
2.4.1	Klirrfaktor . . . . .	15
2.4.2	Intermodulation . . . . .	19
2.4.3	Psychoakustische Maße . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Hörversuche</b>	<b>29</b>
3.1	Aufnahme der Audiodateien . . . . .	29
3.2	Versuchsaufbau . . . . .	30
3.3	Hörbarkeit . . . . .	31
3.3.1	Stimuli . . . . .	31
3.3.2	Schwellwertmessung . . . . .	33
3.4	Klangliche Bewertung . . . . .	39
3.4.1	Stimuli . . . . .	39
3.4.2	Repertory Grid-Technik . . . . .	39
3.4.3	Semantisches Differential . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>59</b>
	<b>Literatur</b>	<b>61</b>
	Normen und Empfehlungen . . . . .	63
	Software und Audiomaterial . . . . .	63
	<b>Verzeichnisse</b>	<b>65</b>
	Abbildungen . . . . .	65
	Tabellen . . . . .	66
<b>A</b>	<b>Kurzschlussmessung</b>	<b>67</b>
<b>B</b>	<b>Quelltext</b>	<b>69</b>



# 1 Einleitung

Unterschiedlichen Mikrofonhaltungen weisen einen weitgehend konstanten Amplitudenfrequenzgang auf. Sie unterscheiden sich aber in Art und Ausmaß der nichtlinearen Verzerrungen. Besonders in nicht-wissenschaftlichen Quellen werden bestimmten Schaltungstypen spezielle klangliche Eigenschaften zugesprochen. So wird z.B. Röhrenhaltungen eine angebliche *Wärme* nachgesagt. In dieser Arbeit wird die klangliche Bewertung unterschiedlicher Schaltungstypen anhand von sechs bestehenden Mikrofonhaltungen untersucht. Neben der messtechnischen Dokumentation werden in einem Hörversuch Schwellwerte für die Hörbarkeit der nichtlinearen Verzerrungen bestimmt. Anschließend werden in zwei weiteren Hörversuchen klangliche Merkmale ermittelt und die Schaltungen anhand dieser Merkmale beurteilt.

## 1.1 Nichtlineare Verzerrungen

Eine nichtlineare Kennlinie des Übertragungssystems lässt zusätzliche Frequenzen im Ausgangssignal entstehen. Die Kennlinie stellt die Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Eingangsspannung grafisch dar. Bei der Speisung mit einem einzelnen Sinuston treten nur bei ganzzahligen Vielfachen seiner Frequenz zusätzliche Töne auf. Diese Verzerrungen werden harmonische Verzerrungen genannt. Zu Intermodulationsverzerrungen kommt es bei der Speisung mit mehreren Sinustönen. Die zusätzlichen Töne treten bei ganzzahligen Linearkombinationen der Eingangsfrequenzen auf. Sie stehen dann nicht mehr nur in einem harmonischen Verhältnis zum Eingangssignal (Müller 2008, S. 1143-1146). Bei tatsächlichen Audiosignalen lässt sich das Eingangssignal als eine Kombination von vielen Sinustönen verstehen. Die dann auftretenden Verzerrungsprodukte sind eine komplexe Zusammensetzung aus harmonischen und nichtharmonischen Bestandteilen.

Die Ursachen nichtlinearer Verzerrungen in analogen elektronischen Schaltungen sind in Tabelle 1.1 aufgelistet (Cabot 1992; Müller 2008, S. 1145). Sie lassen sich in zwei Gruppen unterteilen. Statische Verzerrungen ändern sich nicht mit der Frequenz des Eingangssignals. Dynamische Verzerrungen sind frequenzabhängig und können zunehmend bei tiefen oder hohen Frequenzen auftreten.

statisch	dynamisch (frequenzabhängig)	
	zunehmend bei tiefen Frequenzen	zunehmend bei hohen Frequenzen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nichtlinearitäten in der Eingangsstufe</li> <li>• Nulldurchgangs-, Übernahmeverzerrungen (<i>crossover distortion</i>) im Gegentaktbetrieb</li> <li>• Unsymmetrie in komplementären Ausgangsstufen</li> <li>• Gleichrichtereffekte durch Oxidschichten (Sockel, Lötstellen, Steckverbindungen)</li> <li>• nichtlineare Eingangskennlinie von Differenzverstärkern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• thermische Verzerrung</li> <li>• ungenügende Unterdrückung von Schwankungen der Versorgungsspannung</li> <li>• Sättigung des Ausgangsübertragers</li> <li>• spannungsabhängige Kapazität oder ungenügend vorgespannte (gepolte) Kondensatoren</li> <li>• temperaturabhängige Widerstandsänderung in Sicherungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einkopplung von nichtlinearen Strömen in gemeinsame Masseführung</li> <li>• nichtlineare Kapazität zwischen Kollektor und Basis bei Transistoren</li> <li>• begrenzte Leerlaufverstärkung und Schnelligkeit der Gegenkopplung</li> <li>• kapazitives Übersprechen von nichtlinearen Schaltungsbestandteilen</li> <li>• HF-Schwingungsneigung bei bestimmten Amplituden und/oder Lastfällen</li> <li>• Ladungsspeicherung</li> </ul>

Tabelle 1.1: Ursachen nichtlinearer Verzerrungen in analogen elektronischen Schaltungen

## 1.2 Nicht untersuchte Einflüsse

Pastillé (2001) untersuchte in seiner Dissertation »die Nichtlinearitäten am Kondensatormikrofon unter besonderer Berücksichtigung der Membran«. Nach seinen Ergebnissen ist der Einfluss der Membranverzerrungen auf den Klirrfaktor gering. Einen größeren Einfluss haben bei den untersuchten Mikrofonen der Hohlraum zwischen Membran und Gegenelektrode und das Volumen hinter der Gegenelektrode. Das Zuschalten einer Parallelkapazität als Übersteuerungsschutz für den Impedanzwandler (*Pad*- oder  $-10$  dB-Schalter) erhöhe die nichtlinearen Verzerrungen. Der Einfluss wird als sehr groß bezeichnet.

Akustische Verzerrungen können durch die rein elektrische Messung (Abschnitt 2.1) in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden. Alle Schaltungen wurden hier ohne den Einfluss des  $-10$  dB-Schalters untersucht. Auch der Einfluss der oft vorhandenen Möglichkeit einer Tiefenabsenkung wurde nicht untersucht.

### 1.3 Auswahl der Schaltungen

Die technischen Merkmale der untersuchten Mikrofon-schaltungen sind in Tabelle 1.2 aufgelistet. Die Schaltungen stammen aus tatsächlich vorhandenen Mikrofonen und wurden von der GEORG NEUMANN GMBH zur Verfügung gestellt. Es handelt sich fast ausschließlich um Großmembranmikrofone, die alle die gleiche Kapsel verwenden. Dadurch bleibt der Einfluss der Kapsel abgesehen von konstruktiven Unterschieden konstant. Eine Ausnahme ist das Kleinmembranmikrofon KM 84. Es wurde als Vertreter einer frühen Generation von Halbleiterschaltungen ausgewählt. Bis auf die Verwendung eines Feldeffekttransistors (FET) an Stelle der Röhre ist es einer Röhrenschaltung sehr ähnlich aufgebaut.

Typ	Verstärkung		Ausgang			Netzteil	Einspeisung	Seriennr.
	Röhre	FET	Übertrager	OpV	diskret			
U 47	VF 14		BV 8			NG 1	MA 47	508
M 147 <sup>a</sup>	(6 S)			×		N 149	direkt	38
TLM 49		× <sup>b</sup>		×		N 451	direkt	61
U 47 <sub>FET</sub>		×	BV 331			N 451	MA 47 <sub>FET</sub>	2 312
TLM 147		×			×	N 451	direkt	10 590
KM 84		×	BV 107			N 451	MA 84	34 543

<sup>a</sup> Gemessen wurde die identische Schaltung M 150.

<sup>b</sup> zusätzliche Nichtlinearität

Tabelle 1.2: Untersuchte Mikrofon-schaltungen





## 2 Messungen

Die Messungen sollen die linearen und nichtlinearen Eigenschaften der sechs Schaltungen dokumentieren. Sie wurden maßgeblich nach [DIN EN 60268-3 \(2001\)](#) vorgenommen. Die linearen (und zeitinvarianten) Eigenschaften können mit der Messung einer Impulsantwort vollständig beschrieben werden ([Müller 2008](#), S. 1094). Für die präzise Beschreibung der nichtlinearen Eigenschaften müssen deutlich mehr Messungen durchgeführt werden ([Czerwinski u. a. 2000](#), S. 1011). Dort findet sich auch eine ausführliche, historische Auflistung von Messverfahren für nichtlineare Verzerrungen.

[Cabot \(1992\)](#) vergleicht die Eigenschaften unterschiedlicher Messverfahren anhand von exemplarischen Testschaltungen. Er kommt zu dem Ergebnis, dass die Klirrfaktormessung über Frequenz und Amplitude bei der detaillierten technischen Beschreibung sehr flexibel und nützlich sei. Der Modulationsfaktor (SMPTE) sei besonders bei der Messung statischer Nichtlinearitäten nützlich. Bei der Messung dynamischer Nichtlinearitäten sei der Differenztonfaktor (CCIF) zweiter und dritter Ordnung sehr flexibel. Er bemerkt außerdem, dass die Messung der Dynamischen Intermodulation (DIM) nicht nur für transiente oder dynamische Verzerrungen empfindlich sei.

[Voishvillo \(2007\)](#) vergleicht die Messungen nichtlinearer Verzerrungen mit der Wahrnehmung. Er führt die Diskrepanz zwischen konventionellen Maßen und der subjektiven Klangqualität auf die Komplexität nichtlinearer Systeme, des menschlichen Hörvorgangs und musikalischer Signale zurück. Er schlägt außerdem eine Klassifikation der unterschiedlichen Ansätze zur Erfassung von Nichtlinearitäten vor. Zur ersten Gruppe gehören Verfahren, die ein nichtlineares dynamisches Modell des Gerätes erstellen (*nonlinear identification*). Daraus kann die Reaktion auf ein beliebiges Eingangssignal simuliert werden ([Klippel 2001](#)). Die zweite Gruppe umfasst Verfahren, die bestimmte Anzeichen der Nichtlinearitäten erfassen. Dazu gehören alle konventionellen Maße (Klirr-, Modulations-, Differenztonfaktor, DIM, ...). Zur dritten Gruppe gehören Verfahren, die auf psychoakustischen Modellen basieren und versuchen die Wahrnehmung der Nichtlinearitäten zu beschreiben. Dazu zählen z.B. *GedLee*, *Distortion Score* oder  $R_{\text{nonlin}}$  (Abschnitt 2.4.3).

Die Bezugsgröße ist bei allen Messungen der Spannungspegel am Eingang der Schaltung. Er lässt sich mit dem Übertragungsfaktor  $M_0$  der Kapsel in einen entsprechenden Schalldruckpegel umrechnen.

$$L [\text{dB}_{\text{SPL}}] = 20 \lg \frac{U_0 \cdot 10^{\frac{L[\text{dBu}]}{20}}}{M_0 p_0} \quad (2.1)$$

$$\text{mit } U_0 = 0,775 \text{ V}$$

$$M_0 = 18 \cdot 10^{-3} \text{ V/Pa}$$

$$p_0 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$$

Zum Vergleich ist deshalb bei den meisten Abbildungen zusätzlich zum Spannungspegel auch der berechnete Schalldruckpegel angegeben. Der entsprechende Schalldruckpegel des KM 84 wurde ebenfalls mit dem Übertragungsfaktor der Großmembrankapsel berechnet.

## 2.1 Aufbau

Der schematische Aufbau der Messung ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Messgerät war das analoge und digitale Messsystem AUDIO PRECISION SYS 2722.

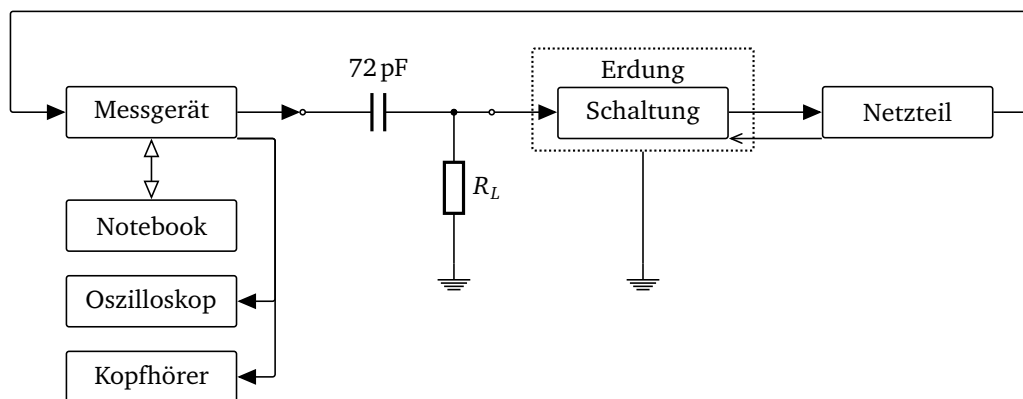


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau der Messung

Das Messsignal (BNC, unsymmetrisch) wurde elektrisch in die Mikrofonschaltungen eingespeist. Das geschah entweder über den entsprechenden Messadapter oder eine Ersatzkapazität von 72 pF. Das Ausgangssignal der Schaltung lag am analogen, symmetrischen XLR-Eingang des Messgeräts an. Der Innenwiderstand des Messgeräts betrug  $20 \Omega$ , der Abschlusswiderstand  $100 \text{ k}\Omega$ . Die Spannungsversorgung erfolgte für die Halbleiterschaltungen über das

Phantomspannungsnetzteil N 451. Es hat im Signalweg lediglich zwei  $6,8\text{ k}\Omega$  Widerstände. Dadurch können Beeinflussungen der Messung minimiert werden. Die Röhrenschaltungen wurden durch das entsprechende Netzteil versorgt. Die Schaltungen ohne Messadapter hingen während der Messung in einer geerdeten und akustisch isolierten Kammer. Zur akustischen und optischen Kontrolle wurde ein Kopfhörer beziehungsweise ein Oszilloskop verwendet. Alle Messungen wurden auch für das Messgerät selber durchgeführt (Kurzschlussmessung). Die Ergebnisse sind im Anhang A zu finden.

## 2.2 Amplitude und Phase

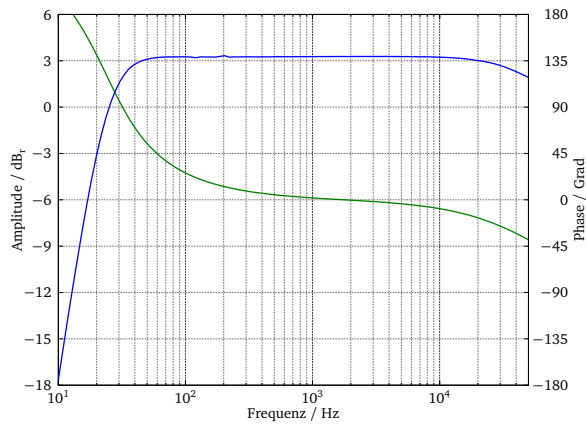
Der Amplituden- und Phasenfrequenzgang wurde zwischen 10 Hz und 50 kHz an 100 Stützpunkten gemessen. Die Stützpunkte haben logarithmischen Abstand. In Abbildung 2.2 sind die gemessenen Frequenzgänge dargestellt. Um die unterschiedliche Verstärkung der Schaltungen deutlich zu machen, wurde auf eine Normierung der Amplitudenfrequenzgänge verzichtet. Der Darstellungsbereich des Phasenfrequenzgangs ist bei invertierenden Schaltungen (Abb. 2.2b, c und e) um  $180^\circ$  verschoben, um die Vergleichbarkeit zu verbessern.

Typ	Minimum		Maximum	
	20 Hz < $f$	100 Hz < $f$	20 Hz < $f$	100 Hz < $f$
U 47	-6,1	-0,2	0,4	0,1
M 147	-0,7	-0,0	0,1	0,0
TLM 49	-0,5	-0,4	1,1	0,4
U 47 FET	-5,4	-1,0	1,1	0,4
TLM 147	-0,6	-0,0	0,2	0,1
KM 84	-0,3	-0,1	0,1	0,1

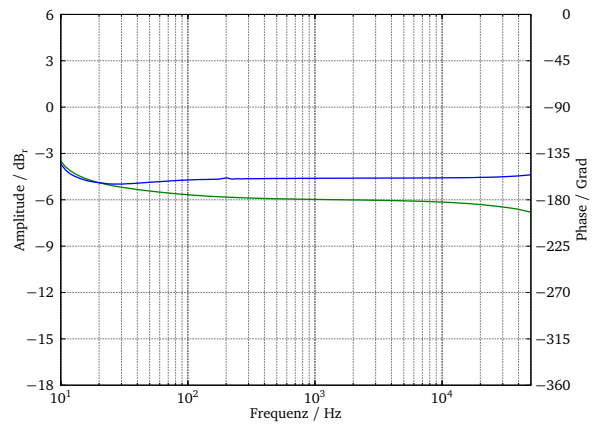
Tabelle 2.1: Minimale und maximale Abweichung der Amplitudenfrequenzgänge in dB

Um das Ausmaß der linearen Verzerrungen zu bestimmen, wurde der Bereich der Abweichungen vom Mittelwert aus dem Amplitudenfrequenzgang bestimmt. Die größten negativen und positiven Abweichungen zwischen 20 bzw. 100 Hz und 20 kHz vom entsprechenden Mittelwert sind in Tabelle 2.1 zu finden. Die größten Abweichungen liegen bei tiefen Frequenzen. Bei der Betrachtung ab 20 Hz sind die negativen Abweichungen der beiden älteren Schaltungen U 47 und U 47 FET bei tiefen Frequenzen deutlich größer als bei den anderen Schaltungen. Die größten positiven Abweichungen gibt es bei dem U 47 FET und TLM 49. Wenn nur der Frequenzbereich ab 100 Hz betrachtet wird, liegen die Abweichungen bei allen Schaltungen zwischen  $-1,0$  und  $0,4$  dB. Bis auf die relativ schmalbandige Anhebung bei 25 Hz des TLM 49 sind sie alle breitbandig.

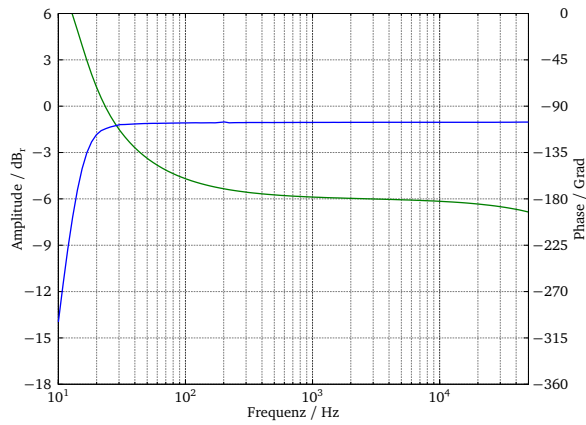
Der Phasenfrequenzgang steigt bei allen Schaltungen zu tiefen Frequenzen an. Das Ausmaß des Anstiegs kann vermutlich auf die unterschiedliche Ausprägung der Hochpasscharakteristik bei den Schaltungen zurückgeführt werden.



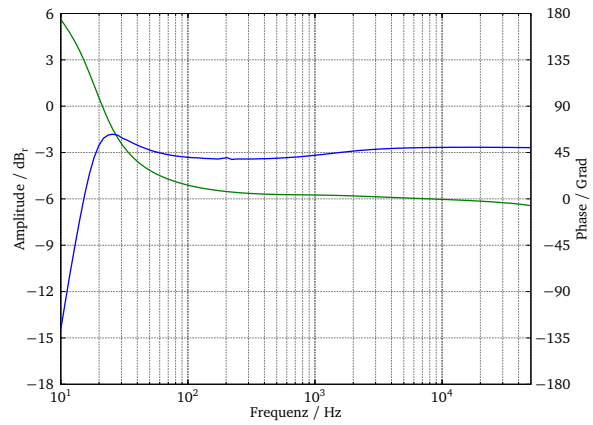
(a) U 47



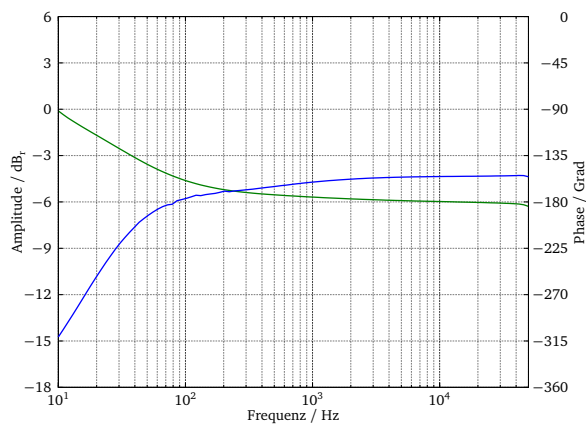
(b) KM 84



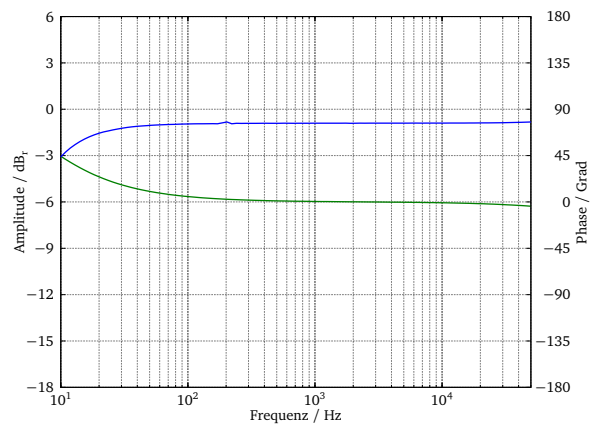
(c) M 147



(d) TLM 49



(e) U 47 FET



(f) TLM 147

Abbildung 2.2: Amplituden- und Phasenfrequenzgang

## 2.3 Rauschen

Das Rauschen der Schaltungen wurde absolut und ohne Eingangssignal gemessen. Das geschah entweder über den Widerstand im Messadapter (U 47, U 47<sub>FET</sub> und KM 84) oder mit kurzgeschlossenen Schaltungseingang. Der Abschlusswiderstand parallel zu den 100 k $\Omega$  des Messeingangs betrug 1 k $\Omega$ . Die Analysebandbreite lag zwischen 22 Hz und 22 kHz. Unbewertete und nach ITU-R 468 bewertete Messungen sind Quasi-Spitzenwerte, A-bewertete Effektivwerte. Zu den absolut gemessenen Pegeln wurde die Verstärkung bzw. Dämpfung der Schaltungen addiert, um die Vergleichbarkeit zu verbessern. In Tabelle 2.2 sind die Geräuschspannungspegel in dBu und daraus berechnete Ersatzgeräuschpegel in dB<sub>SPL</sub> zu finden.

Typ	unbewertet		ITU-R 468		A (RMS)	
	dBu	dB <sub>SPL</sub>	dBu	dB <sub>SPL</sub>	dBu	dB <sub>SPL</sub>
U 47	-96,0	30,6	-101,7	24,9	-113,3	13,4
M 147	-101,1	25,6	-100,4	26,2	-112,4	14,3
TLM 49	-105,2	21,4	-103,4	23,3	-115,7	11,0
U 47 <sub>FET</sub>	-101,8	24,9	-98,7	28,0	-110,5	16,1
TLM 147	-101,2	25,4	-100,6	26,1	-112,5	14,1
KM 84	-96,5	30,2 <sup>a</sup>	-100,1	26,5 <sup>a</sup>	-110,9	15,8 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> ebenfalls mit dem Übertragungsfaktor der Großmembrankapsel berechnet

Tabelle 2.2: Geräuschspannungs- und berechneter Ersatzgeräuschpegel

Die Unterschiede zwischen den Schaltungen sind insgesamt gering. Bei den unbewerteten Messungen rauschen die Schaltungen U 47 und KM 84 am stärksten. Die Unterschiede sind hier noch am größten. Bei den nach ITU-R 468 bewerteten Messungen rauscht das U 47<sub>FET</sub>, bei den A-bewerteten Messungen das U 47<sub>FET</sub> und KM 84 am stärksten. Das Rauschen des TLM 49 ist bei allen Messungen am geringsten.

