

# Hochqualitativer 1 W-NF-Monitor-Verstärker



Peter Treytl  
Januar 2009

## 1. Einleitung

Für anspruchsvolle UKW-FM-Empfänger-Projekte wurde ein NF-Verstärker benötigt, der sowohl den Anschluß eines Kopfhörers als auch den Betrieb eines kleinen, hochqualitativen Monitor-Lautsprechers bei Zimmerlautstärke ermöglicht. Ziel der beschriebenen Entwicklungsaktivitäten war deshalb der Aufbau eines NF-Verstärkers höchster Übertragungsqualität mit einer Ausgangsleistung von etwa 1W bei möglichst geringen Abmessungen. Im Folgenden werden das ausgewählte Schaltungskonzept beschrieben und Hinweise zur Dimensionierung und zum Aufbau gegeben. Die Messergebnisse werden ausführlich präsentiert.

## 2. Schaltung

Die Auswahl des Schaltungskonzeptes wurde neben der Forderung nach hoher Qualität auch durch vorhandenes Material beeinflusst. Letzteres betrifft vor allem die verwendeten Dreifachtrioden 6AV11, Compactrons von General Electric und den Ausgangstransformator, der aus einem nicht mehr restaurierbaren Empfangsgerät der Firma Imperial stammt und für den Betrieb mit der Röhre ECLL800 vorgesehen war. Gleichwertige Ausgangstrafos, ebenfalls in der Größe EI60-20, gibt es auch bei Grundig und anderen. Die Schaltung zeigt Bild 1. Das Eingangssignal gelangt über den Lautstärkereglern P1 zur Eingangsstufe. Diese wurde in SRPP (Shunted Regulated Push Pull)-Technik aufgebaut. Diese Schaltungsart, bei der die Röhre V12 als gesteuerter Anodenwiderstand der Triode V13 wirkt, zeichnet sich vor allem durch einen geringen Innenwiderstand, erhöhte Steilheit und einen nur geringfügig verkleinerten Verstärkungsfaktor  $\mu$  aus. Die Werte einschließlich der Stufenverstärkung V sind in Tabelle 1 gegenübergestellt.

	6AV11 als Triode (Ra = 100 k $\Omega$ )	2x6AV11 in SRPP
$\mu$	14	11
Ri	12	3,1 k $\Omega$
S	1,15	3,01 mA/V
V	12	10,5

**Tabelle 1: Charakteristische Parameter der SRPP-Stufe**

Im konkreten Fall wird der Innenwiderstand der Stufe auf ein Viertel reduziert, was der niederohmigen Ansteuerung der Folgestufe und damit unter anderem auch einem ausgeglichenen Frequenzgang zugute kommt.

Die Phasenumkehrstufe kombiniert wechselstrommäßig eine Kathodenbasis- (KBS, V11) mit einer Gitterbasisschaltung (GBS, V21). Die Schaltung zeichnet sich wegen des Prinzips des Differenzverstärkers und aufgrund der starken Gegenkopplung (R5, R6) durch hohe Stabilität gegenüber Betriebsspannungsschwankungen und Alterungserscheinungen aus. Für die Erreichung eines geringen Klirrfaktors ist es Voraussetzung, daß die gegenphasigen Spannungen zur Ansteuerung der beiden Endröhren gleich groß sind. Die etwas geringere Spannungsverstärkung der GBS gegenüber der KBS wird deshalb mittels P2 ausgeglichen.

Die Gegentakt-Endstufe mit den Systemen V22 und V23 wurde sorgfältig dimensioniert. GEC spezifiziert für die Einzelsysteme der 6AV11 eine Anoden-Verlustleistung von maximal 2,75W. Alle drei Triodensysteme im Röhrenkolben dürfen maximal 6W dissipieren. Da die Verlustleistung von V21 weniger als 0,1W beträgt, kann der Grenzwert von 2,75W je System voll ausgenutzt werden. Bei der Berechnung der thermischen Verlustleistung ist von der aufgenommenen Gleichstromleistung ( $U_a \cdot I_a$ ) auszugehen. Davon ist die ausgekoppelte NF-Nutzleistung abzuziehen.

