

## 300-W-MOS-FET LINEARENDESTUFE für 144 MHz, Testbericht über H L V 300 (BEKO)

Günter Schwarzbeck, DL1BU, W-6917 Schönau-Altneudorf

---

In den VHF-UHF-Bereichen besteht besonderer Bedarf an "sauberen" SSB-Signalen, da die in der Praxis vorkommenden Unterschiede in der Feldstärke und der Empfängereingangsspannung außerordentlich hoch sein können.

Von exponierten Höhenstandorten und mit Endstufen und Yagi-Gruppen kann auf dem Nachbarhügel eine Empfängereingangsspannung von 10 mV auftreten, ein fernes schwaches DX-Signal kann unter 0,1  $\mu$ V liegen. Wenn diese 100 dB Differenz verkraftet werden sollen, muß zunächst das Intermodulations- und Seitenband-Rauschverhalten des Empfängers gut sein.

Man kann sich jedoch durch beliebige Verbesserung des Empfängers nicht vor "breiten" Signalen in der Nachbarschaft schützen. Bei Telegraphie können scharfe Zeichen durch das "Click-Spektrum" ganze Abschnitte des Bandes für den Empfang leiser Signale verderben, bei SSB kommen zwei Probleme zusammen, nämlich Impulsspektren durch Übersteuerung mit der Folge steil ansteigenden Gitterstroms in einer Röhrenendstufe und vor allem die Sender-Intermodulation.

Werden dem SSB-Sender zwei NF-Töne von 1 kHz und 2 kHz zugeführt, entstehen durch Linearitätsabweichungen - vor allem in der Endstufe - weitere Kombinationsfrequenzen in einem 1-kHz-Raster, die "Lattenzäune" bis zu 100 kHz Breite verursachen können.

Hier darf einmal als scherzhafter Vergleich der Motorradfahrer erwähnt werden, der durch Ausbau der Auspuff-Schalldämpfer glaubt, eine "ungeheure (moralische) Wirkung" auf umstehende Bewunderer auszuüben; in Wirklichkeit grüßen diese jedoch mit dem bekannten Kraftfahrergruß und Kopfschütteln zurück . . . .

Röhrenendstufen erreichen Absenkungen der Intermodulationsprodukte bei günstigem Arbeitspunkt um ca. 30 dB. Im Kurzwellenbereich leisten dies auch herkömmliche Halbleiterendstufen, die durch hohen Ruhestrom und starke HF-Gegenkopplung den Röhren-PA's bester Bauart nahekommen.

In den VHF-UHF-Bereichen ist dies schon schwieriger, da die Transistorkapazitäten und Innenwiderstände stark aussteuerungsabhängig sind und eine solide Gegenkopplung schwerer zu realisieren ist. Hier werden oft Intermodulationsabsenkungen von 20 dB bis 25 dB erzielt, die bei weiter entfernt liegenden I.M.-Produkten höherer Ordnung relativ langsam sich auf 30 dB zu bewegen.

Für den Kurzwellenbereich ist nun der erste Serien-Transceiver mit einer MOS-FET (Metalloxid-Feldeffekt-Transistor)-PA erschienen (TS-950 SDX mit 2 x MRF 150 von Motorola). Ein Testbericht wird die Qualifikation der Endstufe zeigen.

Wie bereits erwähnt, ist die Aussendung "schmaler" Signale im UKW-Bereich besonders wichtig. Im folgenden Bericht werden die Daten einer 300-Watt-T-MOS-FET-Endstufe für das 2-m-Band vorgestellt, die bereits die "saubersten" Steuersender hinter sich läßt. Dies bedeutet, daß nunmehr der nächste Schritt, die Einführung von solchen FET-Endstufen in den Transceivern, fällig ist.

Bei der Intermodulationsprüfung mit handelsüblichen 2-m-Transceivern wird das durch die Linear-Endstufe verstärkte Signal die Qualität des Transceivers beibehalten. Um die Möglichkeiten zu ergründen, mußte für die Intermodulationsmessung ein I.M.-freies Doppeltensignal erzeugt werden. Zwei 25-Watt-Transceiver wurden über Dämpfungskabel mit einem Kabel-Leistungsaddierer zusammengeschaltet. Dabei wurden bei Ansteuerleistungen um 10 Watt Absenkungen der Intermodulation 3.Ordnung von 46 dB bis 48 dB erreicht; die I.M. höherer Ordnung ist nicht mehr nachweisbar.

Im weiteren Verlauf des Berichts werden dann auch Vergleiche mit 2-m-Röhrenendstufen und klassischen "bipolaren" Transistor-PA's gezogen.

Zunächst zum Aufbau einer solchen FET-Endstufe:

Der Motorola MOS-FET MRF 150 erlaubt den Aufbau von 150-Watt-Verstärkern bis über 150 MHz hinaus. Dabei werden Drainspannungen von 50 Volt und Ruhestrome von ca. 2 Amp. eingesetzt, die sich mit einer positiven Gate-Spannung von etwa 3,7 V einstellen. In der vorliegenden BEKO HLV 300 sind zwei MRF 150 über Leiterplattenverzweigungen parallel geschaltet.

