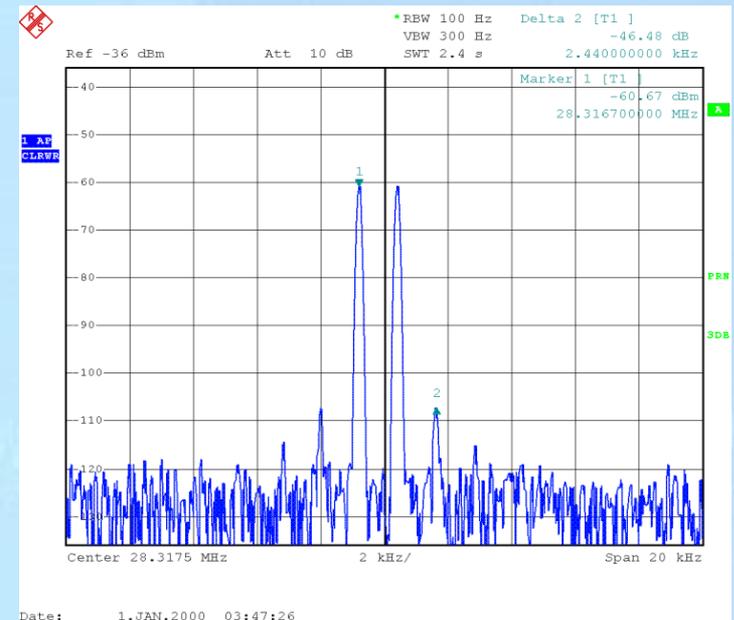


# 12 V Endstufen für KW Ergänzendes zu 2014

Andreas Auerswald  
DL5CN



# „Forschergrüppchen et. al.“



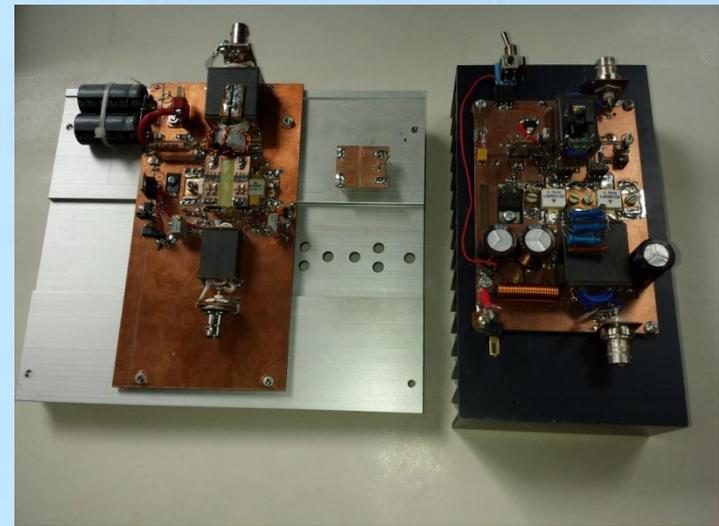
DB1NV, Jochen,  
Coburg



XQ6FOD,  
Manfred, Chile

# Inhalt

- Vorbemerkungen
- Fortsetzung und Ergänzung zu 2014
- Vergleich zweier Konzepte, Unterschiede in Bildung Ausgangsspannung
- Wie funktioniert ein Gegentaktverstärker ?
- Eigenschaften von Breitbandtrafos, Drosseln
- Ergebnisse



# ...der Grund für die Misere...

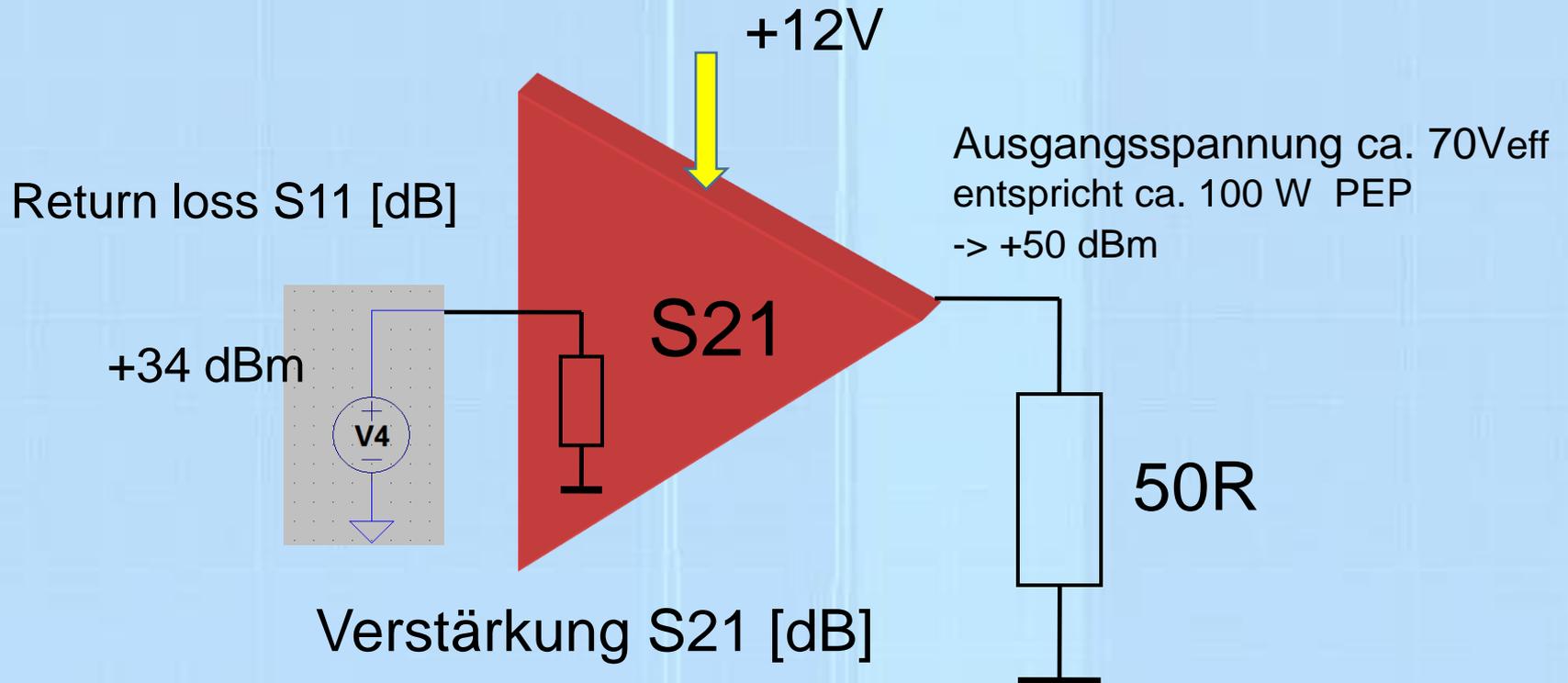


12V-  
SDR

HERMES  
PC-Board  
DN2800MT

Monitor  
Faytech  
10 Zoll

# Linear-Verstärker



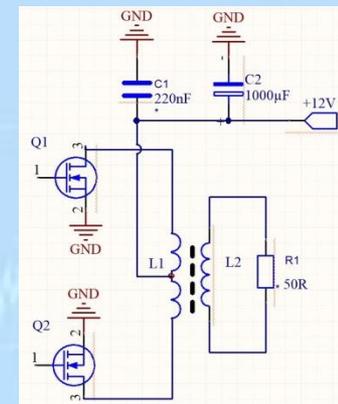
Bandbreite 1,8 – 30 MHz

Ausgangsspektrum

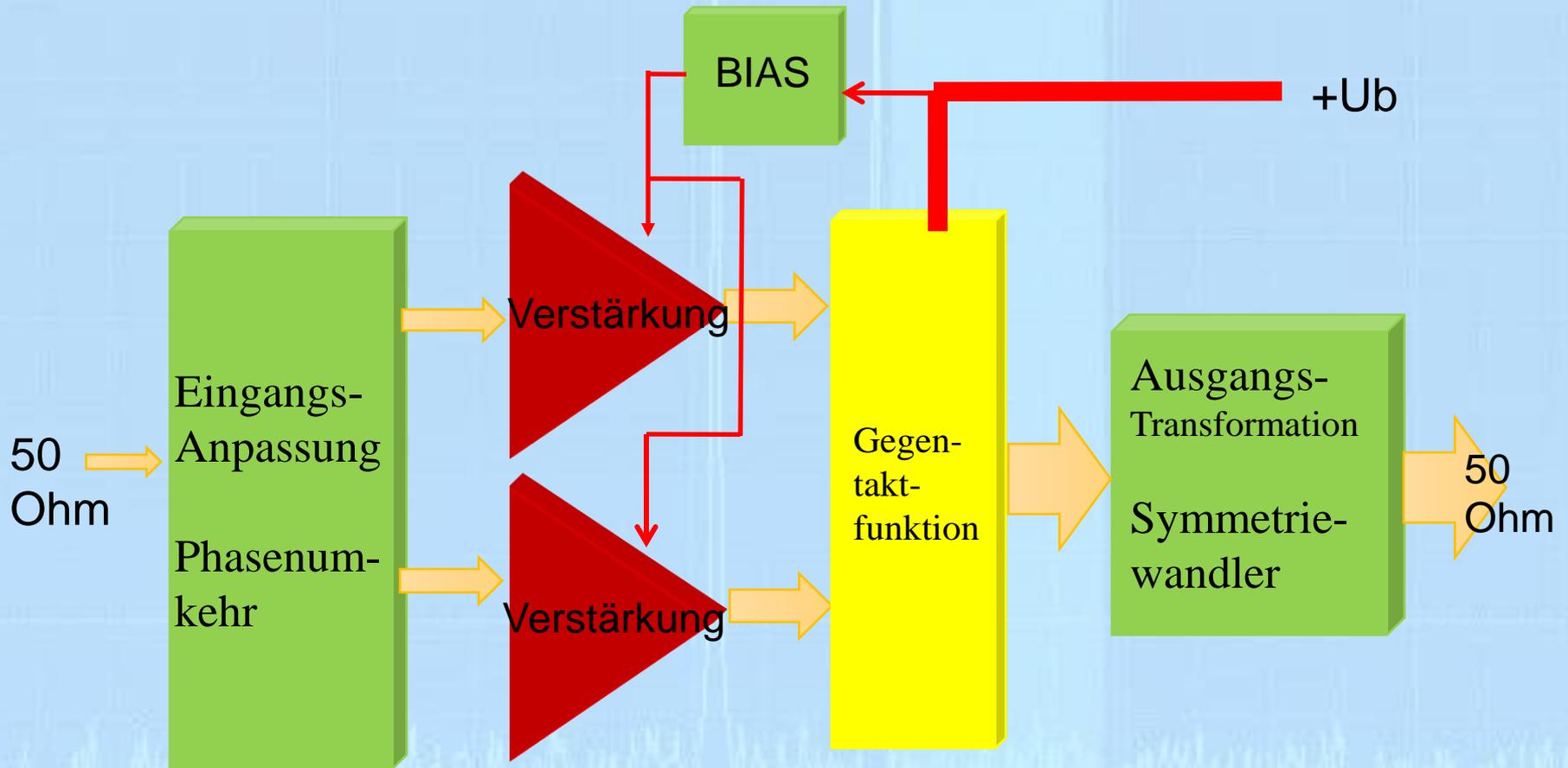
Intermodulationsabstand IMD3 [dBc]

# Warum Gegentakt ???

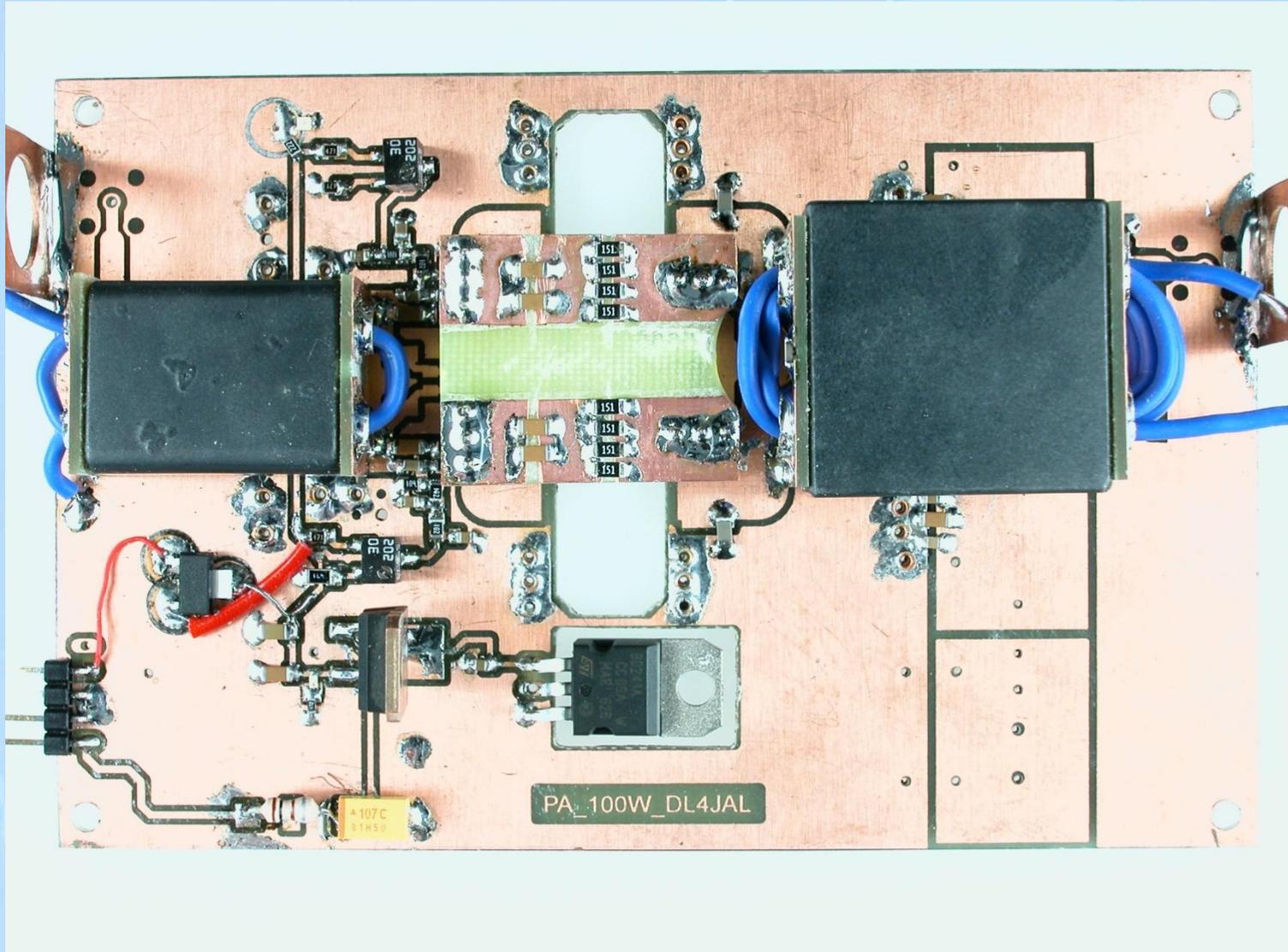
- Mehr Leistungsausbeute (speziell bei gegebener Spannung  $\rightarrow$  12V)
- jede Halbwelle wird getrennt verstärkt
- gradzahlige Harmonische kompensierbar
- Hardwareaufwand unwesentlich höher
- Wirkungsgrad
- Verzerrungen ?