## 2.4 Nichtlineare Verzerrungen

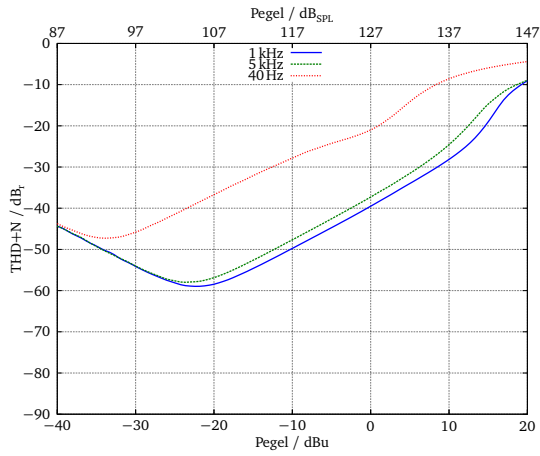
### 2.4.1 Klirrfaktor

Der Gesamtklirrfaktor der Schaltungen wurde analog als THD+N (*Total Harmonic Distortion + Noise*) gemessen. Dabei wird ein Sinussignal in die Schaltung eingespeist und das Ausgangssignal gemessen. Das Eingangssignal wird aus dem Ausgangssignal herausgefiltert. THD+N ist dann das Verhältnis von gefiltertem Ausgangssignal (einschließlich Rauschen) zum Eingangssignal. Im Gegensatz zum Klirrfaktor (THD) berücksichtigt diese Messung die viel eher wahrnehmbaren breitbandigen Störgeräusche und sei mittlerweile gebräuchlicher (Müller 2008, S. 1146). Die Analysebandbreite wurde nicht eingeschränkt (z.B. auf 20 Hz bis 20 kHz). Dadurch fließen auch Verzerrungen und Rauschen außerhalb des Audibereichs in die Messung ein. Ein Vergleich zwischen den Schaltungen sollte trotzdem möglich sein.

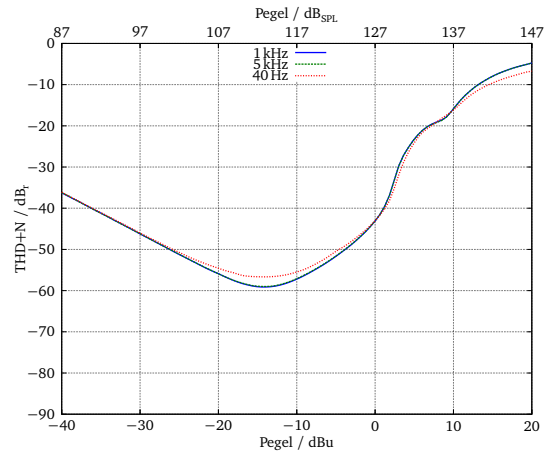
Der Gesamtklirrfaktor als Funktion der Amplitude wurde bei Eingangspegeln zwischen  $-40$  und  $20$  dBu in 1 dB-Schritten gemessen. Die Eingangssignale hatten Frequenzen von 40 Hz, 1 bzw. 5 kHz. Die Kurven sind in Abbildung 2.3 dargestellt. Der Klirrfaktor zweiter bis fünfter Ordnung  $k_{2-5}$  wurde absolut und ebenfalls bei Eingangspegeln zwischen  $-40$  und  $20$  dBu gemessen. Das Eingangssignal hatte eine Frequenz von 1 kHz. Dabei wurde die jeweilige Klirrkompone mit einem Bandpass ermittelt, der nur die entsprechende Oberwelle durchlässt. Nachträglich wurden die absoluten Werte durch den Bezug auf das Eingangssignal in einen relativen Wert umgerechnet. Damit sollen alle drei Klirrfaktormessungen vergleichbar sein. Die Kurven sind in Abbildung 2.4 dargestellt. Der Gesamtklirrfaktor als Funktion der Frequenz wurde bei Frequenzen zwischen 10 Hz und 25 kHz und drei Eingangspegeln ( $-10$ , 0 bzw.  $10$  dBu) gemessen. Das Eingangssignal wurde durch einen gleitenden Bandpass unterdrückt. Bei drei Schaltungen wurde zusätzlich bei einem Eingangspegel von  $-20$  dBu gemessen. Die Kurven sind in Abbildung 2.5 dargestellt.

Der Verlauf des Klirrfaktors unterscheidet sich zwischen den Schaltungen deutlich. Während er bei U 47 FET und TLM 147 mit steigendem Eingangspegel ab der Clippinggrenze sprunghaft ansteigt, ist der Anstieg bei den anderen vier Schaltungen stetig. Auffällig ist beim TLM 147 der Anstieg ab  $-9$  dBu, der hauptsächlich durch den  $k_2$  bestimmt ist. Bis zu einem lokalen Minimum sinkt der Klirrfaktor mit zunehmendem Pegel. In diesem Bereich wird die Messung durch Rauschen der Schaltung bestimmt. Bei den Schaltungen mit Ausgangsübertrager kann ein Anstieg des Klirrfaktors zu tiefen Frequenzen beobachtet werden. Dabei ist aber zu beachten, dass die Amplitude des Eingangssignals als Bezugsgröße bei tiefen Frequenzen abfällt. Das führt bei der relativen Angabe zu scheinbar höheren Werten.

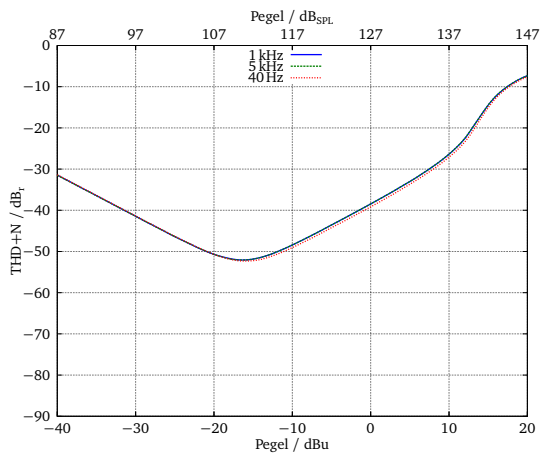
## 2 Messungen



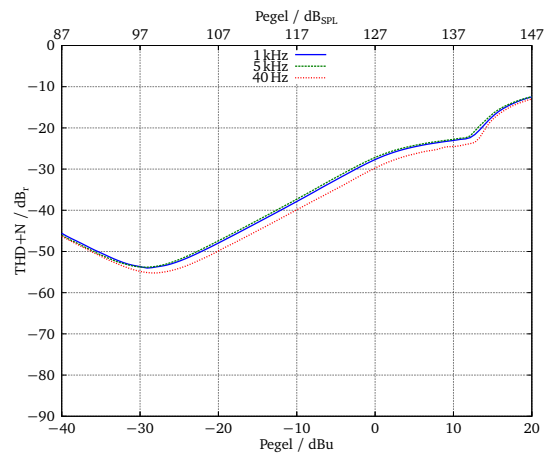
(a) U 47



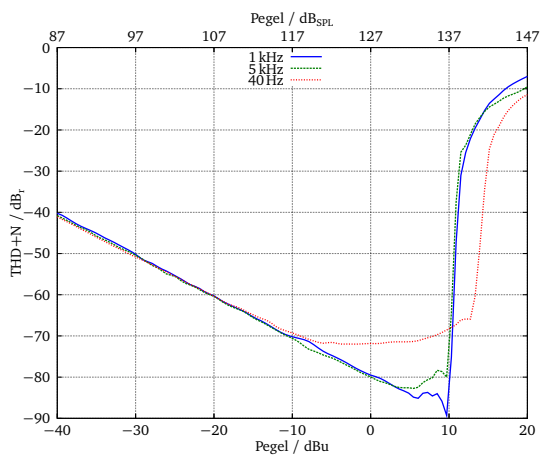
(b) KM 84



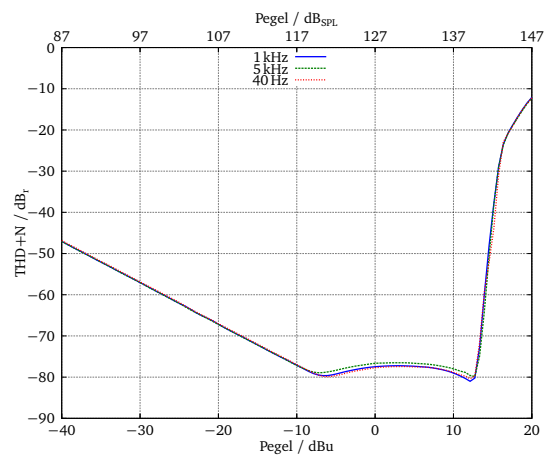
(c) M 147



(d) TLM 49



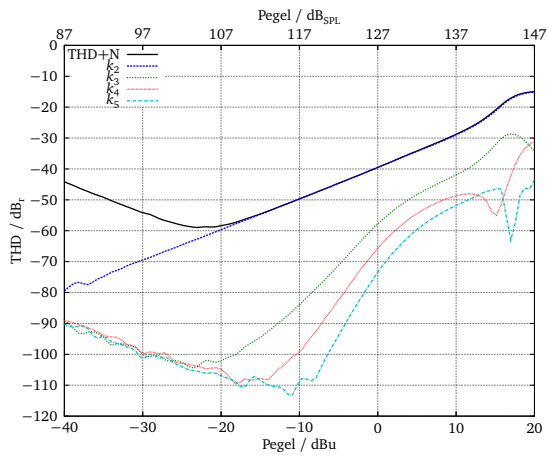
(e) U 47 FET



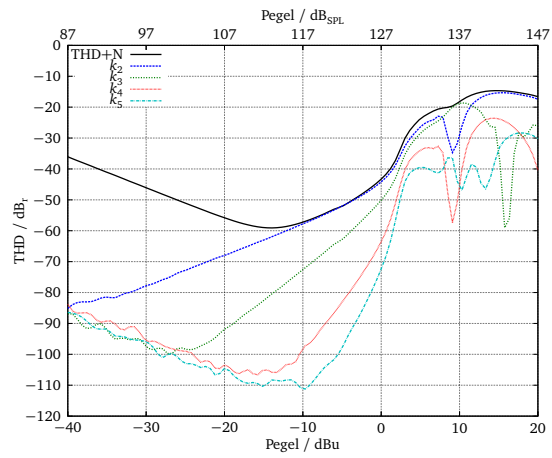
(f) TLM 147

Abbildung 2.3: Gesamtklirrfaktor als Funktion des Eingangspegels bei drei Frequenzen

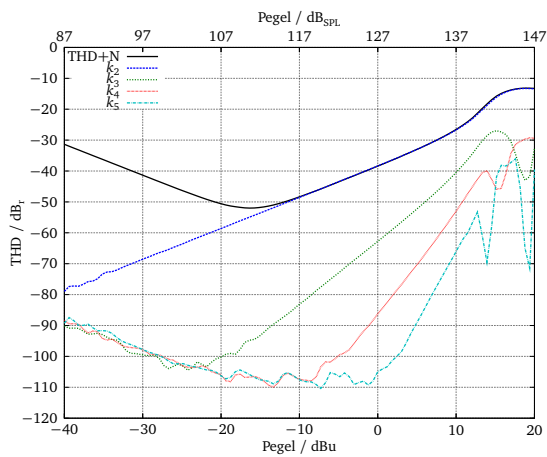




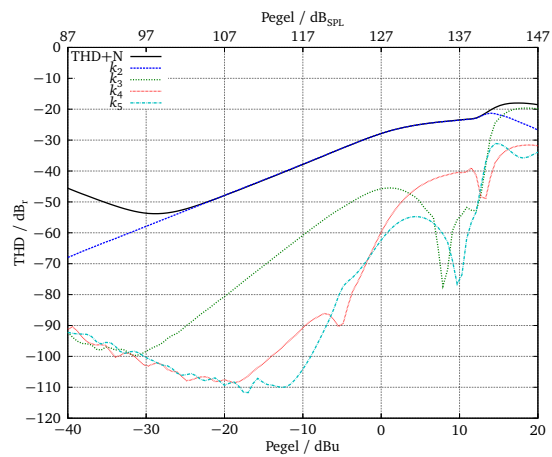
(a) U 47



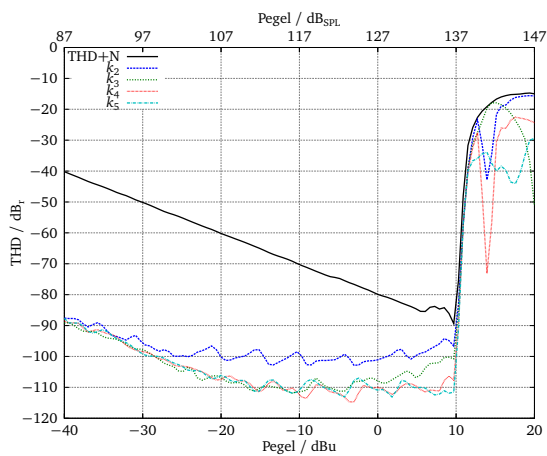
(b) KM 84



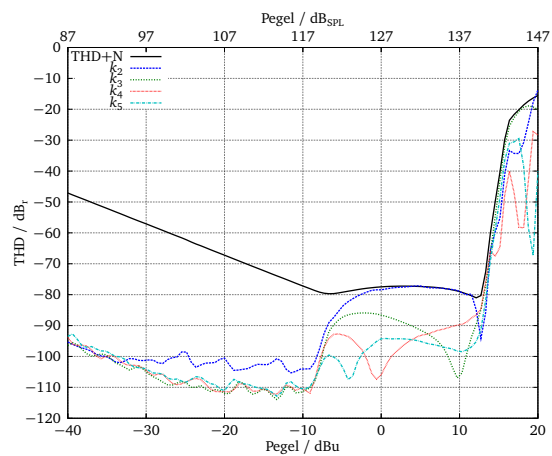
(c) M 147



(d) TLM 49



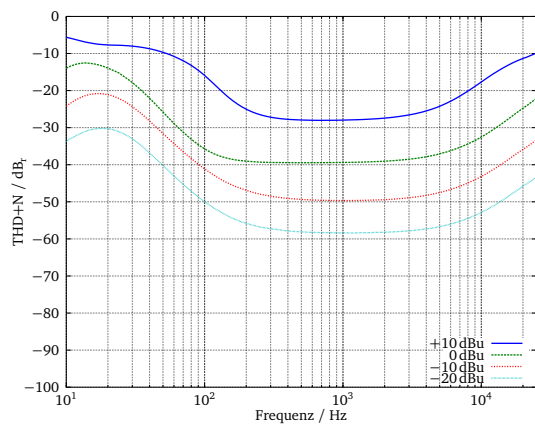
(e) U 47 FET



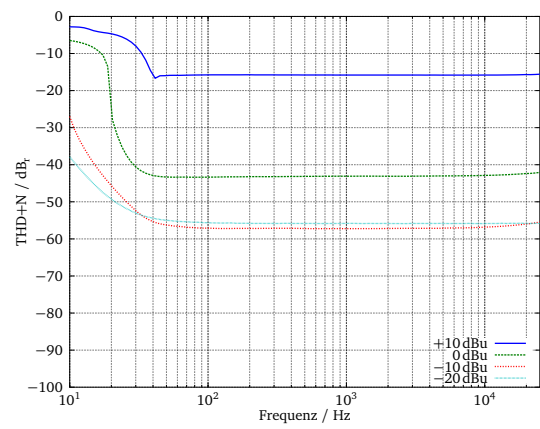
(f) TLM 147

Abbildung 2.4: Gesamtklirrfaktor und Klirrfaktor zweiter bis fünfter Ordnung als Funktion des Eingangspegels bei 1 kHz

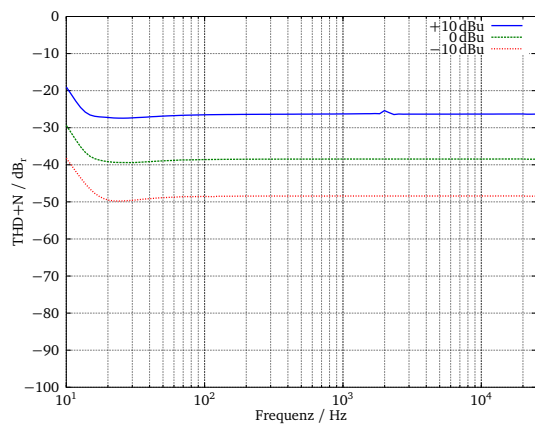
## 2 Messungen



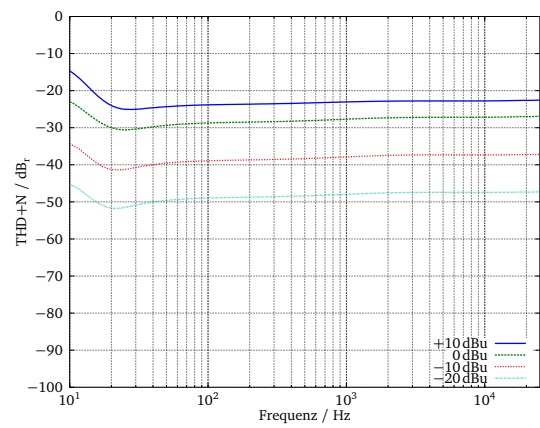
(a) U 47



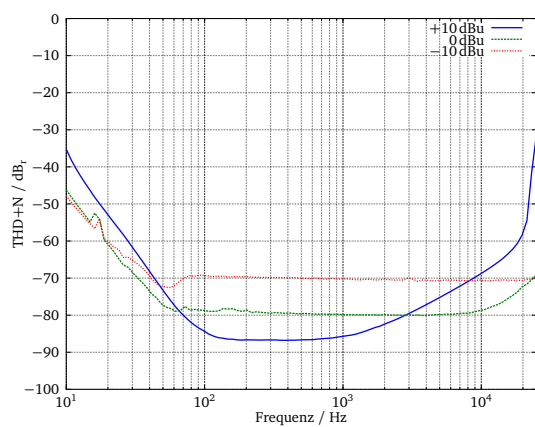
(b) KM 84



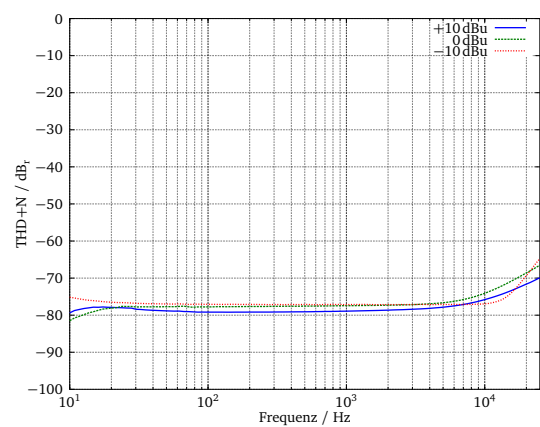
(c) M 147



(d) TLM 49



(e) U 47 FET



(f) TLM 147

Abbildung 2.5: Gesamtklirrfaktor als Funktion der Frequenz bei verschiedenen Eingangspegeln

### 2.4.2 Intermodulation

Zur Messung der Intermodulationsverzerrungen wurden drei übliche Messverfahren eingesetzt. Der Gesamtmodulationsfaktor wurde bei Eingangspegeln zwischen  $-40$  und  $20$  dBu in  $1$  dB-Schritten gemessen. Dazu werden zwei Sinustöne im Amplitudenverhältnis  $4 : 1$  in die Schaltung eingespeist. Die Frequenzen sollen nach [DIN EN 60268-3 \(2001\)](#)  $0,5$  bis  $1,5$  Oktaven oberhalb der unteren und unterhalb der oberen Übertragungsgrenze liegen. Hier wurden Frequenzen von  $40$  Hz und  $8$  kHz verwendet. Ausgewertet werden die Summen- und Differenzöne, die sich um die höhere Frequenz gruppieren. Sie werden auf die Amplitude des schwächeren Eingangssignals bezogen. Die Kurven sind in [Abbildung 2.6](#) dargestellt.

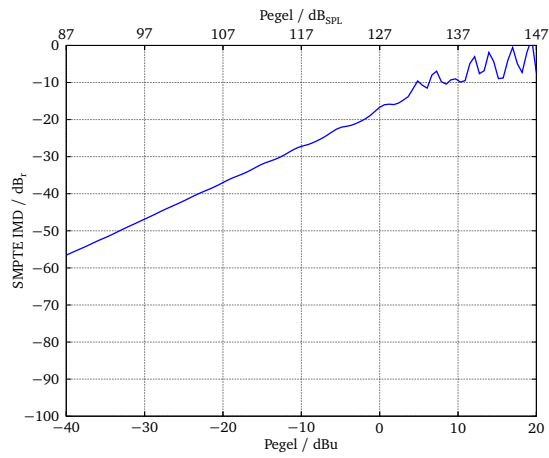
Bei der Messung des Differenztonfaktors werden zwei Sinustöne im Amplitudenverhältnis  $1 : 1$  in die Schaltung eingespeist. Der Frequenzabstand beträgt  $80$  Hz. Dafür wurde das digital erzeugte Eingangssignal für drei Mittenfrequenzen und je vier Pegel in die Schaltung eingespeist. Für die Mittenfrequenzen wurden drei hohe Frequenzen ausgewählt, weil das Verfahren dafür besonders geeignet sein soll. Die Messwerte werden auf die Summe der beiden Eingangsamplituden bezogen. Das Messgerät konnte ohne eine fehlende Hardware-Option keine analoge Differenzton- und DIM-Messung durchführen. Deshalb wurde das Ausgangsspektrum viermal als FFT (*fast Fourier transform*) gemessen und anschließend gemittelt. Die Werte wurden mit GNU OCTAVE<sup>1</sup> berechnet. Die Ergebnisse für den Differenztonfaktor zweiter und dritter Ordnung sind in [Abbildung 2.7](#) dargestellt.

Bei der Messung der Dynamischen Intermodulation (DIM) wird ein Rechteck- und ein Sinussignal in die Schaltung eingespeist. Ursprünglich wurde dieses Verfahren entwickelt um Verzerrungen durch die maximale Steilheit des Ausgangssignal (*slew rate*) einer Schaltung zu messen ([Müller 2008](#), S. 1165–1166). Das Rechtecksignal hat eine Frequenz von  $3,15$  kHz, das Sinussignal  $15$  kHz. Das Amplitudenverhältnis beträgt  $4 : 1$ . Beide Signale werden summiert und tiefpassgefiltert. Nach [Cabot \(1992, S. 58\)](#) ist ein Tiefpass bei  $30$  kHz (DIM30) realistischer und wurde deshalb hier verwendet. Ausgewertet werden neun Intermodulationskomponenten, die in das Audiospektrum fallen. Sie werden auf die Amplitude des Sinussignals bezogen. Das digital erzeugte Eingangssignal wurde für vier Pegel in die Schaltung eingespeist und das Ausgangsspektrum viermal als FFT gemessen und anschließend gemittelt. Die Werte wurden mit GNU OCTAVE berechnet. Sie sind in [Abbildung 2.8](#) dargestellt.