Durch mehrere Schutzschaltungen wird diese Endstufe weniger problematisch als manche Röhrenendstufe mit 4 CX 250/350 und über 2000 V Anodenspannung, die sich gelegentlich mit lautem Knall innerhalb der Röhre entladen. Auch das thermische Weglaufen der Abstimmung ist hier nicht vorhanden. Gegenüber bipolaren PA's ist nicht nur das wesentlich schmalere und reinere Signal hervorzuheben; auch das "Hochlaufen" des Kollektorstroms entfällt, ein FET schützt sich vor einem Anstieg des Drainstroms bei Erwärmung durch den "Einschnüreffekt" im Kanal.

Das Gerät schaltet bei Erreichen von 28 Watt Ansteuerleistung auf verstärkungslosen Durchgang. Das gleiche gilt bei Überschreiten eines SWR von 2, beim Überschreiten eines Grenzstroms für den FET-Verstärker und bei Überhitzung. Hierfür sind getrennte rote LED-Signallampen an der Frontplatte vorgesehen. Mit einem "Reset"-Wippenschalter kann nach Beseitigung des Problems die Endstufe wieder eingeschaltet werden. In der Zwischenzeit wird das 10 dB bis 13 dB schwächere Steuersignal zur Antenne "durchgeschleift".

Ein bis 400 Watt kalibrierter Ausgangsleistungsmesser erhält seine Ansteuerung von einem Richtkoppler im relaisgeschalteten Ausgangskabel zur Ausgangs-N-Buchse. Eine rückseitige Cinch-Buchse wird von einem Schaltkontakt des Steuertransceivers bzw. einer 0-V-Spannung zur PTT-Steuerung verwendet. Eine ALC-Buchse kann zum automatischen Rückregeln des Transceivers durchverbunden werden (nur erforderlich, wenn dieser mehr als 25 Watt liefern kann).

Mit einem weiteren Wippenschalter kann ein externer Antennenvorverstärker aktiviert werden (12 - 15 V, 700 mA) bei abgefallener PTT. Durch eine zeitlich gestaffelte Ablaufsteuerung kann keine HF-Leistung vor Vollzug der Relaisumschaltungen auf Sendebetrieb die Kontakte der Relais beschädigen.

Für eine solche Endstufe mit 50 V Drainspannung und 10 Amp. DC-Strombedarf ist ein fest eingebautes Stromversorgungsteil die richtige Entscheidung. Der 700 VA-Ringkern-Netztransformator liefert über 2 Graetz-Brückengleichrichter die Versorgungsspannung für die Endstufe nach Stabilisierung mit parallelgeschalteten Längsreglern im TO3-Metallgehäuse. 40 000 µF Siebkapazität und elektronische Regelung sorgen für brummfreie Drainspannung. Ein zweiter Brückengleichrichter versorgt über mehrere Spannungsregler den übrigen Teil. Außer den zwei Sendertransistoren sind für die Schutzschaltungen und Regelung mehr als 30 weitere Transistoren im Einsatz. Um das "Herausfliegen" von Haushalts-Automaten beim Einschalten zu verhindern, ist eine Stufen-Startschaltung mit Vorwiderstand und Relais vorgesehen. Ein Lüfter kühlt das Gesamtgerät, er ist gleichfalls elektronisch geregelt.

Die eigentliche MOS-FET-PA zeigt Abb.1, die Stromversorgung und Ablaufsteuerung mit Schutzeinrichtungen Abb.2. Die folgenden Meßwerte zeigen, daß ein geschickter Leiterplattenaufbau auch ohne koaxiale Tiefpaßfilter nur mit Leiterbahnen und Flach-Glimmerkondensatoren in "Vorbeischleiftechnik" sehr gute Oberwellenabsenkungen ermöglicht.

Tabelle 1 zeigt die Oberwellenabsenkung an einer reflexionsarmen 50-Ohm-Last bei 300 Watt Ausgangsleistung. Sie liegt über 70 dBc (dB unter der Einton-Grundwellenleistung) bis 100 dB und mehr. Über 1 GHz liegen die Harmonischen an der Rauschgrenze empfindlicher Analysatoren.

Aus Abb.3 ist ersichtlich, daß das Intermodulationsbild eines SSB-Zweitonsignals aus einem guten Transceiver (\*) und dem um ca. 15 dB verstärkten aus der MOS-FET-Endstufe (\*\*) für die Doppeltonsignale f1 und f2 wie auch für die Intermodulationsprodukte bei Parallelverschiebung des Spektrums praktisch deckungsgleich sind, d.h. der Transceiver bestimmt die Verzerrungen, die Endstufe fügt nichts hinzu. Um die wahre Qualität herauszufinden, muß ein I.M.-freies Doppeltonsignal in der Leistungsregion von 2x 10 Watt erzeugt werden. Die für Empfänger messungen üblichen Leistungsaddierer sind selten über 1 W oder 2 W belastbar, dann erwärmt sich ein Ferritübertrager und erzeugt seinerseits I.M.-Produkte.