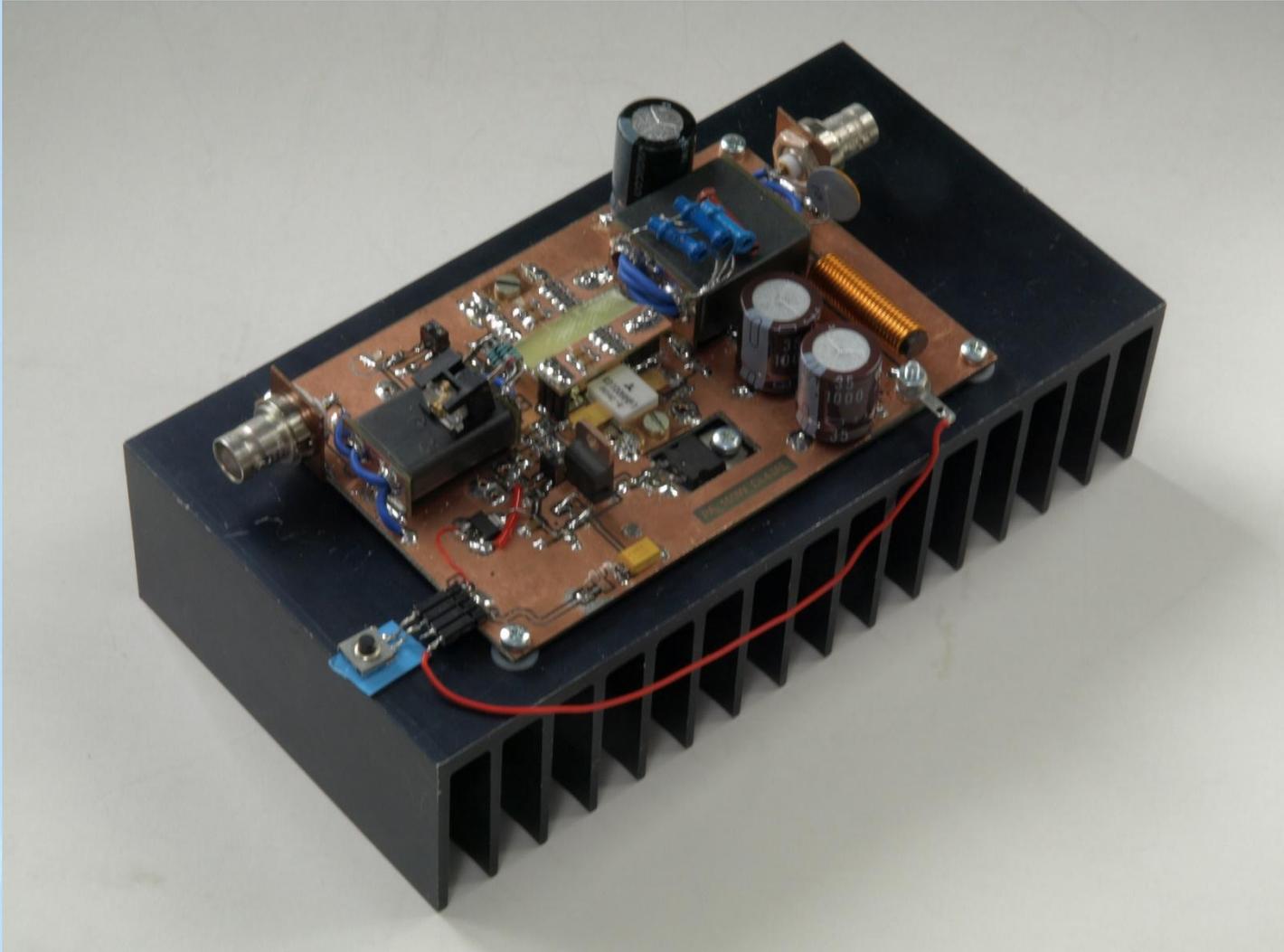
# Grundaufbau



# Platine Nachbau - tnx DL4JAL



# Ergebnisse **nicht** zufriedenstellend



13 dB Gain

IMD3  
<30dbc

Wirkungsgrad

**warum**

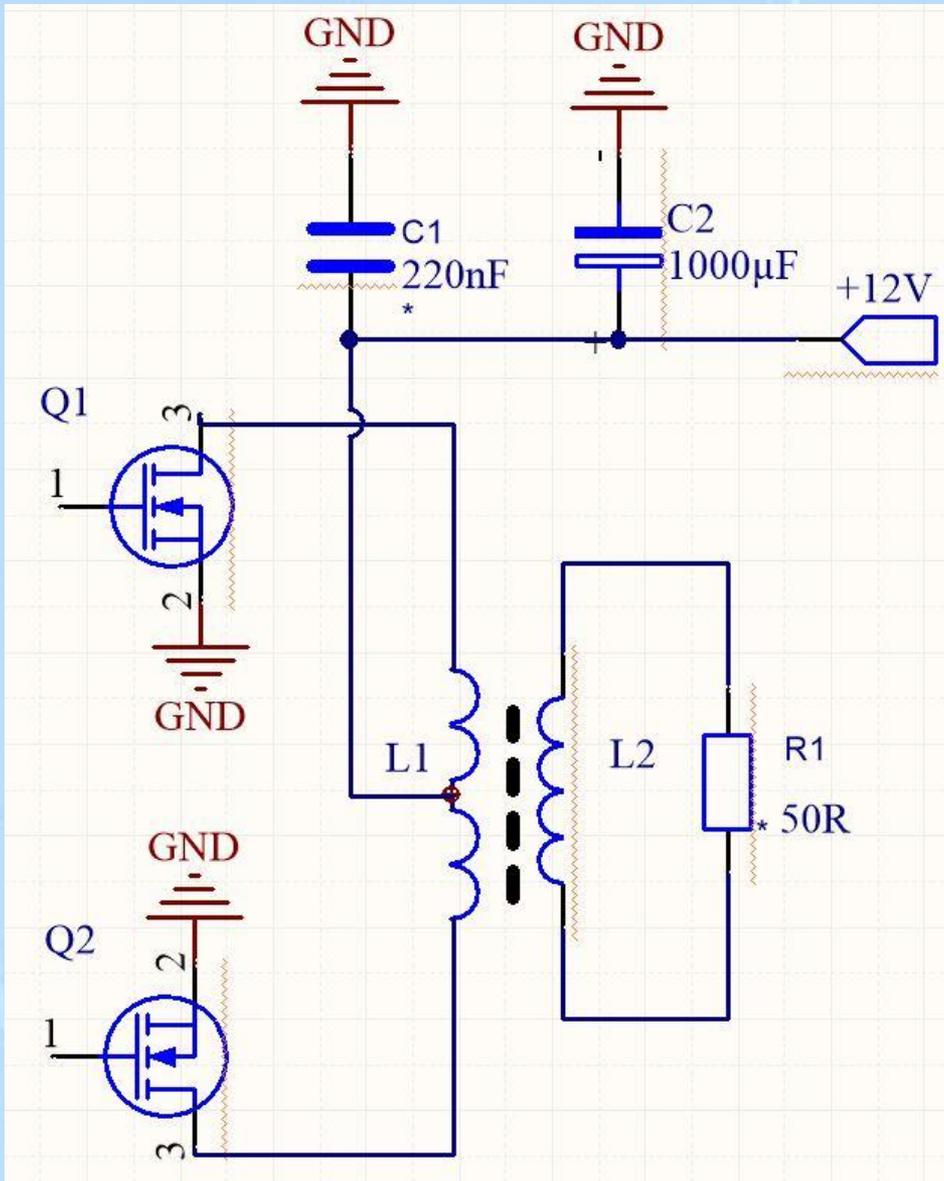
**?????**

# Suche nach Ursachen

- QRO-Rapport, DARC-Verlag
  - Artikel von DJ3VY, Bezug auf DB1NV
- Mailverkehr
  - DB1NV, Jochen, Coburg, Zitat:
- ...“Fehler in vielen 12V-PAs“...!!!
  - XQ6FOD, Manfred, Chile, [www.ludens.cl](http://www.ludens.cl), Artikel auf Webseite

**„Some thoughts on low cost, solid state, efficient, kilowatt-class HF linear amplifiers”**

# Gegentakt-PA



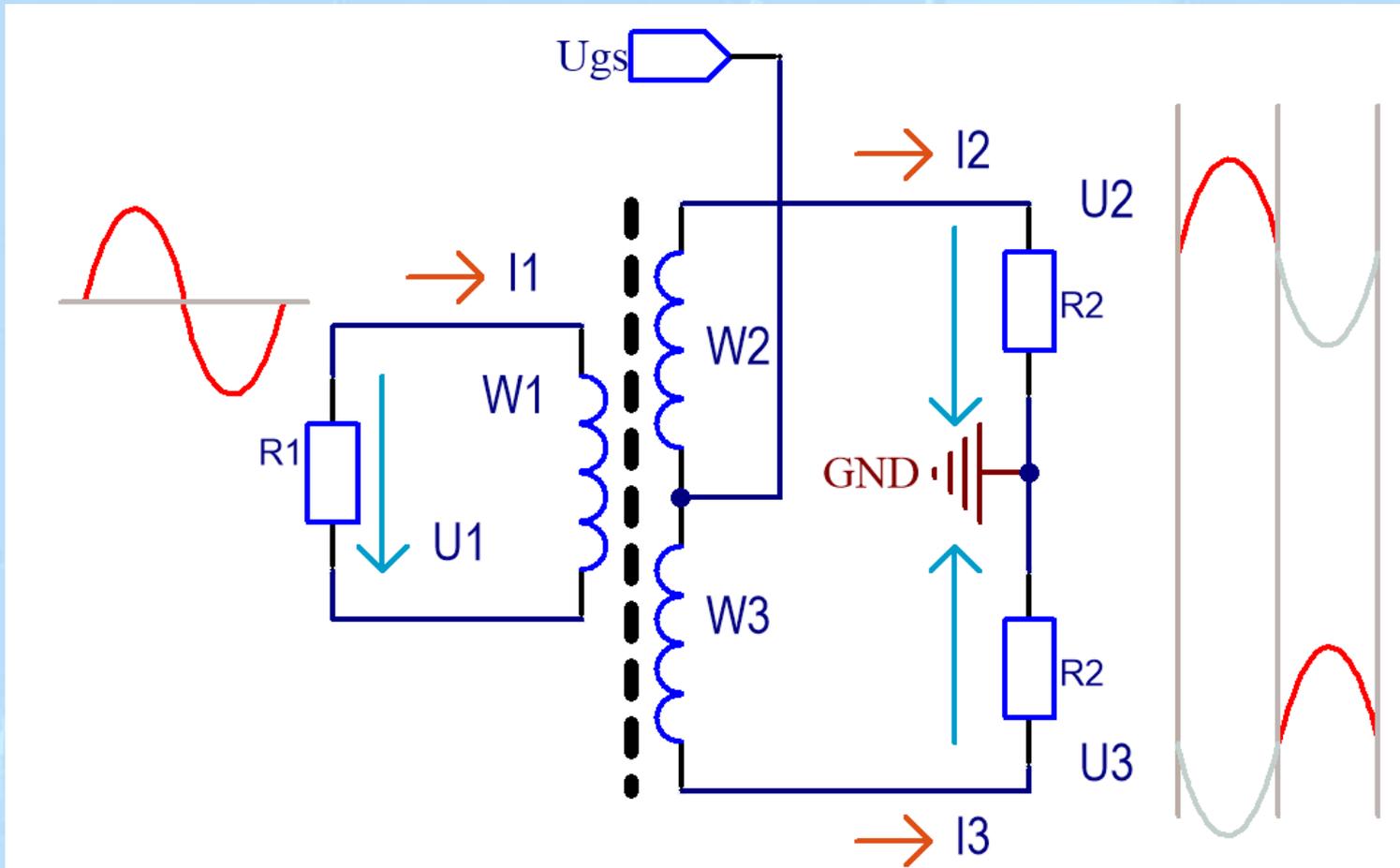
Normale  
Gegentakt-  
schaltung

L1  
mittenangezapft  
und mit L2 **hart**  
gekoppelt

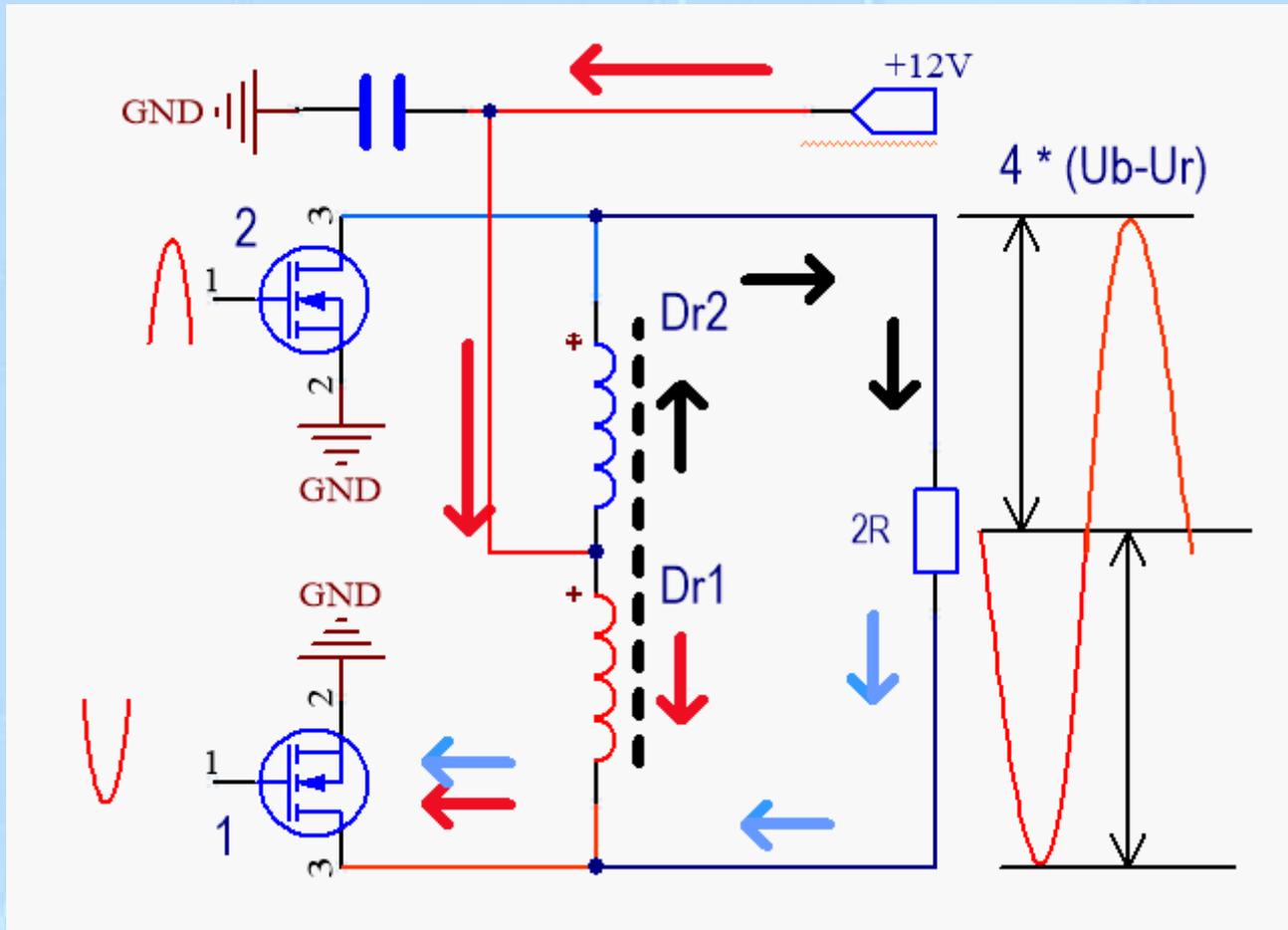
# ...einige Annahmen...

- Eingang gegenphasig (return loss beachten)
- Transistoren spannungsgesteuerte Strom-  
(quellen/senken)
- 1. Harmonische = Grundfrequenz
- 2. Harmonische = erste Oberwelle
- am Ausgang Anpassung mißverständlich
- AB-Betrieb -> 12V-Linearverstärker mit zwei  
Primärwindungen (Röhrchen) des Ausgangs-  
übertragers

# Ansteuerung mit Phasendrehung

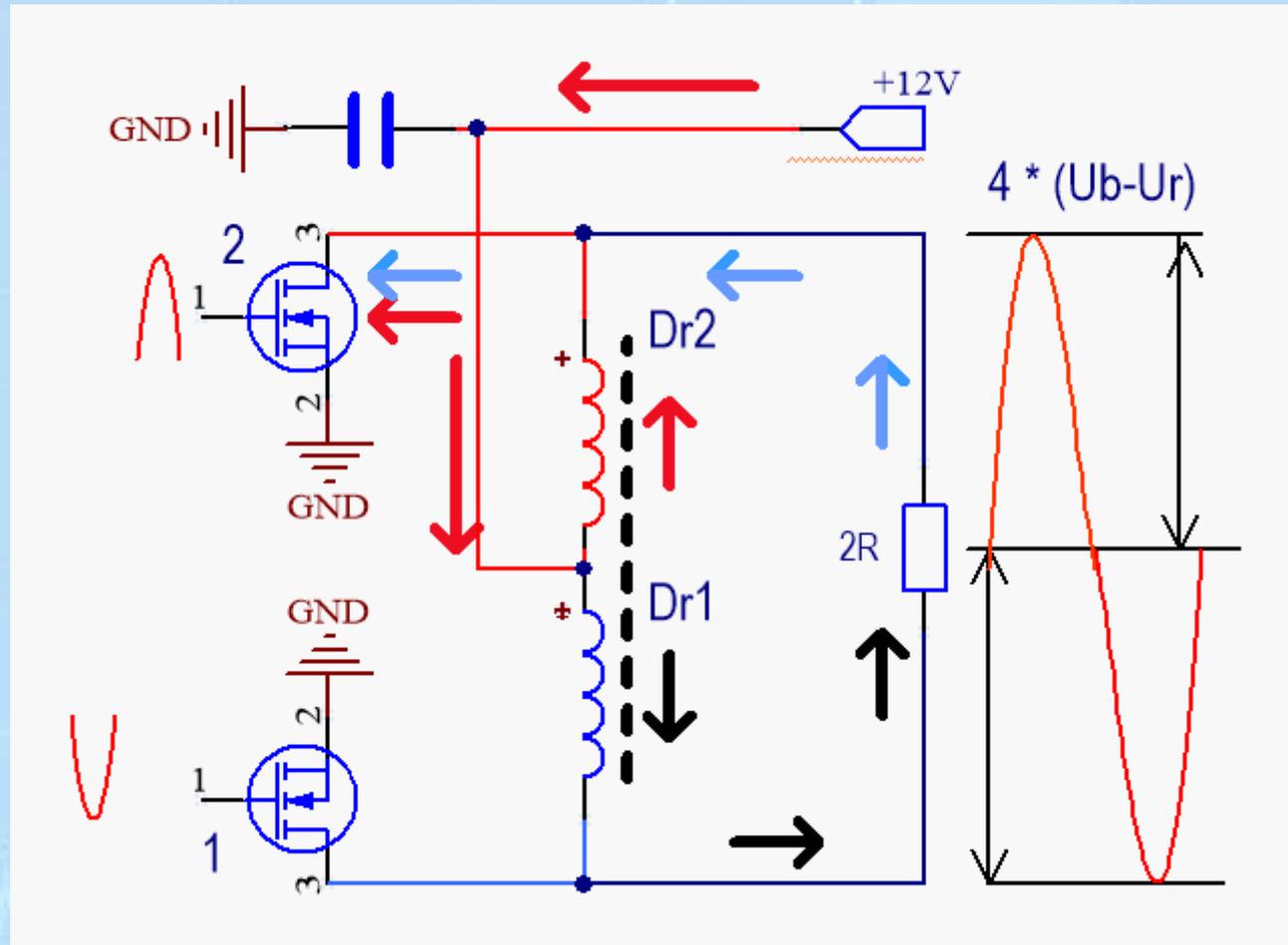


# ...wie funktioniert ein PP-Verstärker...



**Transformation der Betriebsspannung mal 2 (pro Halbwelle)**

# ...andere Halbwelle...



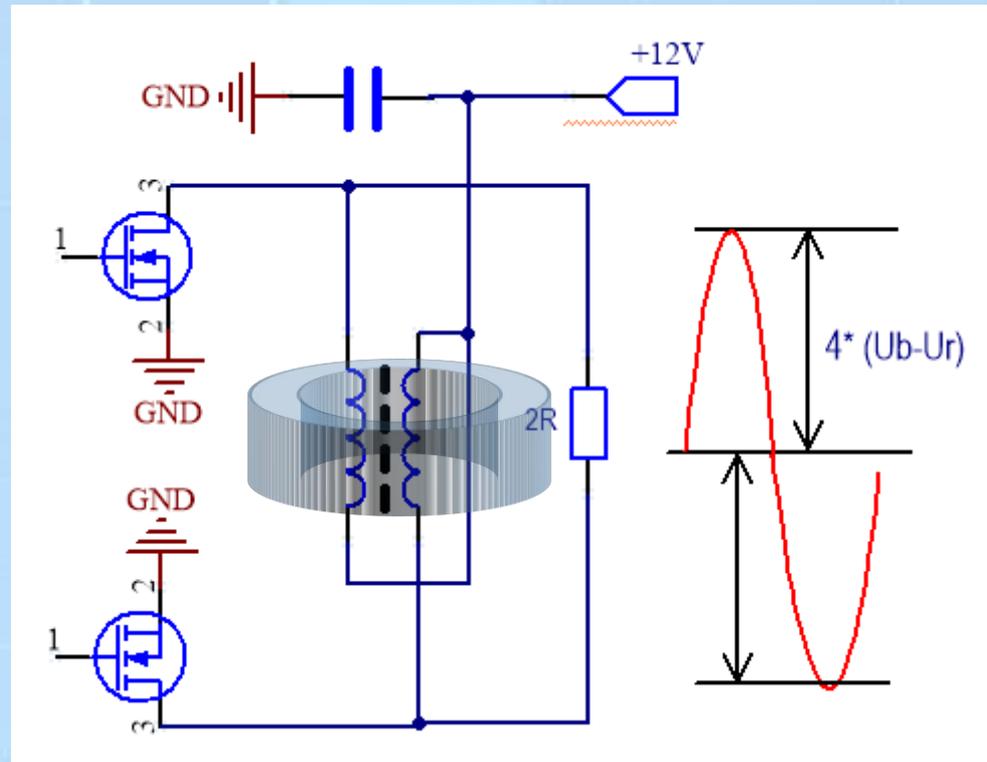
**Transformation der Betriebsspannung mal 2 (pro Halbwelle)**