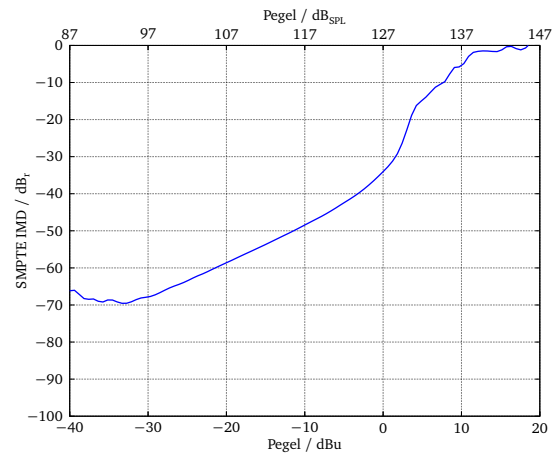
---

<sup>1</sup>Eaton u. a. (2008)

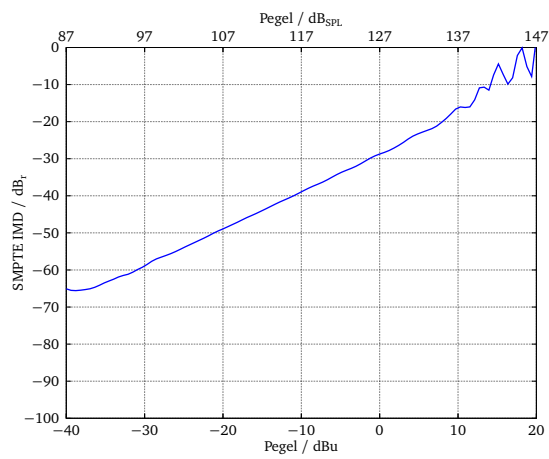
## 2 Messungen



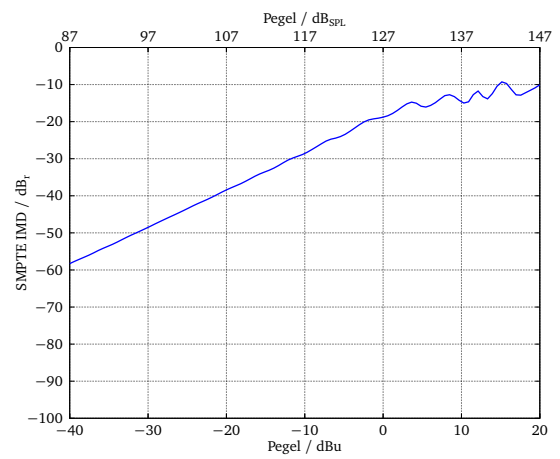
(a) U 47



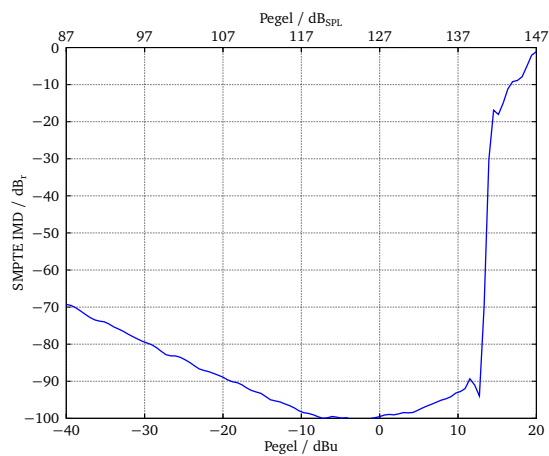
(b) KM 84



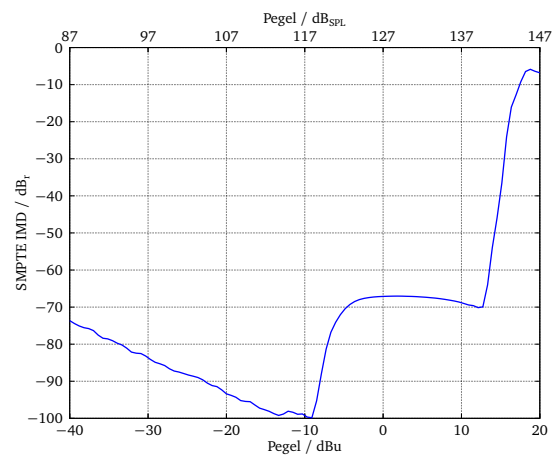
(c) M 147



(d) TLM 49



(e) U 47 FET



(f) TLM 147

Abbildung 2.6: Gesamtmodulationsfaktor als Funktion des Eingangspegels

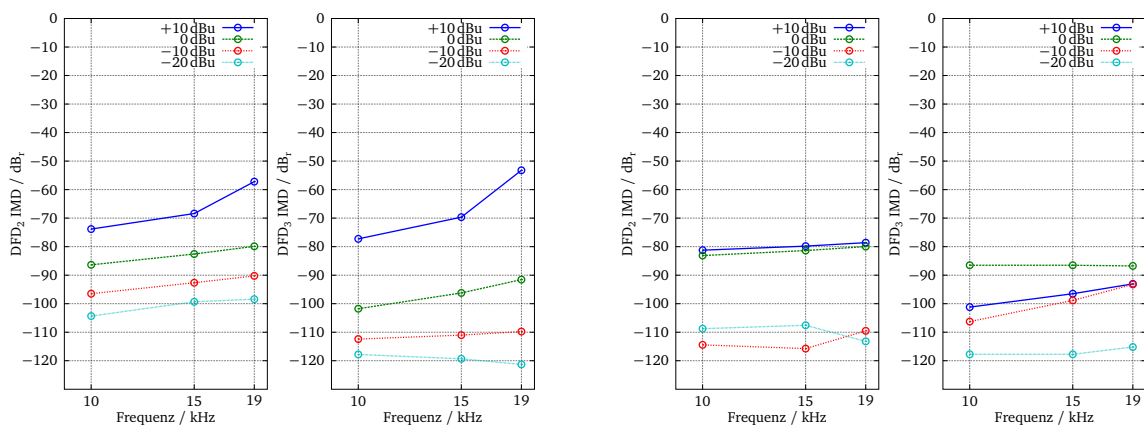
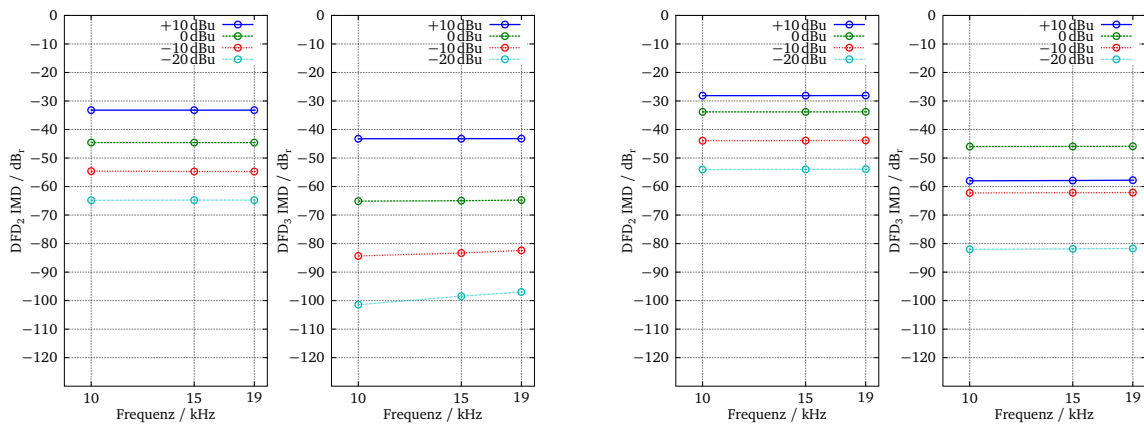
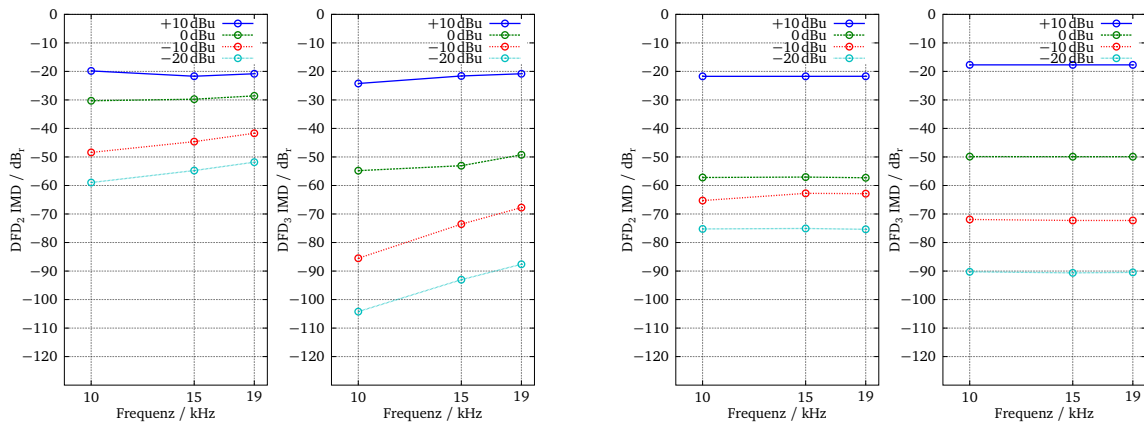


Abbildung 2.7: Differenztonfaktor zweiter (links) und dritter Ordnung (rechts) bei drei Mittenfrequenzen und vier Eingangspegeln

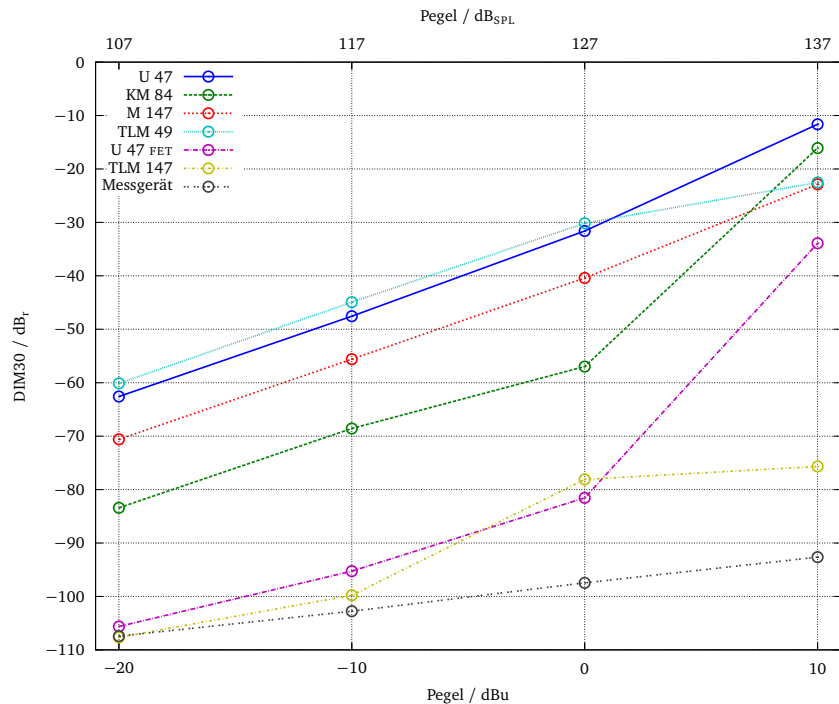


Abbildung 2.8: DIM30 für alle Schaltungen bei vier Eingangspegeln

Der Verlauf des Modulationsfaktors ist dem des Klirrfaktors sehr ähnlich. Die Werte sind aber durch den Bezug auf das schwächere Eingangssignal in der Regel mehr als 10 dB größer (Müller 2008, S. 1163). Unter der Annahme idealisierter Bedingungen lassen sich Klirr-, Modulations- und Differenztonfaktor ineinander umrechnen (Dickreiter 1997, S. 443). Der Differenztonfaktor unterscheidet sich zwischen den Schaltungen sowohl absolut als auch im Verlauf. Eine deutliche Frequenzabhängigkeit ist bei den gemessenen Frequenzen nur bei U 47 FET, U 47 und in geringerem Ausmaß beim TLM 147 erkennbar. Der Differenztonfaktor dritter Ordnung bei 10 dBu Eingangspegel liegt bei TLM 49 und TLM 147 unter dem niedrigeren Eingangspegel. Im Gegensatz zu den anderen Schaltungen ist er beim KM 84 ab 0 dBu Eingangspegel höher als der zweiter Ordnung. Bei den DIM30-Werten erreichen die FET-basierten Schaltungen niedrigere Werte als die Röhrenschaltungen. Eine Ausnahme ist das TLM 49, das bis 0 dBu Eingangspegel sogar etwas höhere Werte hat als das U 47.

### 2.4.3 Psychoakustische Maße

Neuere Maße basieren auf psychoakustischen Modellen oder Prinzipien. Sie versuchen die Wahrnehmung nichtlinearer Verzerrungen besser zu erfassen als herkömmliche Maße.

Das *GedLee*-Maß  $G_m$  wurde von Lee u. Geddes (2003a) entwickelt. Es wird aus der zweiten Ableitung der Übertragungsfunktion  $T(x)$  bestimmt.

$$G_m = \sqrt{\int_{-1}^1 \left( \cos\left(\frac{\pi}{2}x\right) \right)^2 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x) \right)^2 dx} \quad (2.2)$$

Damit werden die nichtlinearen Eigenschaften des Geräts direkt und nicht durch ein Messsignal beschrieben. Durch die zweite Ableitung werden nichtlineare Verzerrungen höherer Ordnung stärker gewichtet als die niedriger Ordnung. Der Kosinusterm gewichtet Verzerrungen bei kleinen Amplituden stärker als die bei großen. In einem Hörversuch (Lee u. Geddes 2003b) wurde ein Musikbeispiel mit künstlich erstellten Verzerrungen auf einer siebenstufigen Rating-Skala (»unerträglich« bis »besser«) bewertet. Die Korrelation des Maßes mit der subjektiven Bewertung liegt bei 0,68. Bei der Entwicklung des Maßes wurden bisher nur statische, frequenzunabhängige Verzerrungen berücksichtigt.

Der *Distortion Score* wurde von Tan u. a. (2003) entwickelt. Er wird aus der Differenz des Spektrums von Ausgangs- und Eingangssignal berechnet. Das Eingangssignal besteht aus zehn Sinustönen mit logarithmischem Abstand. Beide Signale werden dazu in Abschnitte von 30 ms und 40 Frequenzbänder der Breite  $1 - ERB_N$  aufgeteilt. Die *ERB* (*equivalent rectangular bandwidth*) entspricht konzeptionell den Frequenzgruppen (Ellermeier u. Hellbrück 2008, S. 57–58). In Hörversuchen wurde ein Musik- und Sprachbeispiel mit künstlichen und Verzerrungen echter Übertragungssysteme<sup>2</sup> auf einer zehnstufigen Rating-Skala (»sauber, vollständig unverzerrt« bis »sehr verzerrt«) bewertet. Die Korrelation des Maßes mit der subjektiven Bewertung ist für künstliche Verzerrungen hoch. Bei echten Übertragungssystemen konnte nur eine mittlere Korrelation gefunden werden.

#### $R_{\text{nonlin}}$

$R_{\text{nonlin}}$  stellt eine Weiterentwicklung des *Distortion Score* dar (Tan u. a. 2004). Die Korrelation mit der subjektiven Bewertung sei bei echten Übertragungssystemen besser. Ein Flussdiagramm zur Berechnung ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

<sup>2</sup>kompakte elektrodynamische Übertragungssysteme (13 bis 20 mm)

1. Das Eingangssignal (Sprache, Musik)  $x$  wird in die Schaltung eingespeist und das verzerrte Ausgangssignal  $y$  aufgenommen.
2. Beide Signale werden zeitlich ausgerichtet.
3. Beide Signale werden gefiltert um die spektralen Eigenschaften des Außen- und Mittelohrs nachzustellen. Dafür wird ein FIR-Filter mit einer Länge von 4097 Samples verwendet.
4. Beide Signale werden durch eine *ERB*-Filterbank mit  $f_{\max} = 40$  Filtern geschickt. Damit soll die Frequenzselektivität des Gehörs nachgestellt werden. Die tiefste Mittenfrequenz liegt bei 50 Hz, die höchste bei der halben Abtastrate  $f_s/2 = 22,05$  kHz.
5. Die gefilterten Signale werden in  $n$  Abschnitte ( $L \hat{=} 30$  ms) aufgeteilt. Die normalisierte Kreuzkorrelation beider Signale mit einer Verschiebung  $\eta \hat{=} -10 \dots 10$  ms wird berechnet.

$$r_{xy}(n, f; \eta) = \frac{\sum_{k=(n-1)L+\eta_{\max}+1}^{nL+\eta_{\max}} x(k-\eta; f)y(k; f)}{\sqrt{\left(\sum_{k=(n-1)L+\eta_{\max}+1}^{nL+\eta_{\max}} x(k-\eta; f)^2\right) \left(\sum_{k=(n-1)L+\eta_{\max}+1}^{nL+\eta_{\max}} y(k; f)^2\right)}} \quad (2.3)$$

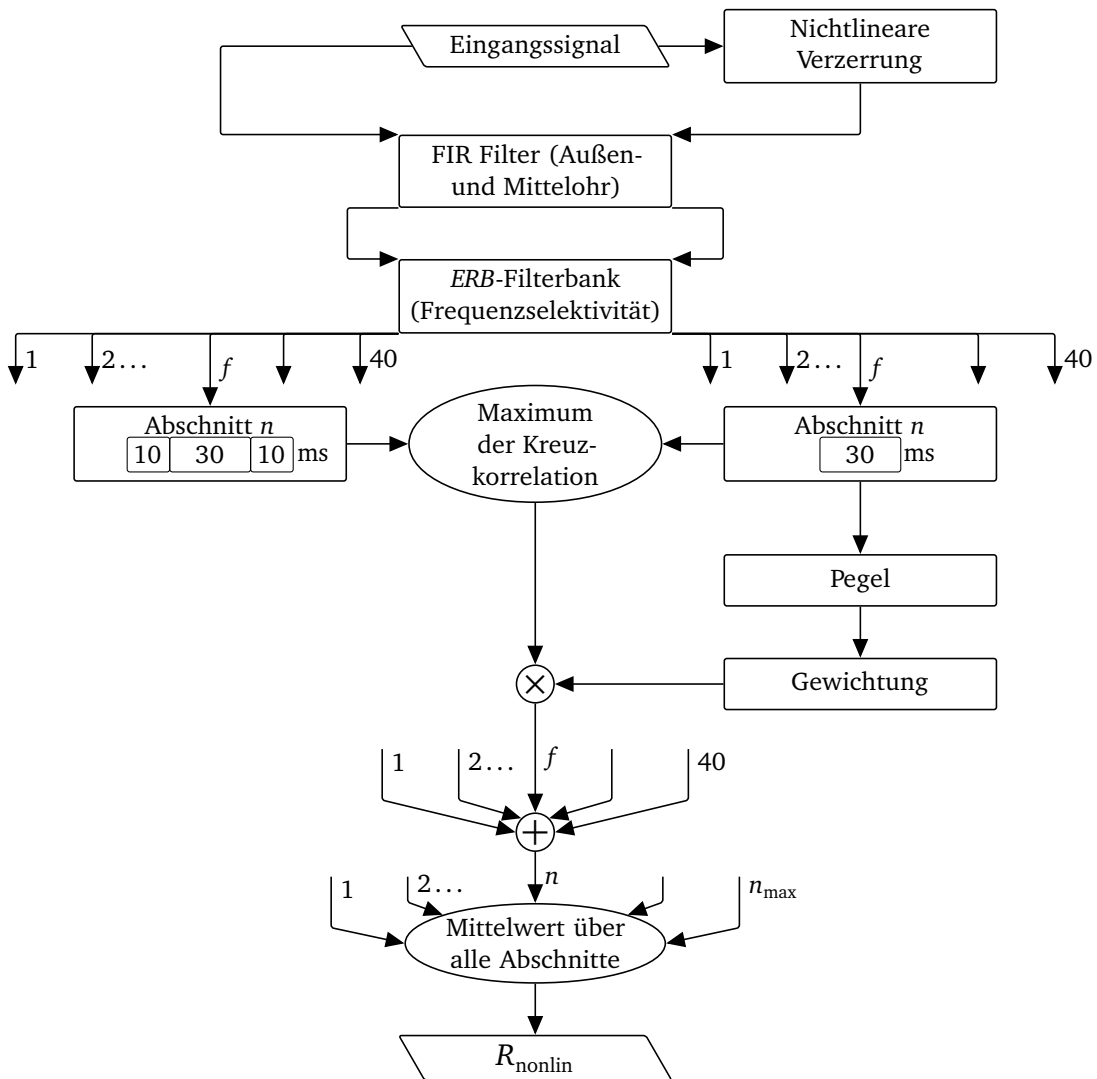
6. Der Maximalwert der Kreuzkorrelation  $r_{\max}(n, f)$  wird ermittelt. Damit sollen kleine, frequenzabhängige Zeitverzögerungen des nichtlinearen Systems zugelassen werden.
7. Der Pegel und maximale Pegel aller Filterausgänge wird berechnet. Daraus wird eine Gewichtung für  $r_{\max}$  bestimmt.
8. Die gewichteten Maximalwerte werden über alle Filter summiert.
9.  $R_{\text{nonlin}}$  wird daraus als Mittelwert über alle Abschnitte berechnet.

In Hörversuchen wurde auch hier wieder die Korrelation mit der subjektiven Bewertung untersucht. Die Korrelation ist sowohl für künstliche als auch für Verzerrungen echter Übertragungssysteme hoch. Dazu wurde aus  $R_{\text{nonlin}}$  eine vorhergesagte Beurteilung mit der empirisch gewählten Funktion

$$\text{Beurteilung} = \frac{a + b \cdot R_{\text{nonlin}}^c}{a + R_{\text{nonlin}}^c} \quad (2.4)$$

bestimmt. Die Parameter hängen von Art und Ausmaß der Verzerrungen, den Versuchspersonen und dem verwendeten Audioinhalt ab. Es gibt also keine eindeutige Beziehung der  $R_{\text{nonlin}}$ -Werte zur subjektiven Beurteilung. Sie sollen aber eine monotone Beziehung haben.



Abbildung 2.9: Flussdiagramm zur Berechnung von  $R_{\text{nonlin}}$

In Abbildung 2.10 sind die berechneten Werte für  $R_{\text{nonlin}}$  dargestellt. Sie wurden aus den Audiodateien für den Schwellwertversuch mit MATLAB<sup>3</sup> (Quelltext B.1) berechnet. Der Zeitversatz der Aufnahmen wurde mit Hilfe einer Kreuzkorrelation ausgeglichen. Der FIR-Filter wurde mit der HUTEAR Toolbox<sup>4</sup>, die ERB-Filterbank mit der AUDITORY Toolbox<sup>5</sup> erzeugt.

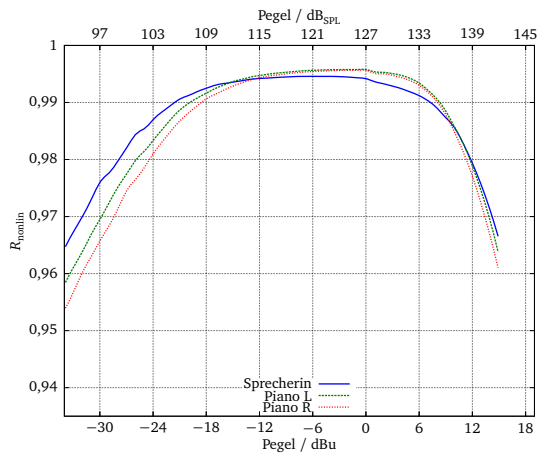
Die  $R_{\text{nonlin}}$ -Kurven lassen sich bei allen Schaltungen in drei Bereiche einteilen. Bei hohen Eingangspegeln sinkt der berechnete Wert wegen nichtlinearer Verzerrungen ab. Im mittleren Pegelbereich ist er annähernd konstant. Hier sind auch die Pegel erkennbar, bei denen die Eingangsempfindlichkeit umgeschaltet wurde (Abschnitt 3.3.1). Der konstante Bereich ist beim KM 84 relativ klein. Bei niedrigen Eingangspegeln sinkt  $R_{\text{nonlin}}$  wieder ab. In diesem Bereich hat Rauschen in den Aufnahmen einen größeren Einfluss als die nichtlinearen Verzerrungen. Außerdem sind Störungen in einzelnen Dateien innerhalb des Ausschnitts sichtbar. Aus dem Verlauf der Kurven lässt sich der Pegelbereich für den Schwellwertversuch abschätzen. Über  $-12$  dBu Eingangspegel bleiben die Werte bei allen Schaltungen bis zur Verzerrung weitgehend konstant. Das Rauschen hat also nur geringen Einfluss. Diese Grenze stimmt auch mit der subjektiven Einschätzung beim Anhören der Dateien überein.