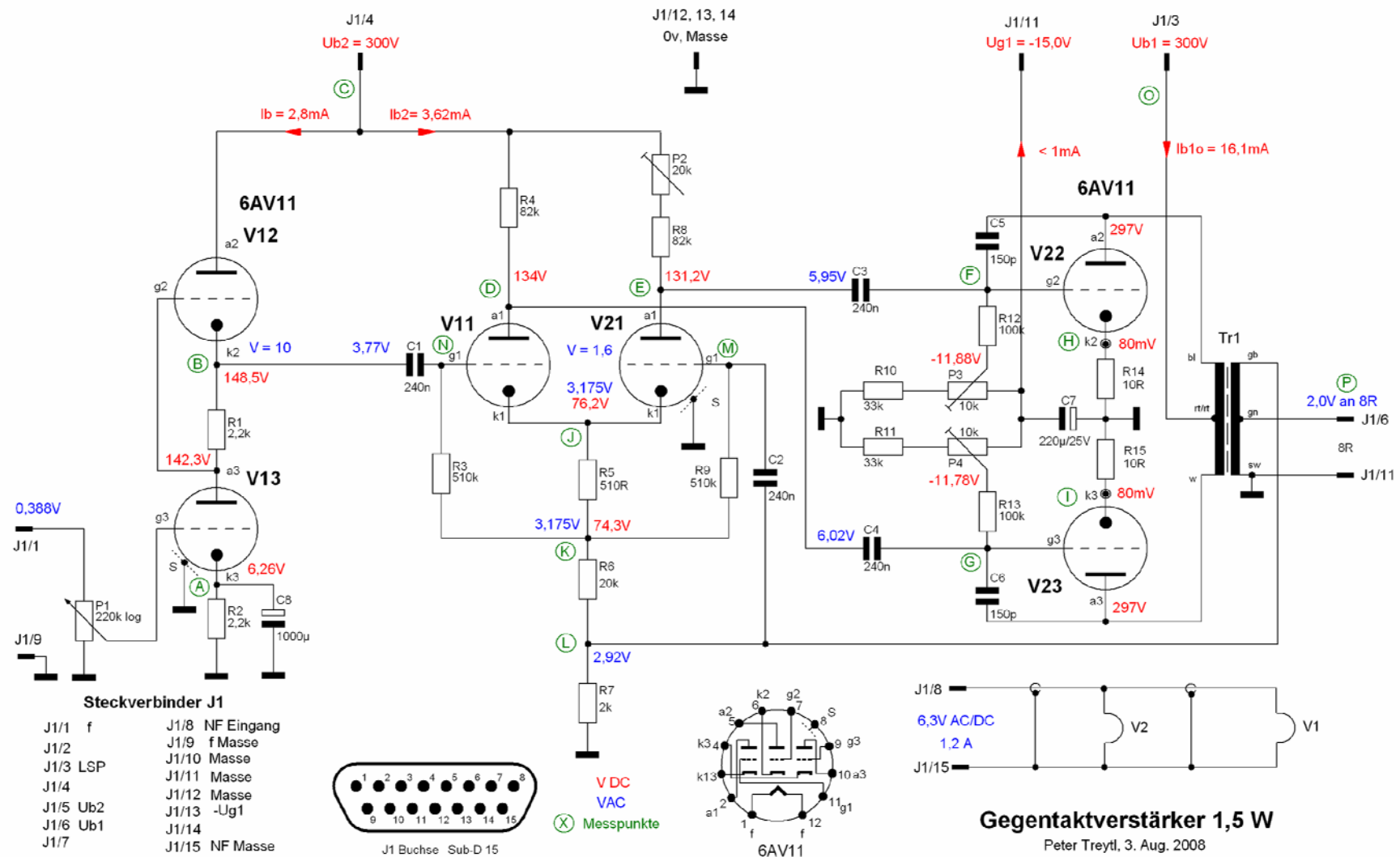
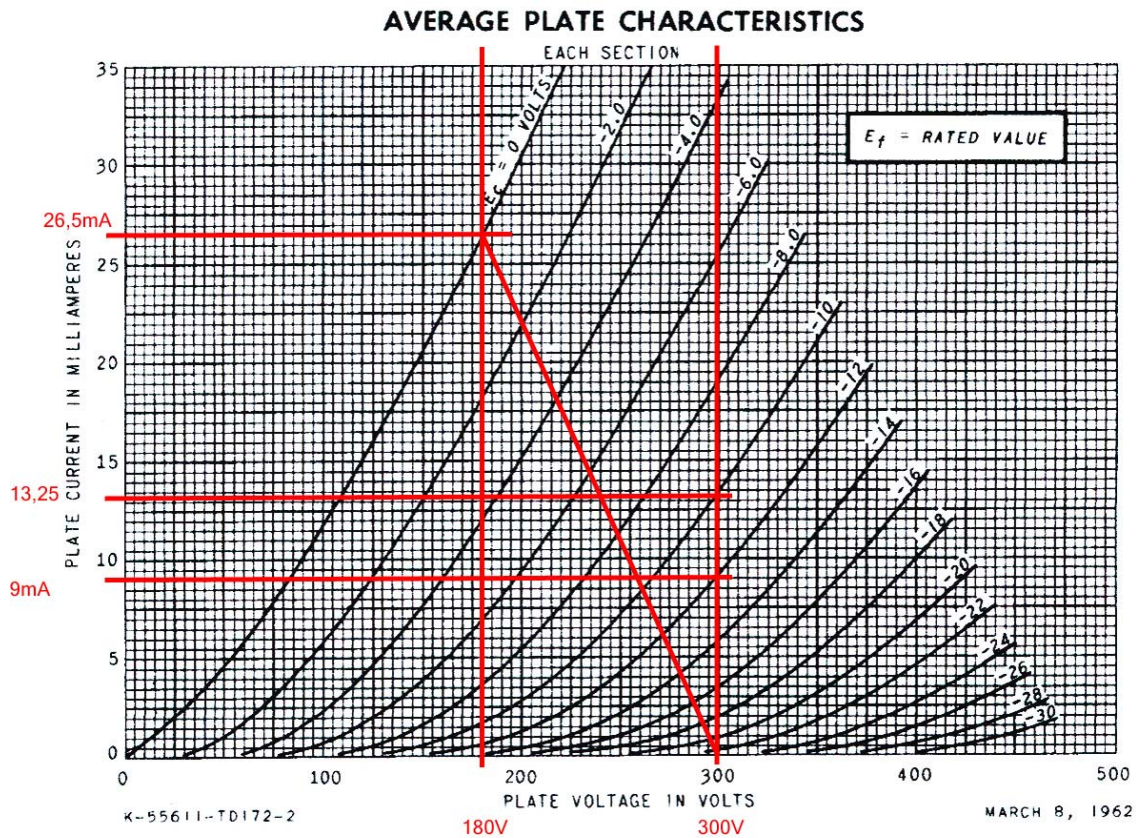


Bild 1: Schaltung des NF-Verstärkers

Der Arbeitspunkt wurde anhand des Datenblattes, Bild 2, festgelegt. Die Anodenspannung wurde mit 300V gewählt. Der primärseitige Spannungsabfall von 3V am Ausgangstransformator wird vernachlässigt. Nach einer Faustformel ergibt sich der maximal zu



**Bild 2: Ia/Ua Kennlinienfeld der 6AV11**

erwartende Strom  $I_{max}$  von 26,5mA im Schnittpunkt der vertikalen Linie  $0,6 U_a$  (180V) mit der Kennlinie  $U_g = 0V$ . Die Steigung der Geraden von diesem Schnittpunkt zum Punkt 300V/0mA ist ein Maß für den Arbeitswiderstand:

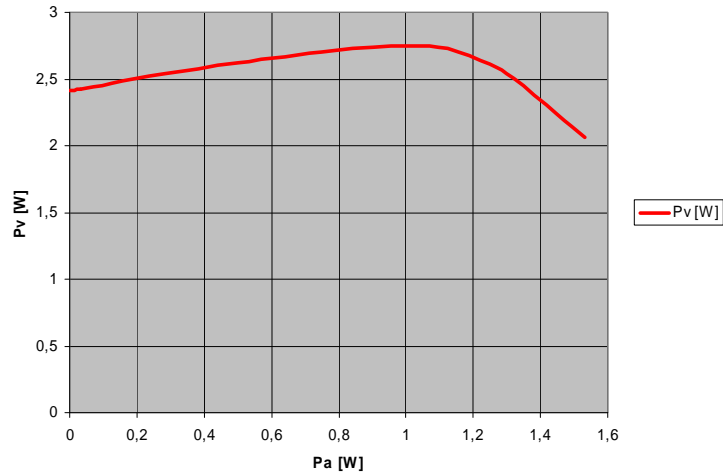
$$U_a = 300V, \quad 0,6 \cdot U_a = 180V$$

$$R_a = \frac{(300-180) V}{26,5 \text{ mA}} = 4,53 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