# Funktionsweise Verstärker

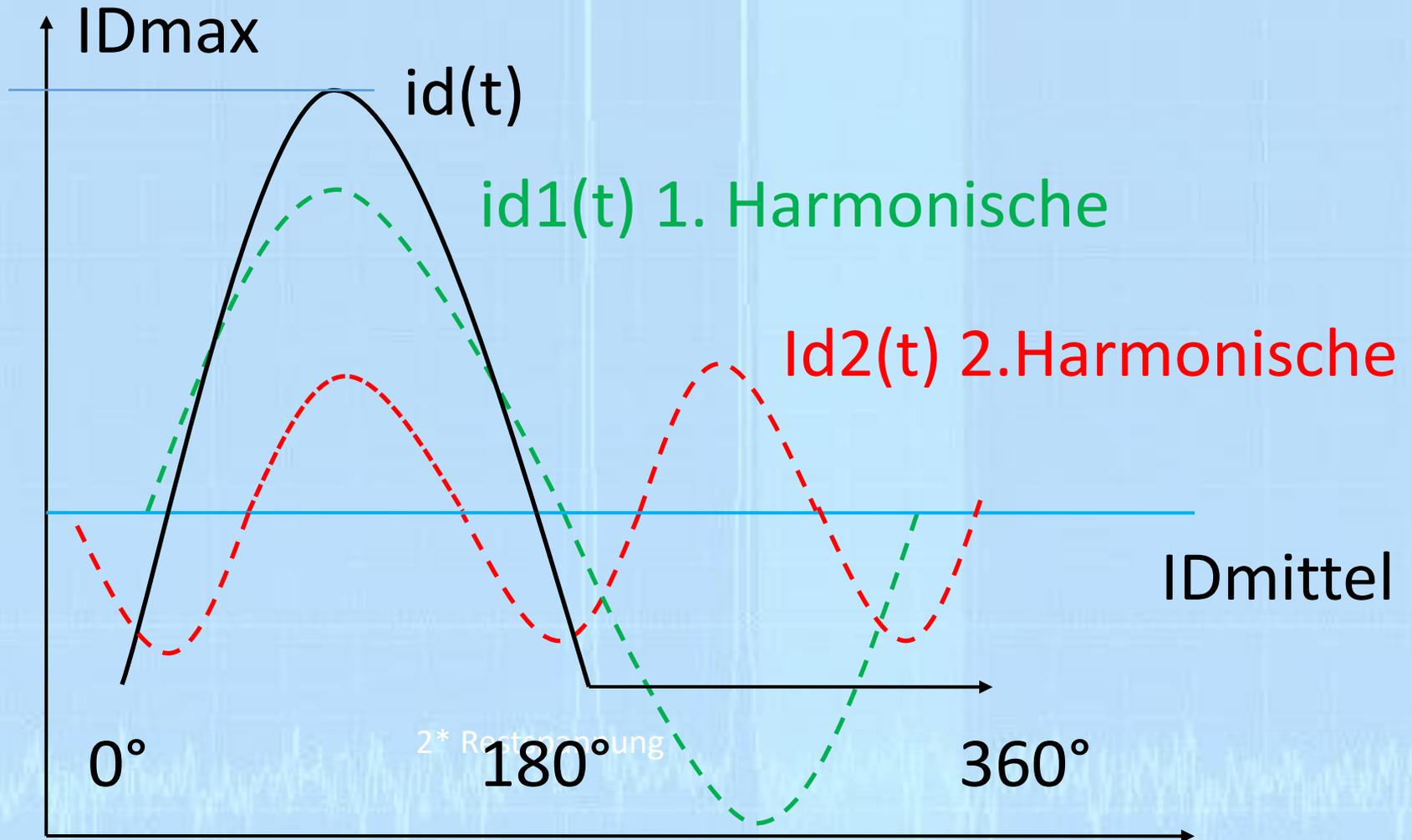
Gegentakt-PA  
Primärwicklung  
Trafo

oder

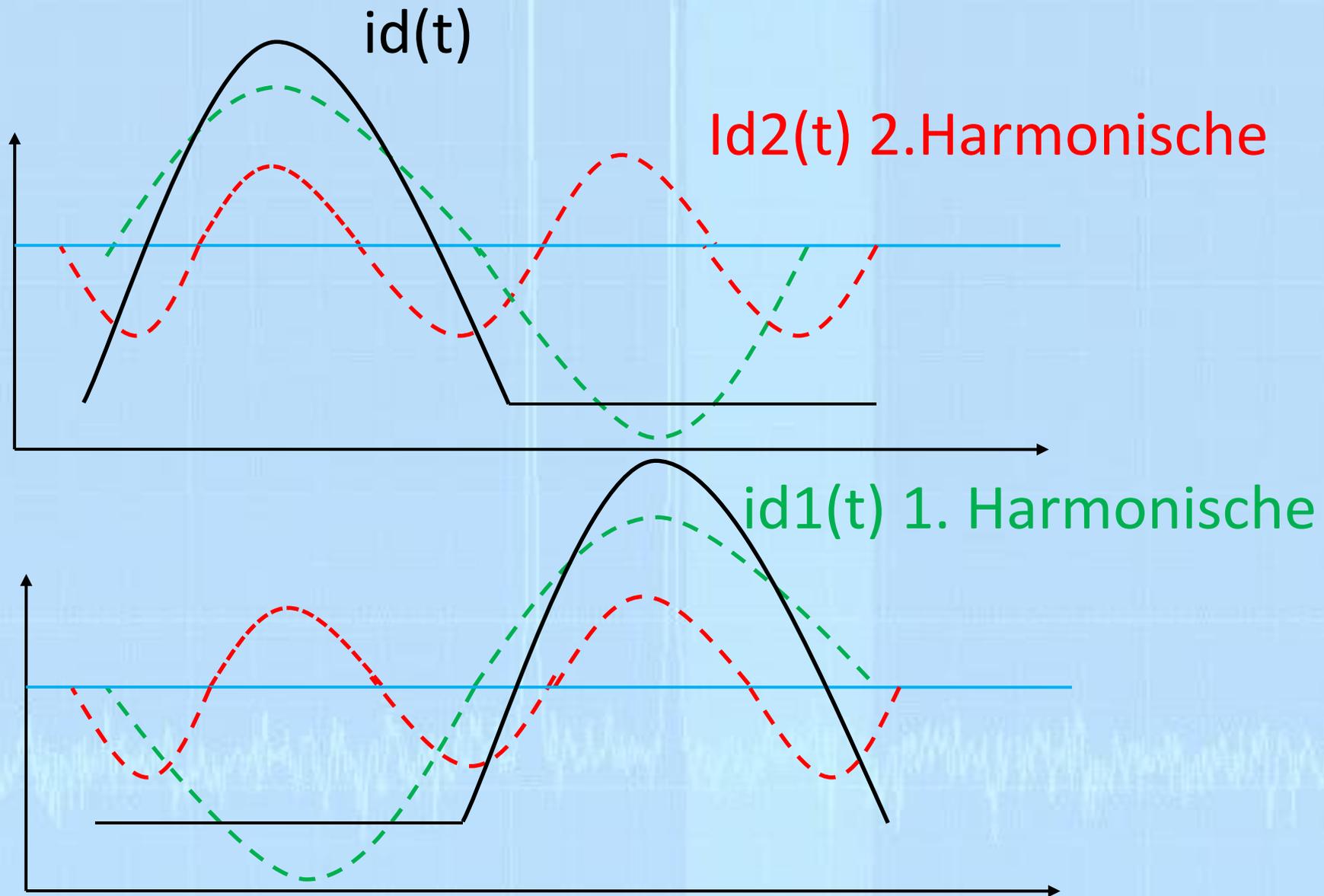
bifilare  
Drossel mit  
**magnetischer**  
Kopplung



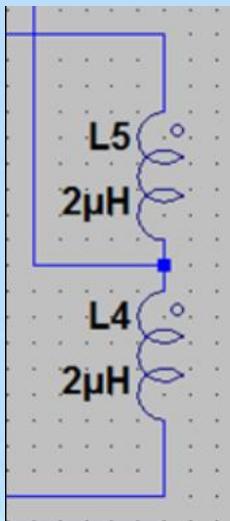
# Drainstromverlauf



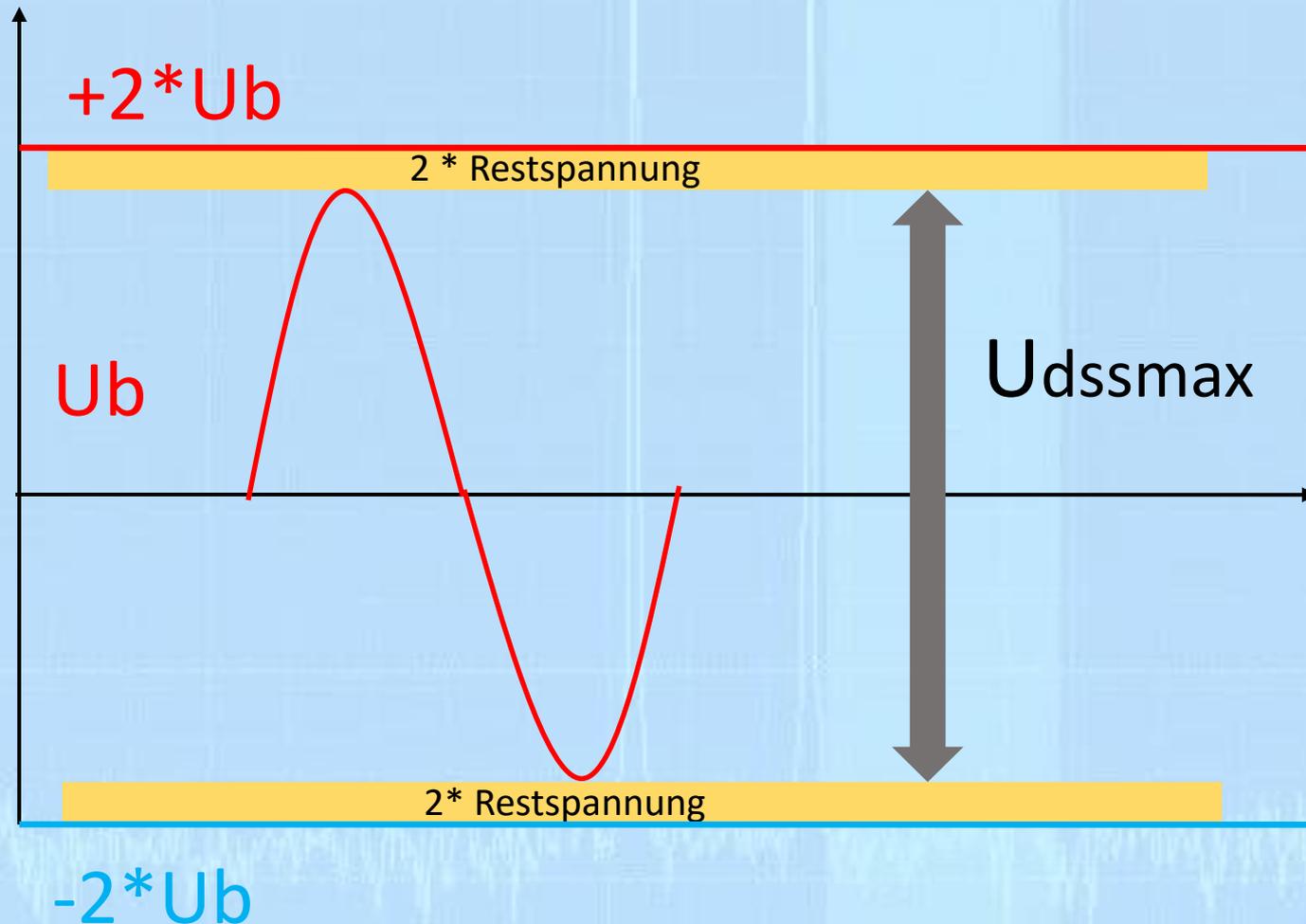
# gradzahlige Harmonische gleichphasig



# ...eine Halbwelle... Spannungsverdopplung



# maximale Wechselspannung zwischen den Drains



# Strom und Spannung

$$U_{ss} = 4(U_b - U_r) \quad 40V_{ss}$$

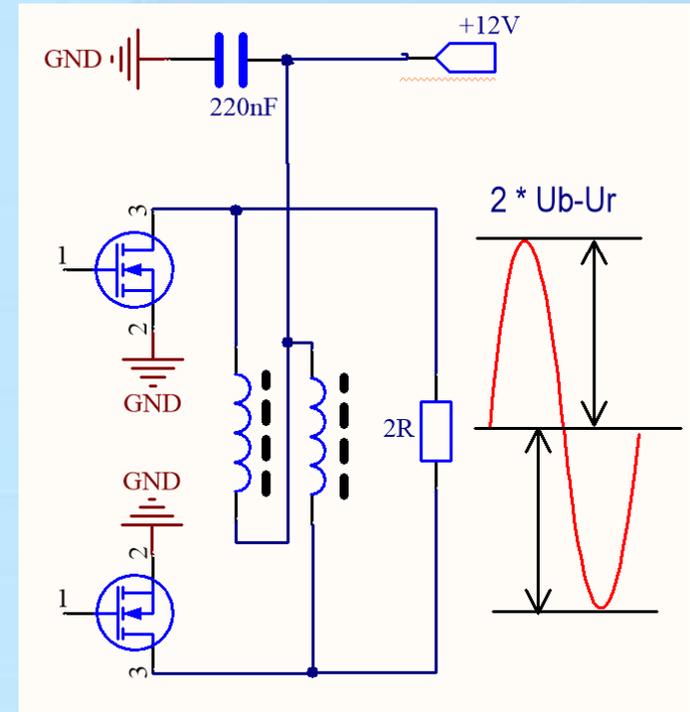
$$U_{eff} = \frac{U_{ss}}{2 * \sqrt{2}} \quad 14,2V_{eff}$$

$$I_{eff} = \frac{U_{eff}}{2} \quad 7,1 A_{eff}$$

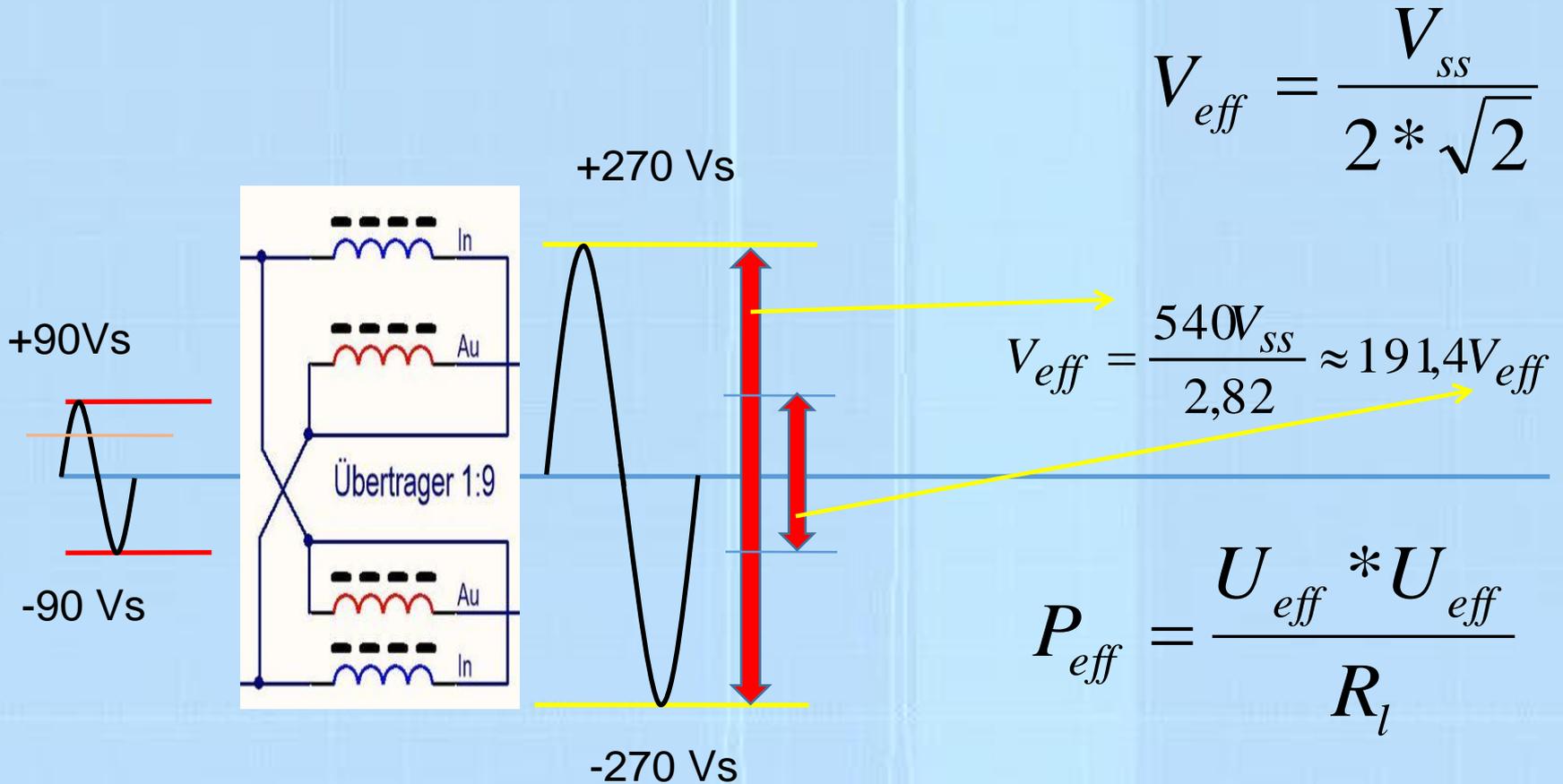
$$P_{eff} = U_{eff} * I_{eff} = 14,2 * 7,1$$

$$P_{eff} = \frac{U_{eff}^2}{R_l}$$

**100W**



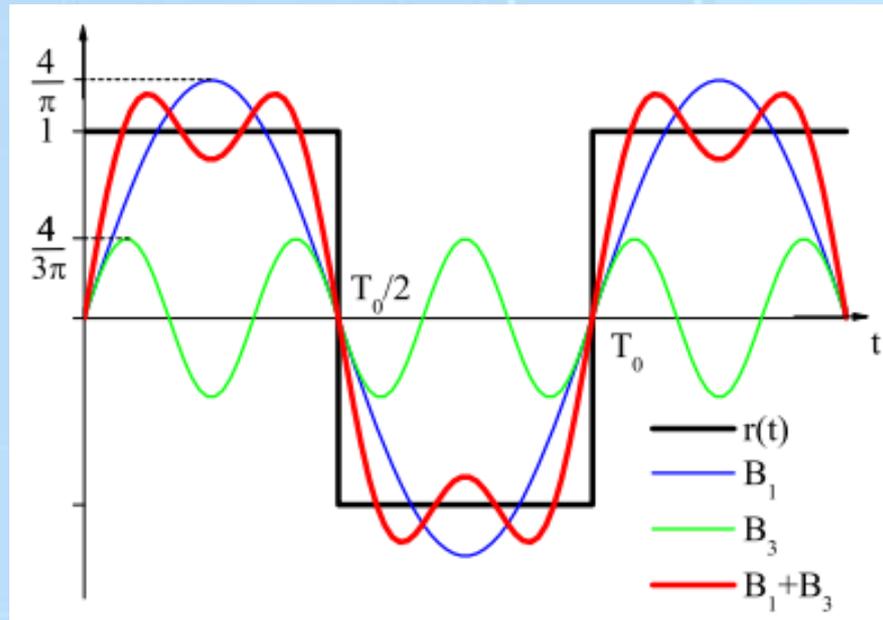
# Ausgangsleistung bei +48 V



$$P_{eff} = \frac{191,4V_{eff} * 191,4V_{eff}}{50\Omega} \approx 730W$$

# höhere Leistungsangaben

- >1000 W, ist das theoretisch möglich?
- Wattmeter mißt gesamtes Spektrum....