---

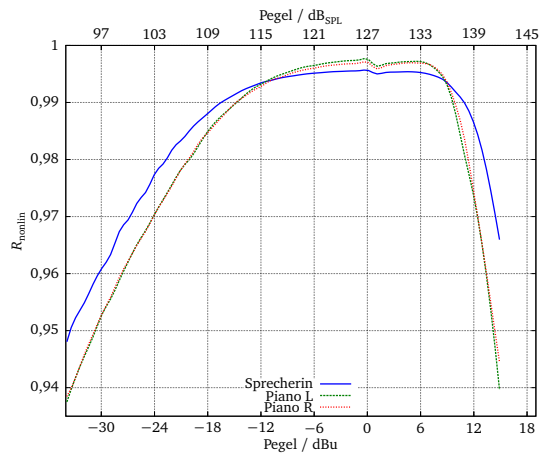
<sup>3</sup>R2009a; THE MATHWORKS, INC.

<sup>4</sup>Härmä u. Palomäki (2000)

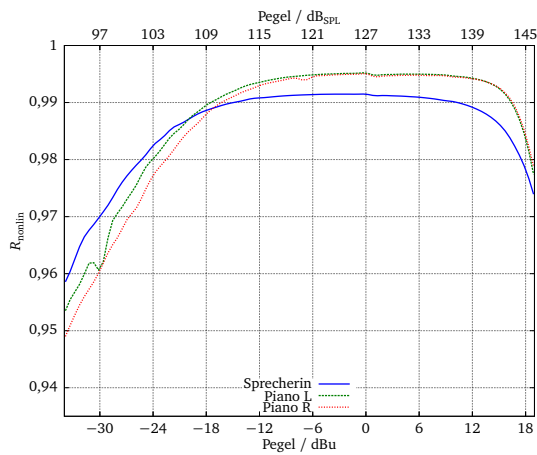
<sup>5</sup>Slaney (1998)



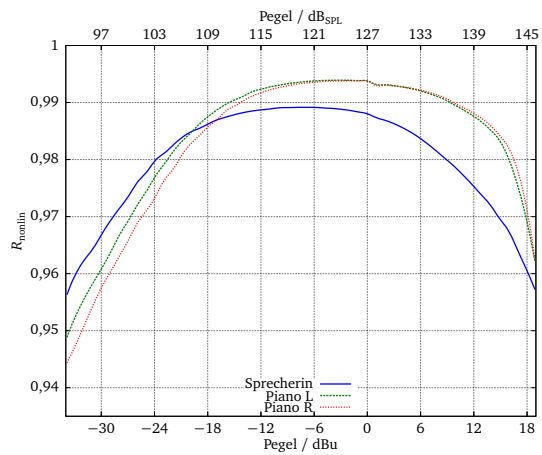
(a) U 47



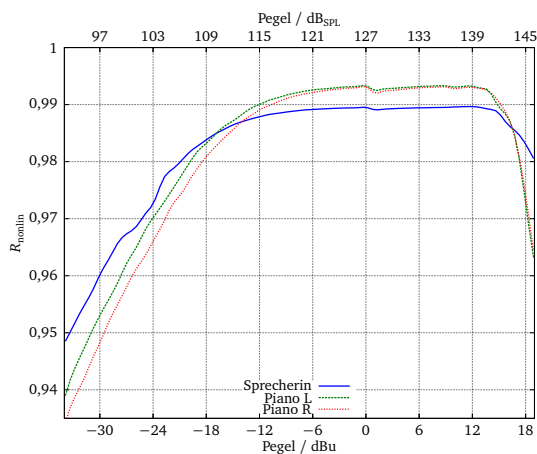
(b) KM 84



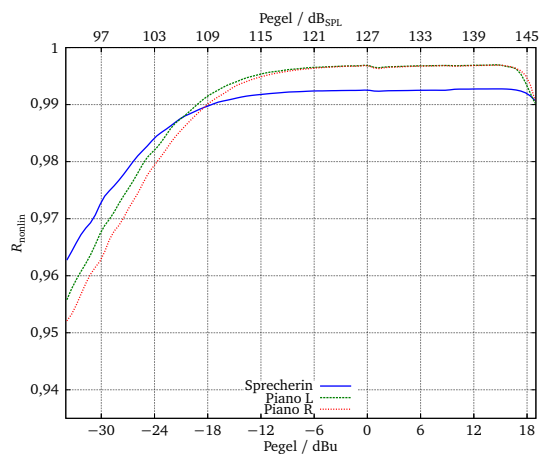
(c) M 147



(d) TLM 49



(e) U 47 FET



(f) TLM 147

Abbildung 2.10:  $R_{\text{nonlin}}$  als Funktion des Eingangspiegels



## 3 Hörversuche

### 3.1 Aufnahme der Audiodateien

Der Aufbau zur Aufnahme der verzerrten Audiodateien ist in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt. Zum Abspielen und Aufnehmen wurde eine Harddisk-Recording-Software (CUBASE LE 1.0.8<sup>1</sup>) verwendet. Die vorbereiteten Audiodateien wurden über ein externes Audiointerface (RME FIREFACE 400) elektrisch in die Mikrofonschaltungen eingespeist. Das geschah entweder über den entsprechenden Messadapter oder eine Ersatzkapazität von 72 pF. Anschließend wurde das Ausgangssignal wieder aufgenommen. Die Schaltungen ohne Messadapter hingen während der Aufnahme in einer geerdeten und akustisch isolierten Kammer. Die Spannungsversorgung für die Halbleiterschaltungen erfolgte über das Phantomspannungsnetzteil N 48 I-2 mit gleichspannungsfreiem Ausgang. Die Röhrenschaltungen wurden wieder durch das entsprechende Netzteil versorgt. Zur akustischen Kontrolle wurde ein Kopfhörer verwendet.

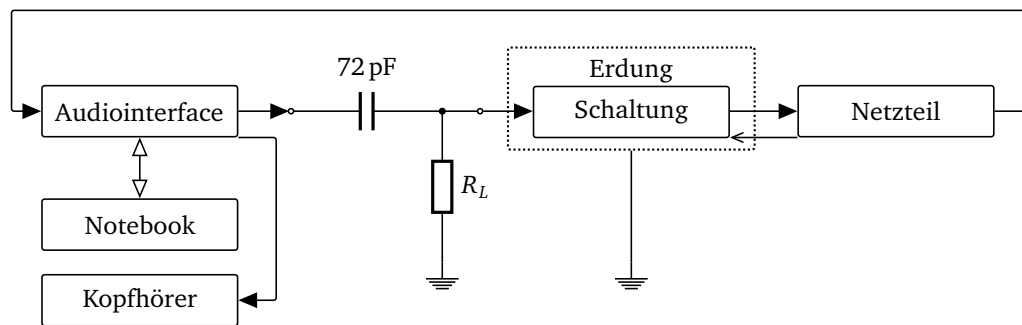


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau zur Aufnahme der Audiodateien

Für alle Stereodateien wurden beide Kanäle nacheinander aufgenommen. Der Zeitversatz wurde dann bei der Stimuluserzeugung durch eine Kreuzkorrelation mit den Originaldateien ausgeglichen. Die Originaldateien stammen von der SQAM-CD<sup>2</sup> (*Sound Quality Assessment Material*). E-Bass und Schlagzeug sind aus Einzelstimmen einer Popmusikproduktion<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>STEINBERG MEDIA TECHNOLOGIES GMBH

<sup>2</sup>EBU (2008)

<sup>3</sup>Radiohead »Reckoner«, »Nude« (»In Rainbows« 2008)

Die folgenden dBu- und  $\text{dB}_{\text{SPL}}$ -Angaben sind für alle aufgenommenen Audiodateien als digitaler Spitzenwert ( $\text{dB}_{\text{FS}}$ ) zu verstehen, der dem Effektivwert eines Sinus-Signals in dBu entspricht. Die Effektivwerte der Audiodateien wurden nicht berücksichtigt, um digitale Übersteuerung zu vermeiden.

## 3.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau war für alle Hörversuche gleich und ist in Abbildung 3.2 schematisch dargestellt.

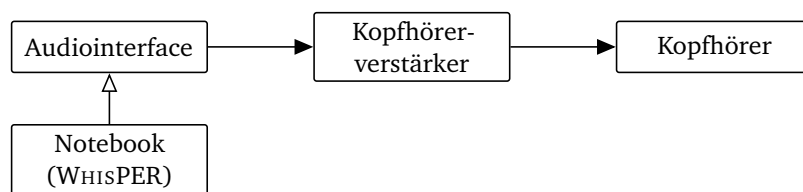


Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau der Hörversuche

Die Hörversuche sind in der MATLAB-Hörversuchsumgebung WHISPER (Ciba 2008)<sup>4</sup> implementiert. Diese stellt eine grafische Benutzeroberfläche zur Verfügung, steuert den Ablauf und erfasst die Daten. Die Audiodateien wurden über das externe Audiointerface M-AUDIO AUDIOPHILE USB und den elektrostatischen Kopfhörer STAX SR-202 mit dem dazugehörigen Kopfhörerverstärker SRM-252II wiedergegeben. Die Versuchsperson konnte eine angenehme Abhörlautstärke wählen. Sie wurde während des Hörversuchs nicht mehr verändert.

Im Anschluss an den Hörversuch sollte die Versuchsperson in einem Fragebogen Geschlecht, Alter und Erfahrung bzw. Vorwissen zum Thema (Tonmeister, musikalische Ausbildung, Hörversuchserfahrung, ...) angeben. Es gab die Möglichkeit Anmerkungen zum Hörversuch zu notieren.

---

<sup>4</sup>Ciba (2009)

### 3.3 Hörbarkeit

Cabot (1984) fasst verschiedene ältere Untersuchungen zur Hörbarkeit nichtlinearer Verzerrungen zusammen. Er gibt zusammenfassend einen Schwellwert von 0,05% für harmonische Verzerrungen höherer Ordnung und 0,25% für niedrigere Ordnungen an. Für Intermodulationsverzerrungen (nach SMPTE) liege der Schwellwert bei 0,7%. Diese Schwellen gelten für Sinustöne. Bei Audioinhalten liege der Schwellwert ungefähr zwischen 0,5 und 1%. Er fordert einen Schwellwert von 0,05% für das gesamte Übertragungssystem unter der Voraussetzung, dass die Verzerrungskomponenten höherer Ordnung nicht dominant seien.

De Santis u. Henin (2007) bestimmten Erkennungsschwellen in Abhängigkeit von dem *Distortion Score* mit einem adaptiven 2AFC-Versuch. Die Hörbeispiele waren künstlich verzerrte Ausschnitte aus einer Klassik- bzw. Jazz-Aufnahme. Sie geben einen minimalen Schwellwert von  $37,7DS$  ( $0,992R_{\text{nonlin}}$ ) für quadratische und kubische Verzerrungen an. Bei Clipping-Verzerrungen seien die Schwellwerte deutlich niedriger (bzw. für  $R_{\text{nonlin}}$  höher).

#### 3.3.1 Stimuli

Die Auswahl der hier verwendeten Audioinhalte orientiert sich an den Ergebnissen eines Hörversuchs zur Hörbarkeit digitaler Clipping-Verzerrungen. Schultz u. a. (2008) fanden niedrige, mittlere Erkennungsschwellen für

- Klavier,
- weibliche Stimme,
- Trompete/Orchester und
- Cello/Klavier (mit hoher Streubreite).

Von diesen wurden die beiden verzerrungsanfälligsten Audioinhalte, Klavier und weibliche Stimme, ausgewählt. Aus den sechs gemessenen Schaltungen wurden drei (U 47, TLM 49 und U 47 FET) ausgewählt. Damit soll die Hörversuchsdauer verkürzt werden. Mit drei Schaltungen und je zwei Audioinhalten ergeben sich sechs Kombinationen.

Um den verwendeten Pegelbereich für die Aufnahme der Audiodateien festzulegen, wurde der Spannungspegel am Eingang der Schaltung verwendet. Er kann über den Übertragungsfaktor der Kapsel in einen entsprechenden Schalldruckpegel umgerechnet werden. Als Grenzschalldruckpegel eines Mikrofons wird typischerweise der Schalldruckpegel angegeben, bei dem der Gesamtklirrfaktor 0,5 oder 1% nicht überschreitet (Schneider 2008, S. 401). Herkömmliche Maße für nichtlineare Verzerrungen, wie der Klirrfaktor, korrelieren aber kaum mit der Wahrnehmung. Sie sind deshalb als Bezugsgröße ungünstig.

Für beide Inhalte (Klavier und Sprecherin) wurden Audiodateien zwischen  $-34$  und  $15$  dBu in  $1$  dB-Schritten aufgenommen. Bei neueren Schaltungen, die subjektiv erst bei höheren Pegeln deutlich verzerrt waren, wurde der Bereich bis  $+19$  dBu erweitert. Die Empfindlichkeit der Ein- und Ausgänge der Soundkarte wurde bei geeigneten Pegeln ( $9$  und  $0$  dBu) umgeschaltet, um das Rauschen der AD/DA-Wandlung möglichst gering zu halten. Der Dynamikfluss während der Aufnahme ist in Abbildung 3.3 für den Pegel mit dem größten Rauschen dargestellt. Nach der Berechnung der  $R_{\text{nonlin}}$ -Werte (Abb. 2.10) und einem Vorversuch wurde der Pegelbereich auf  $-12$  bis  $15$  bzw.  $19$  dBu eingeschränkt.

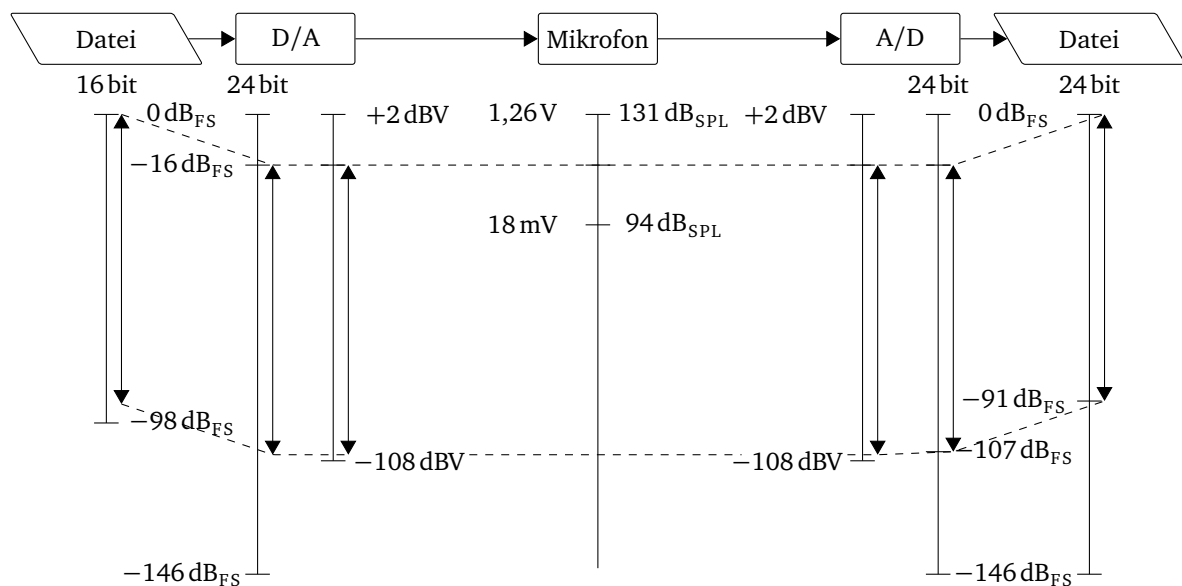


Abbildung 3.3: Dynamikfluss während der Aufnahme

Unterschiedliche Lautheit der verzerrten Stimuli sollte nicht als Erkennungsmerkmal für den manipulierten Stimulus dienen können. Komprimierende Effekte werden damit einerseits nicht mehr berücksichtigt. Die Lautstärke ist andererseits der Parameter, der in der praktischen Anwendung von Mikrofonen fast immer veränderbar ist. Die Lautheit wurde nach [ITU-R BS.1770 \(2006\)](#) angepasst. Schnitt und Lautheitsanpassung der Audiodateien wurde mit MATLAB durchgeführt. Es wurden möglichst sinnvolle Ausschnitte aus den Aufnahmen verwendet. Die Länge der Ausschnitte beträgt ungefähr 5 bzw. 4 s.



### 3.3.2 Schwellwertmessung

Schwellwerte zur Hörbarkeit nichtlinearer Verzerrungen wurden mit einem adaptiven *3 Alternative Forced Choice*-Verfahren (3AFC) ermittelt. Ergebnis dieser Messung sind individuell gültige Absolutschwellen in Abhängigkeit von Audioinhalt und Schaltung bezogen auf den Eingangsspannungspegel.

Während eines Durchgangs werden der Versuchsperson drei Hörbeispiele vorgespielt. Von diesen ist einer manipuliert, die anderen beiden sind die Referenzdateien. Die Versuchsperson soll dann, notfalls durch Raten, angeben welcher manipuliert war. Durch das Erzwingen einer Entscheidung gibt es objektiv richtige und falsche Antworten. Die Versuchsperson muss kein Kriterium festlegen, ab welchem Reizunterschied sie das manipulierte Hörbeispiel erkennen kann. Die Antwortneigung der Versuchsperson geht damit nicht in die Messung ein.

Die Auswahl der Reizstärke für einen Durchgang wurde adaptiv aus den vorhergehenden Antworten der Versuchsperson bestimmt. Die verwendete Adaptionsregel ist ein parametrisches Verfahren mit *Bayes*-Schätzung (Treutwein 1995) und orientiert sich am ZEST-Verfahren. Nach Otto (2008, S. 63) soll dieses Verfahren frei von systematischem Fehler (*Bias*) sein und schon mit 20 Durchgängen sehr genaue Ergebnisse liefern. Die *Bayes*-Schätzung ermittelt die wahrscheinliche Erkennungsschwelle der Versuchsperson aus den vorhergehenden Durchgängen auf Grundlage einer psychometrischen Modellfunktion. Die verwendete *a-priori*-Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung (*prior pdf*) ist eine breite Normalverteilung, deren Mittelwert durch einen Vorversuch festgelegt wurde. Sie wurde bei der abschließenden Berechnung des Schätzwerts nicht berücksichtigt. Der Mittelwert der *Bayes*-Schätzung wurde als Schätzwert verwendet. Der Versuch wurde nach 20 Durchgängen pro Audioinhalt und Schaltung beendet.

#### Stichprobe

An dem Hörversuch nahmen 15 Versuchspersonen teil, davon sind 14 männlich und eine weiblich. Sie waren zwischen 24 und 46 Jahren alt, der Median liegt bei 28 Jahren. Alle Versuchspersonen können aufgrund ihres Vorwissens als Tonmeister oder Tontechniker, musikalischer Ausbildung oder Hörversuchserfahrung als Expertenhörer eingestuft werden.

#### Durchführung

Am Anfang konnte sich die Versuchsperson in einer kurzen Trainingsphase auf den Versuchsaufbau und klangliche Merkmale der nichtlinearen Verzerrungen einstellen. Dafür wurden Hörbeispiele mit stärkeren Verzerrungen für jede Kombination von Schaltung und Audioinhalt verwendet. Im Hauptversuch wurden die 20 Durchgänge aller sechs Kombinationen den Versuchspersonen ineinander verschachtelt (*interleaved*) dargeboten. Damit soll die statistische Unabhängigkeit der einzelnen Durchgänge erhöht werden (Treutwein 1995, S. 2506 u. 2520). Die drei Hörbeispiele wurden während eines Durchgangs nur einmal vorgespielt. Der Hörversuch dauerte insgesamt ungefähr 40 Minuten.

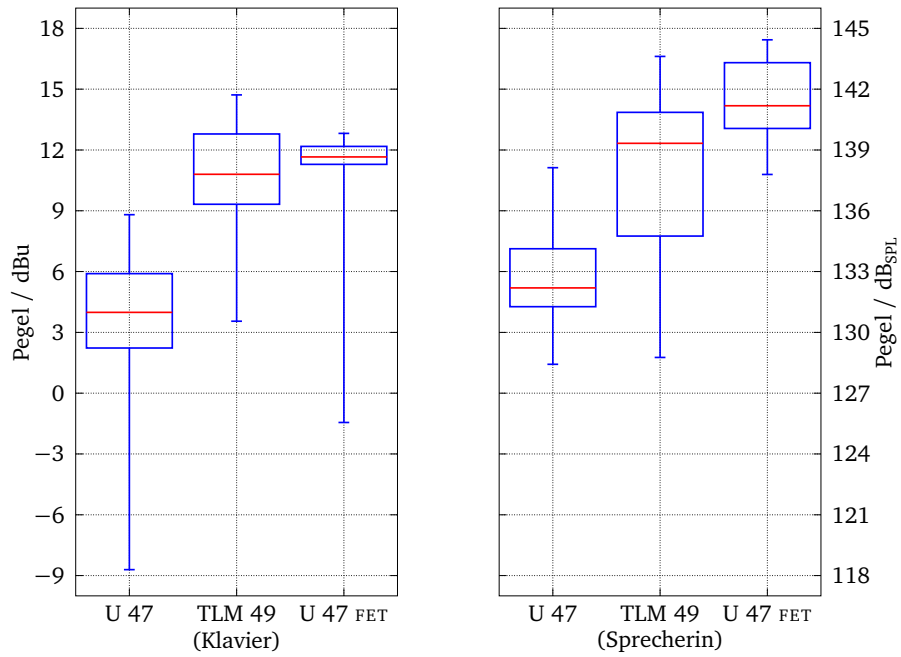
#### Auswertung

Die Ergebnisse des Hörversuchs sind in Abbildung 3.4 als Boxplot und Histogramm dargestellt. Auffällig sind vor allem die hohen Werte der mittleren Erkennungsschwellen. Unter der Annahme von 110 dB maximalem Schallleistungspegel  $L_W$  bei einem Konzertflügel (Meyer 2008, S. 144–145) und halbkugelförmiger Abstrahlung entspricht ein Schalldruckpegel  $L_p$  von 130 dB<sub>SPL</sub> einem Abstand  $r$  von

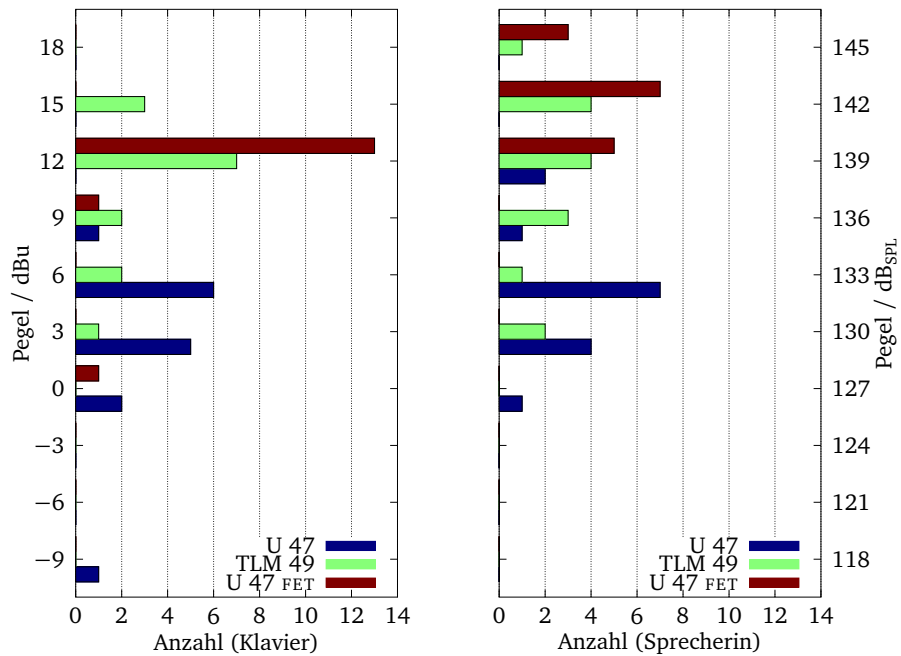
$$10 \lg(r^2) = L_W - L_p - 10 \lg(2\pi) \quad (3.1)$$
$$r \approx 4 \text{ cm.}$$

Der Median der Schwellwerte liegt bei der älteren Röhrenschaltung U 47 niedriger als bei den beiden Transistorschaltungen. Er unterscheidet sich bei diesen beiden nur unwesentlich. Der Interquartilbereich ist bei der Kombination U 47 FET und Klavier deutlich kleiner und bei TLM 49 und Sprecherin größer als bei den anderen Kombinationen. In diesem Bereich liegen die mittleren 50% aller Messwerte.