Der verwendete Ausgangstransformator mit Kern EI60-20 besitzt ein Übersetzungsverhältnis von 24,7:1. Bei Belastung der Sekundärseite des Trafos mit einer Lautsprecher-Impedanz von  $8\Omega$  transformiert sich diese primärseitig mit dem Quadrat dieses Verhältnisses auf  $4881 \Omega$ . Das stimmt sehr gut mit dem theoretisch ermittelten Wert überein. Für die maximal erreichbare Nutzleistung gilt die Näherungsformel

$$P_a = (I_{max} \cdot U_a) / 5 = (0,0265 \cdot 300) / 5 = 1,6 \text{ W}$$

Da bei reinem A-Betrieb die höchstzulässige Verlustleistung von 2,75 W pro System überschritten würde, wurde Gegentakt AB-Betrieb gewählt. Die Gittervorspannung liegt in diesem Fall bei -12V. Der Anoden-Ruhestrom reduziert sich bei AB-Betrieb von 13,25 mA auf rund 8 mA. Bild 3 zeigt, daß die gemessene dissipierte Verlustleistung eines Einzelsystems dann noch innerhalb der spezifizierten Grenze liegt.

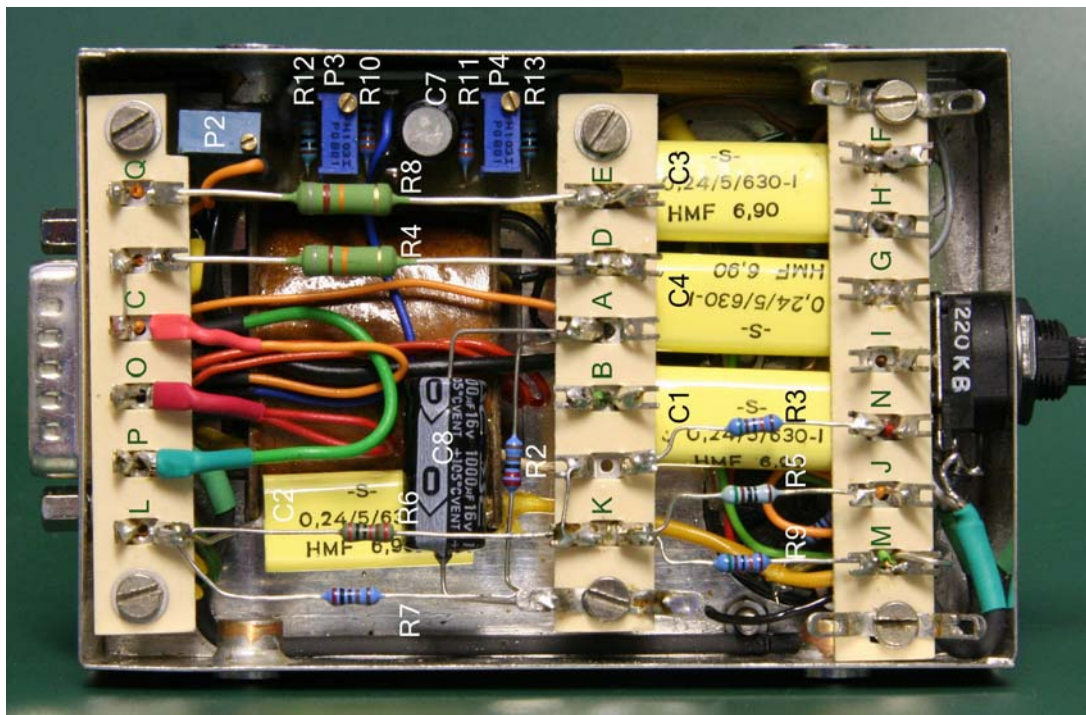


**Bild 3: Thermische Verlustleistung einer Einzel-Triode**

Zur individuellen Einstellung der beiden Endröhren dienen P3 und P4. Die Gitterspannungen werden mittels dieser Regler so eingestellt, daß im Leerlauf, also ohne NF-Ansteuerung, an den beiden Messwiderständen R14 und R15 ein Spannungsabfall von jeweils 80mV auftritt. Die Kondensatoren C5 und C6 bewirken eine hochfrequente Gegenkopplung zwischen Anode und Gitter und verhindern dadurch Schwingen im Ultraschallbereich und darüber.

Das Ausgangssignal der Endstufe wird über eine Gegenkopplungswicklung in die Kathodenkombination der Phasenumkehrstufe eingespeist und reduziert so den Klirrfaktor.

### 3. Aufbau



**Bild 4: Lage der Messpunkte und der Bauelemente**



Der Verstärker wurde in ein Weißblechgehäuse Typ 9 der Firma Schubert mit den Abmessungen 111x74x30mm eingebaut. Für den Ausgangstransformator wurde eine Abdeckung aus kupferkassierten Epoxydharz-Platten angefertigt. Alle Anschlüsse sind über einen 15-poligen Submin-D-Stecker herausgeführt. Bild 4 ist die Lage der Komponenten zu entnehmen. Die Bezeichnung der Bauelemente und der Messpunkte stimmt mit dem Schaltplan überein. Die Montage erfolgt mittels dreier Lötösenleisten mit einem Lochabstand von 8mm. Die Einstellregler P2 bis P4, die Widerstände R10 bis R13 und der Elko C7 sind auf einer kleinen Platine untergebracht. Die Widerstände R1, R14 und R15 sowie die beiden Kondensatoren C5 und C6 sitzen direkt an den Röhrenfassungen. Die Gesamtansicht des Verstärkers, Bild 5, zeigt den kompakten Aufbau. Die Gesamtabmessungen betragen

H = 75 mm  
 B = 74 mm  
 T = 111 mm

**Bild 5: Gesamtansicht des Verstärkers**

Die Masse liegt bei 760 g.