Ja, bei Übersteuerung, Rechteck mal  $\frac{4}{\pi}$ , (1,27)

$$(1,27)^2 = 1,6$$

**kein Linearbetrieb!!!**

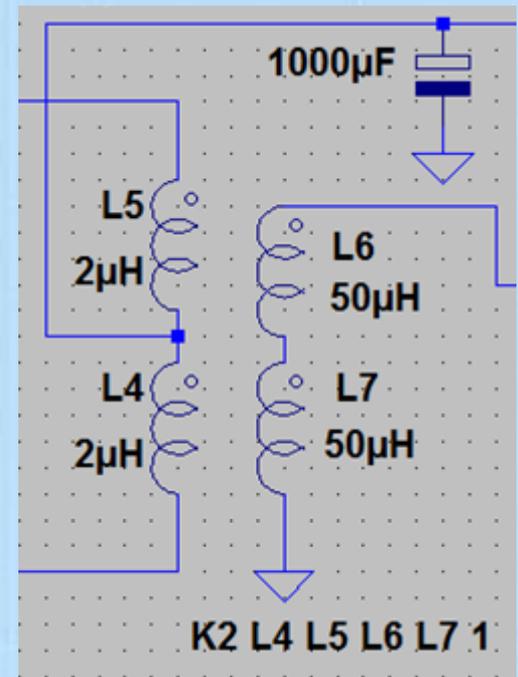
# Zwei Limits für lineare Ausgangsleistung an 50 Ohm

1. Übersetzungsverhältnis Windungen Trafo
2. Betriebsspannung

$$P_A = n^2 \frac{2}{R} (U_b - U_R)^2$$

# Fazit bis hierher

- AB-Betrieb-PP-Amp funktioniert, wenn **primäre** Wicklungen **magnetisch** gekoppelt sind
- Ausgangsspannung entsteht durch **transformatorische** Erhöhung der Betriebsspannung
- Verstärker auch im Leerlauf stabil



# Weitere Schlußfolgerung

- Alle Wicklungsteile des Trafos **fest** gekoppelt
- Grundwellen addieren sich zu einem Sinus
- Trafos müssen primär  $n^*$  gradzahlige Windungen  $>1$  enthalten  
(Kopplungsbedingungen für beide Hälften)
- In Anzapfung Gleichstrom und zweite Harmonische
- Beliebige Lasten möglich
- Gegenkopplung nicht erforderlich
- **Ausgangsspannung wird transformatorisch erzeugt**

# üblicher Aufbau Trafo



- DLK oder  
2 Rührchen

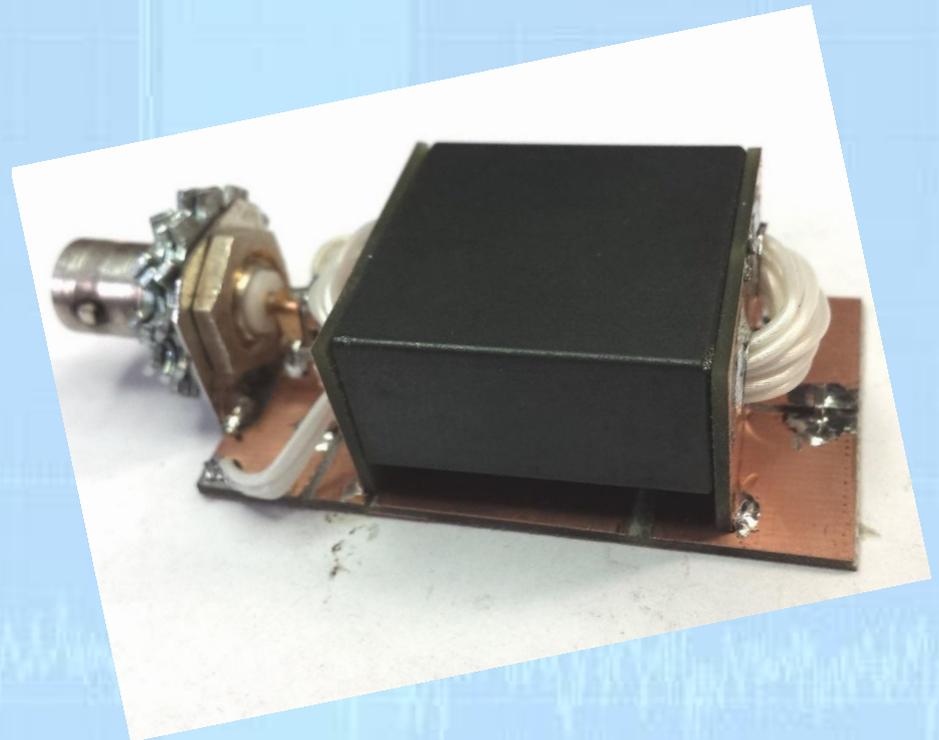
2 Cu-Rohre

getrennte  
Ferritrohre  
Kopplung ?

NEIN

# Doppellochkern – Eigenschaften ?

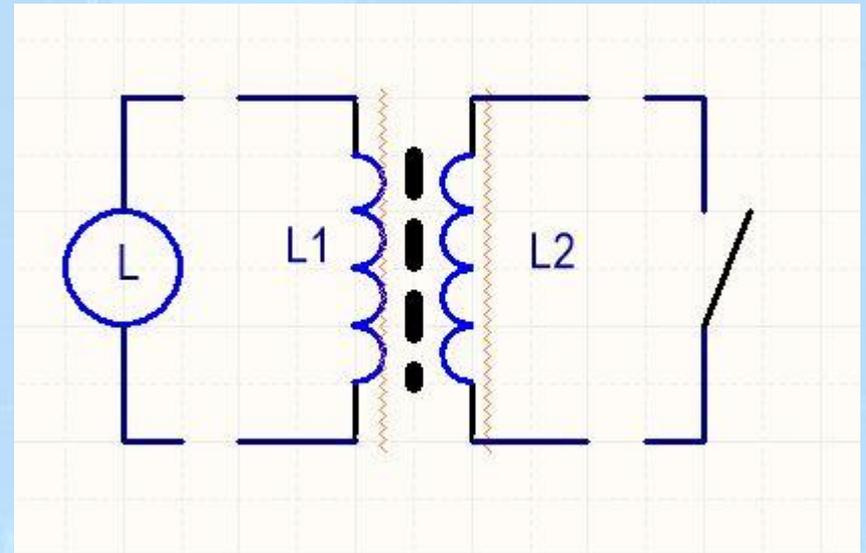
- DLK einheitlicher Ferritkörper
- primär zwei Cu-Rohre
- Kopplung **primär** ?
- Zwei Trafos ?



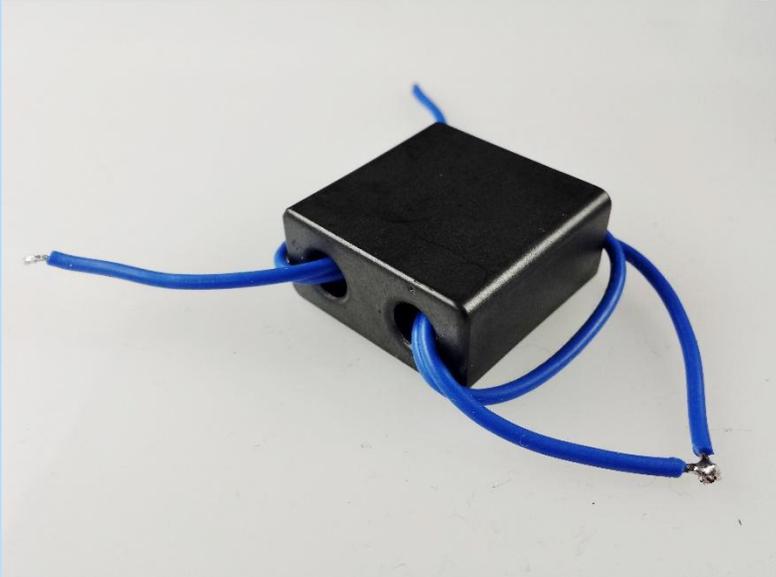
# Streuung von gekoppelten Spulen ?

- Koppelfaktor zwischen Induktivitäten

$$K = \sqrt{1 - \frac{Lk}{L_0}}$$



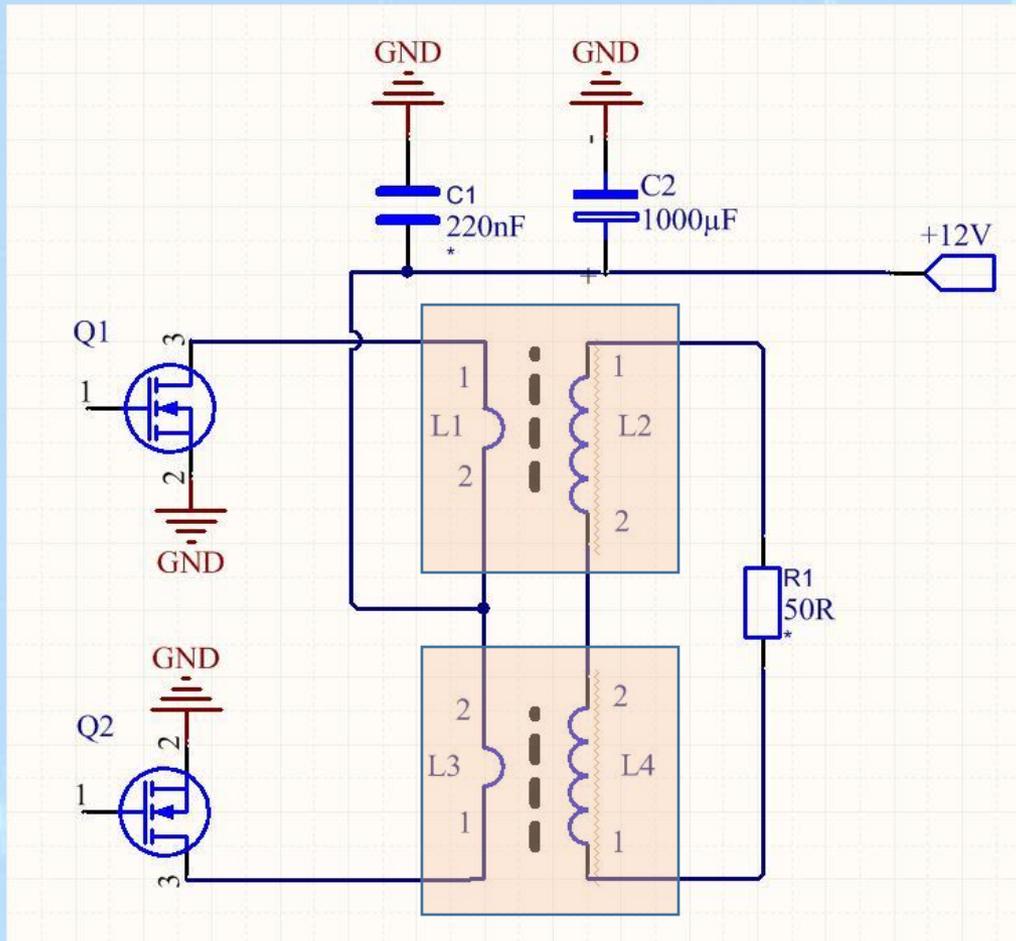
# Magnetische Kopplung ?



offen	20,6 $\mu\text{H}$
geschl.	20,5 $\mu\text{H}$
K	0,069

21,35 $\mu\text{H}$
6,7 $\mu\text{H}$
0,83

# Fazit: Röhren-Trafos haben **keine primäre** Kopplung !



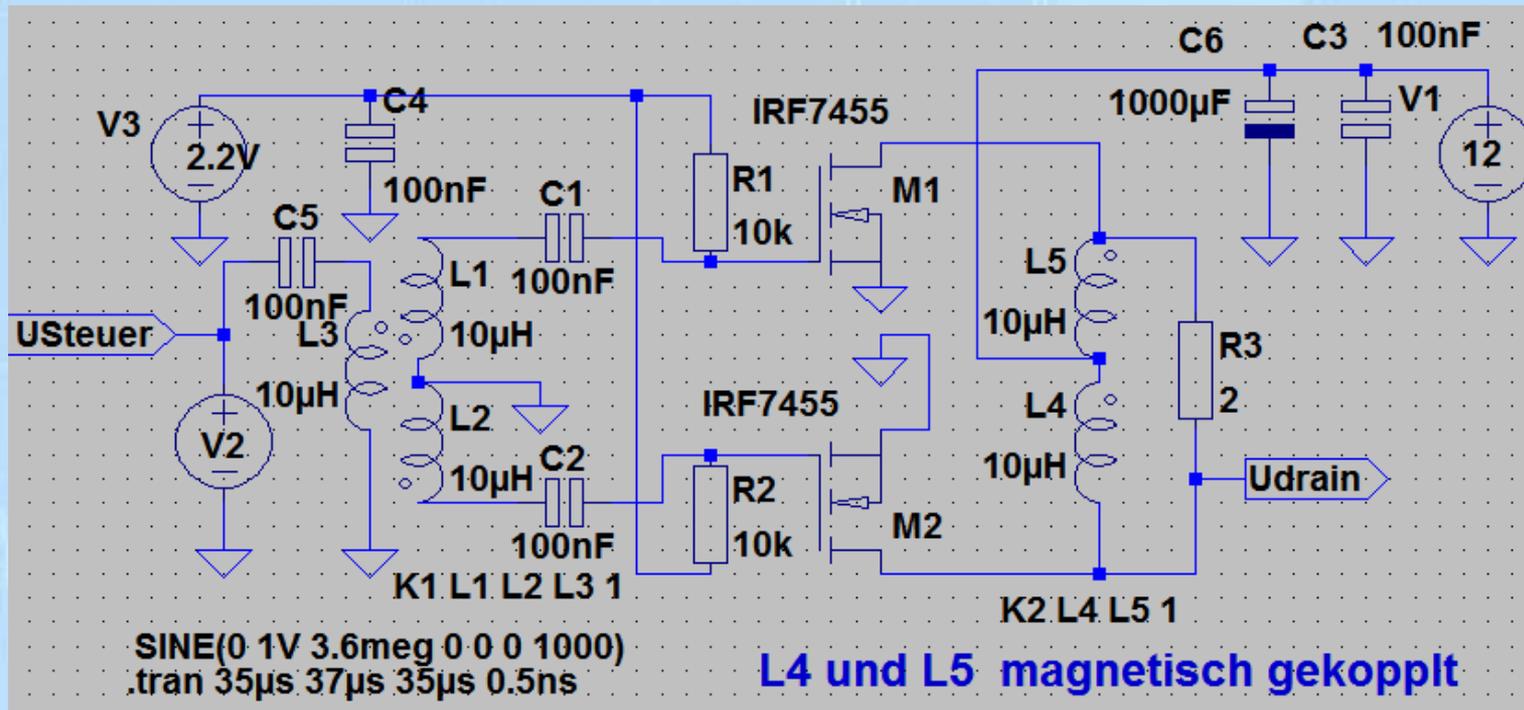
Ferrit-Röhren  
oder DLK, egal

L1 und L3  
**nicht** gekoppelt

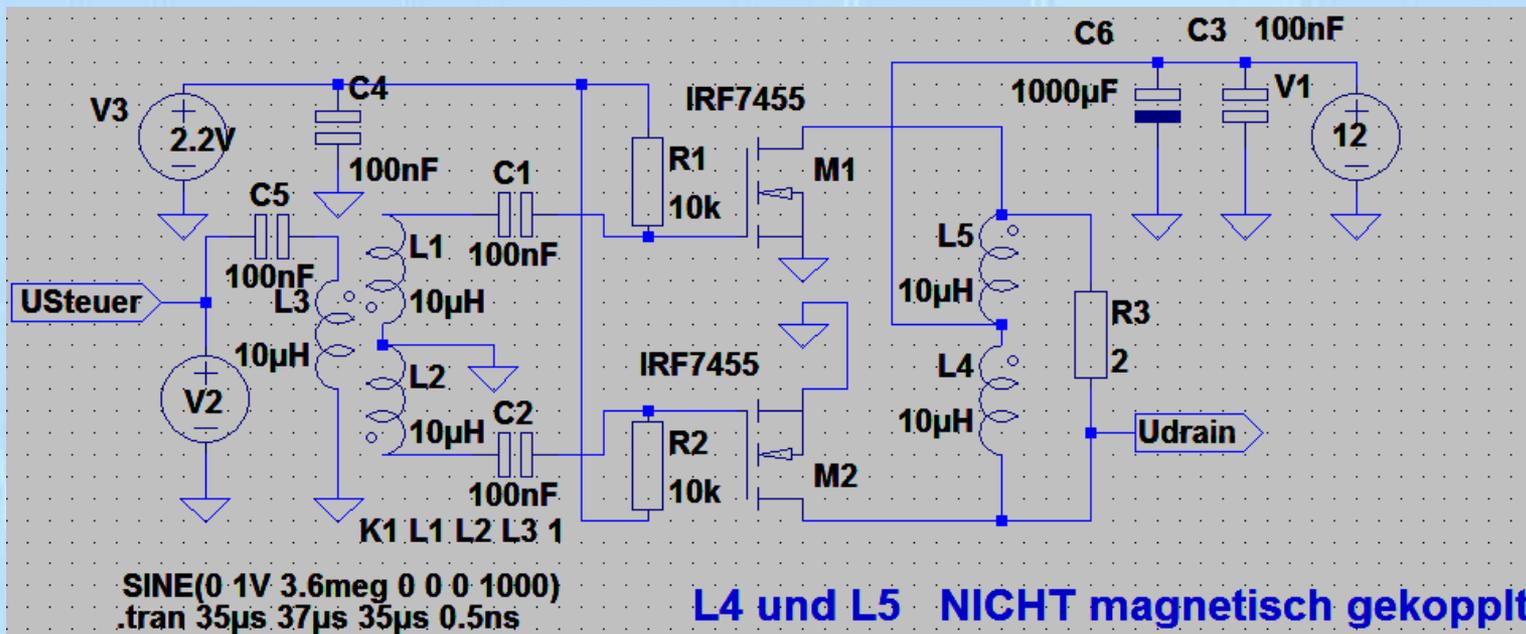
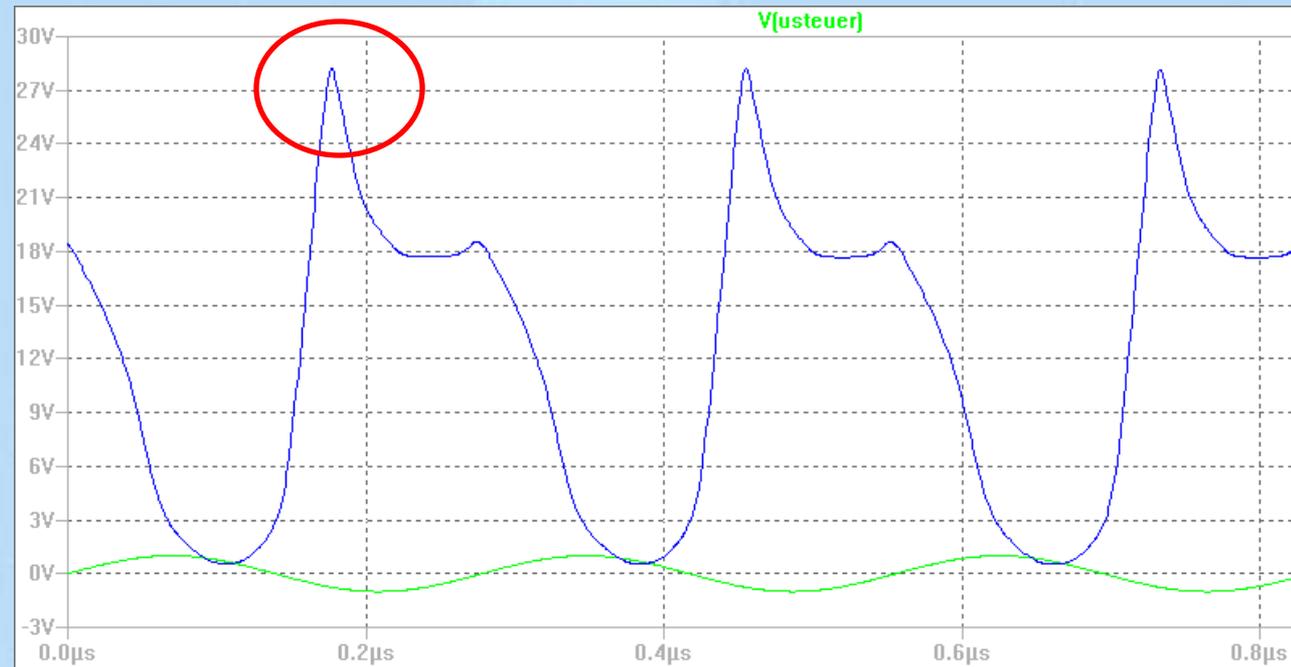
**-> zwei Trafos!**