Hier hilft ein Kabel-Leistungsaddierer, der aus zwei Längen eines Viertelwellenkabels mit 75 Ohm besteht. Am einen Ende, dem Abgang zum 50-Ohm-Prüfling (hier Eingang HLV 300) sind diese 39 cm langen 75-Ohm-Koaxialkabel parallelgeschaltet, am anderen Ende sind die Innenleiter mit einem VHF-tauglichen 100 Ohm Lastwiderstand verbunden, ebenso jeweils mit dem Innenleiter von zwei Koaxialbuchsen. Die Abschirmungen und die Masseanschlüsse der Buchsen sind verbunden. Diese sind nun gut untereinander entkoppelt (hier ca. 35 dB bei SWR 1), so daß zwei Sender ihren um je 6 dB reduzierten Leistungsbeitrag zum Doppelfrequenzsignal liefern, ohne gegenseitig in ihren Ausgängen I.M. zu erzeugen. Die Summenleistung ist dann die Hälfte jeder der beiden Einzelleistungen. Dabei ist die Absenkung der I.M.(d3) bis -48dBc oder 54 dB unter der Doppelton-Spitzenleistung. Außer dieser I.M. dritter Ordnung ist in Abb.4 vom Steuersignal kein weiteres I.M.-Produkt zu sehen. Die derart auf 2/3 ihrer Nennleistung ausgesteuerte HLV 300 (\*\*) hat bei 200 W PEP 41 dB bis 43 dB Absenkung von I.M.(d3), 52 dB bis 56 dB von I.M.(d5) und 65 bzw 63 dB Absenkung der Intermodulation 7.Ordnung. Darüber ist nichts mehr zu sehen.

Hier wird natürlich ein Vergleich mit Röhren- und Bipolar-Transistor-PA's interessant: Aus Abb.5 ist bei einer auf 400 W PEP ausgesteuerten Röhrenendstufe mit 4 CX 350 (max. 700 W) bei dem recht hohen Ruhestrom von 120 mA (ca. 250 W Verlustleistung !) der Abstand I.M.(d3) 29 dBc, (d5) 32 dBc, (d7) 47dBc und (d9) 49dBc. Die gleiche Endstufe mit kleinem Ruhestrom für CW und FM (B-Betrieb) liefert für I.M.(d3) nur 20 dBc, (d5) 25 dBc, (d7) 36 dBc und (d9) 48 dBc. In beiden Fällen erfolgte die Ansteuerung mit dem praktisch I.M.-freien Zwei-Sender-Signal (Abb.6).

Zur Ansteuerung einer älteren 2-m-Halbleiter-PA mit 3 Bipolartransistoren CTC B 40-12, wohl vorwiegend für FM entworfen, wurde wieder ein mit NF-Doppelton ausgesteuerter Transceiver benutzt. Abb.7 zeigt das sehr breite Spektrum bei 100 Watt PEP.

Die sehr gute Linearität der MOS-FET-Endstufe ist auch aus Abb.8 erkennbar. Dort ist auf der horizontalen Achse die Ansteuerleistung (Eingangsleistung in HLV 300) in Watt und dBm (dB über 1 Milliwatt) und auf der vertikalen Achse die Ausgangsleistung aufgetragen. Eine gestrichelte Gerade stellt die Idealkennlinie für 13,5 dB Verstärkung dar. Die durchgezogene Linie zeigt die Meßwerte, die bis 200 Watt Eintonleistung streng parallel laufen. Knapp unter 300 Watt ist erst 0,5 dB Kompression des Ausgangssignals erkennbar, bei 330 W 1 dB. Wer auf 2 dB im Signalrapport verzichten kann, aber froh ist über Lobeshymnen der kritischen Partner, wird die erwähnte 2/3-Aussteuerung auf 200 W wählen. "Vollampf" ergibt nur eine drittel S-Stufe mehr.

Die Selektionskurve bei mittlerer Aussteuerung, über das ganze Gerät gemessen, zeigt Abb.9: Bei 1 dB Minderleistung ist die Bandbreite (in reelle konstante 50-Ohm-Last) 9 MHz. Innerhalb unseres 2-m-Bandes ist die maximale Differenz 0,2 dB.

Schließlich interessiert das Eingangs-Stehwellenverhältnis, denn auch dieses hat Einfluß auf das I.M.-Verhalten des Steuersenders. Naturgemäß ist dieses SWR aussteuerungsabhängig. Abb.10 weist aus, daß bei kleinen Steuerleistungen das SWR bei 1,5 liegt, um bei Maximalleistung unter SWR 1,2 abzusinken.

Der MOS-FET-Verstärker trägt auf der Rückseite zwei N-Buchsen für Eingang und Ausgang, zwei Cinch-Buchsen für ALC (Autom.Level Control, Pegelregelung des Steuersenders) und PTT ("Push-to-Talk") zur Relaissteuerung durch einen Kontaktschluß oder 0-Volt-Pegel im Transceiver bei Betriebsart "Senden". Der Netzeingang mit Europastecker ist mit 6,3 A abgesichert und führt innen über ein zweipoliges Netzfilter.