## 4. Messungen am Verstärker

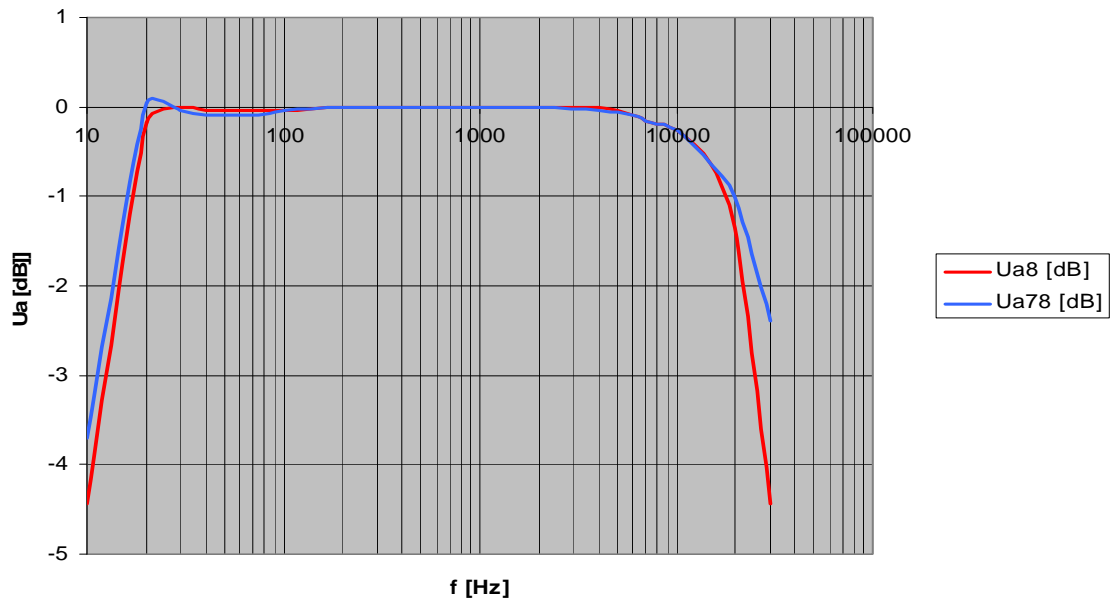
### 4.1 Frequenzgang und Rechteckverhalten

In Bild 6 ist der Frequenzgang des Verstärkers für Lastwiderstände von 8  $\Omega$  (Betrieb an Lautsprecher) und 78  $\Omega$  (Kopfhörerbetrieb) aufgetragen. Er ist zwischen 16 Hz und 20 kHz geradlinig mit einem Abfall von etwa 1 dB. Die 3 dB-Bandbreite reicht von 11 Hz bis ca. 30 kHz. Die Messungen wurden bei konstanter Eingangsspannung und einer Ausgangsspannung von 2 V @ 1000 Hz durchgeführt. Das entspricht bei einem Lastwiderstand von 8  $\Omega$  einer Leistung von 0,5 W.

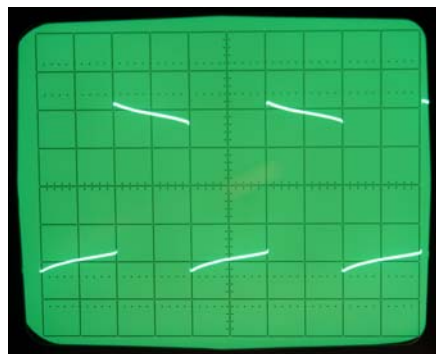
Ein aussagefähiges Kriterium für die Übertragungsqualität eines Verstärkers ist das Verhalten bei Ansteuerung mit Rechtecksignalen. In Bild 7 sind die Ausgangssignale bei Betrieb des Verstärkers mit 50 Hz, 1000 Hz, und 5 kHz bei einem Ausgangspegel von 1 V (10dB unter Vollaussteuerung) dargestellt. Die selbst bei einer Frequenz von 50 Hz noch sehr geringe Dachschräge spricht für die außergewöhnlich gute Übertragungsqualität.

### 4.2 Ausgangsleistung, Eingangsspannung und Klirrfaktor

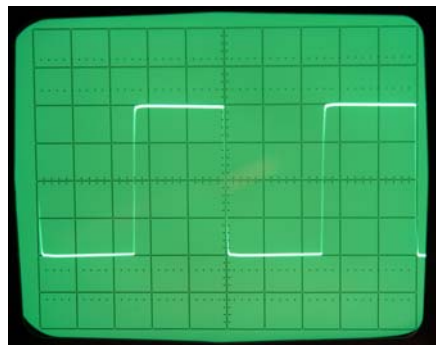
Die zur Erreichung einer bestimmten Ausgangsspannung  $U_{out}$  bzw. Ausgangsleistung  $P_{out}$  erforderliche effektive Spannung  $U_{in}$  am Eingang des Verstärkers ist für die Varianten Betrieb am Kopfhörer bzw. Lautsprecher in den Bildern 8a und 8b dargestellt.



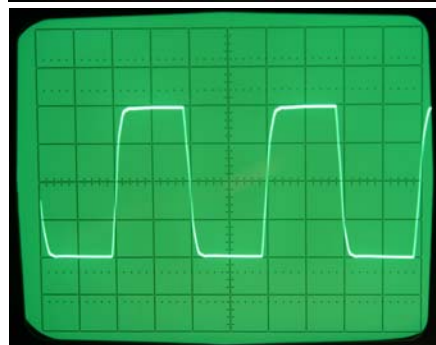
**Bild 6: Frequenzgang mit Lautsprecher (rot) und Kopfhörer (blau)**