Die gemessenen Schwellwerte sind, bis auf die Kombination U 47 FET und Klavier, normalverteilt. Deshalb wurden aus den Stichprobenkennwerten Populationsparameter geschätzt. Die geschätzten Populationsmittelwerte der Erkennungsschwellen sind in Abbildung 3.5 mit Konfidenzintervallen dargestellt. Das Konfidenzintervall kennzeichnet den Bereich, in dem sich 95% aller Populationsparameter befinden, die den Stichprobenmittelwert erzeugt haben können (Bortz 2005, S. 102). Diese Betrachtung lässt sich für die Grundgesamtheit der Expertenhörer verallgemeinern.



(a) Boxplot der Schwellwerte mit Median (rot), Interquartil- (Box) und vollständigem Bereich (Whisker)



(b) Histogramm der Schwellwerte

Abbildung 3.4: Ergebnisse des 3AFC-Versuchs

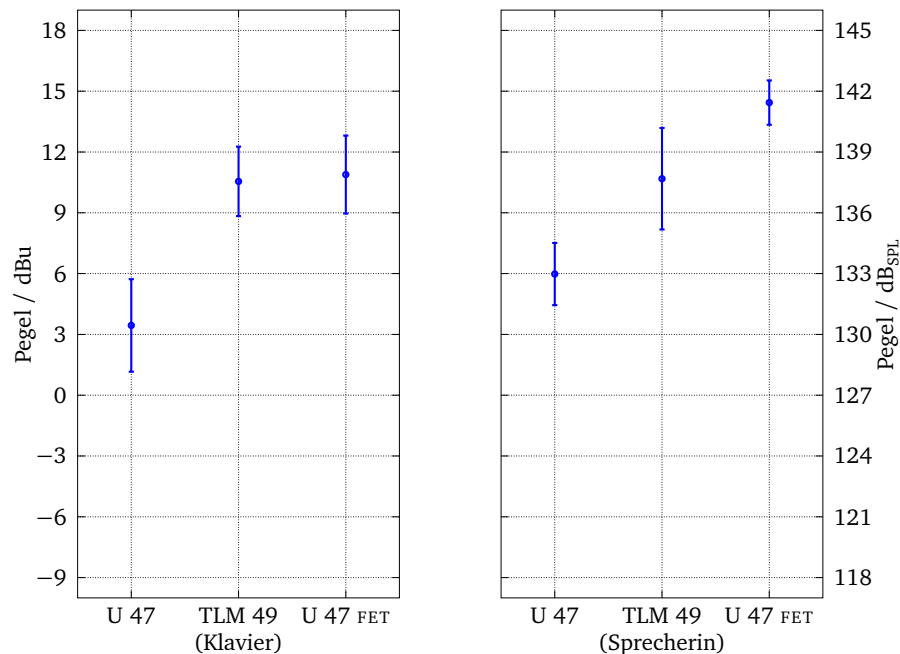


Abbildung 3.5: Geschätzte Populationsmittelwerte der Erkennungsschwellen mit 95% Konfidenzintervallen

Mit einer zweifaktoriellen Varianzanalyse für vollständige Messwiederholung (vgl. Abschnitt 3.4.3) wurde überprüft, ob sich die mittleren Schwellwerte signifikant unterscheiden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.1 zu finden. Danach gibt es signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Schaltungen und den Audioinhalten.

Effekt	$df_H$	$df_E$	$\hat{\sigma}_H^2$	$\hat{\sigma}_E^2$	$F$	$\hat{\epsilon}$	$p$	$\hat{\eta}_P^2$	$\hat{\eta}_G^2$
Schaltung	2	28	511,28	6,62	77,20	0,73	0,000	0,85	0,10
Audioinhalt	1	14	130,94	14,98	8,74	–	0,010	0,38	0,01
Schaltung $\times$ Audioinhalt	2	28	23,15	9,17	2,53	0,71	0,118	0,15	0,01

Tabelle 3.1: Ergebnisse der Varianzanalyse des Schwellwertversuchs

In Abbildung 3.6 ist der Mittelwert der Schwellwerte auf vier technische Maße für nichtlineare Verzerrungen und die berechneten  $R_{\text{nonlin}}$ -Werte übertragen. Für keines der technischen Maße kann eine große Übereinstimmung mit den ermittelten Schwellwerten festgestellt werden. Besonders auffällig ist dabei der Unterschied zwischen den Werten für den Modulationsfaktor (SMPTE). Der mittlere Schwellwert entspricht bei der Kombination U 47 FET und Klavier einem Modulationsfaktor von  $-89$  dB, bei allen anderen durchschnittlich  $-14$  dB. Die

maximalen Abweichungen bei den drei anderen Maßen sind ebenfalls größer als 30 dB. Dabei sollte beachtet werden, dass die technischen Messwerte mit Sinustönen, die Schwellwerte aber mit Audioinhalten ermittelt wurden. Die Abweichung bei den aus den Audiodateien berechneten  $R_{\text{nonlin}}$ -Werten betragen maximal 0,02. Der gesamte Bereich der berechneten Werte (Abb. 2.10) beträgt ungefähr 0,06. Am stärksten weicht hier die Kombination TLM 49 und Sprecherin ab. Auch hier kann keine große Übereinstimmung festgestellt werden. Bei der Entwicklung des Maßes wurden die Versuchspersonen aber auch nicht nach dem Unterschied zwischen verzerrten und unverzerrten Hörbeispielen gefragt, sondern sollten die wahrgenommene Qualität der Hörbeispiele bewerten.

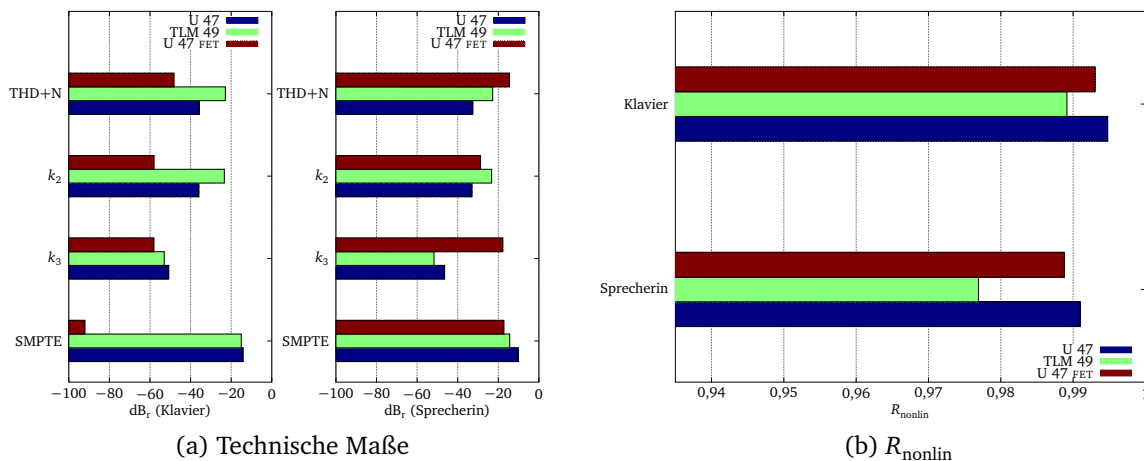


Abbildung 3.6: Mittelwert der Schwellwerte übertragen auf Verzerrungsmaße

Eine Versuchsperson erreichte bei den Kombinationen von U 47 und U 47 FET mit Klavier deutlich niedrigere Schwellwerte als die übrigen Versuchspersonen. Das kann einerseits an ihrer größeren Erfahrung mit nichtlinearen Verzerrungen liegen. Andererseits gab diese Versuchsperson Lokalisationsunterschiede zwischen verzerrten Hörbeispielen und der Referenz als Erkennungsmerkmal an. Das kann an einem Fehler bei der Erstellung der Referenzdateien für die Stereoaufnahmen (Klavier) liegen, der die Normalisierung der beiden Kanäle betrifft. Bei der Kombination von TLM 49 und Klavier führt das aber nicht zu deutlich niedrigeren Schwellwerten. Dieser Fehler wurde anscheinend von keiner anderen Versuchsperson bemerkt.

Weitere Probleme sind Ermüdungserscheinungen durch die Dauer des Hörversuchs. Diese machen sich bei einigen Versuchspersonen in einem schwankendem Konvergenzvorgang des Adaptionsverfahrens bemerkbar. Das Interleaving führt möglicherweise dazu, dass sich die

Versuchsperson nicht ausreichend auf spezifische Erkennungsmerkmale der Verzerrungen bei einer Kombination einstellen kann. Einzelne Versuchspersonen gaben an, dass schon die Referenzdateien nicht vollkommen verzerrungsfrei seien.

## 3.4 Klangliche Bewertung

[Hamm \(1973\)](#) untersuchte Mikrofonvorverstärker mit Röhren, Transistoren und Operationsverstärkern. Messungen waren dabei auf harmonische Verzerrungen beschränkt. Die subjektive Bewertung wurde qualitativ erfasst. [Hamm](#) stellt eine klare Bevorzugung des Röhrenverstärkers gegenüber den Halbleiterschaltungen fest. Er führt das auf subjektiv höhere Lautheit und höheren Rauschabstand von Aufnahmen mit Röhrenverstärkern zurück.

### 3.4.1 Stimuli

Für die beiden Hörversuche zur klanglichen Bewertung wurden verschiedene Audioinhalte über die Schaltungen verzerrt aufgenommen. Daraus wurden die folgenden vier ausgewählt.

- Schlagzeug (Stereo)
- E-Bass (Mono)
- Querflöte (Stereo)
- Sprecherin (Mono)

Für die Auswahl waren spektrale und transiente Eigenschaften der Signale entscheidend. Schlagzeug und E-Bass wurden ausgewählt, weil sie im Gegensatz zu den anderen Beispielen subjektiv als angenehm beurteilt werden konnten. Nichtlineare Verzerrungen können außerdem besonders in Popmusikproduktionen absichtlich eingesetzt werden, um ein »medial-autonomes Klangideal« ([Maempel u. a. 2008](#), S. 779, 747) zu unterstützen.

Aus den vorhandenen Schaltungen wurden vier (U 47, M 147, TLM 49 und U 47 FET) ausgewählt, um die Hörversuchsdauer zu verkürzen. Die Audiodateien wurden für zwei Pegel (11 und 17 dBu) in die Schaltung eingespeist. Diese hohen Pegel wurden gewählt, weil subjektiv erst dann ein Unterschied zwischen den Aufnahmen festgestellt werden konnte. Für die Erzeugung der Hörbeispiele wurden die Aufnahmen bei 17 dBu verwendet. Für das U 47 wurden die Aufnahmen bei 11 dBu verwendet, weil die Verzerrungen bei 17 dBu deutlich stärker als bei den anderen Schaltungen waren. Aus den Aufnahmen wurden möglichst sinnvolle Ausschnitte mit einer Länge von 5 s ausgewählt. Die Lautheit wurde auch hier nach [ITU-R BS.1770 \(2006\)](#) angepasst.

### 3.4.2 Repertory Grid-Technik

Bei dem Hörversuch wurde die *Repertory Grid-Technik* (RGT) eingesetzt. Dabei handelt es sich um »eine Datenerhebungsmethode, die das individuelle Konstruktsystem der Probanden

ermittelt« (Bortz u. Döring 2005, S. 187). Der Ablauf gliedert sich in einen qualitativen und einen quantitativen Teil. Ziel dieses Hörversuchs war es, valide Merkmale zur Bewertung der nichtlinearen Verzerrungen mit dem semantischen Differential zu erhalten.

#### **Stichprobe**

An dem Versuch nahmen vier Personen teil. Sie waren zwischen 25 und 45 Jahren alt und können aufgrund ihres Vorwissens (Tonmeister, Audioforschung, Mikrofonentwickler, Tontechniker), musikalischer Ausbildung oder Hörversuchserfahrung alle als Experten Hörer eingestuft werden.

#### **Durchführung**

Für den qualitativen Teil wurden Triaden aus den Hörbeispielen erstellt. Unterschiedliche Audioinhalte sollten nicht miteinander verglichen werden. Aus jeweils vier Audioinhalten und Schaltungen ergeben sich damit bei einer vollständigen Kombination 16 Triaden. Die Reihenfolge der Triaden war zufällig. Die Versuchsperson konnte sich die drei Hörbeispiele einer Triade mehrfach anhören. Sie sollte dann

1. entscheiden, welche beiden ähnlich sind.
2. überlegen, durch welches Merkmal sie ähnlich sind.
3. die beiden ähnlichen Hörbeispiele mit einer Ausprägung des Merkmals und das dritte mit der anderen bezeichnen.

Pro Triade konnten bis zu drei Konstrukte eingegeben werden. Nach dem Abschluss des ersten Teils wurde die Liste von Konstrukten mit der Versuchsperson überarbeitet. Dabei wurden sehr ähnliche und leere Konstrukte gelöscht und zu lange Formulierungen gekürzt. Im quantitativen Teil sollte die Versuchsperson alle Hörbeispiele einzeln anhand des erstellten Fragebogens beurteilen. Dazu wurde eine fünfstufige Rating-Skala verwendet. Die Reihenfolge der Hörbeispiele war zufällig.

#### **Auswertung**

Die erhobenen Konstrukte wurden durch eine hierarchische, agglomerative Clusteranalyse gruppiert. Ausgehend von den einzelnen Konstrukten werden dabei die Konstrukte oder Cluster von Konstrukten zusammengefasst, welche die größte Ähnlichkeit haben. Dieser Vorgang wird solange durchgeführt, bis nur noch ein Cluster übrig bleibt, der alle Konstrukte enthält. Ähnlichkeitsmaß ist der Betrag der Korrelation. Dadurch sollen Konstrukte zusammengefasst



werden, die bei allen Stimuli – unabhängig von der Polung – ähnlich verwendet werden. Als Fusionskriterium wurde das *average linkage*-Verfahren verwendet. Dabei führt die größte durchschnittliche paarweise Korrelation zwischen zwei Clustern zu einer Verbindung. Die Dendrogramme der Clusteranalyse sind in Abbildung 3.7 dargestellt. Die Berechnungen wurden mit R<sup>5</sup> und dem Paket *pvclust*<sup>6</sup> durchgeführt. Der verwendete *Bootstrapping*-Algorithmus berechnet für jeden Cluster Signifikanzwerte. Diese geben an wie gut die gefundene Clusterlösung durch die vorhandenen Daten unterstützt wird. Cluster mit einem Signifikanzwert (*»approximately unbiased«*) über 95% sind grün umrahmt. Beim *Bootstrap*-Verfahren wird eine große Zahl von Unterstichproben aus der empirischen Stichprobe mit Zurücklegen gezogen. Aus diesen können statistische Kennwerte berechnet werden (Bortz u. Döring 2005, S. 480–481).

In Tabelle 3.2 stehen in den Spalten alle individuellen Konstrukte der vier Versuchspersonen. Sie sind nach den Ergebnissen der Clusteranalyse gruppiert. Die Stärke der Ähnlichkeit innerhalb der Versuchspersonen ist nach der individuellen Clusteranalyse mit Interpunktionszeichen kodiert. Konstrukte, die von mehreren Versuchspersonen ähnlich benannt wurden, stehen jeweils in einer Zeile. Damit sollen inhaltlich ähnliche Cluster und Einzelkonstrukte identifiziert werden. Für das semantische Differential wurden alle Konstrukte berücksichtigt, die nach den individuellen Clusteranalysen in getrennten Clustern stehen. Dabei wurden diejenigen Konstrukte bevorzugt, die von mehreren Versuchspersonen ähnlich benannt wurden. Der Cluster bei Versuchsperson 3, der hauptsächlich Lokalisationsparameter beschreibt, wurde nicht mit aufgenommen. Bei der Betrachtung der Einzelurteile für diesen Cluster sind nur bei einem der beiden Stereoaufnahmen kleinere Unterschiede zwischen den Schaltungen zu finden. Aus den berücksichtigten Konstrukten wurden diejenigen ausgewählt, die möglichst prägnant und gegensätzlich sind. Gegebenenfalls wurden dabei auch Formulierungen verändert. Zusätzlich wurde das Gegensatzpaar *gut – schlecht* für eine mögliche Regressionsanalyse mit den  $R_{\text{nonlin}}$ -Werten aufgenommen. Das so erstellte semantische Differential ist in Tabelle 3.3 zu finden.

Ein Problem bei diesem Hörversuch war vor allem die lange Dauer. Sie lag zwischen einer und über zwei Stunden. Auch unter Berücksichtigung der kurzen Pause zwischen beiden Teilen sind verstärkte Urteilsfehler durch Ermüdungserscheinungen damit sehr wahrscheinlich. Der ungewohnten Hörversuchssituation hätte außerdem durch sorgfältigere Instruktionen begegnet werden können.

---

<sup>5</sup>R Development Core Team (2009)

<sup>6</sup>Suzuki u. Shimodaira (2009)

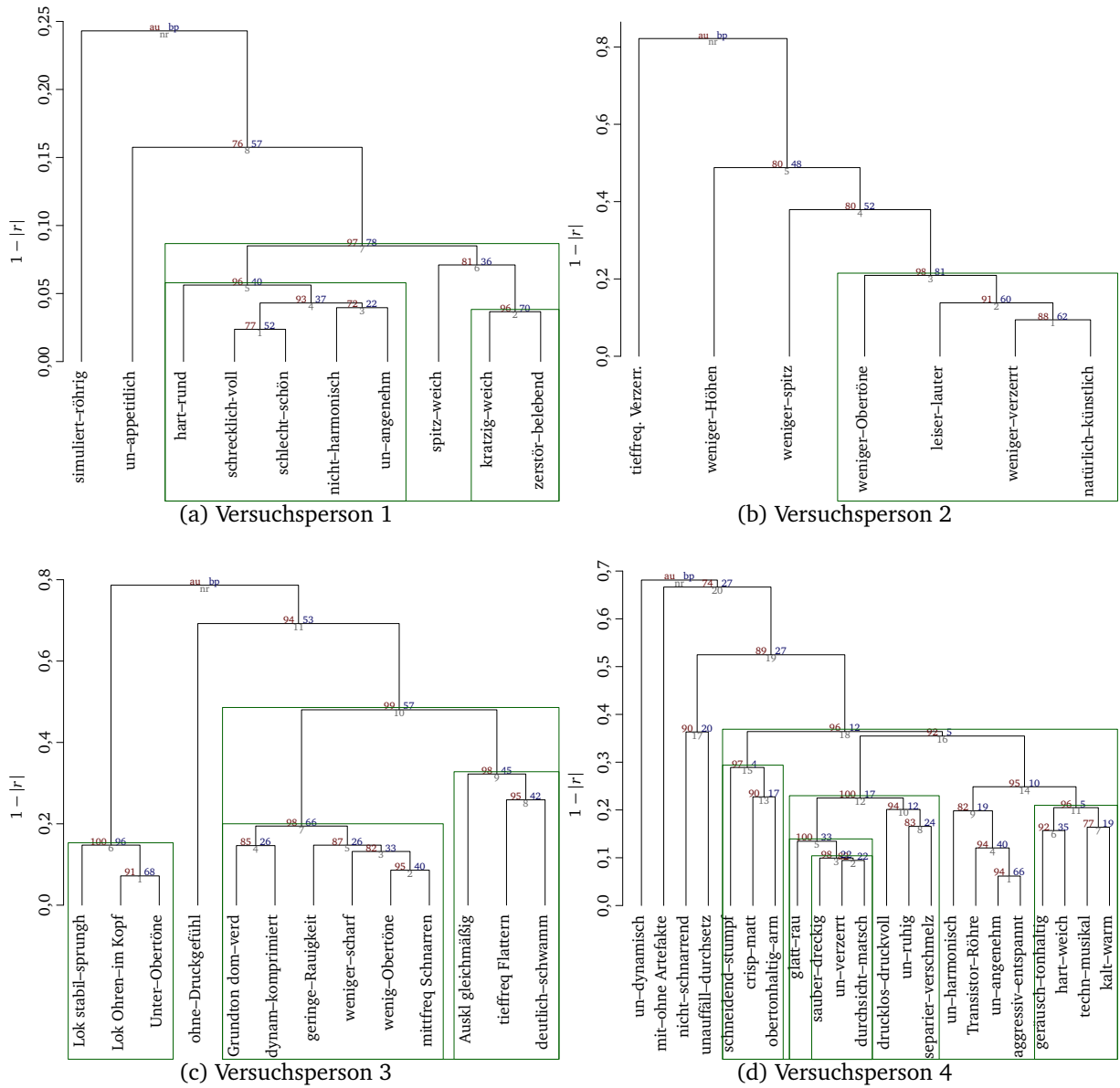


Abbildung 3.7: Dendrogramme der individuellen Clusteranalysen

Versuchsperson 1	Versuchsperson 2	Versuchsperson 3	Versuchsperson 4
		(Lok. stabil – sprunghaft, Lok. im Kopf – an Ohren, Untertöne – Obertöne) <sup>1</sup>	
<i>simuliert – röhrig</i> <sup>1</sup>   appetitlich – unappetitlich <sup>1</sup>   <i>unangenehm – angenehm</i> , <i>nicht – harmonisch</i> , schrecklich – voll, schlecht – schön, <i>hart – rund</i> ;		mit – ohne Druckgefühl <sup>1</sup>	<i>unharmonisch – harmonisch</i> ; <i>Transistor – Röhre</i> , <i>unangenehm – angenehm</i> , aggressiv – entspannt
	<i>weniger – mehr Höhen</i> <sup>1</sup>		<i>hart – weich</i> , geräuschhaft – tonhaltig; kalt – warm, technisch – musikalisch
<i>spitz – weich</i> , kratzig – weich, zerstörerisch – belebend	<i>spitz – weniger spitz</i> <sup>1</sup>	<i>scharf – weniger scharf</i> ;	<i>schneidend – stumpf</i> <sup>1</sup> ;
	<i>weniger – mehr Obertöne</i> ;	<i>wenig – viele Obertöne</i> , mittelfrequentes Schnarren;	<i>obertonarm – obertonhaltig</i> , matt – crisp <sup>1</sup>
	<i>verzerrt – weniger verzerrt</i> , künstlich – natürlich, leiser – lauter	<i>geringe – Rauigkeit</i>	<i>glatt – rau</i> ; <i>verzerrt – unverzerrt</i> , matschig – durchsichtig, dreckig – sauber   <i>drucklos – druckvoll</i> ; unruhig – ruhig, separierend – verschmelzend
		<i>dynamisch – komprimiert</i> , Grundton dominant – verdeckt	<i>dynamisch – undynamisch</i> <sup>1</sup>
	tieffrequente Verzerrungen <sup>1</sup>		<i>mit – ohne Artefakte</i> <sup>1</sup>
		Ausklang gleichmäßig – verändert <sup>1</sup> ; Signaleinsatz <i>deutlich – schwammig</i> <sup>1</sup> , tieffrequentes Flattern <sup>1</sup>	<i>unauffällig – durchsetzungsstark</i> <sup>1</sup>   nicht – schnarrend <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Diese Konstrukte können bei Anwendung des *single linkage*-Verfahrens als Ausreißer identifiziert werden (Backhaus u. a. 2003, S. 516-521).

, ; | Stärke der Ähnlichkeit nach der individuellen Clusteranalyse  
*kursiv* ähnliche Konstrukte bei mehreren Versuchspersonen  
**fett** für das Semantische Differential berücksichtigte Konstrukte

Tabelle 3.2: Inhaltliche Gegenüberstellung aller individuellen Konstrukte

### 3.4.3 Semantisches Differential

In diesem Hörversuch sollten die Versuchspersonen alle 16 Hörbeispiele einzeln anhand des semantischen Differentials (Tab. 3.3) beurteilen. Das semantische Differential erfasst vor allem die konnotative Bedeutung von Beurteilungsobjekten mit Hilfe von bipolaren Begriffspaaren. Das Ergebnis sind charakteristische Profilverläufe für jedes Objekt (Bortz u. Döring 2005, S. 184-186). Die Profilverläufe für den Mittelwert über alle Versuchspersonen sind in Abbildung 3.8 dargestellt.