# LTSpice

## normaler Trafo

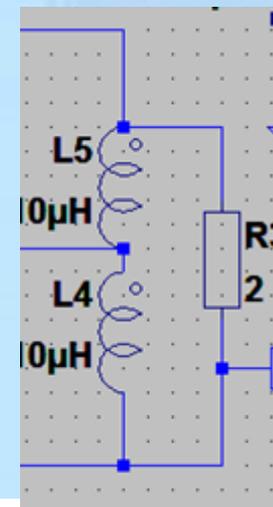


# LTSpice ohne Kopplung

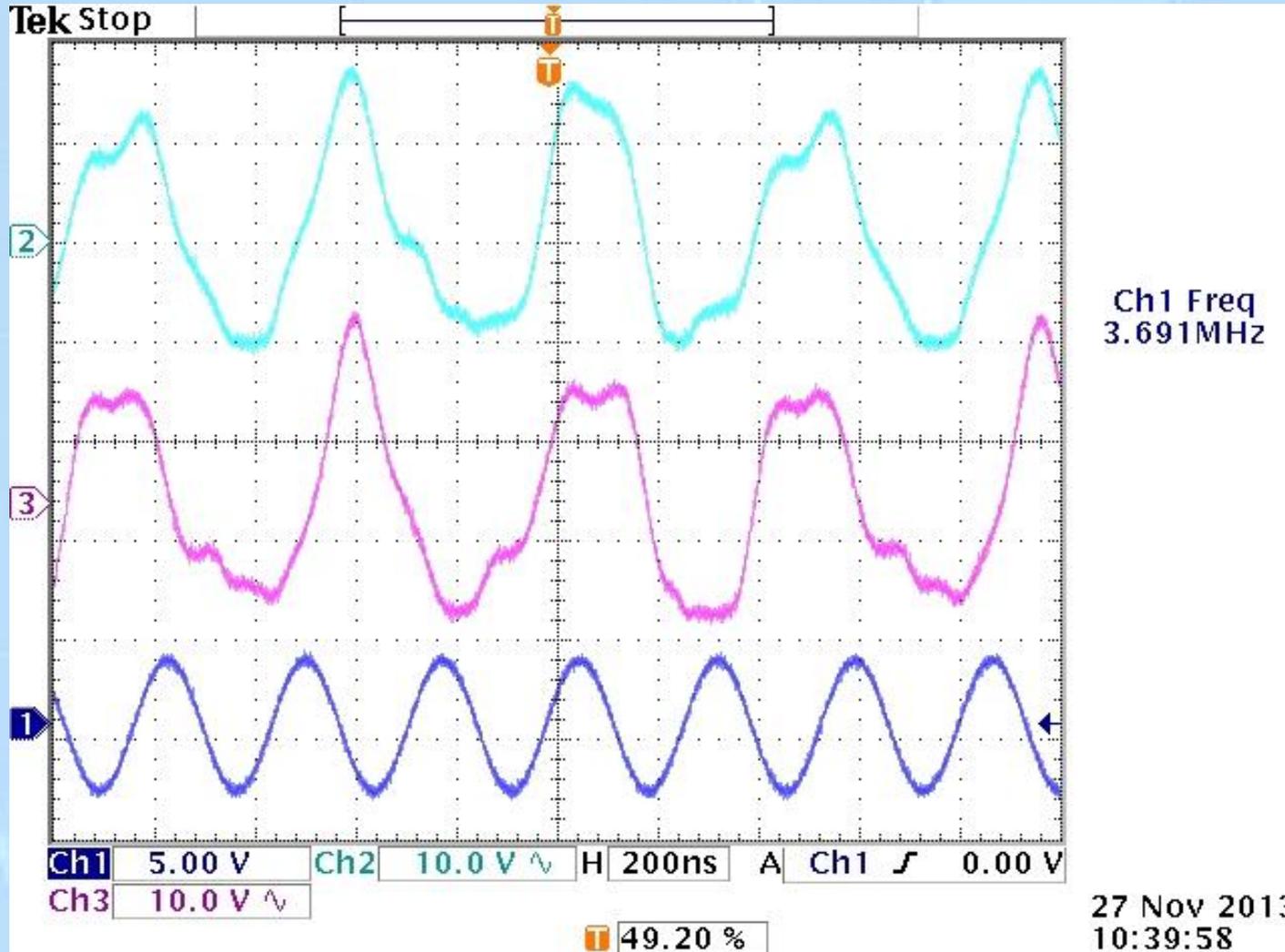


# Stromverläufe

L4; L5, R3

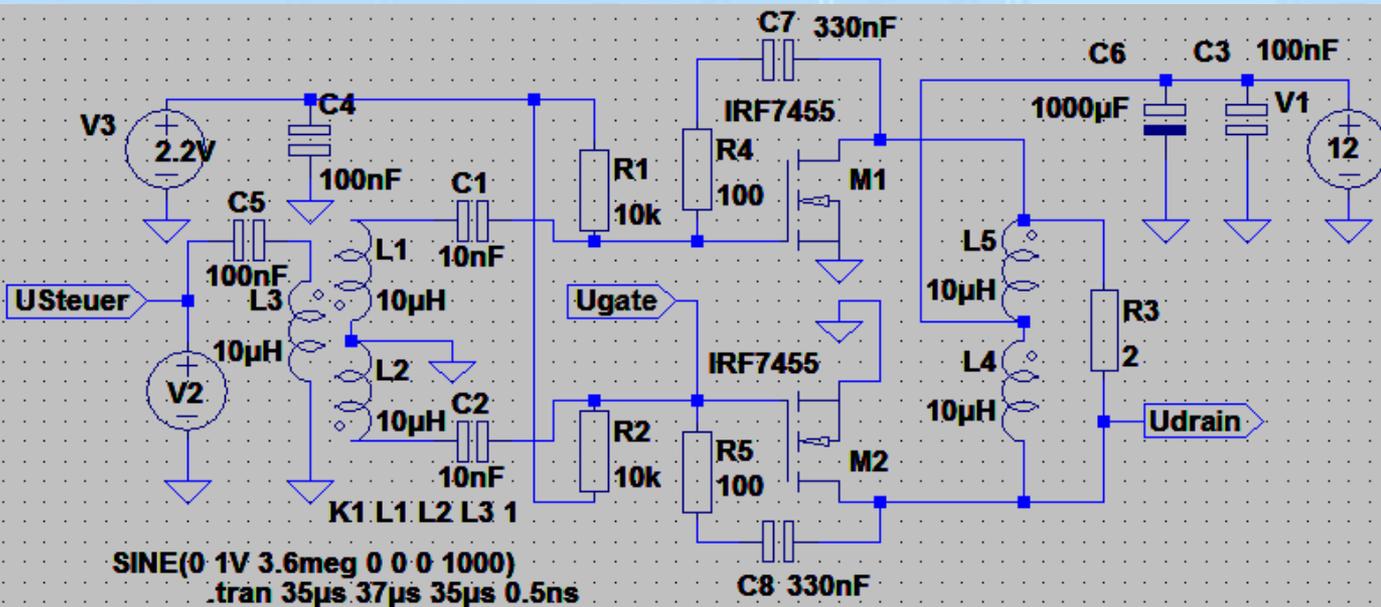
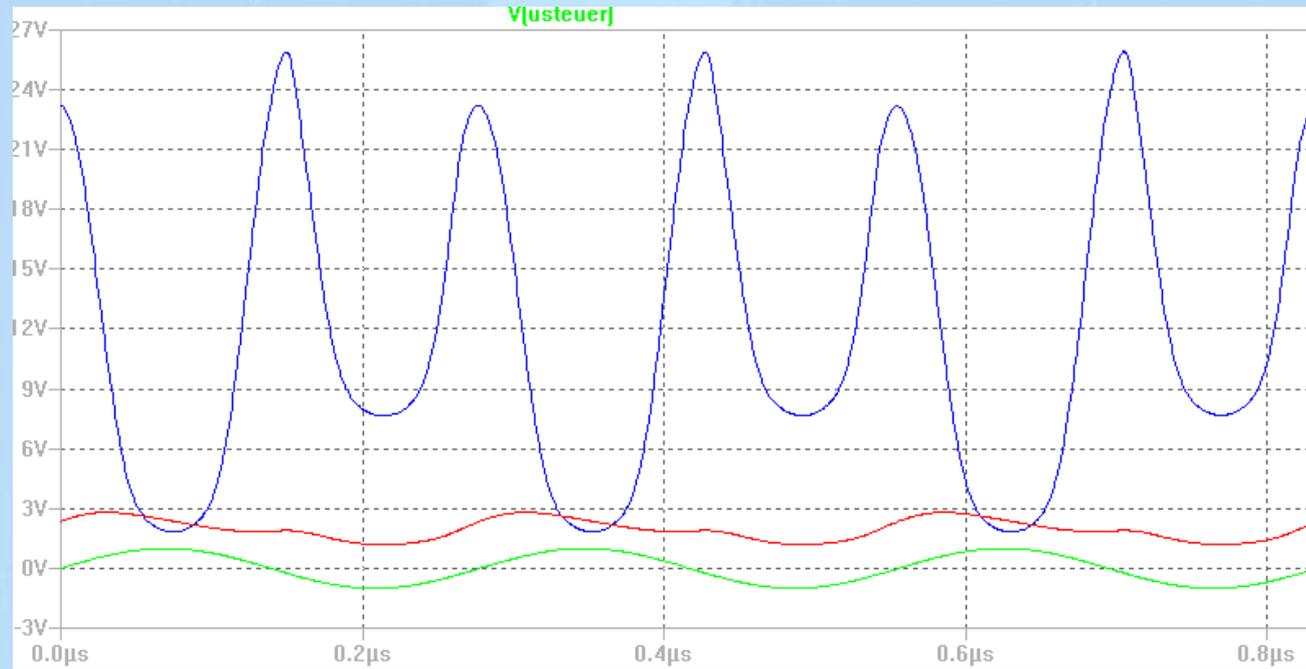


# Drainspannung ohne Gegenkopplung



# Gegenkopplung

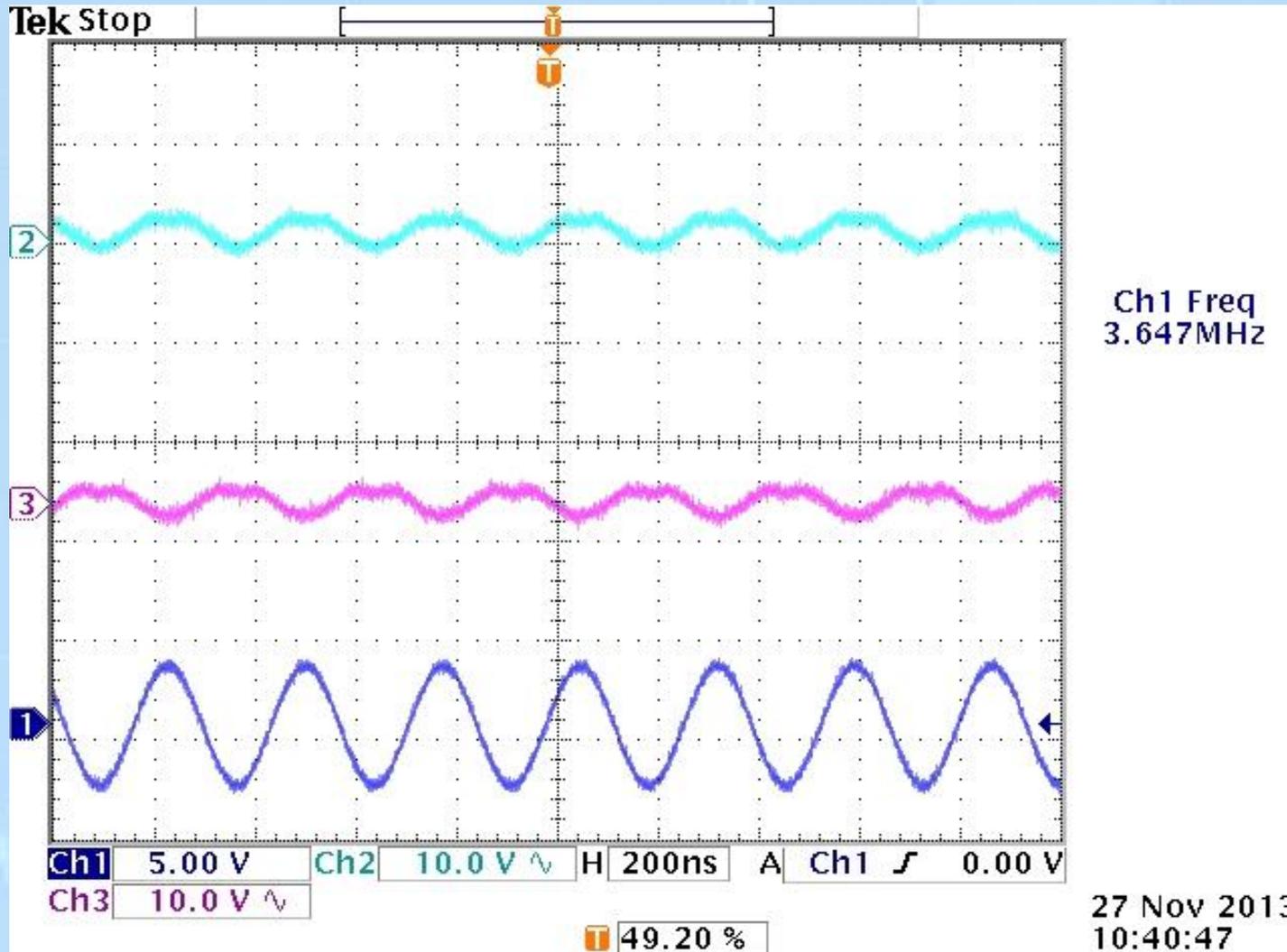
## Deformation der Gatespannung



temporäre  
Verschiebung  
Arbeitspunkt  
AB -> A

L4 und L5 NICHT magnetisch gekoppelt  
Gegenkopplung

# Drainspannung mit GK



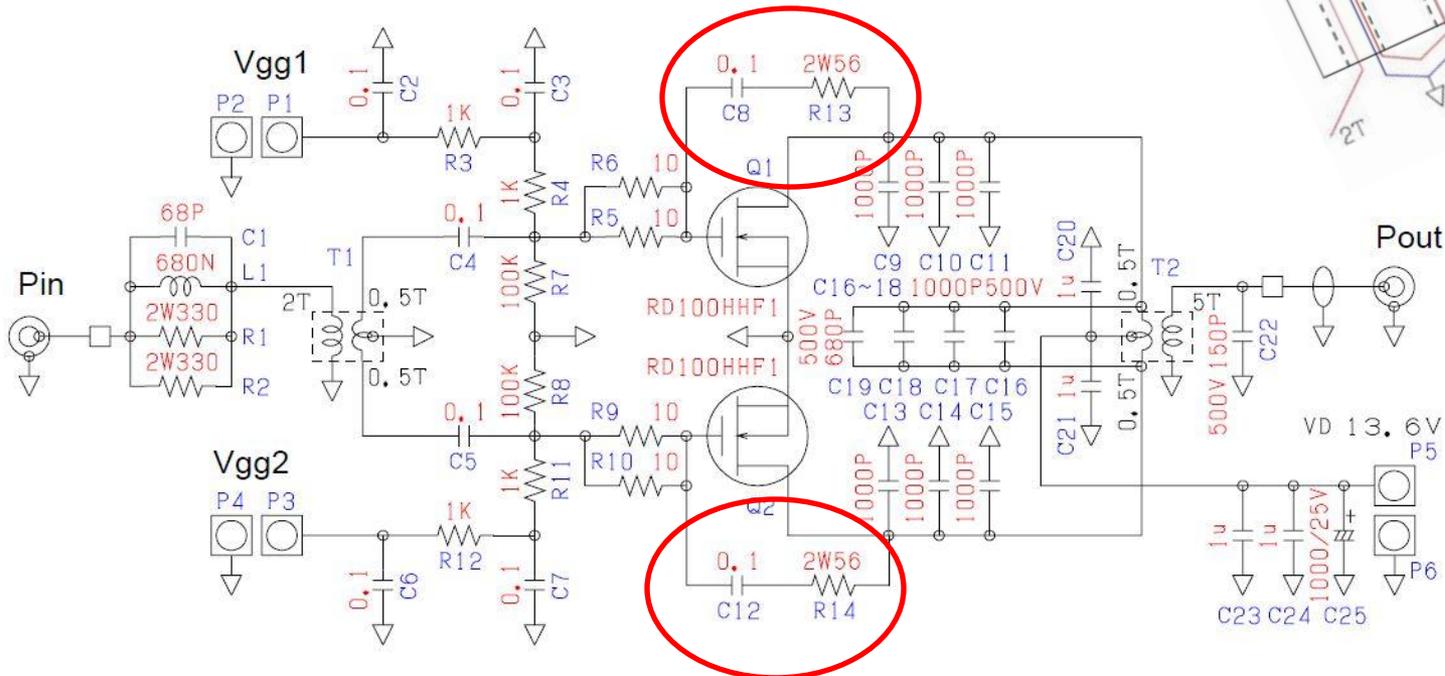
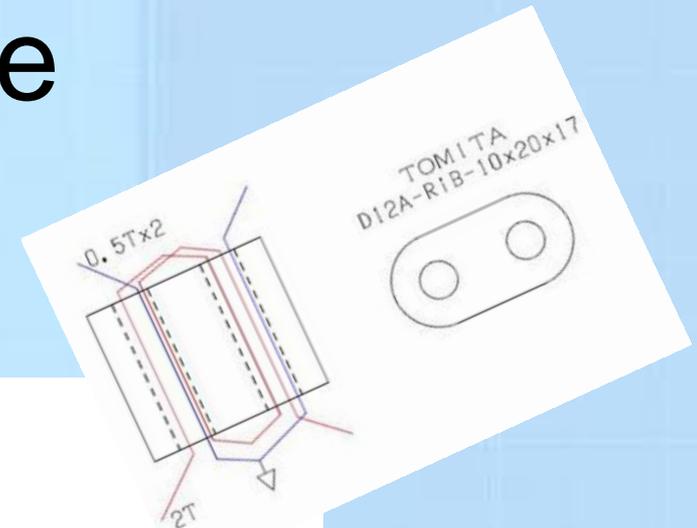
...was nun ???...



- Wie gut funktioniert ein Gegentaktverstärker ohne Kopplung der Primärwindungen ?
- Wie erfolgt eine Spannungserzeugung ?
- Was macht die Gegenkopplung ?
- Wie wirkt sich die Arbeitspunktverschiebung aus ?
- Wie machen es die Profis ?
- Gibt es eine Lösung ?
- Was sagt die Literatur ?