$f = 50 \text{ Hz}$

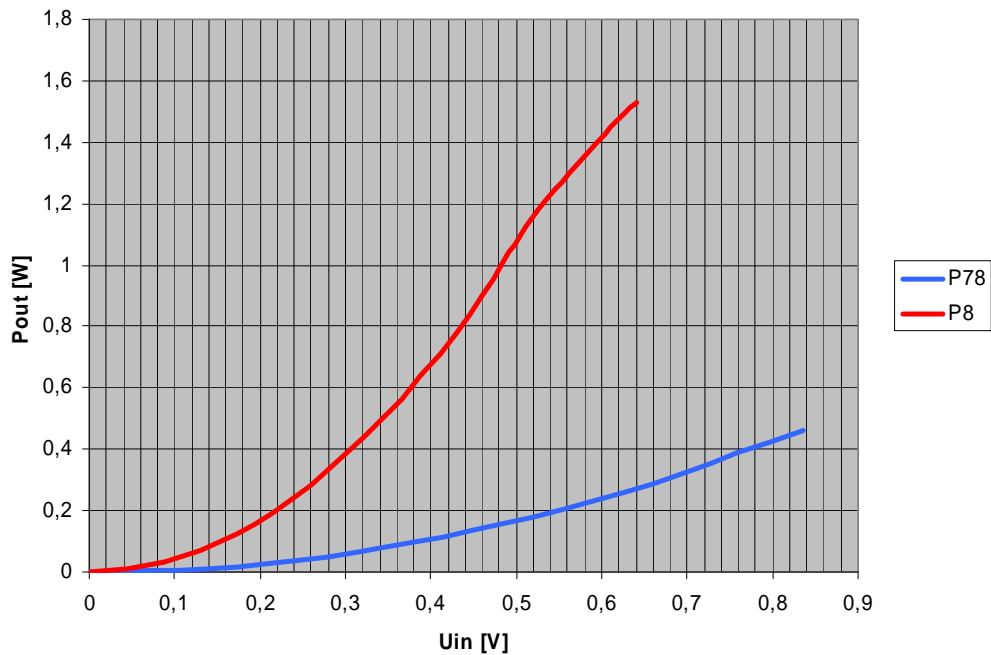


$f = 1 \text{ kHz}$

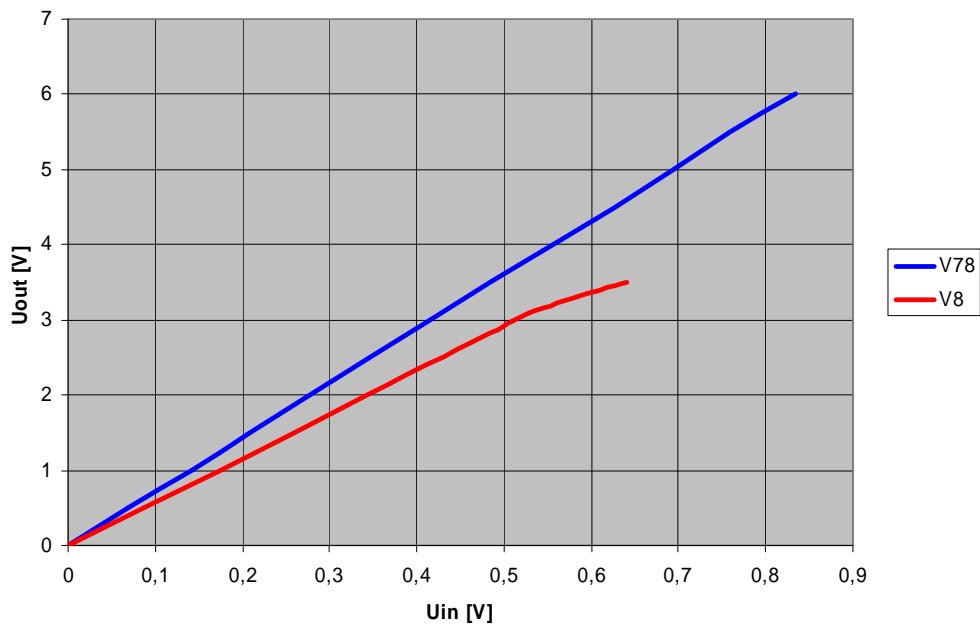


$f = 5 \text{ kHz}$

**Bild 7: Rechteckdurchgänge bei 50, 1000 und 5000 Hz,  $y = 0,5\text{V/Skt}$**



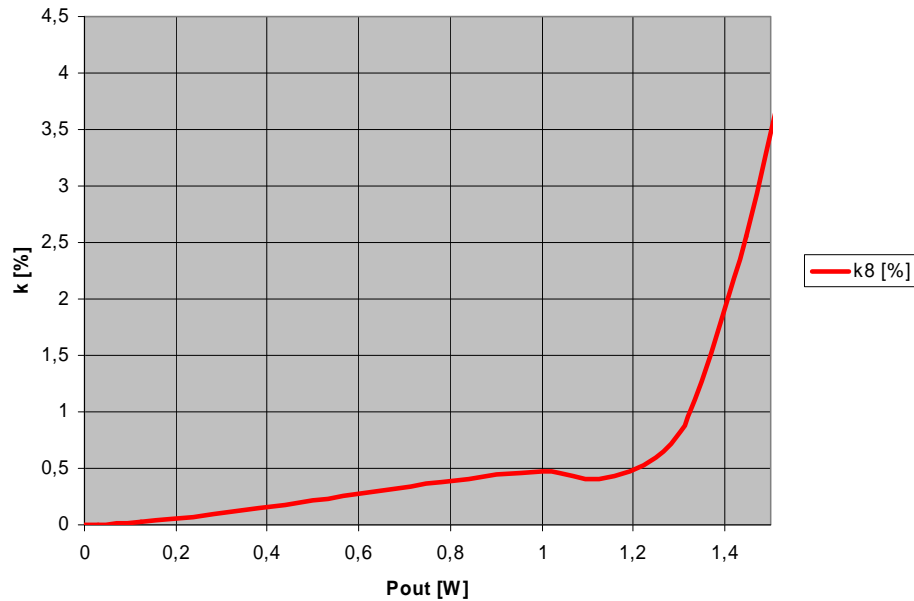
**Bild 8a: Ausgangsleistung  $P_{out}$  über der Eingangsspannung für Kopfhörer- (blau) und Lautsprecherbetrieb (rot)**