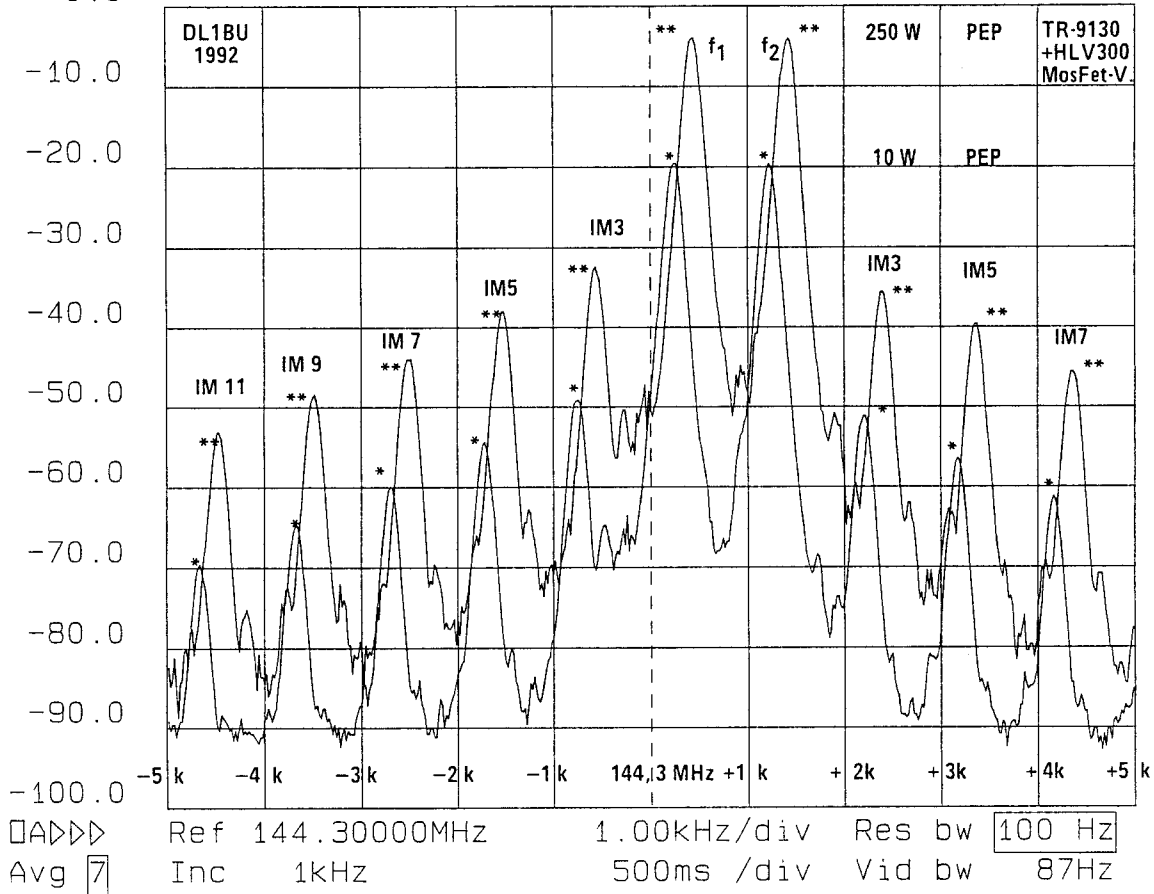
Diese 2-m-Linearendstufe hat die Abmessungen (B x H x T) : 280 x 140(+18) x 355(+40 +18) mm, Gewicht 12 kg. Sie wurde zur Verfügung gestellt vom Entwickler, Bernhard Korte, Mühlerweg 17, 8000 München 60, Tel. 089 834 7990.

Literatur: B.Korte, Intermodulationsverzerrungen von Transistor-Leistungsverstärkern, beam 6/87 und 7/87