# Mitsubishi App-Note

## RD100HHF1

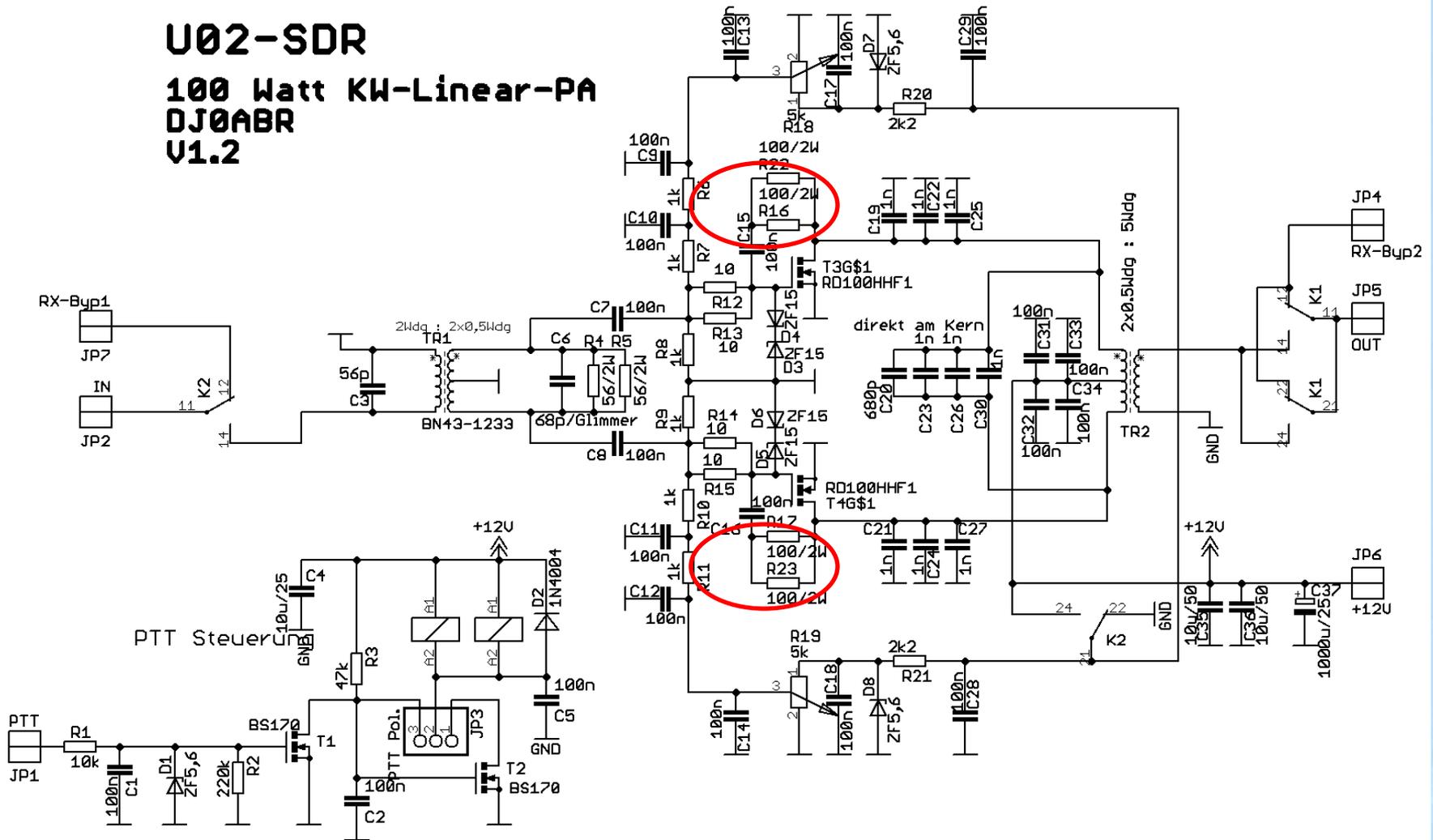


RD100HHF1 PUSH-PULL  
100W-PEP LINEAR AMP

# DJ0ABR – Endstufe für LIMA SDR

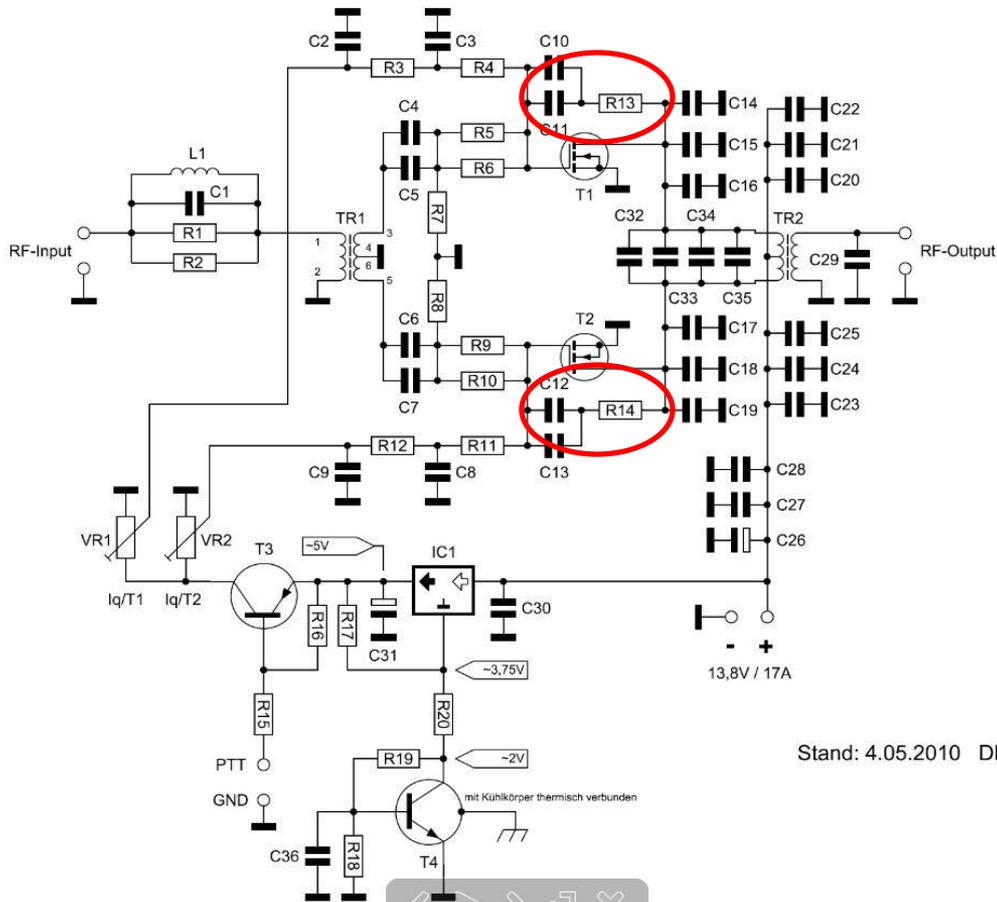
## U02-SDR

100 Watt KW-Linear-PA  
DJ0ABR  
V1.2



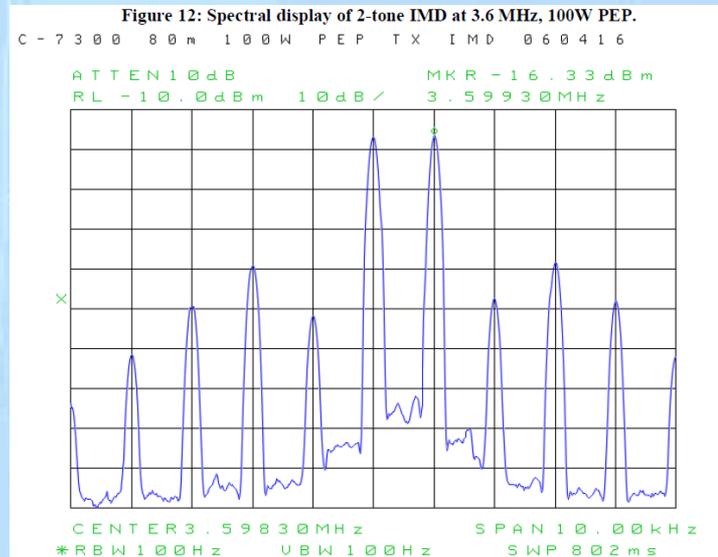
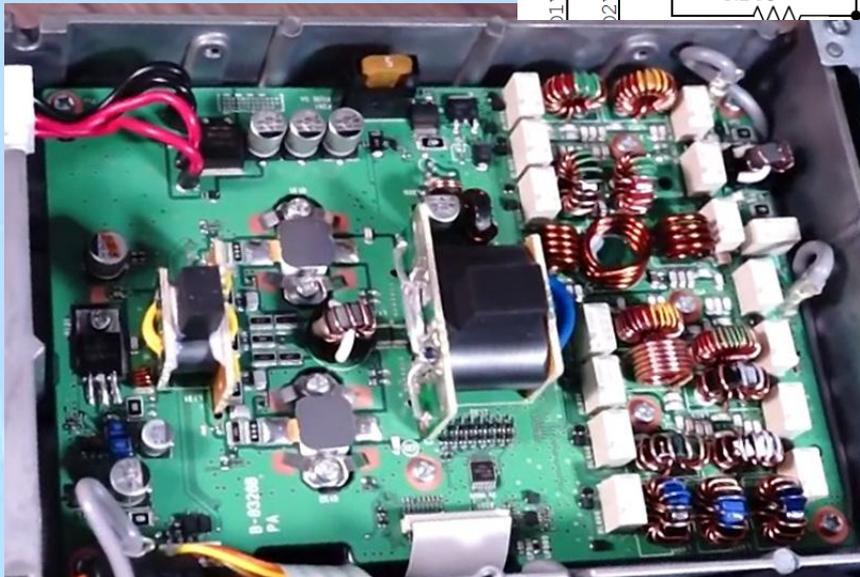
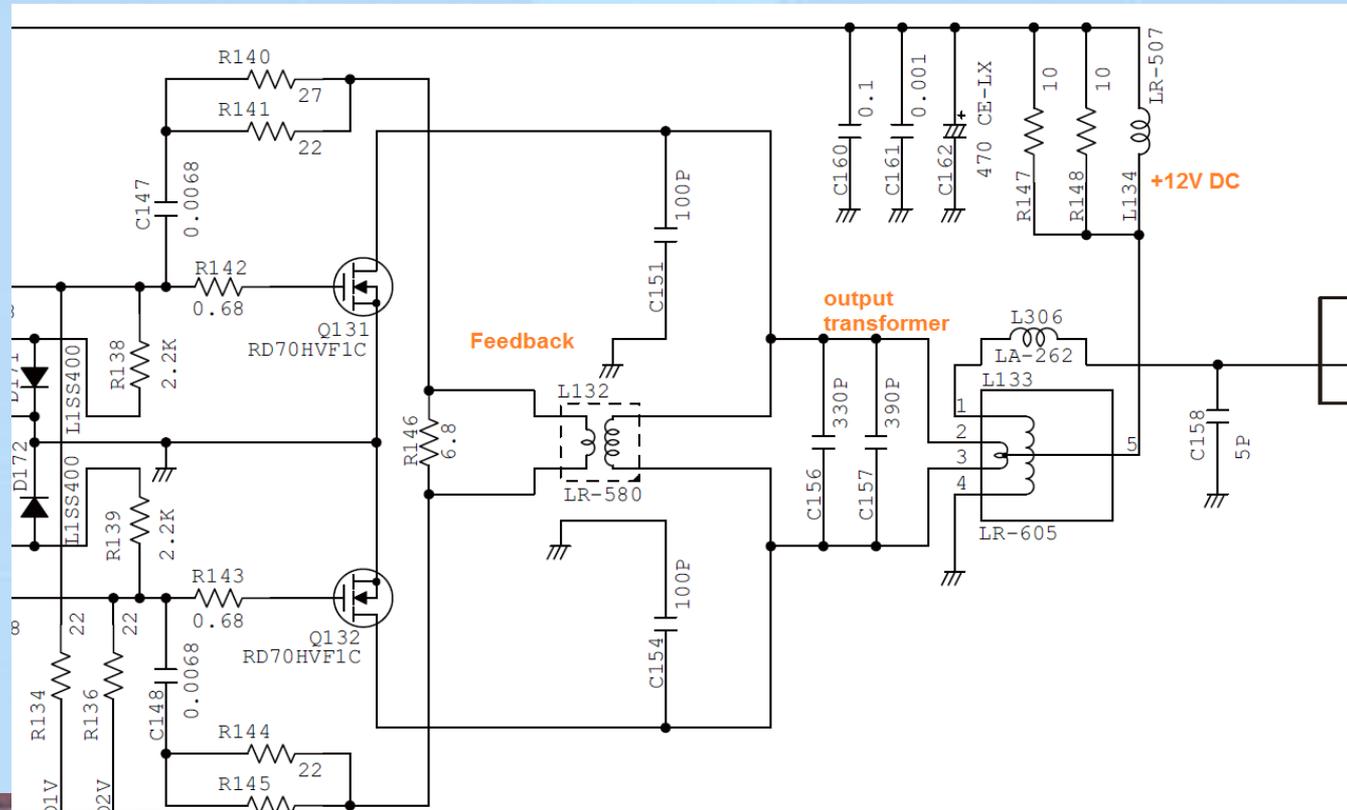
# Qrp-Project

## 12V / 100W RF-POWER-AMPLIFIER 1,8-30MHz



# IC7300 Endstufe !!!

ITU-Guideline  
-25 dBc IMD



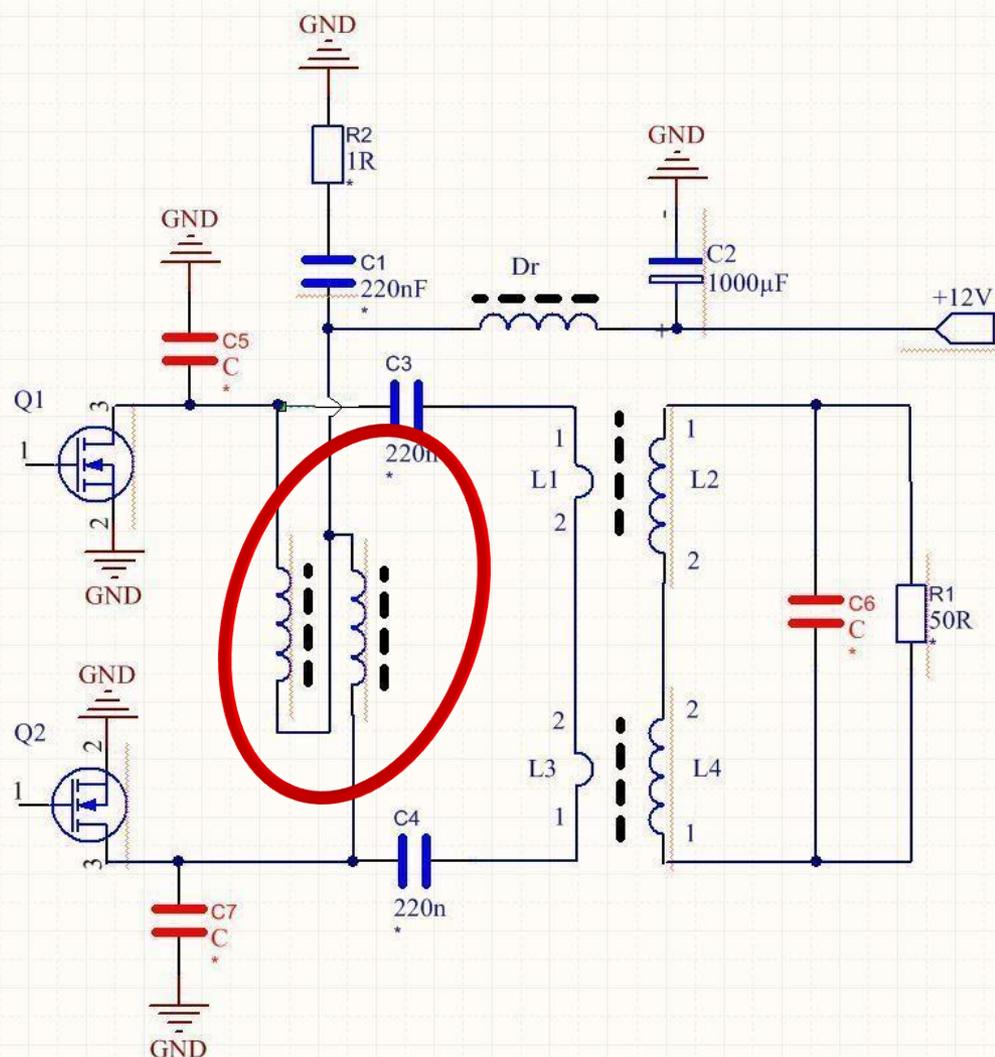
# Schlußfolgerung

- Röhrenchentrafos **ohne** Kopplung ergeben **keine** transformatorische Spannungserzeugung
- Röhrenchentrafos speichern magnetische Energie
- Spannungsanstieg wird durch Selbstinduktion bewirkt
- Drainströme aber nicht sinusförmig
- Starke Gegenkopplung - Drainspannung - Gate!  
Verschiebung Arbeitspunkt
- Wirkungsgrad und Linearität ?

# Warum gibt es so viele Verstärker mit Röhrentrafos?

- Ergebnisse wurden/werden als ausreichend betrachtet
- Technische Daten kontra Ökonomie ?
- Bisher keine Analyse der Ursachen im Afu-Bereich
- Vorteil wirkt nur, wenn BE Daten einhalten
- Niederohmige Gegenkopplung verhindert Schlimmeres
- Zunehmende SDR-Verbreitung schärft IM-Bewußtsein
- **Kommerzielle Firmen R&S, Codan, Rockwell Collins, Harris, Telefunken etc. verwenden grundsätzlich Autotrafos**

# Lösung -> bifilare Speisedrossel



Erzeugung einer sinusförmigen Drainspannung von  $4 \cdot (U_b - U_r)$  obwohl jeweils nur ein FET leitet...  
durch **Auto-transformation**

# Aufgabenteilung Drossel - Ausgangstrafo

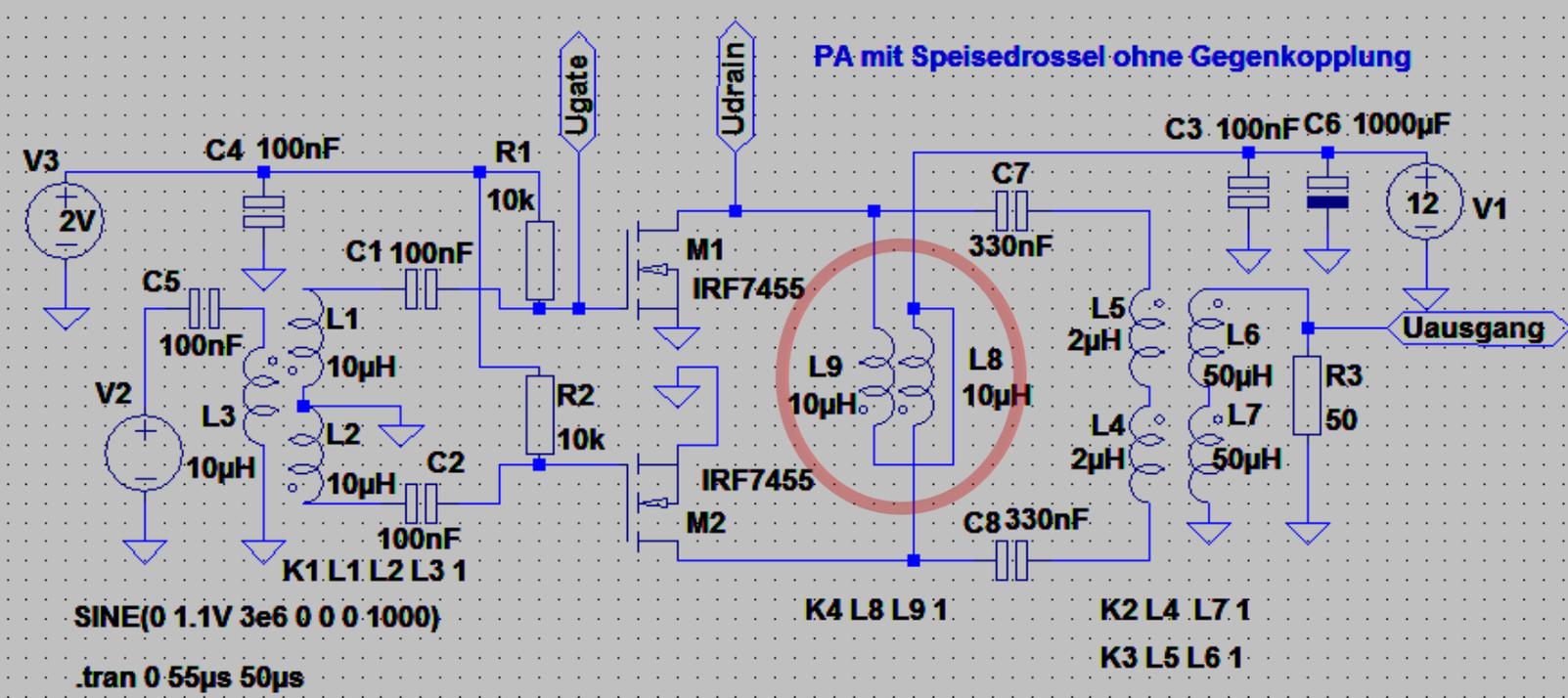
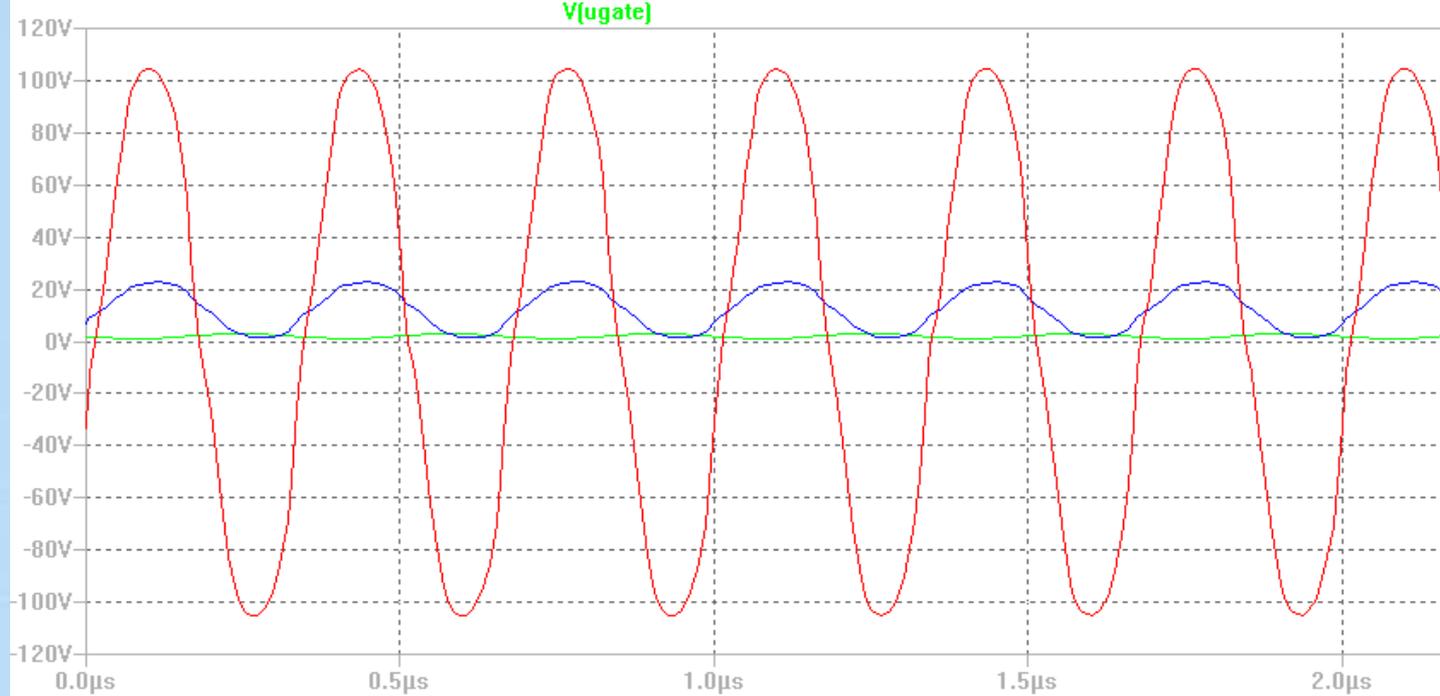
- **Trafo:**

- Transformation von 50 Ohm auf einen für die Transistoren passenden Wert (maximalen Strom beachten!)