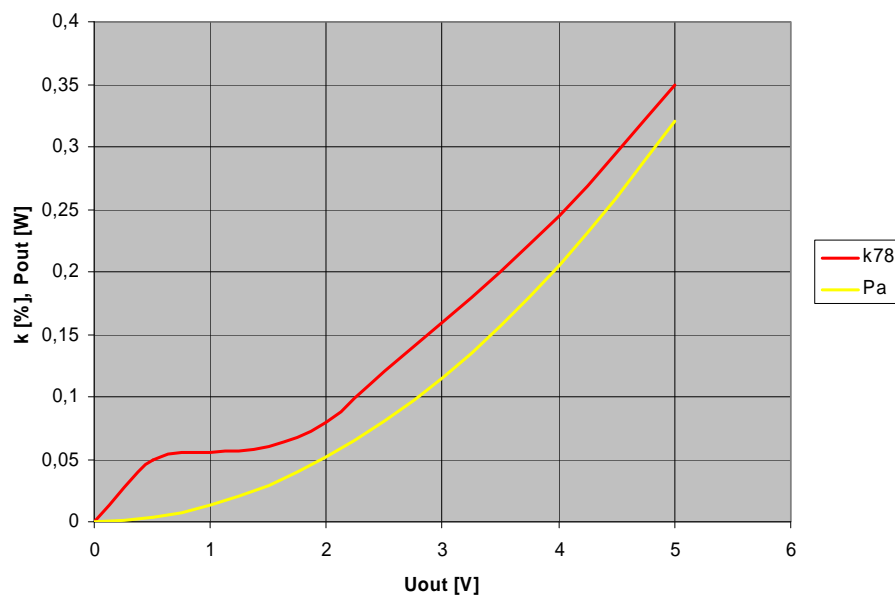
**Bild 8b: Ausgangsspannung über der Eingangsspannung (blau: Kopfhörer, rot: 8  $\Omega$  Lautsprecher)**

Für die Darstellung des Klirrfaktors in den Bildern 9 wurden für die beiden Betriebsarten unterschiedliche Darstellungen gewählt. Der Klirrfaktor für Lautsprecherbetrieb ist in Bild 9a über der Ausgangsleistung  $P_{out}$  aufgetragen. Er bleibt bis 1,2 W unter 0,5%. Für Kopfhörerbetrieb wurde der Klirrfaktor als Funktion der Ausgangsspannung  $U_{out}$  dargestellt. Zusätzlich ist zur jeweiligen Ausgangsspannung die zugehörige Ausgangsleistung aufgetragen, die sich bei einem Arbeitswiderstand von 78  $\Omega$  ergibt. Entsprechend liegt der Klirrfaktor bei einer Ausgangsleistung von 50 mW (etwa 2V an 78 $\Omega$ ) bei 0,075%.





**Bild 9a: Klirrfaktor als Funktion der Ausgangsleistung, Lautsprecherbetrieb 8Ω**



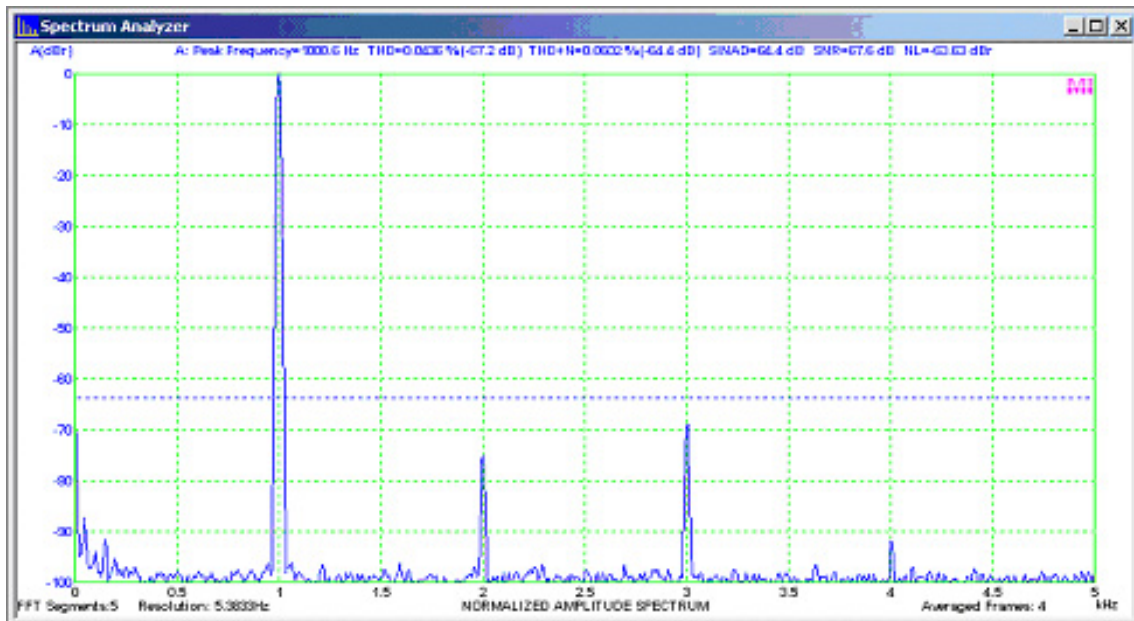
**Bild 9b: Klirrfaktor (rot) und Ausgangsleistung (gelb) als Funktion der Ausgangsspannung bei Kopfhörerbetrieb mit 78Ω.**