---

<i>gut</i>	<i>schlecht</i>
Röhre	Transistor
angenehm	unangenehm
weich	hart
dunkel	hell
stumpf	scharf
obertonarm	obertonreich
glatt	rau
unverzerrt	verzerrt
drucklos	druckvoll
dynamisch	komprimiert
ohne Artefakte	mit Artefakten
unauffällig	auffällig
deutlich	schwammig

---

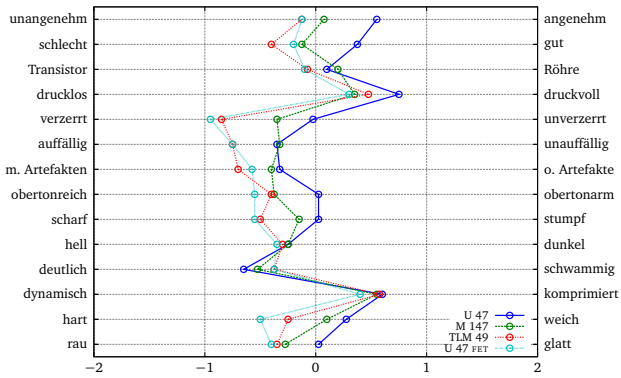
Tabelle 3.3: Semantisches Differential

### Stichprobe

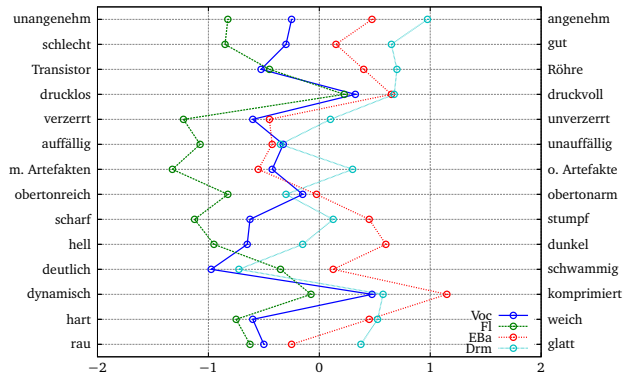
An dem Hörversuch nahmen zehn Versuchspersonen teil, davon sind neun männlich und eine weiblich. Sie waren zwischen 22 und 41 Jahren alt, der Median liegt bei 29 Jahren. Alle Versuchspersonen können aufgrund ihres Vorwissens als Tonmeister, Tontechniker oder Produzent, musikalischer Ausbildung oder Hörversuchserfahrung als Expertenhörer eingestuft werden.

### Durchführung

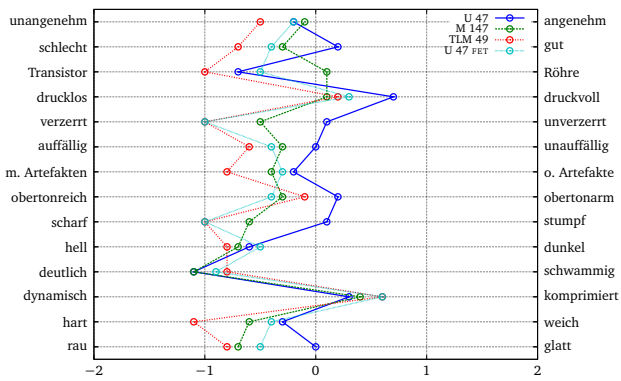
Die Hörbeispiele wurden wieder auf fünfstufige Rating-Skalen beurteilt. Reihenfolge und Polung der Begriffspaare waren zufällig gewählt, aber für alle Hörbeispiele gleich. Die



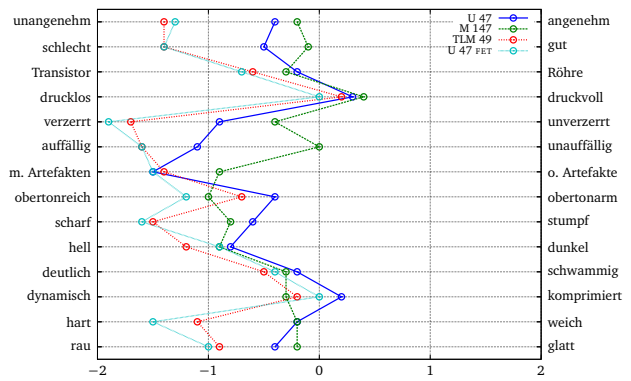
(a) Mittelwert über alle Audioinhalte



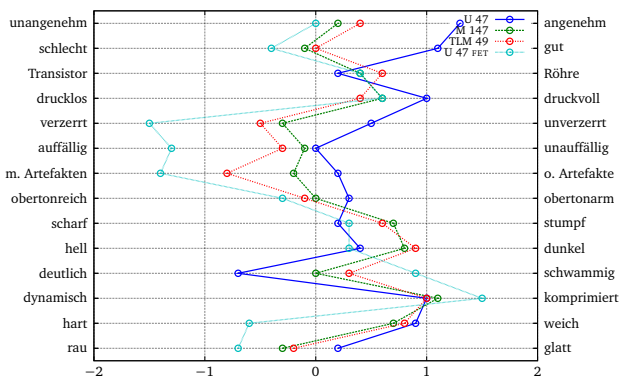
(b) Mittelwert über alle Schaltungen



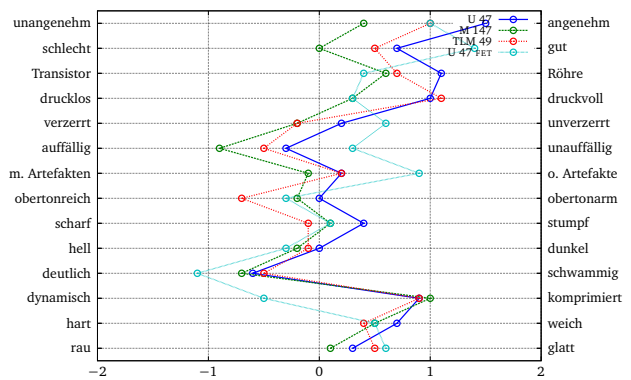
(c) Sprecherin



(d) Flöte



(e) E-Bass



(f) Schlagzeug

Abbildung 3.8: Mittelwert-Profile der abgegebenen Urteile

Reihenfolge der Hörbeispiele war ebenfalls zufällig. Dadurch sollten Reihenfolge- und *Halo*-Effekte verringert werden. Die Versuchsperson konnte die Hörbeispiele mehrfach anhören, weil sie nur 5 s lang sind. In einem kurzen Training sollten die Versuchspersonen am Anfang vier Hörbeispiele mit extremen Merkmalsausprägungen bewerten. Das sollte einerseits den Versuchsablauf verdeutlichen und andererseits *Floor*- und *Ceiling*-Effekte verringern (Bortz u. Döring 2005, S. 175–184). Der Hörversuch dauerte ungefähr 20 Minuten.

### Übereinstimmung und Konsistenz der Urteiler

Zur Einschätzung der Reliabilität der Urteiler wurden *Intraclass*-Korrelationskoeffizienten (*ICC*) berechnet. Allgemein lässt sich der *ICC* als Verhältnis der Varianz durch die Urteilsobjekte und der Gesamtvarianz verstehen (McGraw u. Wong 1996). Die Formen unterscheiden sich durch das zugrundeliegende statistische Modell. Alle Modelle setzen mehrere Urteile für jedes Objekt voraus. Die Objekte werden bei allen Modellen als zufällige Auswahl betrachtet. Die Koeffizienten können sich jeweils auf einzelne Urteiler oder den Mittelwert über alle Urteiler beziehen. In diesem Hörversuch wurden alle Objekte (Hörbeispiele) von allen Urteilern (Versuchspersonen) beurteilt. Die Urteiler werden dabei als zufälliger Faktor betrachtet. Das statistische Modell ist damit eine zweifaktorielle Varianzanalyse und entspricht »Fall 2« bei Shrout u. Fleiss (1979).

In Tabelle 3.4 sind für alle Skalen zwei *Intraclass*-Korrelationskoeffizienten bezogen auf den Mittelwert aller Versuchspersonen zu finden. Sie wurden mit R und dem Paket *psych*<sup>7</sup> berechnet.  $ICC(A, k)$  ist ein Maß für die absolute Übereinstimmung (*agreement*) der mittleren Urteile von  $k$  Versuchspersonen.

$$ICC(A, k) = \frac{\hat{\sigma}_B^2 - \hat{\sigma}_E^2}{\hat{\sigma}_B^2 + \frac{\hat{\sigma}_J^2 - \hat{\sigma}_E^2}{n}} \quad (3.2)$$

mit  $\hat{\sigma}^2$  : Schätzwert für Varianz

$B$  : zwischen (*between*) den Objekten

$E$  : des Messfehlers (*error*)

$J$  : der Urteiler (*judges*)

$n$  : Anzahl der Objekte

<sup>7</sup>Revelle (2009)

$ICC(C, k)$  ist ein Maß für die Konsistenz (*consistency*) der mittleren Urteile von  $k$  Versuchspersonen.

$$ICC(C, k) = \frac{\hat{\sigma}_B^2 - \hat{\sigma}_E^2}{\hat{\sigma}_B^2} \quad (3.3)$$

Im Gegensatz zum  $ICC(A, k)$  wirken sich nur relative, keine absoluten Unterschiede auf das Ergebnis aus. Wenn zufällig zehn andere Versuchspersonen ausgewählt worden wären, könnte erwartet werden, dass deren mittlere Urteile (unter den anfangs genannten Voraussetzungen) z.B. auf der Skala *gut* – *schlecht* mit den hier beobachteten mittleren Urteilen zu 83% absolut übereinstimmen und zu 88% korrelieren.

Skala	Übereinstimmung	Konsistenz
	$ICC(A, 10)$	$ICC(C, 10)$
scharf – stumpf	0,90	0,90
verzerrt – unverzerrt	0,87	0,90
unangenehm – angenehm	0,85	0,89
hart – weich	0,83	0,85
schlecht – gut	0,83	0,88
hell – dunkel	0,82	0,83
m. Artefakten – o. Artefakte	0,78	0,85
auffällig – unauffällig	0,75	0,79
dynamisch – komprimiert	0,71	0,74
rau – glatt	0,70	0,70
deutlich – schwammig	0,68	0,74
Transistor – Röhre	0,64	0,66
obertonreich – obertonarm	0,47	0,57
drucklos – druckvoll	0,17 <sup>a</sup>	0,19 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> nicht signifikant von Null verschieden ( $F_{df_1=15, df_2=135} = 1,23$ ;  $p = 0,254$ )

Tabelle 3.4: *Intraclass*-Korrelationskoeffizienten

Zu den Koeffizienten wurde ein Konfidenzintervall (Signifikanzniveau  $\alpha < 5\%$ ) berechnet, das in Abbildung 3.9 durch Fehlerbalken dargestellt ist. Bis auf die Skala *drucklos* – *druckvoll* sind alle berechneten Koeffizienten mindestens sehr signifikant von Null verschieden. Für die beiden Skalen *drucklos* – *druckvoll* und *obertonreich* – *obertonarm* ist die Übereinstimmung der Versuchspersonen kleiner als 0,5. Die größte Übereinstimmung und Konsistenz liegt bei den Skalen *scharf* – *stumpf*, *verzerrt* – *unverzerrt* und *unangenehm* – *angenehm* vor.

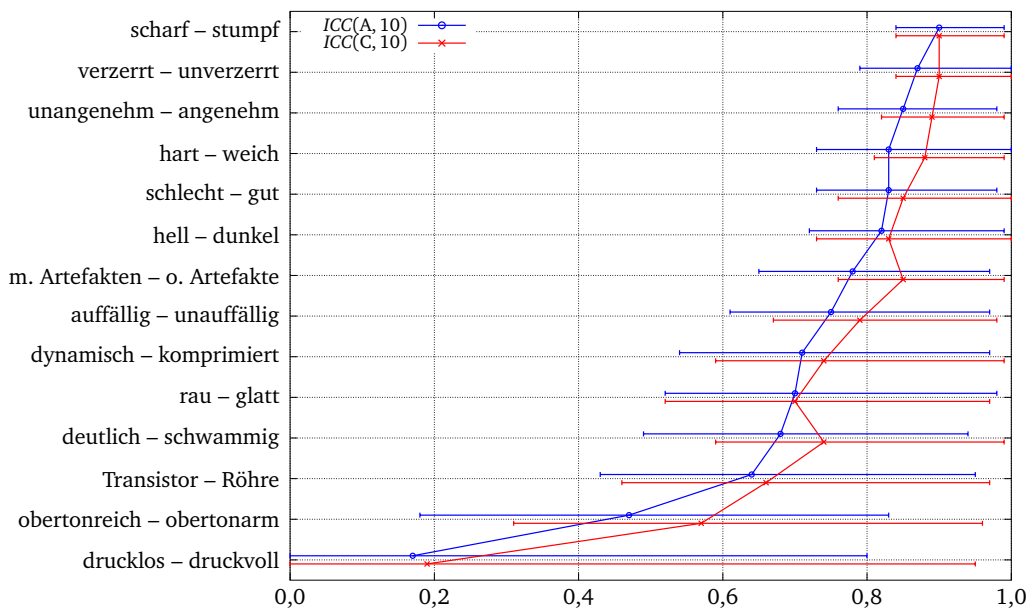


Abbildung 3.9: Intra-class-Korrelationskoeffizienten mit Konfidenzintervallen

### Dimensionalität

Die 14 Rating-Skalen (manifeste Variablen) des semantischen Differentials können durch eine explorative Faktorenanalyse auf wenige, wichtige Einflussfaktoren (latente Variablen) zurückgeführt werden. Die Ausgangsdaten wurden dafür in eine »personenbezogene Objektmatrix« überführt. Die Urteile jeder Versuchsperson für jeden Stimulus werden dann als Objekt betrachtet. Im Gegensatz zur Mittelwertbildung über alle Versuchspersonen fließt die personenbezogene Streuung in den Daten damit in die Analyse ein (Backhaus u. a. 2003, S. 326–327). Die folgenden Berechnungen wurden mit R und den Paketen *rela*<sup>8</sup> und *psych* durchgeführt (Quelltext B.2).

Um die Eignung der Ausgangsdaten für eine Faktorenanalyse zu überprüfen, wurde die Prüfgröße *MSA* (*measure of sampling adequacy*, auch Kaiser-Meyer-Olkin-Kriterium) aus der Korrelationsmatrix berechnet. Es liegt zwischen 0 und 1 und zeigt an, wie stark die Skalen zusammengehören. Damit sich die Matrix für eine Faktorenanalyse eignet, soll das *MSA* mindestens 0,5 sein (Backhaus u. a. 2003, S. 272–277). Die berechneten Werte für die einzelnen Skalen liegen zwischen 0,66 (»mittelmäßig«) und 0,90 (»erstaunlich«). Für die gesamte Matrix ergibt sich ein *MSA* von 0,83 (»verdienstvoll«).

<sup>8</sup>Chajewski (2009)



Es wird angenommen, dass sich die gesamte Varianz  $\sigma^2$  einer Variablen in Kommunalität  $h^2$  (gemeinsame Varianz) und Spezifität  $u^2$  (variablenspezifische und Messfehlervarianz) aufteilt. Die Faktorenanalyse versucht nur die Kommunalität durch Faktoren zu erklären. Faktoren werden dann als Ursache für hohe Ladungen auf den Variablen interpretiert (Backhaus u. a. 2003, S. 289–293). Die Kommunalität wurde hier iterativ geschätzt, indem die Quadratsumme der Residuen minimiert wurde. Die Residuen ergeben sich aus der Differenz zwischen ursprünglicher und durch die Faktoren reproduzierter Korrelation einer Variablen. Die Kommunalität kann in der Faktorladungs-Matrix als Quadratsumme aus den Ladungen einer Variable berechnet werden.

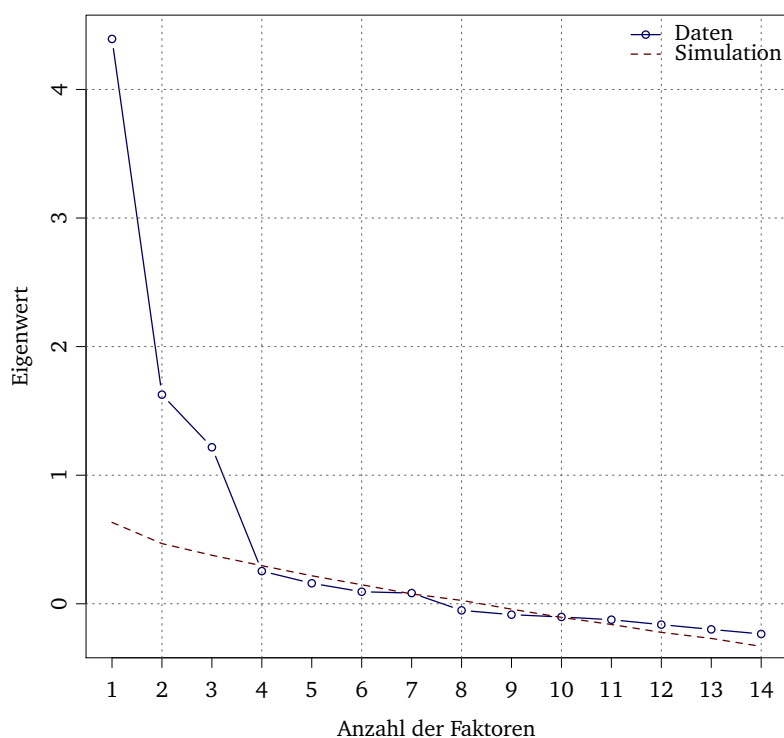


Abbildung 3.10: Screeplot beobachteter und simulierter, zufälliger Daten nach der Kommunalitäten-Schätzung

Es gibt mehrere Kriterien für die Entscheidung, wieviele Faktoren extrahiert werden sollen. Nach den Empfehlungen von Zwick u. Velicer (1984) wurde die Anzahl der Faktoren durch Parallelanalyse (*parallel analysis*) bestimmt. Die Eigenwerte der Korrelationsmatrix beobachteter Daten werden dabei mit denen zufälliger Matrizen gleicher Größe verglichen. Es werden diejenigen Faktoren extrahiert, bei denen die beobachteten Eigenwerte größer als die simulierter, zufälliger Daten sind. Der Screeplot (Abbildung 3.10) zeigt die Eigenwerte der beobachteten und zufälligen Daten in Abhängigkeit von der Faktoranzahl. Die Eigen-

werte sind ein Maß für die Varianz, die durch einen Faktor erklärt wird. Sie können in der Faktorladungs-Matrix als Quadratsumme aus den Ladungen eines Faktors berechnet werden. Es wurden drei Faktoren extrahiert<sup>9</sup>.

Faktoren können grafisch als Vektoren interpretiert werden. Die inhaltliche Interpretation der Faktoren wird durch Rotation dieser Vektoren erleichtert. Hier wurde die oblique (schiefwinklige) *Promax*-Rotation verwendet, die eine Korrelation der Faktoren zulässt. [Fabrigar u. a. \(1999\)](#) argumentieren, dass erstens eine Korrelation der Faktoren bei vielen psychologischen Konstrukten erwartet werden könne, zweitens die Faktorladungs-Struktur durch oblique Rotation vereinfacht werde und drittens der Informationsgehalt höher als bei einer orthogonalen Rotation sei. Die Korrelation der Faktoren ist in Tabelle 3.5 zu finden.

	F1	F2	F3
F1	–		
F2	0,35	–	
F3	0,16	0,27	–

Tabelle 3.5: Korrelation der Faktoren nach der *Promax*-Rotation

Durch erneute Faktorenanalyse der Faktor-Korrelationsmatrix und einer Schmid-Leiman-Transformation wurde ein allgemeiner Faktor  $g$  bestimmt. Durch die Transformation kann direkt der Einfluss eines Faktors höherer Ordnung auf die manifesten Variablen bestimmt werden und die Faktoren unterschiedlicher Ebenen sind voneinander unabhängig ([Wolff u. Preising 2005](#)). Die berechneten Faktorladungen und Spezifitäten sind in Tabelle 3.6 zu finden. Faktorladungen über 0,4 sind grau hinterlegt. Zusätzlich sind zwei Maße für die Reliabilität ([Zingbard u. a. 2005](#)) des semantischen Differentials angegeben. Mit  $\omega_h$  (*hierarchical*) wird der Anteil der Gesamtvarianz beschrieben, der durch den allgemeinen Faktor erklärt wird. Mit  $\omega_t$  (*total*) wird der Anteil beschrieben, der durch alle Faktoren zusammen erklärt wird.

Das semantische Differential erfasst nach dieser Analyse drei unterschiedliche Bewertungsdimensionen. Sie werden durch die Gruppierungsfaktoren beschrieben. Auf dem ersten Gruppierungsfaktor haben vor allem die Skalen hohe Ladungen, die durch Valenz bestimmt sind. Auf dem zweiten sind es Skalen, welche die Stärke der Verzerrung beschreiben. Bei dem dritten Faktor sind es Skalen, die durch Transparenz beschrieben werden können. Der allgemeine Faktor kann hier als übergeordnetes Konstrukt zur klanglichen Bewertung der

<sup>9</sup>Andere Kriterien (*MAP*, *Scree-Test*, *VSS<sub>2</sub>*, *Kaiser-Kriterium*) legen ebenfalls drei Faktoren als optimale Anzahl nahe.

Skala	g	Gruppierungsfaktoren			$\hat{u}^2$
		F1*	F2*	F3*	
unangenehm – angenehm	0,53	0,76	0,09	0,06	0,13
schlecht – gut	0,52	0,71	0,16	0,11	0,20
Transistor – Röhre	0,35	0,49	0,01	0,29	0,56
drucklos – druckvoll	0,03	0,46	0,17	0,01	0,75
verzerrt – unverzerrt	0,67	0,22	0,48	0,06	0,26
auffällig – unauffällig	0,54	0,14	0,50	0,03	0,44
m. Artefakten – o. Artefakte	0,54	0,22	0,40	0,16	0,47
obertonreich – obertonarm	0,35	0,28	0,31	0,31	0,60
scharf – stumpf	0,47	0,16	0,12	0,63	0,35
hell – dunkel	0,29	0,05	0,00	0,69	0,44
deutlich – schwammig	-0,06	0,30	0,10	0,54	0,60
dynamisch – komprimiert	-0,05	0,07	0,20	0,39	0,80
hart – weich	0,54	0,25	0,26	0,27	0,51
rau – glatt	0,49	0,27	0,26	0,11	0,60
hierarchisch	$\omega_h = 0,48$				
Gesamt	$\omega_t = 0,88$				

Tabelle 3.6: Faktorladungen des allgemeinen Faktors und der drei Gruppierungsfaktoren

nichtlinearen Verzerrungen verstanden werden. Er wird vor allem durch die Stärke der Verzerrung und weniger durch Valenz und Transparenz bestimmt. Die Skalen *hart – weich* und *rau – glatt* haben auf den Gruppierungsfaktoren ähnlich niedrige Ladungen. Sie laden aber relativ hoch auf dem übergeordneten Faktor und sind deshalb vermutlich für die allgemeine klangliche Bewertung wichtig. Die Skala *obertonreich – obertonarm* hat sowohl auf dem allgemeinen Faktor als auch den Gruppierungsfaktoren ähnlich hohe Ladungen. Das kann die geringe Übereinstimmung und Konsistenz der Urteiler auf dieser Skala (Abschnitt 3.4.3) erklären, weil nicht klar getrennt ist, welche Beurteilungsdimension erfasst wird.

Die Höhe der beiden Reliabilitätsmaße ( $\omega_h$  und  $\omega_t$ ) lässt vermuten, dass mit diesem semantischen Differential zwar ein allgemeiner Faktor erfasst wird, aber die drei Dimensionen eine größere Bedeutung bei der Beurteilung haben.