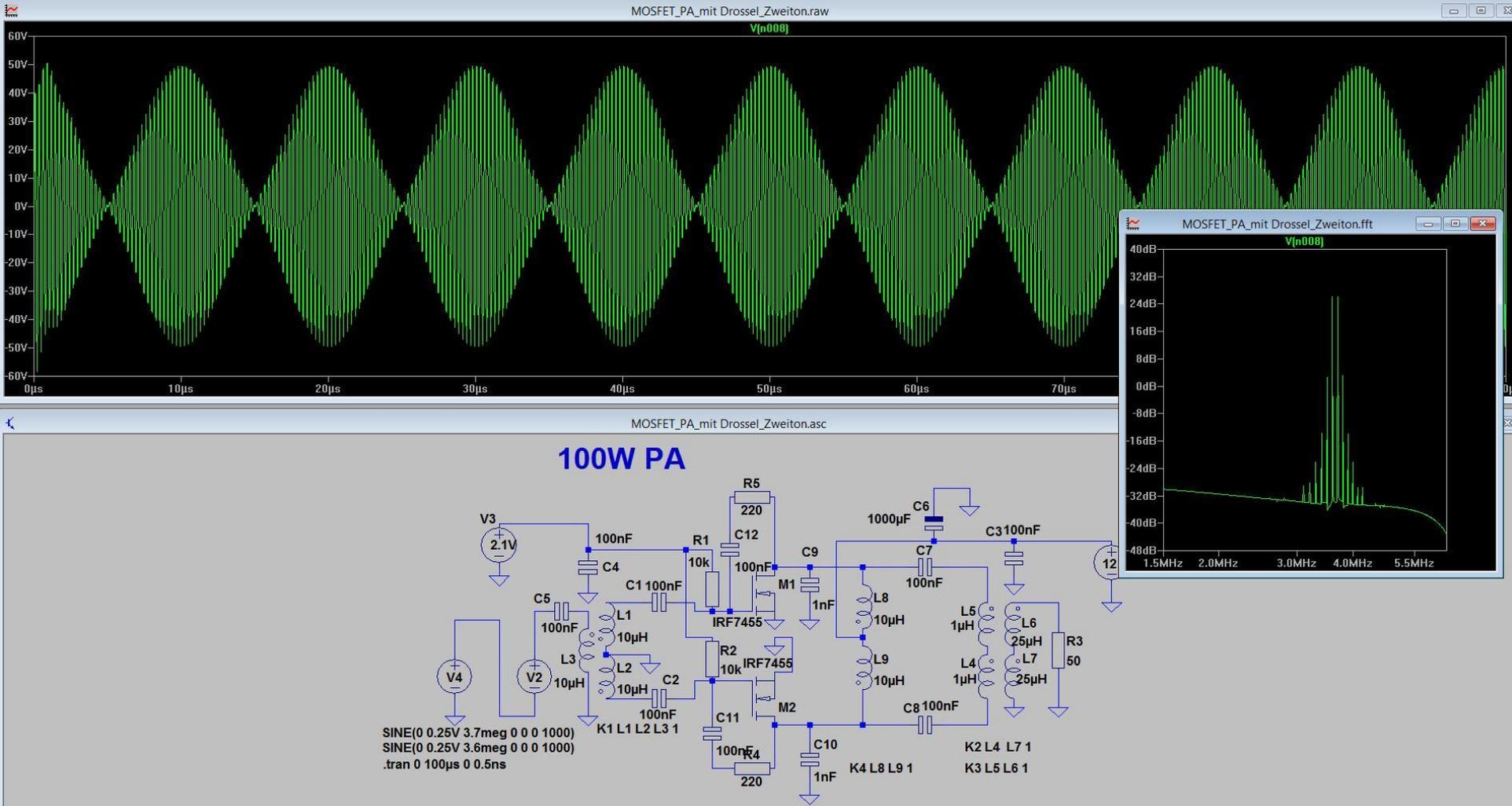
- **Drossel:**

- Zuführung der Gleichspannung
- Arbeitswiderstände für die Transistoren
- Erzeugung (Addition) einer **sinusförmigen** Spannung zwischen den Drains durch Transformation mal zwei