### 4.3 Messungen des Verstärkers mit einem Audio-Analyzer

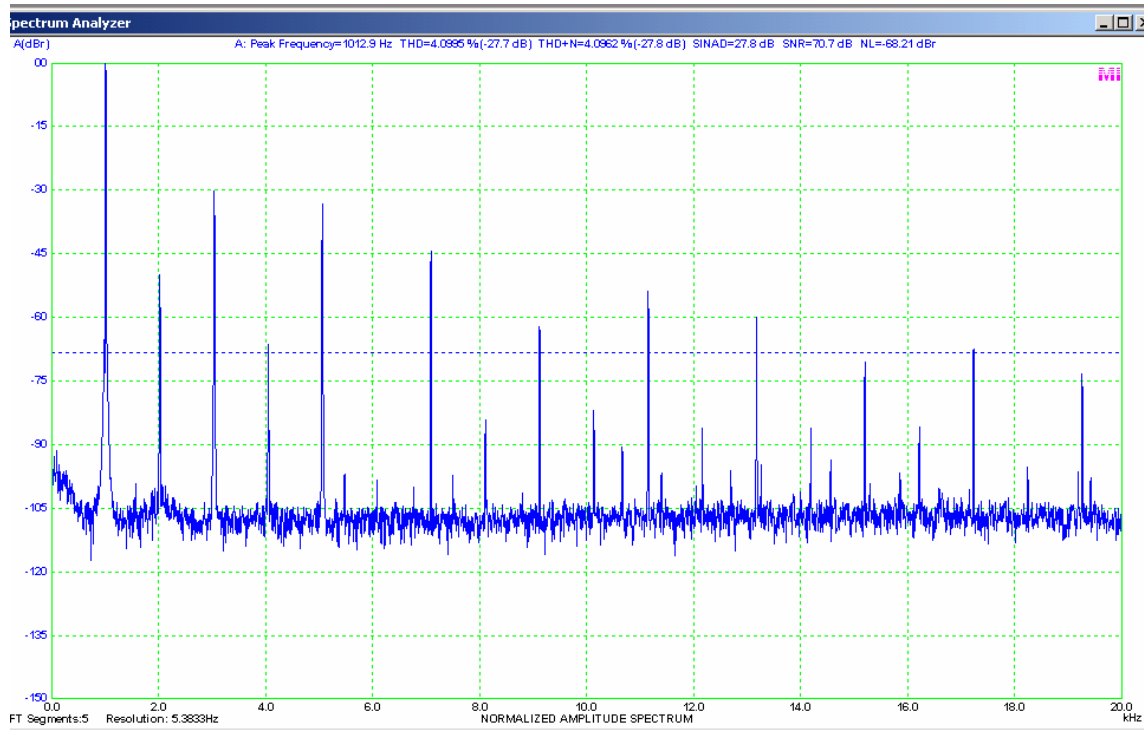
Die Beurteilung der Übertragungsqualität aus einem anderen Blickwinkel ermöglicht die Untersuchung des Verstärkers mit einem auf einem PC installierten Audio-Analysator. Zum Einsatz kam das Software-Produkt Multi-Instrument 3.0 von Virtins Technology. Die Messungen wurden mit dem selben klirrfreien RC-Generator durchgeführt, mit dem auch die analogen Messungen vorgenommen wurden. Das Ausgangsspektrum des RC-Generators bei 1000 Hz zeigt Bild 10. Es fallen die beiden Linien bei 2kHz und 3kHz (erste und zweite Oberwelle) mit einem Abstand von 70 dB zur Grundwelle auf. Dieser Umstand ist bei der Beurteilung der Messergebnisse zu berücksichtigen.

Für das Ausgangsspektrum in Bild 11 wurde der Verstärker absichtlich übersteuert. Man erkennt deutlich, daß in einer Gegentakt-Endstufe mit Trioden vor allem geradzahlige Oberwellen entstehen, die subjektiv nicht so störend empfunden werden wie ungerad-

zahlige. Die ausgeprägte Präsenz der ersten Oberwelle im Ausgangsspektrum ist auf das Vorhandensein dieser Komponente als Störlinie im Ausgangssignal des RC-Generators (Bild 10) zurückzuführen. Entsprechend ergibt sich die ebenfalls stark ausgeprägte dritte Oberwelle als Intermodulationsprodukt mit der ersten.



**Bild 10: Spektrum des Ausgangssignals des RC-Generators**

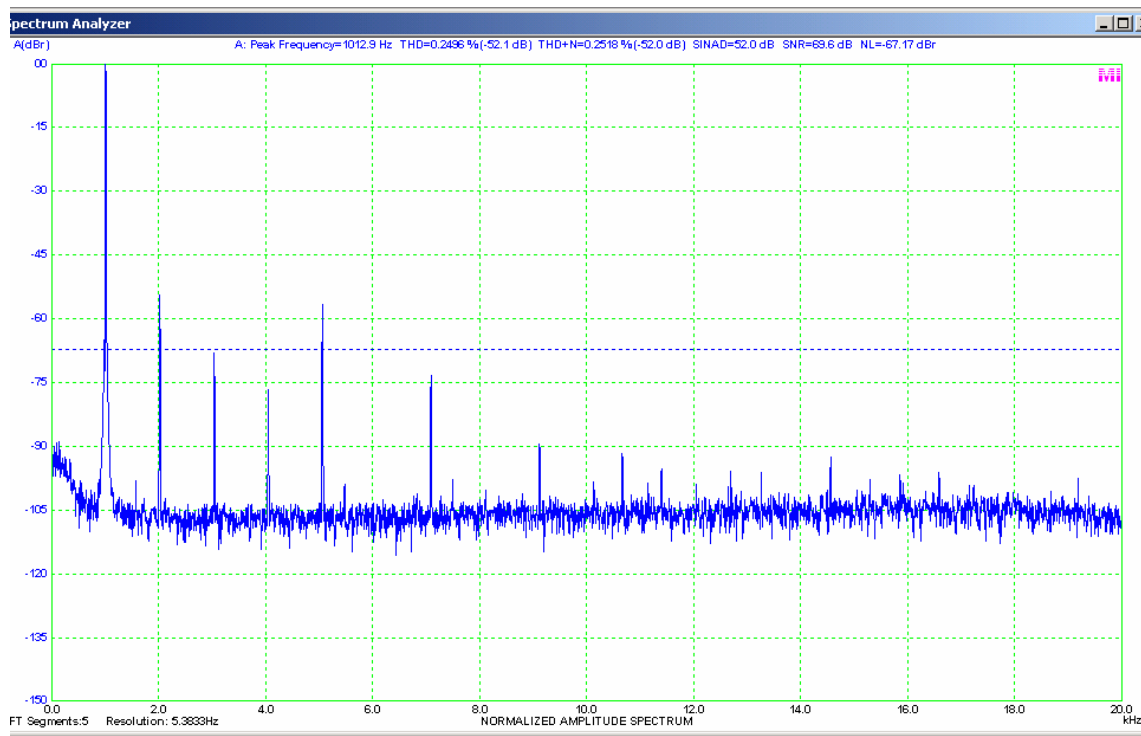


**Bild 11: Ausgangsspektrum des Verstärkers bei  $U_{out} = 3,46V$  (1,5W) an  $8\Omega$**

Bild 12 schließlich zeigt das Spektrum bei einer Messfrequenz von 1000 Hz und einer Ausgangsleistung von 1W entsprechend 2,83 V an 8 Ω. Die bei dieser Einstellung gemessenen Werte sind