## Varianzanalyse

Bei diesem Hörversuch haben zehn Versuchspersonen für jede Kombination von Schaltung (Faktor  $A$ ) und Audioinhalt (Faktor  $B$ ) (unabhängige Variablen), auf 14 Rating-Skalen ein Urteil (abhängige Variablen) abgegeben. Es handelt sich also um ein multivariates, zweifaktorielles Versuchsdesign mit vollständiger Messwiederholung. Die Varianzanalyse überprüft, ob sich mindestens zwei Mittelwerte der abhängigen Variablen in Bezug auf die unabhängigen Variablen unterscheiden. Die Überprüfung ist hier explorativ zu verstehen, weil vor der Untersuchung keine Hypothese formuliert wurde (Bortz u. Döring 2005, S. 384). Aus den Ergebnissen kann möglicherweise eine Hypothese für weitere Untersuchungen abgeleitet werden.

Beide Faktoren werden als feste Effekte betrachtet und haben jeweils vier Stufen. Die Auswahl der Versuchspersonen wird als zufällig angenommen. Die beiden Haupteffekte  $A$  und  $B$  und die Interaktion  $A \times B$  werden bei einer abhängigen Variablen (univariat) getestet, indem Schätzwerte für die Varianz des Effekts  $\hat{\sigma}_H^2$  (hypothesis) und des dazugehörigen Fehlers  $\hat{\sigma}_E^2$  (error) aus entsprechenden Quadratsummen  $QS$  bestimmt werden. Mit einem  $F$ -Test wird dann überprüft, ob sich die Varianzen signifikant unterscheiden. Die Prüfvarianzen und Freiheitsgrade  $df$  (degrees of freedom) für das verwendete Versuchsdesign (Bortz u. Döring 2005, S. 347-350) sind in Tabelle 3.7 zu finden.

Effekt	$\hat{\sigma}_H^2$	$df_H$	$\hat{\sigma}_E^2$	$df_E$
Schaltung	$\hat{\sigma}_A^2$	3	$\hat{\sigma}_{A \times Vpn}^2$	27
Audioinhalt	$\hat{\sigma}_B^2$	3	$\hat{\sigma}_{B \times Vpn}^2$	27
Schaltung $\times$ Audioinhalt	$\hat{\sigma}_{A \times B}^2$	9	$\hat{\sigma}_{A \times B \times Vpn}^2$	81

Tabelle 3.7: Prüfvarianzen für das verwendete Versuchsdesign

Bei mehreren abhängigen Variablen (multivariat) werden die Varianzen durch entsprechende Kovarianz-Matrizen ersetzt. Für die Bestimmung des  $F$ -Wertes gibt es mehrere Prüfstatistiken. Hier ist Pillais Spurkriterium  $PS$  angegeben. Es wird bei kleineren Stichproben empfohlen, bei denen

$$df_E < 10 \cdot n \cdot df_H \quad (3.4)$$

mit  $n$  : Anzahl der abhängigen Variablen

$$(10 - 1) \cdot df_H \ll 10 \cdot 14 \cdot df_H$$

ist. Es führt zu eher konservativen Entscheidungen (Bortz 2005, S. 593–594). Die Ergebnisse der multivariaten Varianzanalyse sind in Tabelle 3.8 zu finden. Die Berechnungen wurden mit R durchgeführt (Quelltext B.4).

Effekt	<i>PS</i>	<i>F</i>	$df_1$	$df_2$	<i>p</i>	$\hat{\eta}_p^2$
Schaltung	1,78	1,67	42	48	0,044	0,16
Audioinhalt	2,15	2,90	42	48	0,000	0,24
Schaltung × Audioinhalt	2,02	1,57	126	684	0,000	0,15

Tabelle 3.8: Ergebnisse der multivariaten Varianzanalyse

Nach diesen Berechnungen gibt es signifikante Unterschiede in der Bewertung für beide Haupteffekte und die Interaktion. Die Unterschiede hinsichtlich der Audioinhalte und der Interaktion von Schaltung und Audioinhalt sind sogar hoch signifikant. Dieser multivariate Ansatz berücksichtigt aber nicht die Abhängigkeit der einzelnen Variablen, sondern gewichtet alle Variablen gleich. Das setzt voraus, dass die Fehlerkomponenten unabhängig von den Treatmenteffekten sind (Bortz 2005, S. 597). Durch das verwendete Versuchsdesign ist das nicht gegeben. Ein multivariate Varianzanalyse, welche die Abhängigkeit der Variablen berücksichtigt, lässt sich nicht berechnen, weil weniger Versuchspersonen als abhängige Variablen vorhanden sind. Damit stehen bei der Berechnung nicht mehr genügend Freiheitsgrade für die Fehlerkomponente zur Verfügung. Zusätzlich wird multivariate Normalverteilung der abhängigen Variablen in der Population vorausgesetzt. Diese lässt sich, vor allem bei kleinen Stichproben, nur schlecht prüfen (Bortz 2005, S. 450). Eine weitere Voraussetzung ist die Homogenität der Kovarianzen. Diese wurde mit dem *Box-Test* (Bortz 2005, S. 619) überprüft. Die Prüfung ergab, dass sich alle entsprechenden Kovarianz-Matrizen signifikant unterscheiden. Der Test setzt aber multivariate Normalverteilung voraus und entscheidet schon bei leichter Verletzung dieser Annahme zugunsten der Heterogenität.

Die Ergebnisse der univariaten Varianzanalysen für die einzelnen Rating-Skalen sind in Tabelle 3.9 dargestellt. Die Berechnungen wurden mit R und dem Paket *ez*<sup>10</sup> durchgeführt (Quelltext B.3). Die wechselseitigen Beziehungen zwischen den abhängigen Variablen bleiben dabei unberücksichtigt. Das Signifikanzniveau ist mit

$$p' = 1 - (1 - p)^{14} \quad (3.5)$$

korrigiert, weil mit 14 simultanen Signifikanztests der Unterschied zwischen den Faktorstufen überprüft wird. Diese Korrektur führt zu konservativen Entscheidungen, weil die Skalen nicht unabhängig voneinander sind (Bortz 2005, S. 271-272). Alle Skalen mit  $p' < 5\%$  sind grau hinterlegt.

In der univariaten Varianzanalyse mit Messwiederholung wird vorausgesetzt, dass die Varianzen unter den Faktorstufen und die Korrelationen zwischen den Faktorstufen homogen sind. Die Freiheitsgrade für den *F*-Wert wurden für beide Messwiederholungsfaktoren mit dem von Bortz (2005, S. 354-358) beschriebenen Verfahren korrigiert. Damit sollen Verletzungen dieser Voraussetzung kompensiert werden.

Für alle Skalen, bei denen der Interaktionseffekt signifikant ist, sind Interaktionsdiagramme in Abbildung 3.11 dargestellt. Aus diesen kann deskriptiv der Interaktionstyp bestimmt werden (Bortz u. Döring 2005, S. 534-536). Bei den Skalen *verzerrt – unverzerrt* und *auffällig – unauffällig* liegt disordinale Interaktion vor. Die Beurteilung verläuft für die Audioinhalte über alle Schaltungen (links) und für die Schaltungen über alle Audioinhalte (rechts) nicht gleichsinnig. Die Verläufe sind für beide Skalen ähnlich. So wird z.B. die Flöte in Kombination mit dem M 147 als unverzerrter und unauffälliger beurteilt, die übrigen Audioinhalte dagegen gleich oder verzerrter und auffälliger. Das U 47 FET wird in Kombination mit dem Schlagzeug als unverzerrter und unauffälliger beurteilt, die übrigen Schaltungen dagegen gleich oder verzerrter und auffälliger. Bei disordinaler Interaktion können die Haupteffekte nicht global interpretiert, also über alle Faktorstufen verallgemeinert werden. Bei der Skala *komprimiert – dynamisch* liegt hybride Interaktion vor. Das Schlagzeug wird z.B. in Kombination mit dem U 47 FET als dynamischer beurteilt, die übrigen Audioinhalte dagegen gleich oder komprimierter. Der Verlauf der Beurteilung für die Schaltungen über alle Audioinhalte verläuft gleichsinnig.

Unterschiede in der mittleren Bewertung sind zwischen den Schaltungen nur bei den Skalen *unangenehm – angenehm*, *gut – schlecht* und *verzerrt – unverzerrt* signifikant. Der Signifikanzwert bei den Skalen *scharf – stumpf* und *hart – weich* ist zwar nicht kleiner als 5%,

---

<sup>10</sup>Lawrence (2010)

aber ebenfalls relativ niedrig. Unterschiede zwischen den Audioinhalten sind bei fast allen Skalen signifikant.

Als Maß für die Effektgröße wurden zwei Schätzwerte für  $\eta^2$  aus der univariaten Varianzanalyse berechnet. Mit partiellem  $\hat{\eta}_P^2$

$$\hat{\eta}_P^2 = \frac{QS_H}{QS_H + QS_E} \quad (3.6)$$

wird der Varianzanteil des Effekts an der dazugehörigen Fehlerkomponente beschrieben. [Olejnik u. Algina \(2003\)](#) schlagen eine verallgemeinerte Form  $\hat{\eta}_G^2$  vor. Die Werte sind deutlich niedriger als  $\hat{\eta}_P^2$ . Sie wird für das verwendete Versuchsdesign – z.B. für den Faktor A – mit

$$\hat{\eta}_G^2 = \frac{QS_A}{QS_{\text{Gesamt}} - QS_B - QS_{A \times B}} \quad (3.7)$$

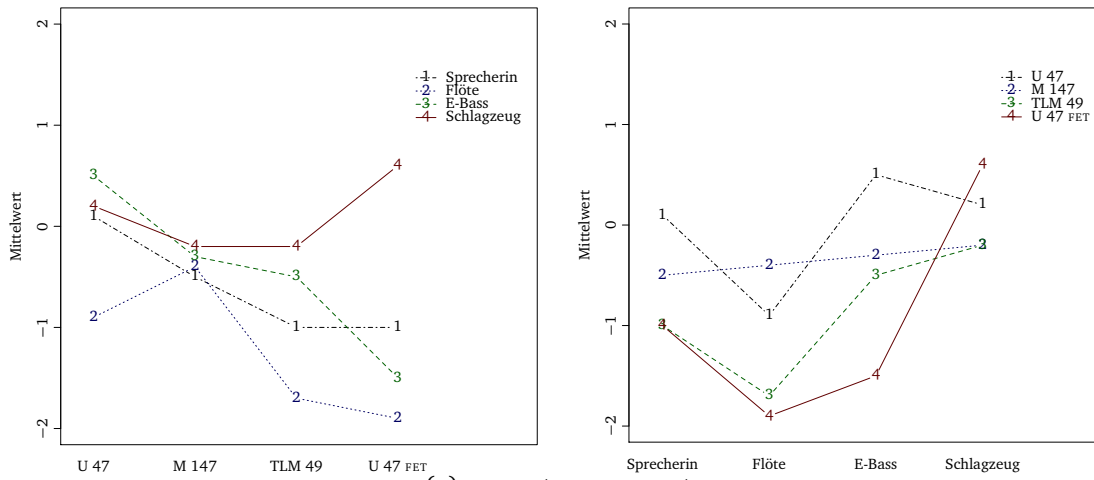
berechnet. Damit soll eine Vergleichbarkeit der Effektgröße unabhängig vom Versuchsdesign gewährleistet werden. Außerdem sei das Maß konsistent mit den üblichen Richtlinien für Effektgrößen. Der Unterschied der Beurteilung zwischen den Schaltungen kann nach diesen Richtlinien ([Cohen 1988](#), S. 284-288) als kleiner bis mittlerer Effekt bezeichnet werden. Der Unterschied zwischen den Audioinhalten kann als großer, die Interaktion als mittlerer bis großer Effekt bezeichnet werden.

### 3 Hörversuche

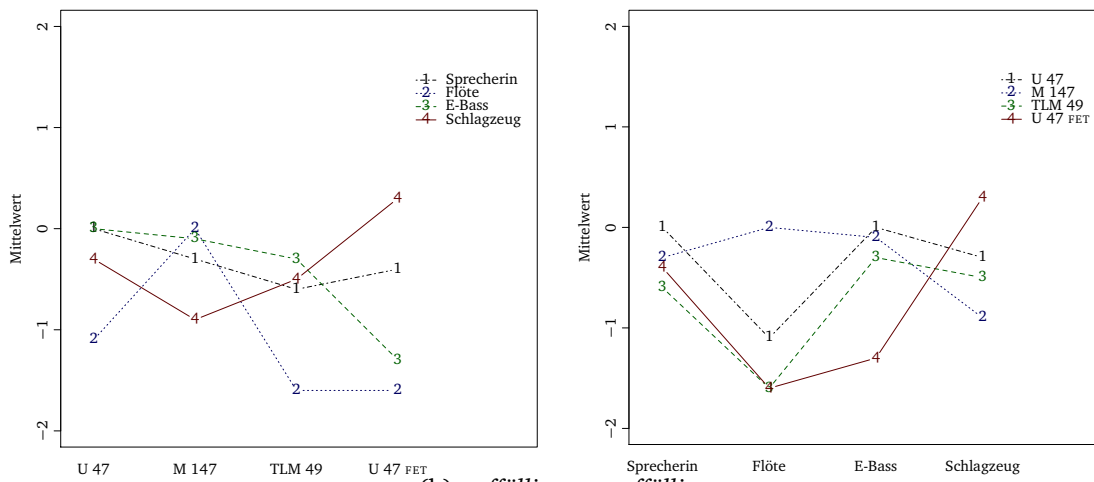
Skala	$QS_H$	$QS_E$	$\hat{\sigma}_H^2$	$\hat{\sigma}_E^2$	$F$	$\hat{\epsilon}$	$p'$	$\hat{\eta}_P^2$	$\hat{\eta}_G^2$
<b>Schaltung (<math>df_H = 3, df_E = 27</math>)</b>									
unangenehm – angenehm	12,17	11,27	4,06	0,42	9,72	1,00	0,002	0,52	0,07
schlecht – gut	13,03	10,23	4,34	0,38	11,46	0,69	0,007	0,56	0,07
Transistor – Röhre	2,47	42,34	0,82	1,57	< 1	1,00	–	0,06	0,01
drucklos – druckvoll	4,87	27,69	1,62	1,03	1,58	0,61	0,977	0,15	0,03
verzerrt – unverzerrt	22,62	11,57	7,54	0,43	17,60	0,73	0,000	0,66	0,13
auffällig – unauffällig	6,82	12,49	2,27	0,46	4,91	0,60	0,294	0,35	0,04
m. Artefakten – o. Artefakte	3,45	19,68	1,15	0,73	1,58	0,69	0,976	0,15	0,02
obertonreich – obertonarm	7,25	19,50	2,42	0,72	3,35	1,00	0,382	0,27	0,04
scharf – stumpf	9,22	14,84	3,07	0,55	5,59	0,72	0,139	0,38	0,09
hell – dunkel	0,28	16,85	0,09	0,62	< 1	1,00	–	0,02	0,00
deutlich – schwammig	2,12	16,69	0,71	0,62	1,14	1,00	0,998	0,11	0,01
dynamisch – komprimiert	0,97	34,47	0,32	1,28	< 1	0,64	–	0,03	0,01
hart – weich	14,52	24,67	4,84	0,91	5,30	0,56	0,266	0,37	0,09
rau – glatt	4,35	16,53	1,45	0,61	2,37	0,68	0,835	0,21	0,03
<b>Audioinhalt (<math>df_H = 3, df_E = 27</math>)</b>									
unangenehm – angenehm	75,37	23,07	25,12	0,85	29,40	1,00	0,000	0,77	0,33
schlecht – gut	49,08	27,18	16,36	1,01	16,25	1,00	0,000	0,64	0,23
Transistor – Röhre	44,97	32,34	14,99	1,20	12,51	0,63	0,007	0,58	0,18
drucklos – druckvoll	6,22	53,34	2,07	1,98	1,05	0,64	0,998	0,10	0,03
verzerrt – unverzerrt	35,62	18,57	11,87	0,69	17,26	1,00	0,000	0,66	0,18
auffällig – unauffällig	15,27	32,04	5,09	1,19	4,29	0,61	0,390	0,32	0,08
m. Artefakten – o. Artefakte	53,15	35,98	17,72	1,33	13,30	0,74	0,002	0,60	0,20
obertonreich – obertonarm	14,85	28,40	4,95	1,05	4,71	1,00	0,120	0,34	0,08
scharf – stumpf	61,17	12,89	20,39	0,48	42,70	0,68	0,000	0,83	0,40
hell – dunkel	55,08	29,55	18,36	1,09	16,77	0,56	0,003	0,65	0,31
deutlich – schwammig	27,52	42,29	9,17	1,57	5,86	0,64	0,155	0,39	0,13
dynamisch – komprimiert	30,22	48,72	10,07	1,80	5,58	1,00	0,056	0,38	0,14
hart – weich	54,62	48,07	18,21	1,78	10,23	0,57	0,029	0,53	0,28
rau – glatt	23,75	32,13	7,92	1,19	6,65	1,00	0,023	0,43	0,16
<b>Schaltung × Audioinhalt (<math>df_H = 9, df_E = 81</math>)</b>									
unangenehm – angenehm	15,96	65,86	1,77	0,81	2,18	0,44	0,737	0,20	0,09
schlecht – gut	27,08	56,18	3,01	0,69	4,34	0,45	0,074	0,33	0,14
Transistor – Röhre	9,11	96,83	1,01	1,20	< 1	0,47	–	0,09	0,04
drucklos – druckvoll	5,66	41,03	0,63	0,51	1,24	0,47	0,994	0,12	0,03
verzerrt – unverzerrt	24,96	47,11	2,77	0,58	4,77	0,48	0,034	0,35	0,14
auffällig – unauffällig	30,31	54,13	3,37	0,67	5,04	0,55	0,014	0,36	0,14
m. Artefakten – o. Artefakte	21,20	50,68	2,36	0,63	3,77	0,38	0,211	0,29	0,09
obertonreich – obertonarm	3,00	48,25	0,33	0,60	< 1	0,41	–	0,06	0,02
scharf – stumpf	9,31	41,38	1,03	0,51	2,02	0,48	0,792	0,18	0,09
hell – dunkel	4,23	46,65	0,47	0,58	< 1	0,45	–	0,08	0,03
deutlich – schwammig	14,41	46,03	1,60	0,57	2,82	0,47	0,398	0,24	0,07
dynamisch – komprimiert	18,36	33,46	2,04	0,41	4,94	0,54	0,017	0,35	0,09
hart – weich	17,56	47,51	1,95	0,59	3,33	0,47	0,229	0,27	0,11
rau – glatt	9,50	51,63	1,06	0,64	1,66	0,55	0,921	0,16	0,07

Tabelle 3.9: Ergebnisse der univariaten Varianzanalyse

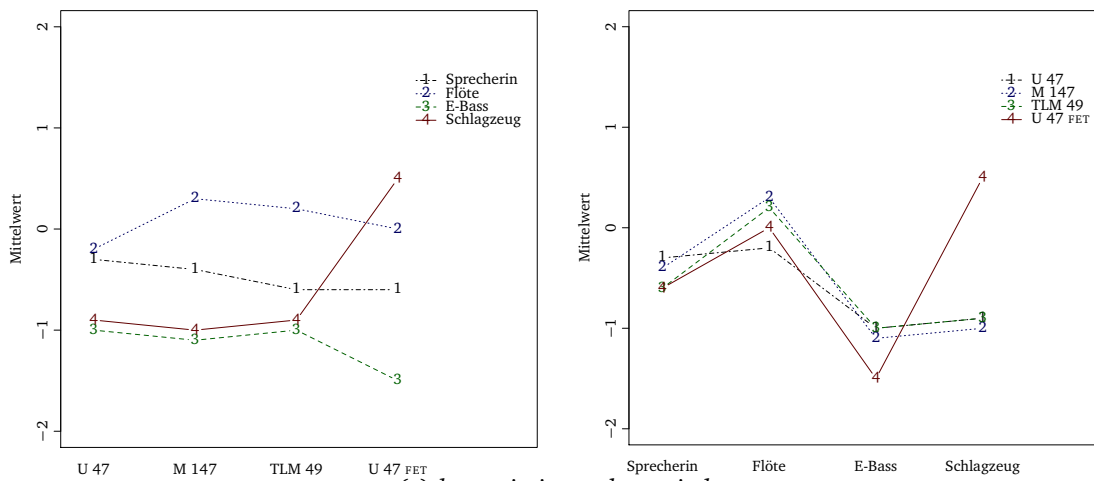




(a) verzerrt – unverzerrt



(b) auffällig – unauffällig



(c) komprimiert – dynamisch

Abbildung 3.11: Interaktionsdiagramme



## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Als Ergebnis der vorliegenden Arbeit kann festgestellt werden, dass nichtlineare Verzerrungen durch die Mikrofonhaltungen erst bei überraschend hohen Pegeln erkannt werden. Die Erkennungsschwellen hängen von Schaltung und Audioinhalt ab. Die kleinste mittlere Schwelle entspricht einem Schalldruckpegel von  $130 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ . Nach einem deskriptiven Vergleich kann keine große Übereinstimmung der mittleren Schwellen mit technischen Verzerrungsmaßen festgestellt werden. Die kleinste ermittelte individuelle Schwelle entspricht einem Schalldruckpegel von  $118 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ . Diese Ergebnisse sollten vor dem Hintergrund des Fehlers in den Referenzdateien verstanden werden.

Mit dem in dieser Arbeit erstellten semantischen Differential können klangliche Merkmale nichtlinearer Verzerrungen beschrieben werden. Es erfasst die drei Beurteilungsdimensionen Verzerrung, Valenz und Transparenz. Bei der messtechnischen Betrachtung lassen sich deutliche Unterschiede in Art und Ausmaß der nichtlinearen Verzerrungen zwischen den Schaltungen erkennen. Amplituden- und Phasenfrequenzgang unterscheiden sich hauptsächlich im tieffrequenten Bereich. Trotzdem sind Unterschiede in der klanglichen Bewertung vermutlich klein. Mit den verwendeten Hörbeispielen können sie vor allem bei Verzerrung und Valenz vermutet werden.

Diese Vermutungen können in weiteren Hörversuchen überprüft werden. Das hier erstellte semantische Differential kann dafür als Ausgangspunkt dienen. Es sollte aber nach den Ergebnissen der statistischen Auswertung modifiziert und gegebenenfalls um hier nicht berücksichtigte Skalen ergänzt werden. Der Stichprobenumfang sollte sich dabei an einer kleinen bis mittleren Effektgröße und einer multivariaten Varianzanalyse orientieren. Für die Hörbeispiele können auch andere Audioinhalte, Schaltungen und Eingangspegel erwogen werden. Möglicherweise ist auch eine Berücksichtigung der akustischen Verzerrungen von Mikrofonen sinnvoll.