G.Schwarzbeck, DL1BU: "SSB-QRM", cq-DL 7/1975 , ab Seite 386

A dBm  
0.0

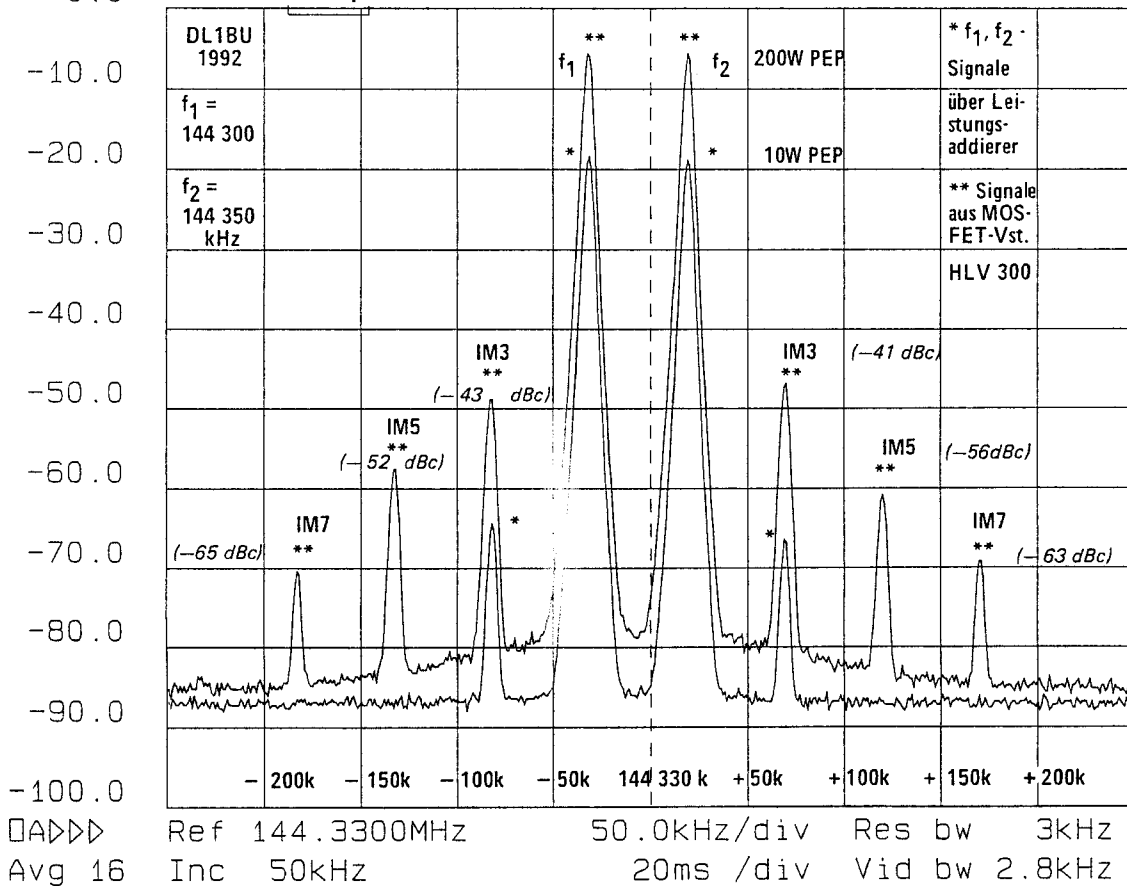
**T-MOS-FET-Endstufe HLV-300 (2x MRF-150)**  
**250 W PEP SSB, Anst. 10-12W aus Transceiver**