THD =  $k = 0,25\%$   
 SINAD = -52 dB  
 SNR = 69,6 dB  
 NL = -67,17 dB

Klirrfaktor  
 Signal zu Klirrfaktor + Rauschen  
 Signal zu Rauschen  
 Rauschen relativ zu Nutzsignal



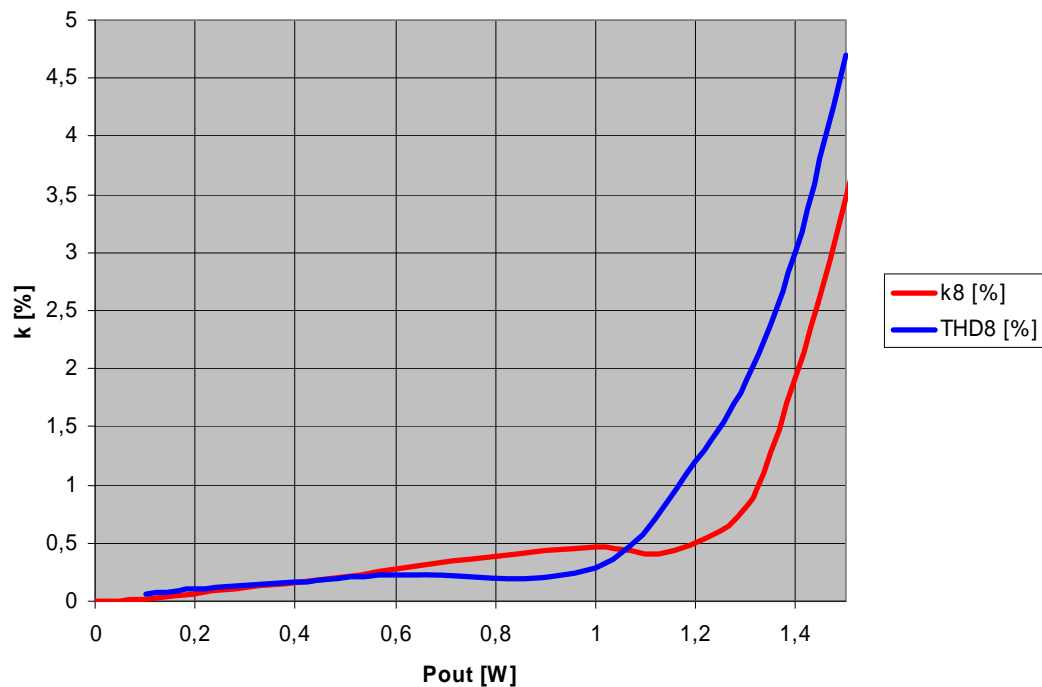
**Bild 12: Spektrum bei einer Ausgangsleistung von 1W an 8 Ω**

Der auf diese Weise gemessene Klirrfaktor bei Betrieb an 8 Ω ist in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung in Bild 13 dargestellt. Zusätzlich wurde die Messkurve aus Bild 9a in das Diagramm übertragen. Bis zu einer Ausgangsleistung von fast 1,2W liegen die mit dem Analyzer nach der FFT-Methode gemessenen Werte bis zu 50% unter den analogen Messwerten. Über 1,2W liegen sie überraschender Weise deutlich darüber. Das liegt aber nicht an einer möglichen Übersteuerung der Eingangsstufe der Soundkarte.

#### 4.4 Hörtests

Hörtests wurden sowohl mit einem Yamaha Kleinlautsprecher Pianocraft NX-E800 als auch mit dem akustisch offenen SONY-Kopfhörer MDR 605 durchgeführt. Letzterer wurde über einen Vorwiderstand von 39 Ω an den Ausgang des Verstärkers angeschlossen. Angesteuert wurde direkt vom Ausgang eines CD-Players. Natürlich ist im Lautsprecherbetrieb die Lautstärke auch wegen des geringen akustischen Wirkungsgrades der verwendeten Box begrenzt. Sie liegt aber deutlich über normaler Zimmerlautstärke. Das Klangbild ist neutral und transparent und in keiner Weise aggressiv. Überraschend auch, wie ausdrucksstark Bässe sowohl bei klassischer als auch bei Pop-Musik ankommen. Nicht ohne Grund wurde früher der Begriff „Zimmerlautstärke“ bei einer Ausgangsleistung von nur 50mW definiert!

Bei Kopfhörerbetrieb lässt neben der Tonqualität auch die Lautstärke keine Wünsche offen.



**Bild 13: Gegenüberstellung der Messwerte für den Klirrfaktor bei 1000Hz: THD (blau) gemessen mit dem Audio-Analyzer und k (rot) gemessen mit einem analogen Klirrfaktor-Messgerät**

## 5. Zusammenfassung

Konzept und Aufbau eines kleinen, qualitativ hochwertigen Gegentaktverstärkers zur Verwendung als Monitorverstärker für Lautsprecher- und Kopfhörerbetrieb werden beschrieben. Die charakteristischen elektrischen und mechanischen Daten sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Hörtests mit einer guten Lautsprecherbox und einem akustisch offenen Kopfhörer bestätigen die herausragenden elektrischen Eigenschaften.

Ausgangsleistung	Pa	1W
Eingangsspannung für Pa = 1W	Uin	<0,5Veff
Klirrfaktor bei Abschluß mit 8Ω	k	0,25% *)
Klirrfaktor bei Kopfhörerbetrieb	k	< 0,1%
Frequenzgang (-1dB)		16Hz...20kHz
Betriebsspannung	Ub	300V
Betriebsstrom (Pa = 1W)	Ib	29mA
Gitterspannung	Ug1	-15V
Heizspannung	Uf	6,3V
Heizstrom	If	1,2A
Abmessungen über alles	HxBxT	75x74x111mm
Masse	m	761g

\*) gemessen mit FFT Audio Analyzer. Analog gemessen: 0,5%

**Tabelle 2: Charakteristische Daten des Monitor-Verstärkers**