## Literatur

- [Backhaus u. a. 2003] BACKHAUS, Klaus ; ERICHSON, Bernd ; PLINKE, Wulff ; WEIBER, Rolf: *Multi-variate Analysemethoden – Eine anwendungsorientierte Einführung*. Zehnte, neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin : Springer-Verlag, 2003
- [Bortz 2005] BORTZ, Jürgen: *Statistik – für Human- und Sozialwissenschaftler*. Sechste, vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. Heidelberg : Springer Medizin Verlag, 2005
- [Bortz u. Döring 2005] BORTZ, Jürgen ; DÖRING, Nicola: *Forschungsmethoden und Evaluation – für Human- und Sozialwissenschaftler*. Dritte, überarbeitete Auflage. Heidelberg : Springer Medizin Verlag, 2005
- [Cabot 1984] CABOT, Richard C.: Perception of Nonlinear Distortion. In: *2nd International Convention Audio Engineering Society*, 1984, S. 53–65
- [Cabot 1992] CABOT, Richard C.: Comparison of Nonlinear Distortion Measurement Methods. In: *11th International Convention Audio Engineering Society*, 1992, S. 53–65
- [Ciba 2008] CIBA, Simon: *Erstellung einer Softwarebibliothek für Hörversuche – Programmkonzept und zu implementierende Testverfahren*, Technische Universität Berlin, Magisterarbeit, 2008
- [Cohen 1988] COHEN, Jacob: *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Hillsberg, New Jersey : Lawrence Erlbaum, 1988
- [Czerwinski u. a. 2000] CZERWINSKI, Eugene ; VOISHVILLO, Alexander ; ALEXANDROV, Sergei ; TEREKHOV, Alexander: Multitone Testing of Sound System Components – Some Results and Conclusions, Part 1: History and Theory. In: *109th Convention Audio Engineering Society*, 2000, S. 1011–1048
- [Dickreiter 1997] DICKREITER, Michael ; SCHULE FÜR RUNDfunkTECHNIK (Hrsg.): *Handbuch der Tonstudioteknik*. Bd. 2. 6. verbesserte Auflage. München : K. G. Saur, 1997
- [Ellermeier u. Hellbrück 2008] ELLERMEIER, Wolfgang ; HELLBRÜCK, Jürgen: Hören – Psychoakustik – Audiologie. In: **(Weinzierl 2008)**, Kapitel 2, S. 41–85
- [Fabrigar u. a. 1999] FABRIGAR, Leandre E. ; WEGENER, Duane T. ; MACCALLUM, Robert C. ; STRAHAN, Erin J.: Evaluating the Use of Exploratory Factor Analysis in Psychological Research. In: *Psychological Methods* 4 (1999), Nr. 3, S. 272–299

- [Hamm 1973] HAMM, Russell O.: Tubes Versus Transistors – Is There an Audible Difference. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 21 (1973), Nr. 4, S. 267–273
- [Klippel 2001] KLIPPEL, Wolfgang: Speaker Auralization – Subjective Evaluation of Nonlinear Distortion. In: *110th Convention* Audio Engineering Society, 2001
- [Lee u. Geddes 2003a] LEE, Lidia W. ; GEDDES, Earl R.: Auditory Perception of Nonlinear Distortion – Theory. In: *115th Convention* Audio Engineering Society, 2003
- [Lee u. Geddes 2003b] LEE, Lidia W. ; GEDDES, Earl R.: Auditory Perception of Nonlinear Distortion. In: *115th Convention* Audio Engineering Society, 2003
- [Maempel u. a. 2008] MAEMPEL, Hans-Joachim ; WEINZIERL, Stefan ; KAMINSKI, Peter: Audio-bearbeitung. In: (**Weinzierl 2008**), Kapitel 13, S. 719–784
- [McGraw u. Wong 1996] MCGRAW, Kenneth O. ; WONG, S. P.: Forming Inferences About Some Intraclass Correlation Coefficients. In: *Psychological Methods* 1 (1996), Nr. 1, S. 30–46
- [Meyer 2008] MEYER, Jürgen: Musikalische Akustik. In: (**Weinzierl 2008**), Kapitel 4, S. 123–180
- [Müller 2008] MÜLLER, Swen: Messtechnik. In: (**Weinzierl 2008**), Kapitel 21, S. 1087–1169
- [Olejnik u. Algina 2003] OLEJNIK, Stephen ; ALGINA, James: Generalized Eta and Omega Squared Statistics: Measures of Effect Size for Some Common Research Designs. In: *Psychological Methods* 8 (2003), Nr. 4, S. 434–447
- [Otto 2008] OTTO, Stefanie: *Vergleichende Simulation adaptiver, psychometrischer Verfahren zur Schätzung von Wahrnehmungsschwellen*, Technische Universität Berlin, Magisterarbeit, 2008
- [Pastillé 2001] PASTILLÉ, Holger: *Über die Nichtlinearitäten am Kondensatormikrofon unter besonderer Berücksichtigung der Membran*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2001
- [de Santis u. Henin 2007] SANTIS, Eric M. ; HENIN, Simon: Perception & Thresholds of Nonlinear Distortion Using Complex Signals / Aalborg University, Section of Acoustics, Institute of Electronic Systems. 2007. – Forschungsbericht
- [Schneider 2008] SCHNEIDER, Martin: Mikrofone. In: (**Weinzierl 2008**), Kapitel 7, S. 313–419
- [Schultz u. a. 2008] SCHULTZ, Frank ; CHOLAKOV, Vladimir ; MAEMPEL, Hans-Joachim: Zur Hörbarkeit von digitalen Clipping-Verzerrungen. In: *25. Tonmeistertagung* Verband Deutscher Tonmeister, 2008, S. 479–486
- [Shrout u. Fleiss 1979] SHROUT, Patrick E. ; FLEISS, Joseph L.: Intraclass Correlations: Uses in Assessing Rater Reliability. In: *Psychological Bulletin* 86 (1979), Nr. 2, S. 420–428

- [Tan u. a. 2003] TAN, Chin-Tuan ; MOORE, Brian C. J. ; ZACHAROV, Nick: The Effect of Nonlinear Distortion on the Perceived Quality of Music and Speech Signals. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 51 (2003), Nr. 11, S. 1012–1031
- [Tan u. a. 2004] TAN, Chin-Tuan ; MOORE, Brian C. J. ; ZACHAROV, Nick ; MATTILA, Ville-Veikko: Predicting the Perceived Quality of Nonlinearly Distorted Music and Speech Signals. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 52 (2004), Nr. 7/8, S. 699–711
- [Treutwein 1995] TREUTWEIN, Bernhard: Minireview – Adaptive Psychophysical Procedures. In: *Vision Research* 35 (1995), Nr. 17, S. 2503–2522
- [Voishvillo 2007] VOISHVILLO, Alex: Measurements and Perception of Nonlinear Distortion – Comparing Numbers and Sound Quality. In: *123rd Convention Audio Engineering Society*, 2007
- [Weinzierl 2008] WEINZIERL, Stefan (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin : Springer-Verlag, 2008
- [Wolff u. Preising 2005] WOLFF, Hans-Georg ; PREISING, Katja: Exploring item and higher order factor structure with the Schmid-Leiman solution: Syntax codes for SPSS and SAS. In: *Behavior Research Methods* 37 (2005), Nr. 1, S. 48–58
- [Zingbard u. a. 2005] ZINGBARD, Richard E. ; REVELLE, William ; YOVEL, Iftah ; LI, Wen: Cronbach's  $\alpha$  Revelle's  $\beta$  and McDonald's  $\omega_h$ : Their Relations With Each Other and Two Alternative Conceptualizations of Reliability. In: *Psychometrika* 70 (2005), Nr. 1, S. 123–133
- [Zwick u. Velicer 1984] ZWICK, William R. ; VELICER, Wayne F.: A Comparison of Five Rules for Determining the Number of Components in Data Sets. In: *92nd Annual Meeting American Psychological Association*, 1984

## Normen und Empfehlungen

- [DIN EN 60268-3 2001] Norm DIN EN 60268-3 Oktober 2001. *Elektroakustische Geräte – Teil 3: Verstärker*
- [ITU-R BS.1770 2006] International Telecommunication Union: *Algorithms to measure audio programme loudness and true-peak audio level*. 2006

## Software und Audiomaterial

- [Chajewski 2009] CHAJEWSKI, Michael: *rela: Scale item analysis*, 2009. <http://cran.r-project.org/package=rela>. – Paketversion 4.1

- [Ciba 2009] CIBA, Simon: *Whisper v1.0 – User documentation*, 2009. <http://www.ak.tu-berlin.de/whisper/>. – Programmversion 1.0.4
- [Eaton u. a. 2008] EATON, John W. ; BATEMAN, David ; HAUBERG, Søren: *GNU Octave Manual Version 3*, 2008. <http://www.network-theory.co.uk/docs/octave3/>. – Programmversion 3.2.4
- [EBU 2008] EBU: *Sound Quality Assessment Material – recordings for subjective tests*. Genf: European Broadcast Union, 2008. – TECH 3253
- [Härmä u. Palomäki 2000] HÄRMÄ, Aki ; PALOMÄKI, Kalle: *HUTear – a Free Matlab Toolbox for Modeling of Human Auditory System / Helsinki University of Technology*. <http://www.acoustics.hut.fi/software/HUTear>. 2000. – Forschungsbericht
- [Lawrence 2010] LAWRENCE, Michael A.: *ez: Easy analysis and visualization of factorial experiments*, 2010. <http://cran.r-project.org/package=ez>. – Paketversion 1.6
- [R Development Core Team 2009] R DEVELOPMENT CORE TEAM: *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Wien: R Foundation for Statistical Computing, 2009. <http://www.r-project.org>. – Programmversion 2.9.2
- [Revelle 2009] REVELLE, William: *psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research*, 2009. <http://cran.r-project.org/package=psych>. – Paketversion 1.0-85
- [Slaney 1998] SLANEY, Malcom: *Auditory Toolbox Version 2 / Interval Research Corporation*. <http://cobweb.ecn.purdue.edu/~malcolm/interval/1998-010/>. 1998. – Forschungsbericht
- [Suzuki u. Shimodaira 2009] SUZUKI, Ryota ; SHIMODAIRA, Hidetoshi: *pvclust: Hierarchical Clustering with p-Values via Multiscale Bootstrap Resampling*, 2009. <http://www.is.titech.ac.jp/~shimo/prog/pvclust/>. – Paketversion 1.2-1



# Verzeichnisse

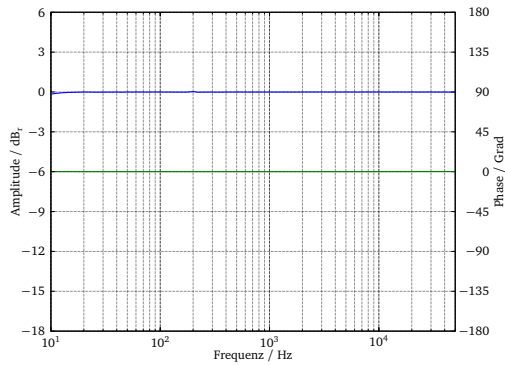
## Abbildungen

2.1	Schematischer Aufbau der Messung . . . . .	10
2.2	Amplituden- und Phasenfrequenzgang . . . . .	13
2.3	Gesamtklirrfaktor als Funktion des Eingangspegels bei drei Frequenzen . . . . .	16
2.4	Gesamtklirrfaktor und Klirrfaktor zweiter bis fünfter Ordnung als Funktion des Eingangspegels bei 1 kHz . . . . .	17
2.5	Gesamtklirrfaktor als Funktion der Frequenz bei verschiedenen Eingangspegeln . . . . .	18
2.6	Gesamtmodulationsfaktor als Funktion des Eingangspegels . . . . .	20
2.7	Differenztonfaktor zweiter (links) und dritter Ordnung (rechts) bei drei Mittelfrequenzen und vier Eingangspegeln . . . . .	21
2.8	DIM30 für alle Schaltungen bei vier Eingangspegeln . . . . .	22
2.9	Flussdiagramm zur Berechnung von $R_{\text{nonlin}}$ . . . . .	25
2.10	$R_{\text{nonlin}}$ als Funktion des Eingangspegels . . . . .	27
3.1	Schematischer Aufbau zur Aufnahme der Audiodateien . . . . .	29
3.2	Schematischer Aufbau der Hörversuche . . . . .	30
3.3	Dynamikfluss während der Aufnahme . . . . .	32
3.4	Ergebnisse des 3AFC-Versuchs . . . . .	35
3.5	Geschätzte Populationsmittelwerte der Erkennungsschwellen mit 95% Konfidenzintervallen . . . . .	36
3.6	Mittelwert der Schwellwerte übertragen auf Verzerrungsmaße . . . . .	37
3.7	Dendrogramme der individuellen Clusteranalysen . . . . .	42
3.8	Mittelwert-Profile der abgegebenen Urteile . . . . .	45
3.9	<i>Intraclass</i> -Korrelationskoeffizienten mit Konfidenzintervallen . . . . .	48
3.10	<i>Screeplot</i> beobachteter und simulierter, zufälliger Daten nach der Kommunalitäten-Schätzung . . . . .	49
3.11	Interaktionsdiagramme . . . . .	57
A.1	Kurzschlussmessung des Messgeräts . . . . .	67

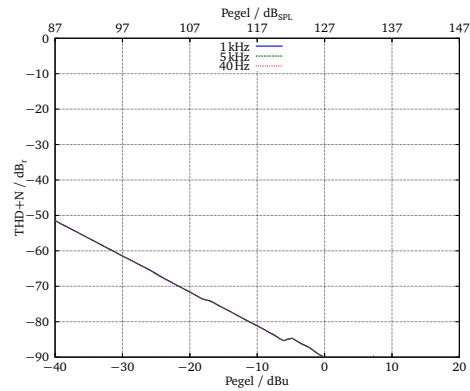
## Tabellen

1.1	Ursachen nichtlinearer Verzerrungen in analogen elektronischen Schaltungen	6
1.2	Untersuchte Mikrofonhaltungen . . . . .	7
2.1	Minimale und maximale Abweichung der Amplitudenfrequenzgänge in dB .	12
2.2	Geräuschspannungs- und berechneter Ersatzgeräuschpegel . . . . .	14
3.1	Ergebnisse der Varianzanalyse des Schwellwertversuchs . . . . .	36
3.2	Inhaltliche Gegenüberstellung aller individuellen Konstrukte . . . . .	43
3.3	Semantisches Differential . . . . .	44
3.4	<i>Intraclass</i> -Korrelationskoeffizienten . . . . .	47
3.5	Korrelation der Faktoren nach der <i>Promax</i> -Rotation . . . . .	50
3.6	Faktorladungen des allgemeinen Faktors und der drei Gruppierungsfaktoren .	51
3.7	Prüfvarianzen für das verwendete Versuchsdesign . . . . .	52
3.8	Ergebnisse der multivariaten Varianzanalyse . . . . .	53
3.9	Ergebnisse der univariaten Varianzanalyse . . . . .	56

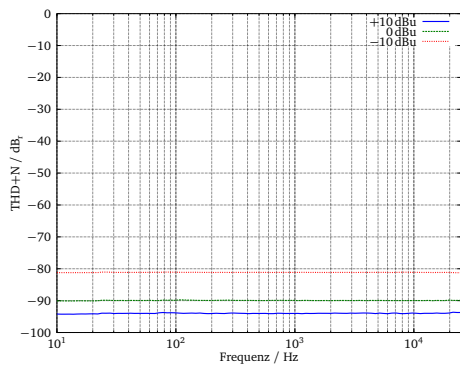
# A Kurzschlussmessung



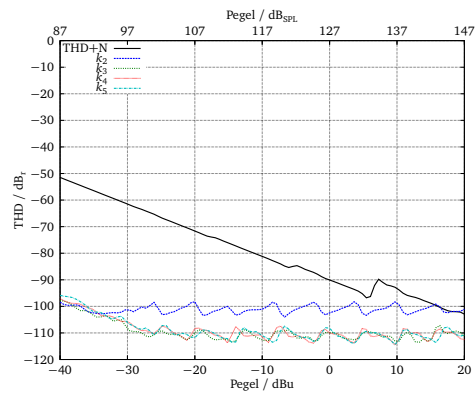
(a) Amplitude und Phase



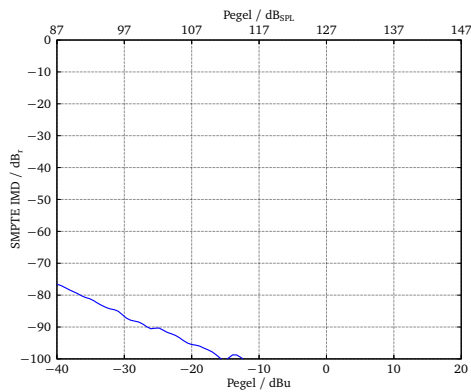
(b) Gesamtklirrfaktor über Pegel



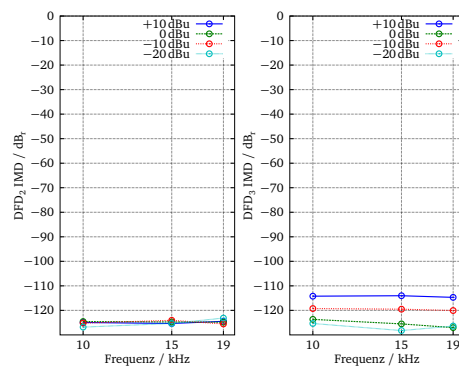
(c) Gesamtklirrfaktor über Frequenz



(d) Klirrfaktor einzeln



(e) Modulationsfaktor



(f) Differenztonfaktor



## B Quelltext

### Quelltext B.1: rnonlin.m

```
% Matlab R2009a
%
function R = rnonlin(X, wavout)
global fs;
5
global omefilt;
% Outer and middle ear filter (FIR 4097 taps)
wavout = filter(omefilt.a, 1, wavout);
10
global maxfc fc fCoeff;
% Seperate in gammatone filter outputs
Y = ERBFilterBank(wavout, fCoeff); Y = Y';

% 30ms frames
15
L = 30e-3 * fs;
% Maximum lag index 10ms
maxeta = 10e-3 * fs;

% Number of frames (without additional lag)
20
maxn = floor( (size(X, 1) - 2*maxeta) / L );

maxRxy = zeros(maxn, maxfc);
Level = zeros(maxn, maxfc);
Weight = zeros(maxn, maxfc);
25
Rxyn = zeros(2*maxeta + 1, maxfc);

for n = 1:maxn
% Frame index
idx = ( ((n-1)*L + 1):(n*L) ) + maxeta;
30

% Normalized cross correlation
Yn = Y(idx, :);
sumsqYn = sum(Yn.^2);
for eta = -maxeta:maxeta
35
Xn = X(idx-eta, :);
Rxyn(eta + maxeta+1, :) = sum( Xn .* Yn ) ./ sqrt( sum(Xn.^2) .* sumsqYn );
end

% Maximum of cross correlation
40
maxRxy(n, :) = max(Rxyn);

% Level for all filter outputs
Level(n, :) = 10 * log10( 1/L * sumsqYn )';
45

% Weighting
maxLevel = max( Level(n, : ) );
% Levels within 40dB of maximum are maximum
idx = find( Level(n, :) >= (maxLevel-40) );
if ( isempty(idx) == 0 )
50
Weight(n, idx) = 1;
end

% Levels between 40 and 80 dB scaled linearly
idx = find( Level(n, :) < (maxLevel-40) & Level(n, :) > (maxLevel-80) );
```

```

55   if ( isempty(idx) == 0 )
       Weight(n, idx) = ( 80 - maxLevel + Level(n, idx) ) / 40;
   end
   % Level smaller than 80dB of maximum are zero
   idx = find( Level(n, :) <= (maxLevel-80) );
60   if ( isempty(idx) == 0 )
       Weight(n, idx) = 0;
   end
   % Normalize weighting
   Weight(n, :) = Weight(n, :) / sum( Weight(n, :) );
   % Apply weighting
65   maxRxy(n, :) = maxRxy(n, :) .* Weight(n, :);
   end

   R = mean( sum(maxRxy, 2) );
end

```

## Quelltext B.2: factor-ana.r

```

## R version 2.9.2 (2009-08-24)
##
library(rela)
library(psych)
5
x <- data.frame(read.csv("sd-object.csv", header = FALSE))

# Measure of Sampling adequacy
paf.x <- paf(as.matrix(x))
10 msa.x <- data.frame(c(paf.x$MSA, paf.x$KMO))
rownames(msa.x) <- c(colnames(x), "Gesamt")
colnames(msa.x) <- "MSA"
write.csv(msa.x, "csv/msa.csv")

15 # Screeplot
pdf("screeplot.pdf")
fa.parallel.x <- fa.parallel(x, smc = TRUE)
dev.off()

20 # Very Simple Structure, MAP
vss.x <- VSS(x, rotate = "promax", plot = FALSE)

# MinRes, Varimax (orthogonal)
fa.var.x <- fa(x, nfactors = 3, residuals = TRUE, scores = TRUE)
25 write.csv(fa.var.x$loadings, "csv/mr-varimax-3.csv")

# MinRes, Promax (oblique)
fa.pro.x <- fa(x, nfactors = 3, rotate = "promax", residuals = TRUE, scores = TRUE)
write.csv(fa.pro.x$loadings, "csv/mr-promax-3.csv")
30 cor.fa.pro.x <- fa.pro.x$Phi
rownames(cor.fa.pro.x) <- c("MR1", "MR2", "MR3")
colnames(cor.fa.pro.x) <- c("MR1", "MR2", "MR3")
write.csv(cor.fa.pro.x, "csv/mr-promax-3.csv", append = TRUE)

35 # Schmid-Leiman
schmid.x <- schmid(cor.x, rotate = "promax")
write.csv(schmid.x$sl, "csv/sl-3.csv")
omegaT <- (sum(cor.x) - sum(schmid.x$sl[, 6])) / sum(cor.x)
omegaH <- sum(schmid.x$sl[, 1])^2 / sum(cor.x)
40 alpha <- ((sum(cor.x) - sum(diag(cor.x)))/sum(cor.x)) * (14/(14 - 1))

```

---

### Quelltext B.3: var-ana.r

```
## R version 2.9.2 (2009-08-24)
##
library(ez)

5 n <- 14
ord <- c(9, 4, 7, 8, 5, 2, 12, 3, 14, 11, 6, 1, 13, 10)

x <- data.frame(read.csv("sd-manova.csv", header = FALSE))
x[, 1] <- as.factor(x[, 1])
10 x[, 2] <- as.factor(x[, 2])
x[, 3] <- as.factor(x[, 3])

Rating <- as.matrix(x[, ord+3])

15 # MANOVA
source("multivar.r")

intercept.x <- data.frame(matrix(NA, n, 8))
rownames(intercept.x) <- colnames(Rating)
20 colnames(intercept.x) <- c("df[H]", "df[E]", "SS[H]", "SS[E]", "F", "p", "pes", "ges")
univar <- data.frame(matrix(NA, n, 14))
rownames(univar) <- colnames(Rating)
colnames(univar) <- c(
25 "df[H]", "df[E]", "SS[H]", "SS[E]", "F", "p", "pes",
"ges",
"W", "p[W]",
"GGe", "p[GG]", "HFe", "p[HF]"
)
uni.x <- list(univar, univar, univar)
30

# Analysis of variance
for (SC in 1:n) {
  anova.x <- ezANOVA(x,
35 colnames(Rating)[SC],
.(Run),
within = .(Mic, Content)
)

intercept.x[SC, ] <- cbind(
40 anova.x[[1]][1, -c(1, 8)],
anova.x[[1]][1, 4] / (sum(anova.x[[1]][, 4:5]) - sum(anova.x[[1]][-1, 4]))
)

for (Effect in 1:3) {
45 uni.x[[Effect]][SC, ] <- cbind(
anova.x[[1]][Effect+1, -c(1, 8)],
anova.x[[1]][Effect+1, 4] / (sum(anova.x[[1]][, 4:5]) - sum(anova.x[[1]][(2:4)[-Effect], 4])),
anova.x[[2]][Effect, -c(1, 4)],
anova.x[[3]][Effect, -c(1, 4, 7)]
50 )
}
}
write.csv2(intercept.x, "csv/univar-intercept.csv")
write.csv2(uni.x[[1]], "csv/univar-mic.csv")
55 write.csv2(uni.x[[2]], "csv/univar-content.csv")
write.csv2(uni.x[[3]], "csv/univar-mic-content.csv")
```

## Quelltext B.4: multivar.r

```
## R version 2.9.2 (2009-08-24)
##
manova.x <- manova(Rating ~ Mic * Content * Run, data = x)
D <- summary(manova.x)$SS[-3]
5 row.names <- summary(manova.x)$row.names[-3]
  degf <- summary(manova.x)$Df[-3]

multi.x <- data.frame(matrix(NA, nrow = 3, ncol = 6))
rownames(multi.x) <- row.names[1:3]
10 colnames(multi.x) <- c(
  "Pillai's_Trace", "F", "df1", "df2", "p(F)",
  "PetaSq")

for (Effect in 1:3) {
15   # Multivariate
     H <- D[[Effect]]
     dfH <- degf[[Effect]]
     E <- D[[Effect+3]]
     dfE <- degf[[Effect+3]]
20
     r <- Re(eigen(E %*% solve(H+E), symmetric = FALSE)$values)

     # Pillai
     Pillai <- sum(1 - r)
25     s <- min(n, dfH)
     b <- max(n, dfH)
     F <- ((dfE - n + s) * Pillai) / (b*(s - Pillai))
     dfF <- c(s*b, s*(dfE - n + s))
     pF <- pf(F, dfF[1], dfF[2], lower.tail = FALSE)
30     # Partial eta squared
     PetaSq <- (dfH*F) / (dfH*F + dfE)

     multi.x[Effect, ] <- c(Pillai, F, dfF[1], dfF[2], pF, PetaSq)
35 }

write.csv2(multi.x, "csv/multivar.csv")
```