HLV  
3

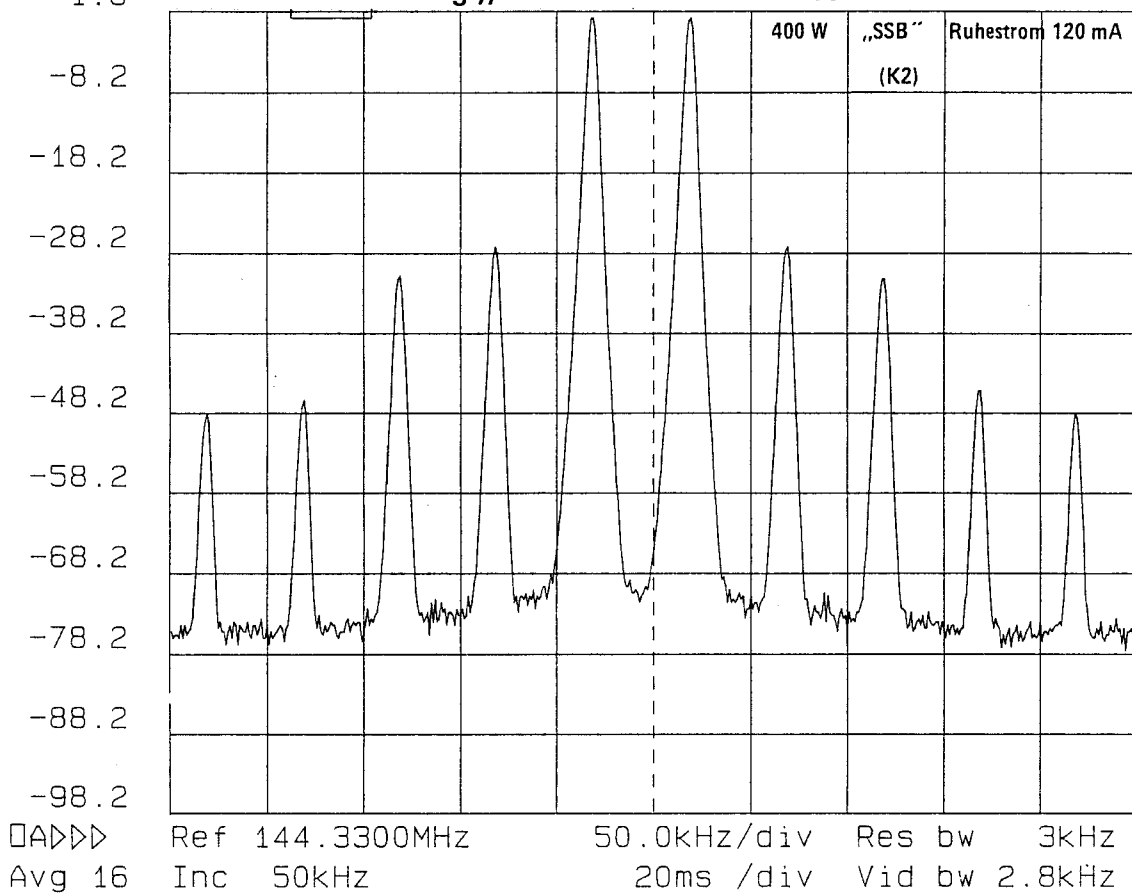
A dBm  
0.0

**T-MOS-FET-Endstufe 145 MHz, 2x MRF 150**  
**200 W PEP, Anst. 10W PEP Intermod.-48dB**

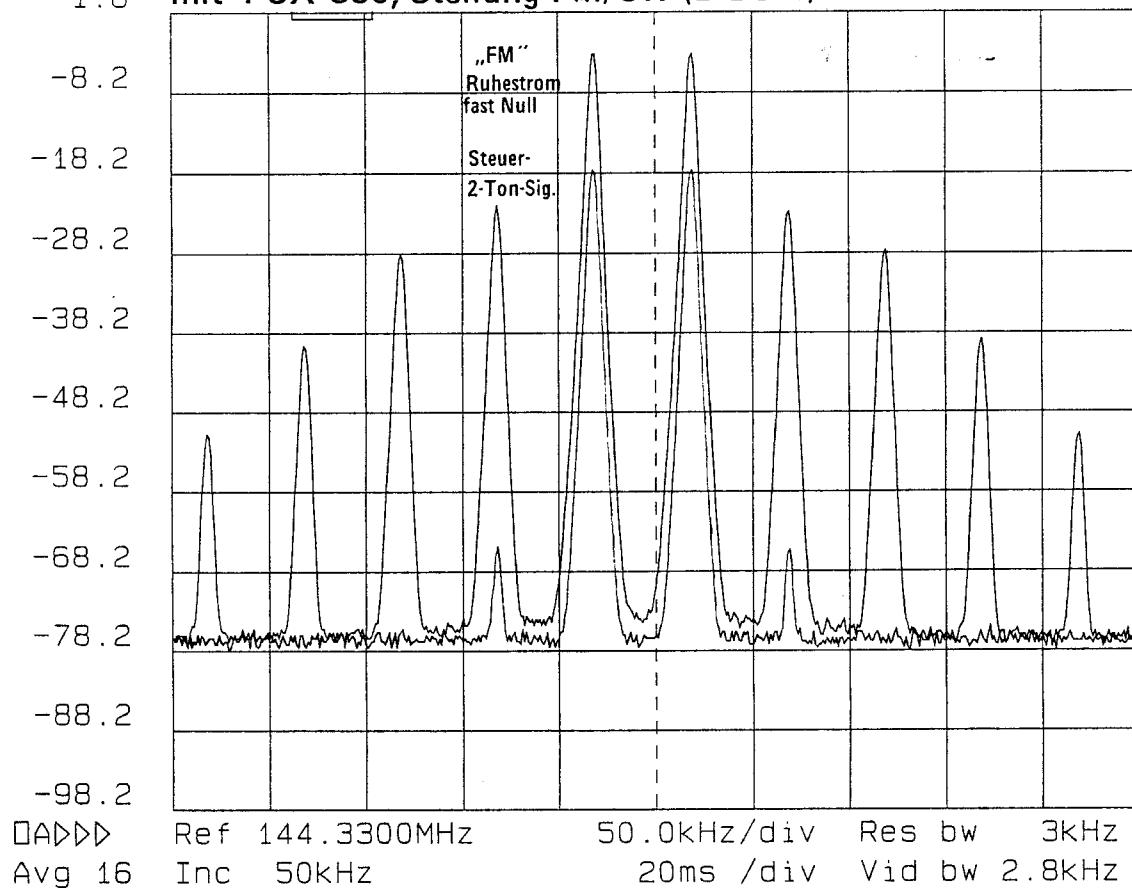


HLV  
4

A dBm  
1.8  
**400/700W-Röhrendstufe für 145 MHz**  
**Betriebseinstellung „SSB“ mit 120mA R.S.**

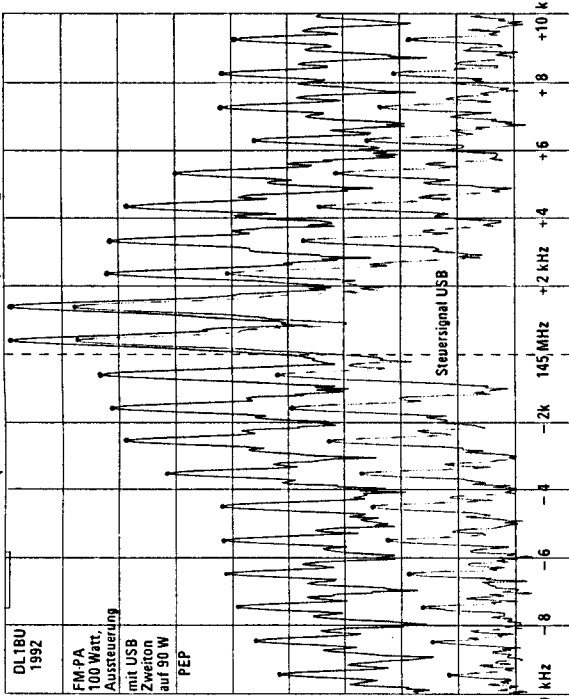


A dBm  
1.8  
**400/700W-Röhrendstufe für 145 MHz**  
**mit 4 CX 350, Stellung FM/CW (B-Betr.)**



100-Watt-Endstufe (B-Betrieb) mit bipolaren Sendertransistoren (3x CTC B 40-12), 2stufig

A dBm  
-2.0  
-12.0  
-22.0  
-32.0  
-42.0  
-52.0  
-62.0  
-72.0  
-82.0  
-92.0  
-102.0



DL18U 1992  
FM/PA 100 Watt, Aussteuerung mit USB Zweiton auf 90 W PEP  
Steuersignal USB  
2.00kHz/div Res bw 100 Hz  
1 s /div Vid bw 87Hz  
Ref 145.00000MHz  
Inc 2kHz  
Avg 4

DL18U, 1992  
T-MOS-FET - Linearstufe 145 MHz HLV 300 (2x MRF 150), Kurve Eingangsleistung / Ausgangsleistung, gestrichelt: theoret. 13,5 dB-Verstärkungskurve.

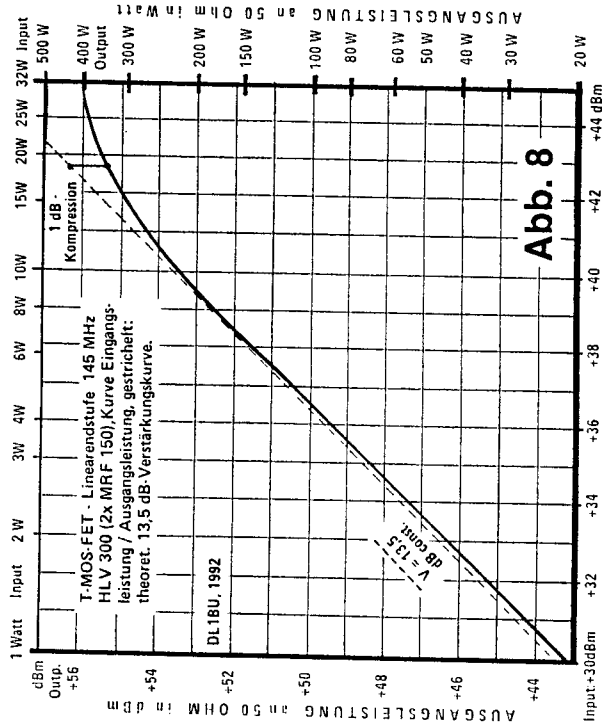
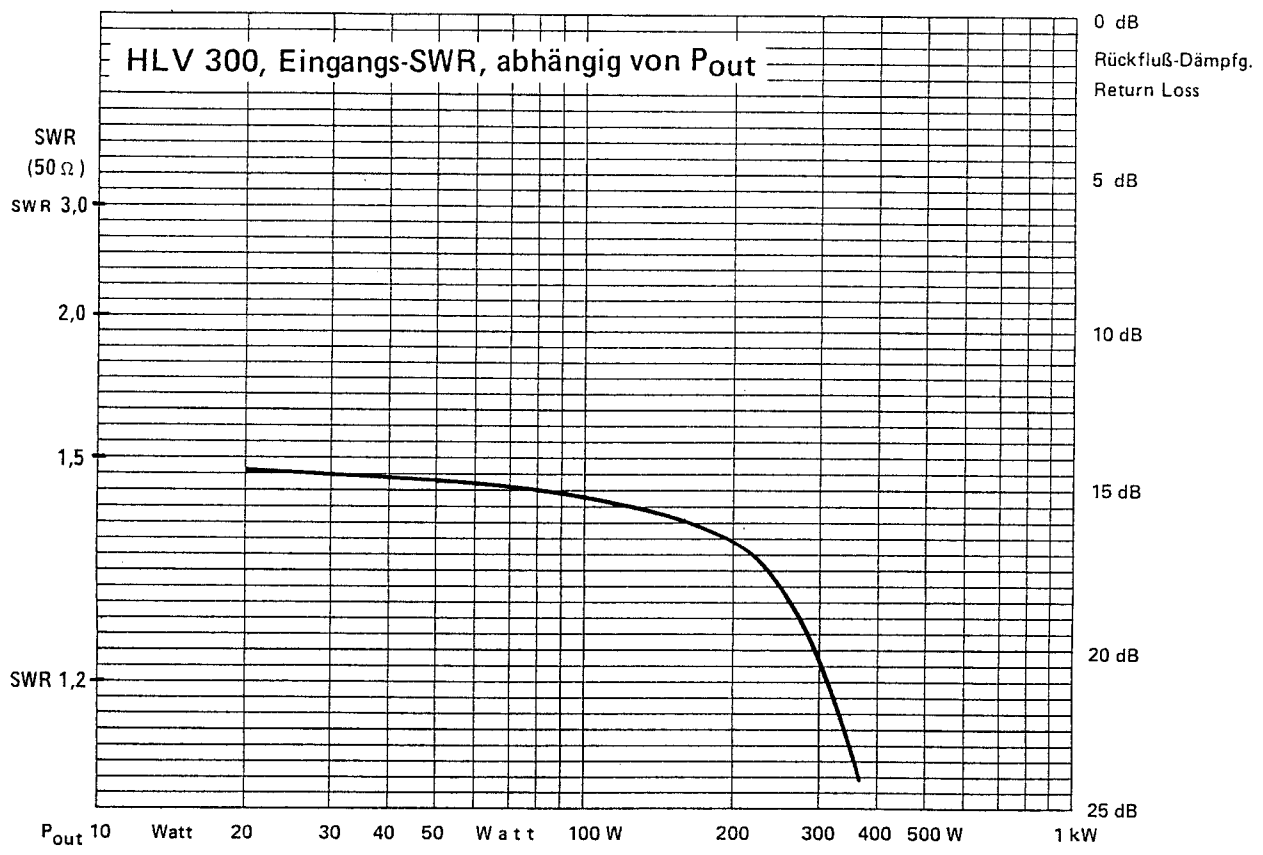
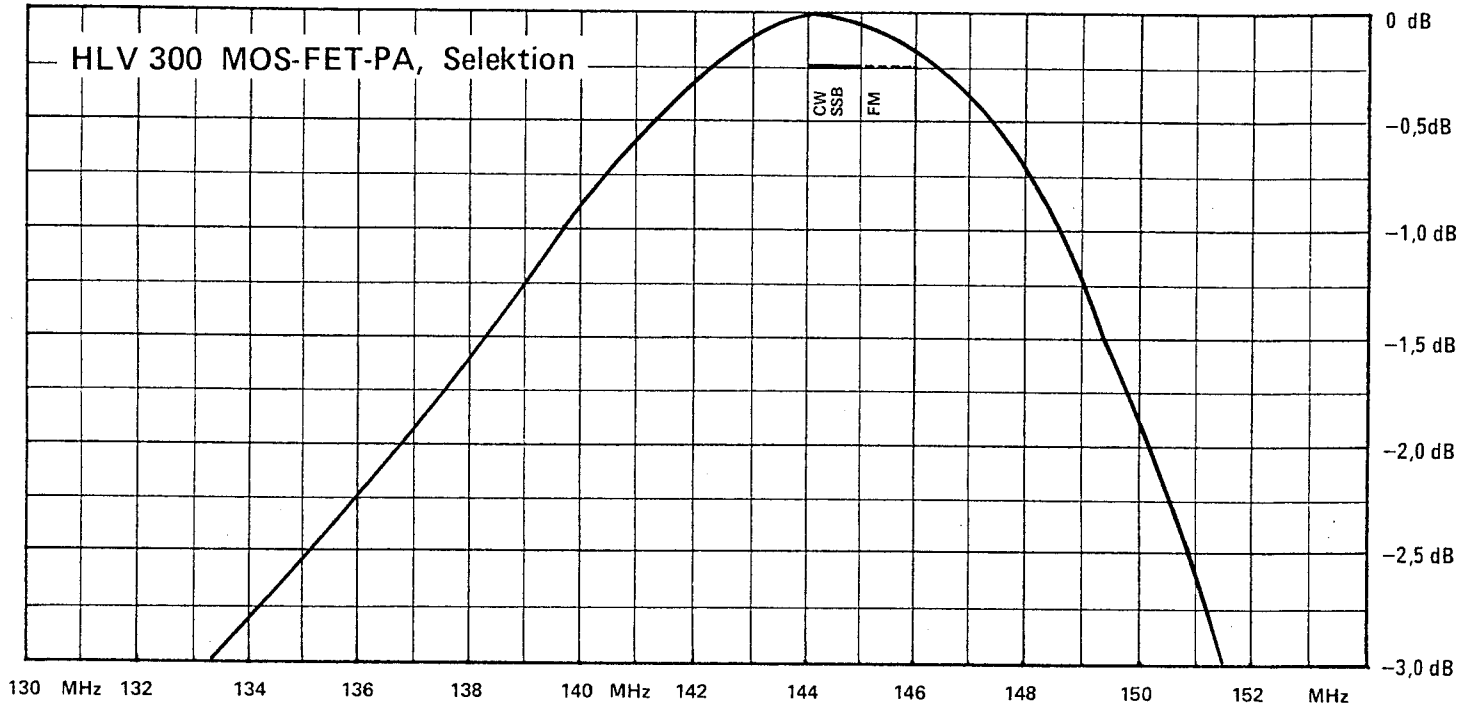


Abb. 8

TABELLE 1

OBERWELLEN-Absenkung HLV 300, P <sub>ausg.</sub> = 300 W	
k2 288 MHz	-72 dBc
k3 432 MHz	-86 dBc
k4 576 MHz	-96 dBc
k5 720 MHz	-98 dBc
k6 864 MHz	-100 dBc
(k7 - k 10: -90 ... -109)	

11.09



Red.  
12