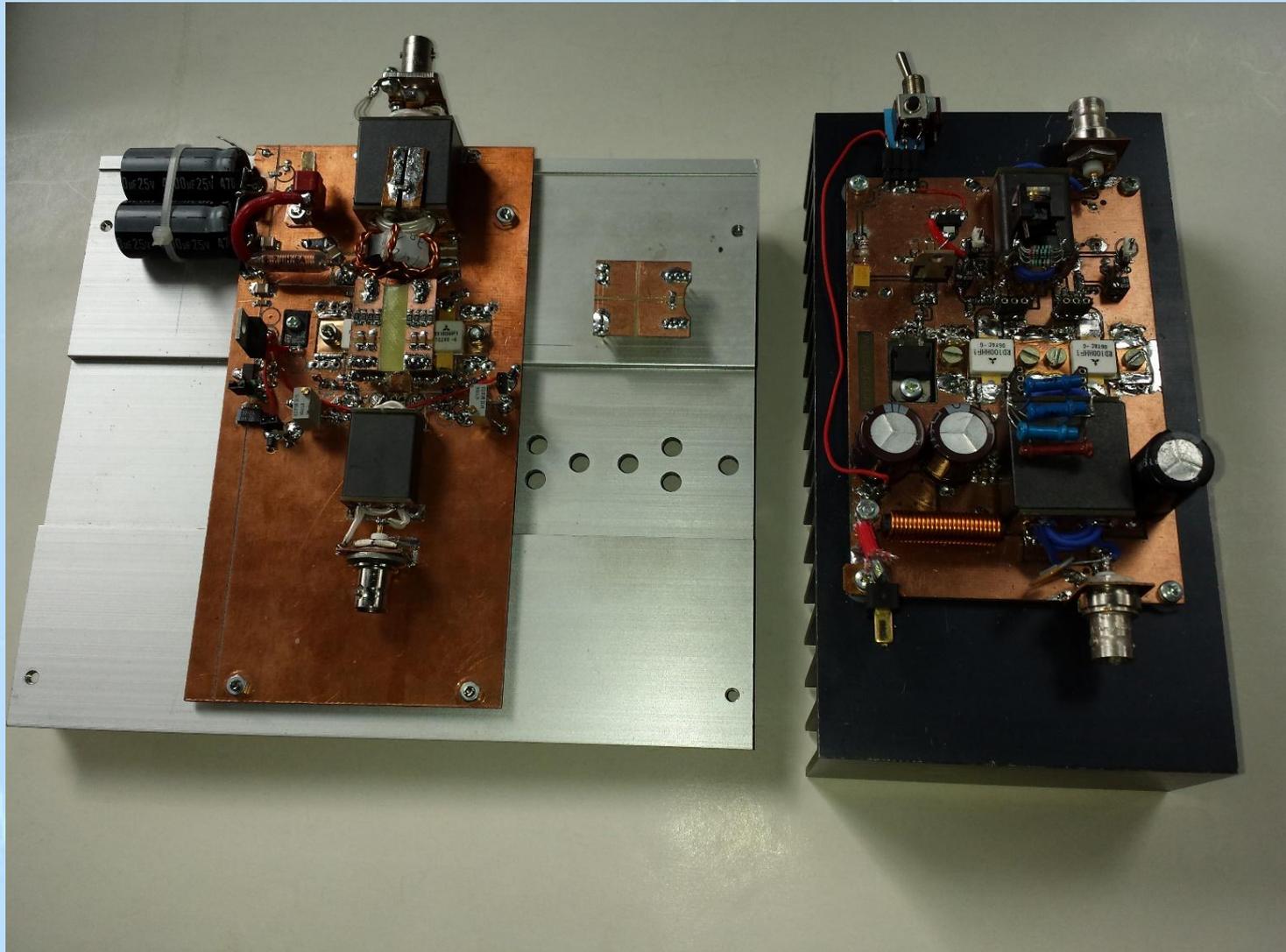
# PP-AMP korrekter Aufbau

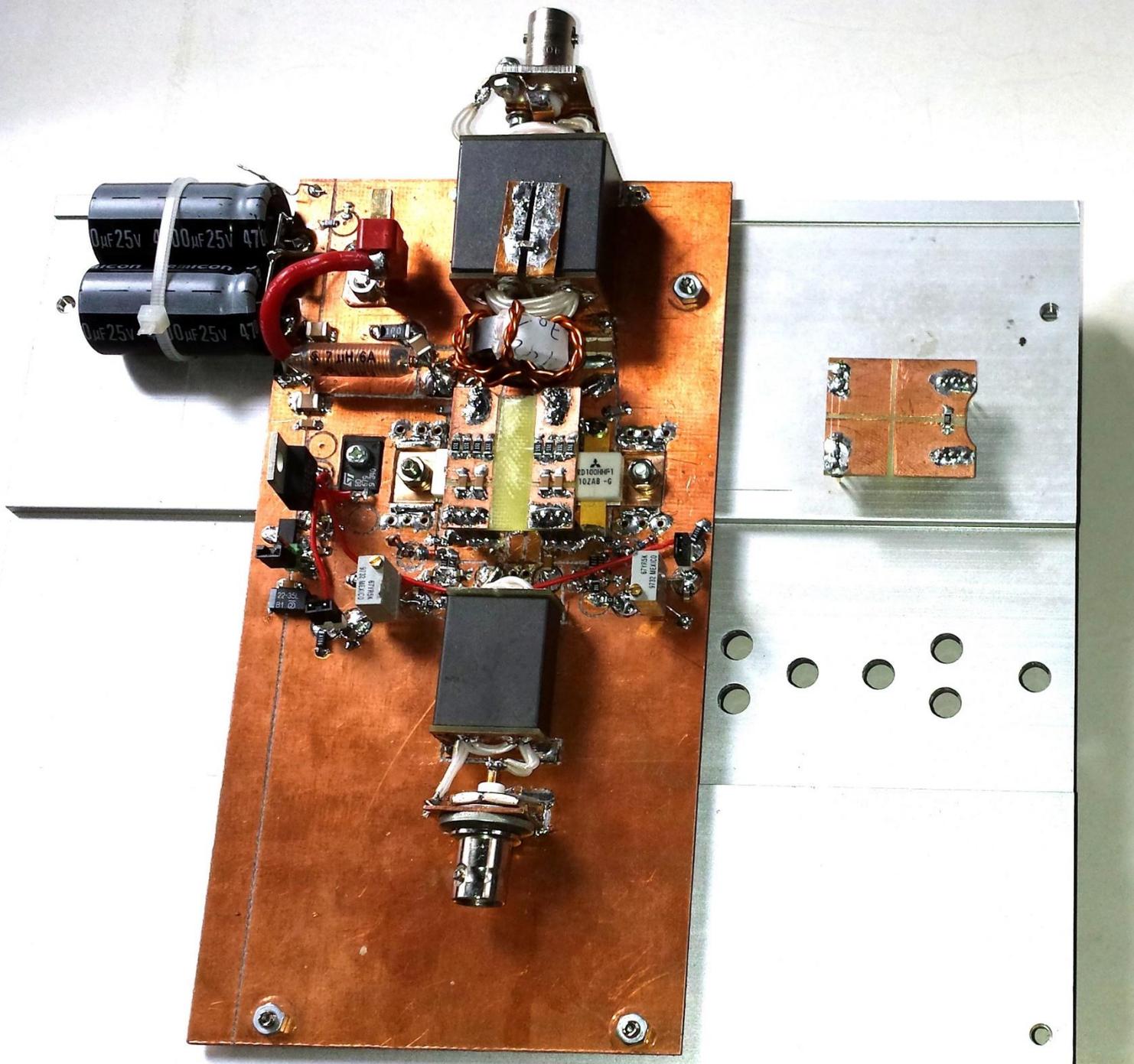


# Zweiton-Simulation mit LTSpice



# Neubau mit Drossel





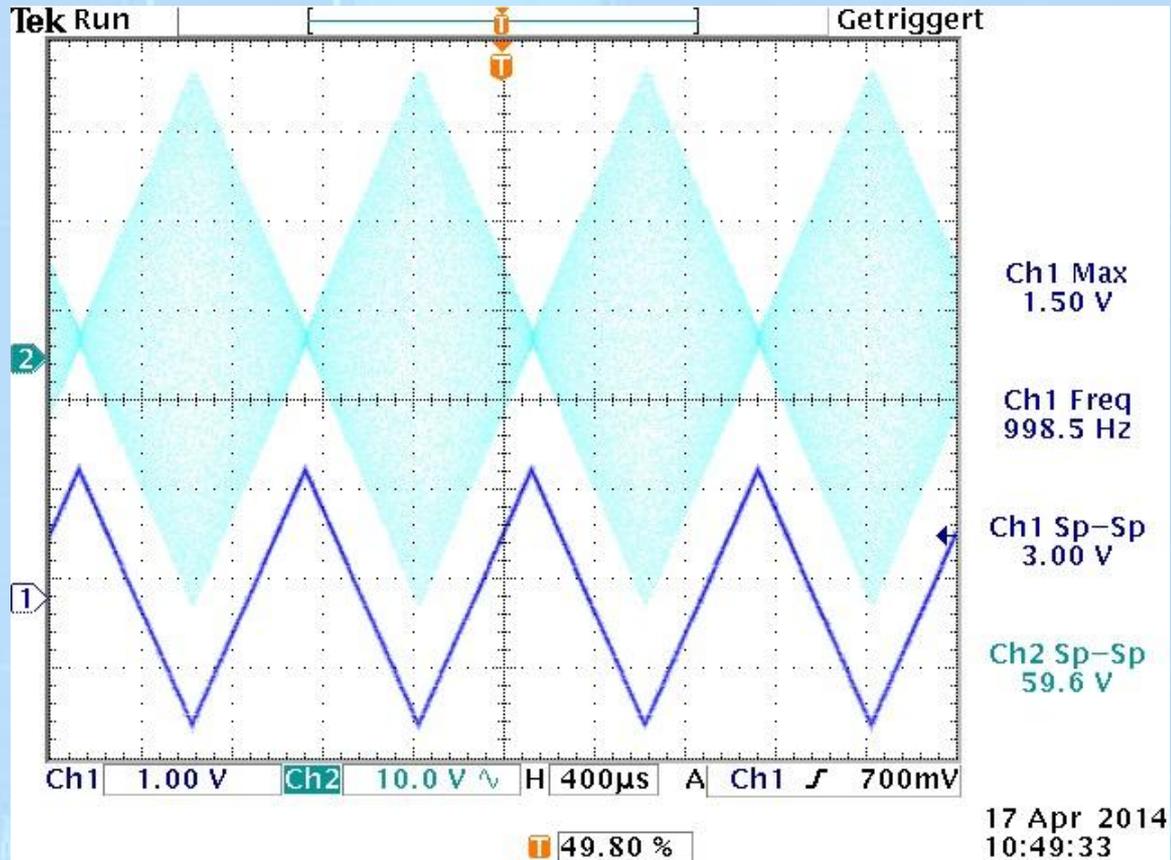
PA

# Beurteilung der Linearität

Dreiecksgenerator

HF-Signal,  
amplituden-  
moduliert

Linearität im  
Zeitbereich



# Meßaufbau

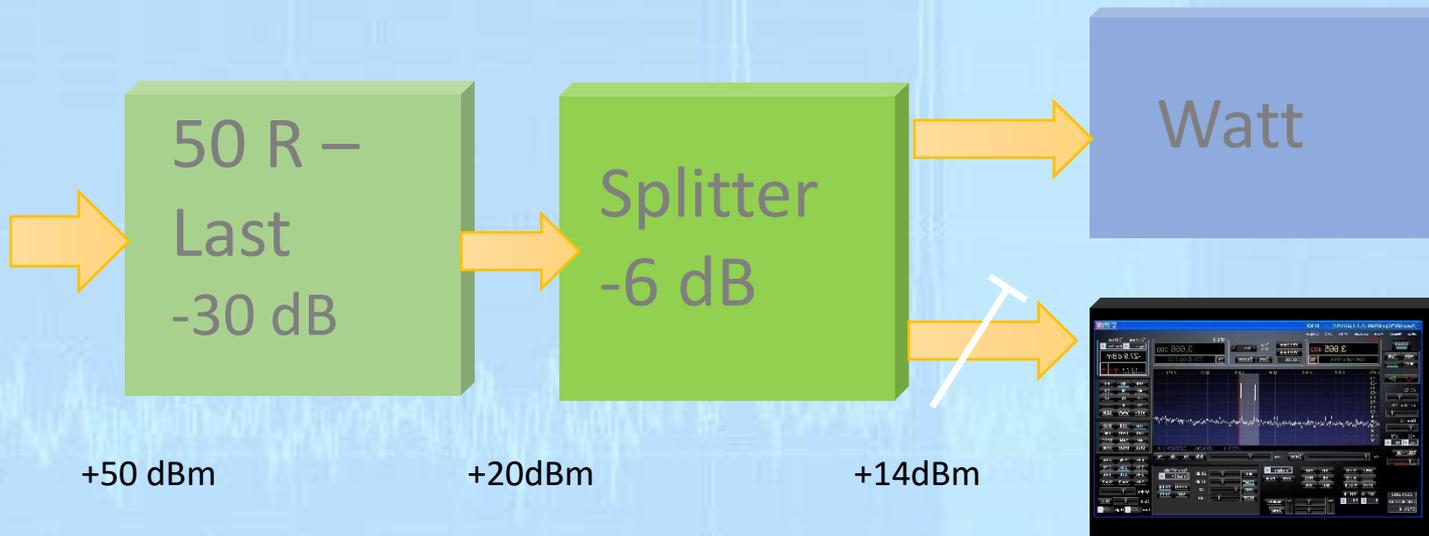


+24 dBm

+44dBm

+34 dBm

+50 dBm

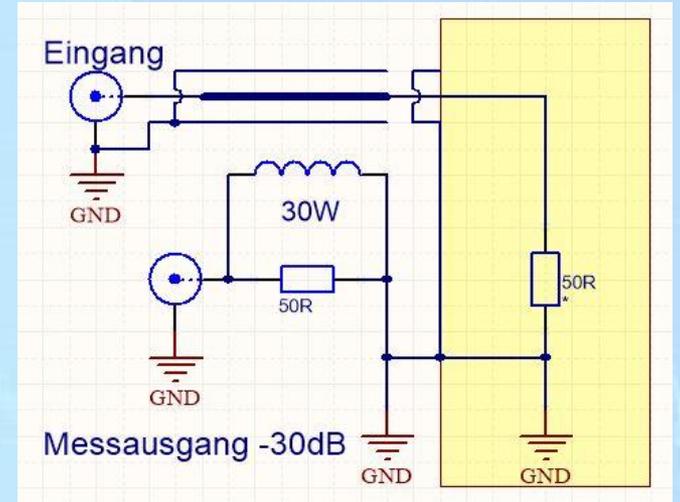
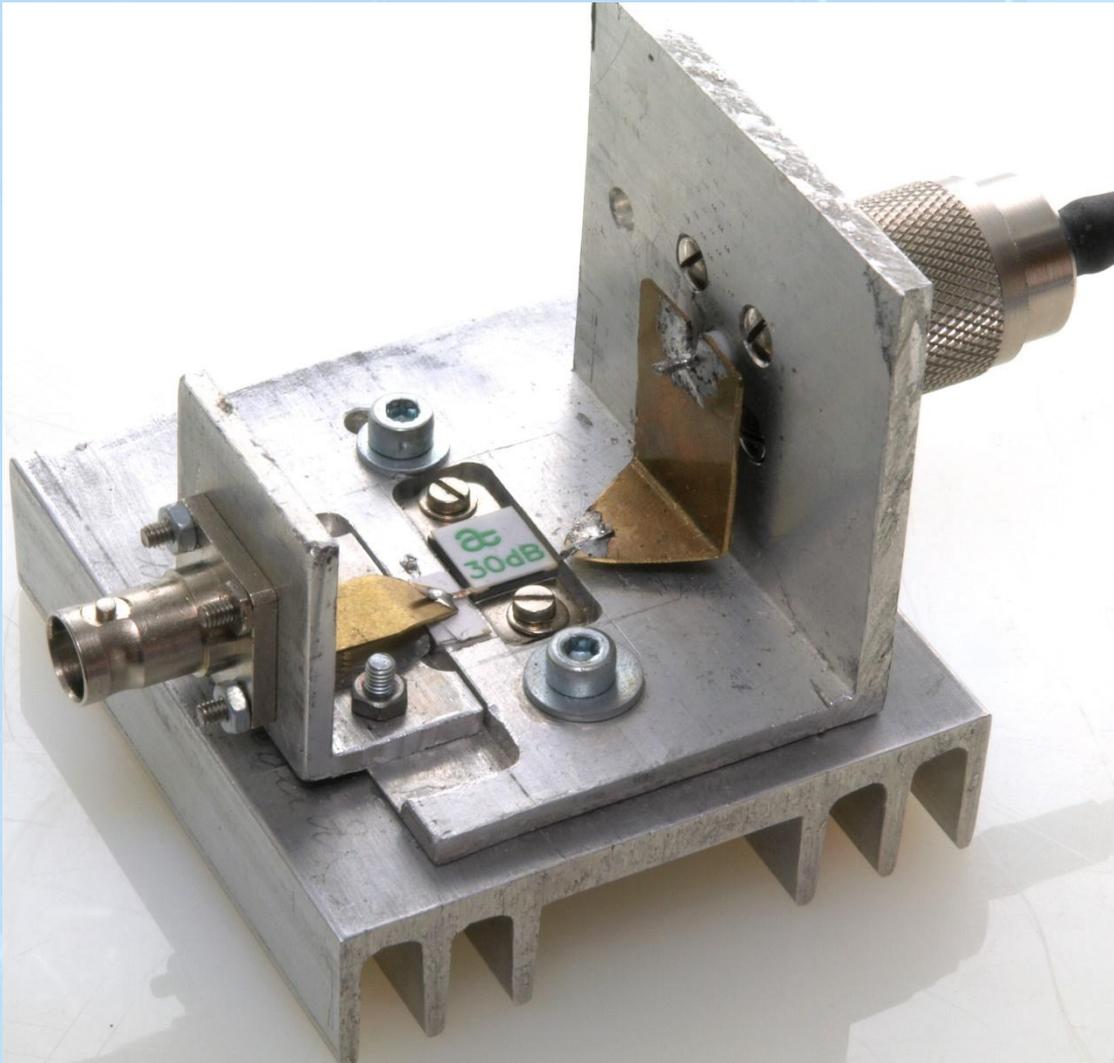


+50 dBm

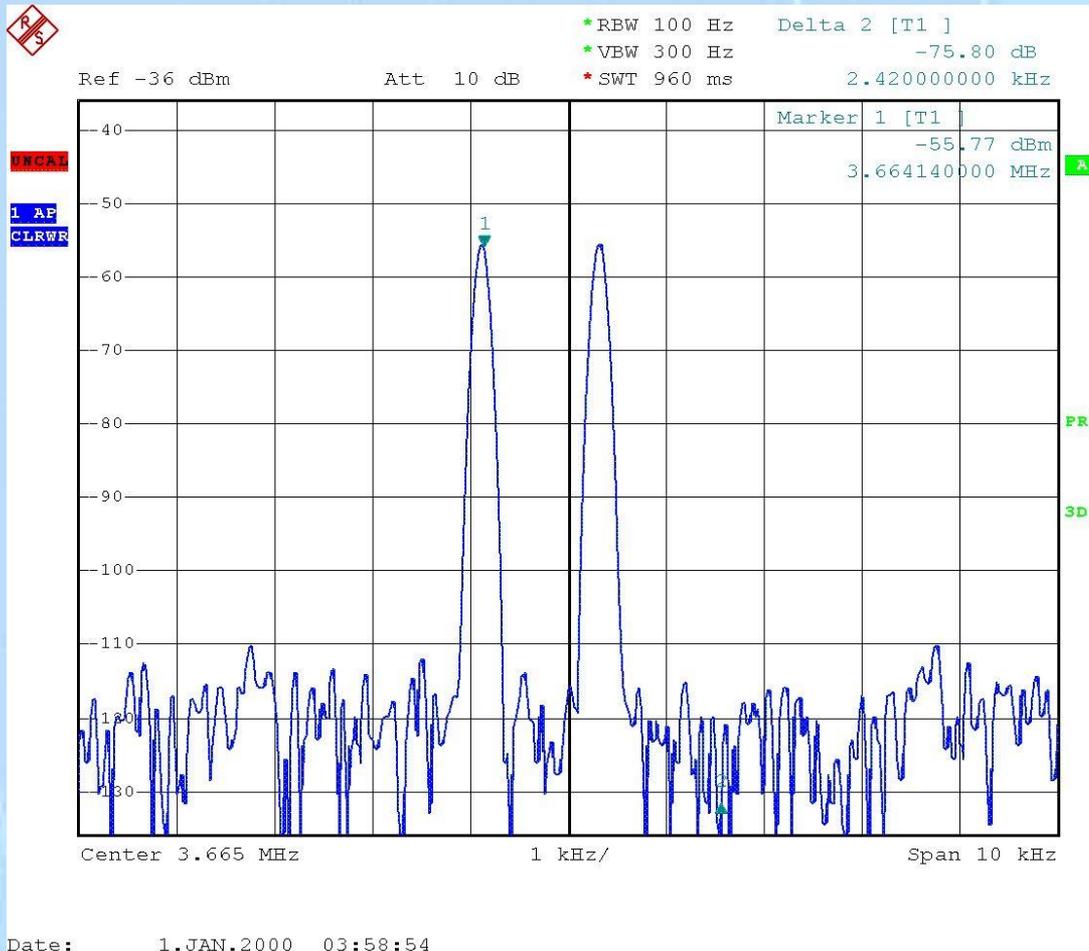
+20dBm

+14dBm

# Lastwiderstand mit Meßausgang



# Ansteuerung mit HERMES



# MRF150 im A-Betrieb



# Wattmeter nach DL4JAL



# Durchgangsverstärkung

DG8SAQ Vector Network Analyzer Software

20.08.2013 23:30:32 PAait\_PAneu

1: 3.5MHz -17.49dB -14.18dB  
2: 30.5MHz -17.71dB -13.33dB

Cursor Trace2: 27.1MHz -19.29dB



MC

Start = 1 MHz

Center = 30.5 MHz  
Span = 59 MHz

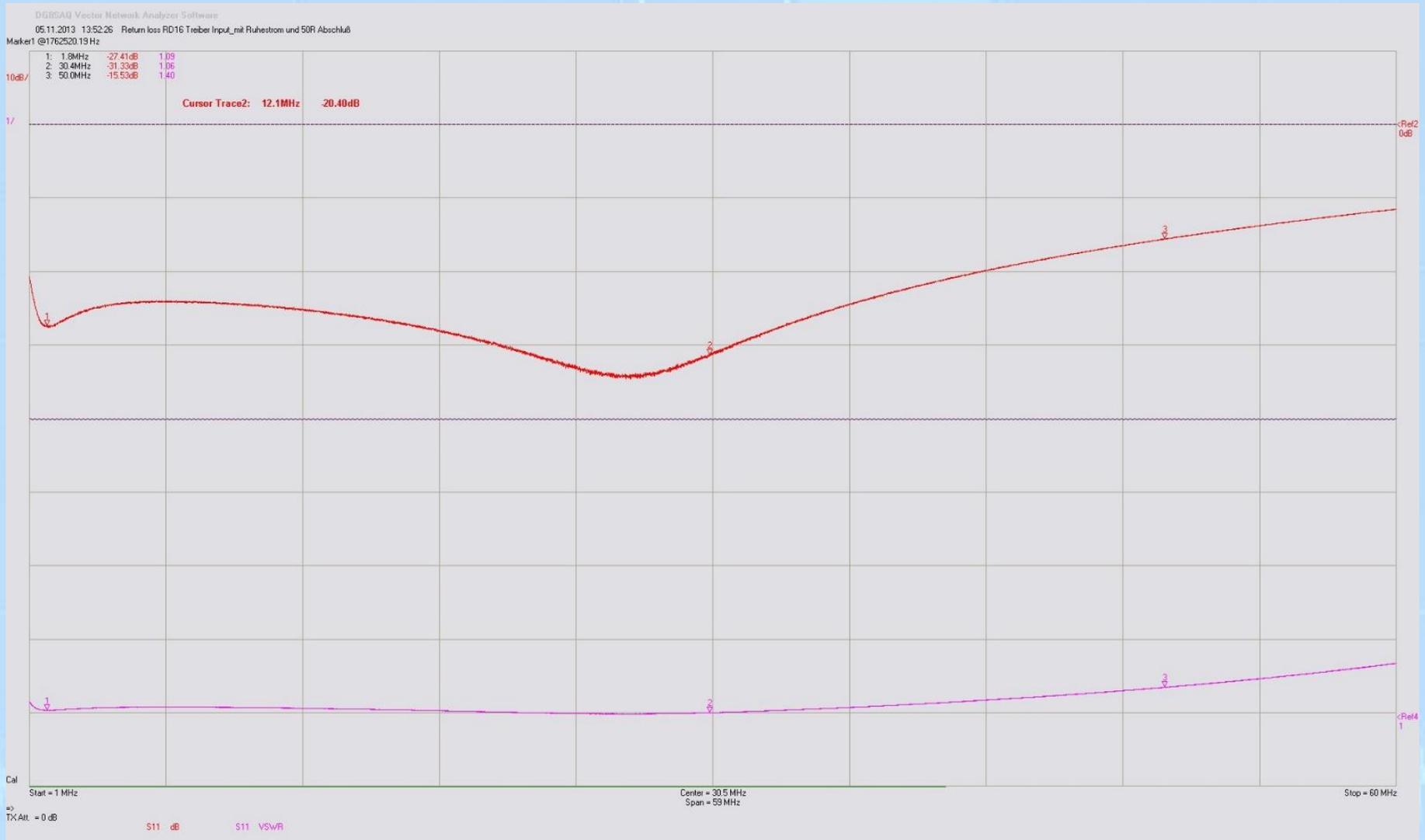
Stop = 60 MHz

=>  
TX,Att. = 0 dB

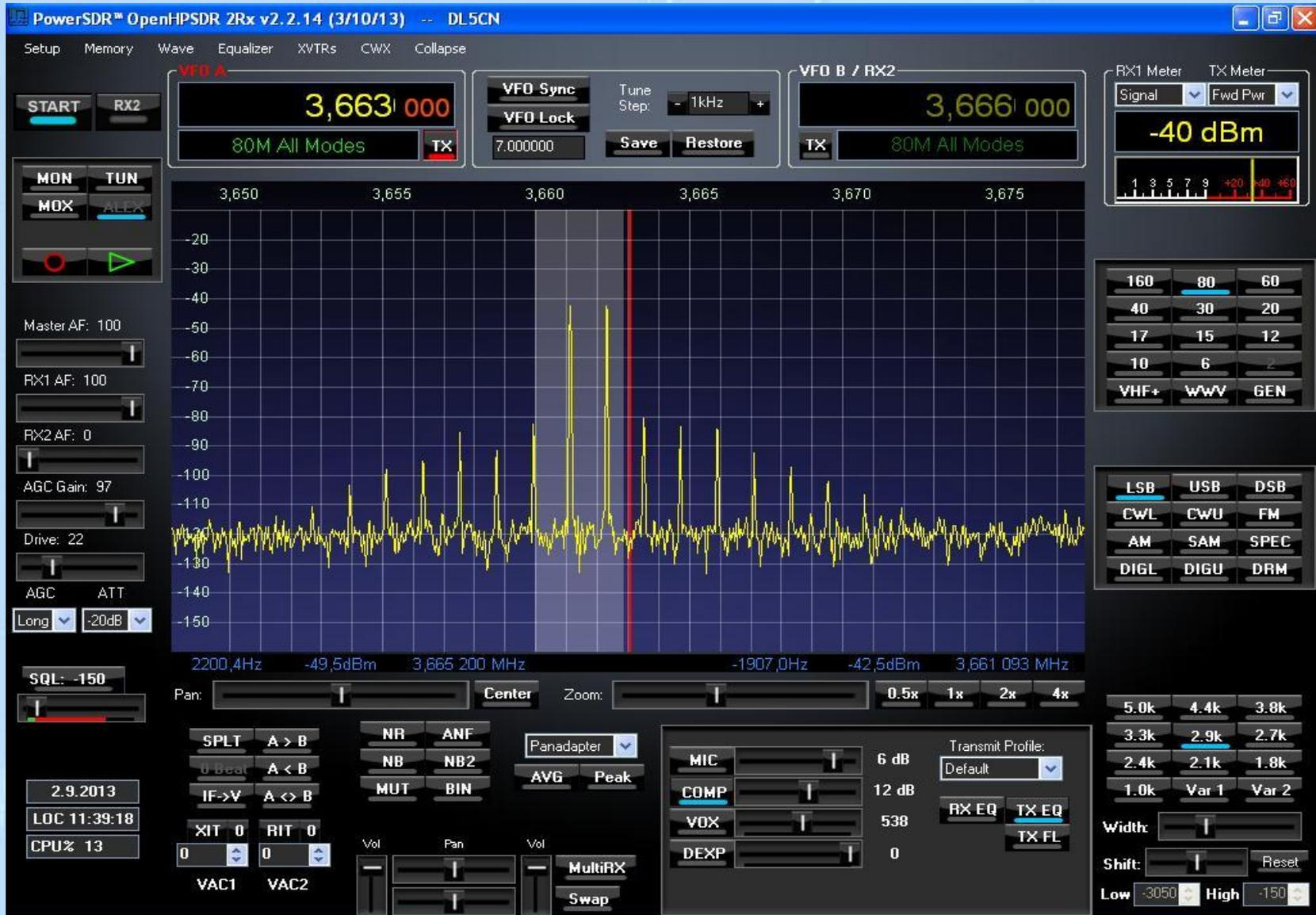
S21 dB

Mem1 dB

# Eingangsanpassung, komp.

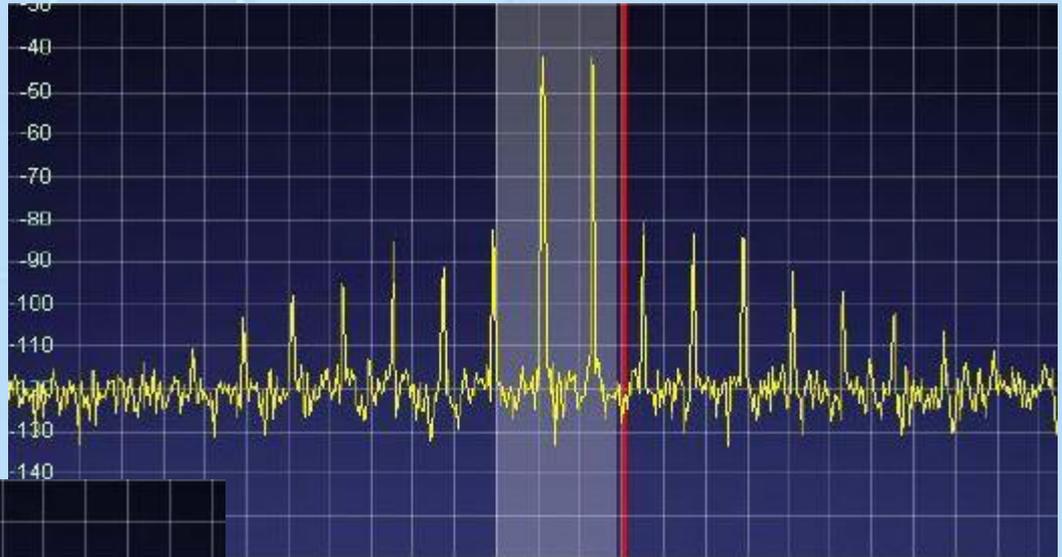


# ...knapp 40 dBc bei 100 Watt PEP

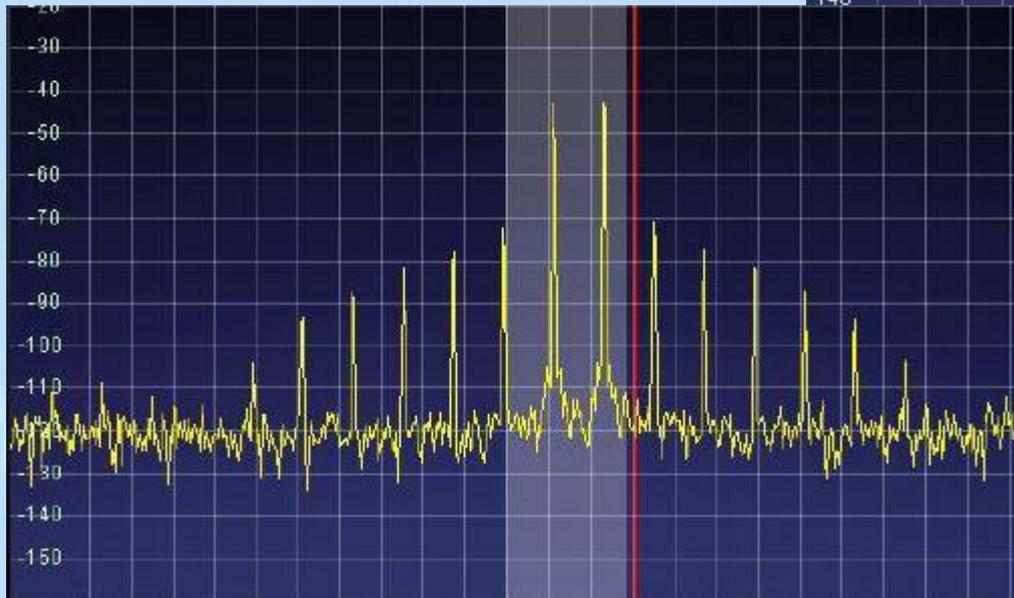


# Vergleich beider Versionen

mit Drossel,  
fast 40 dBc

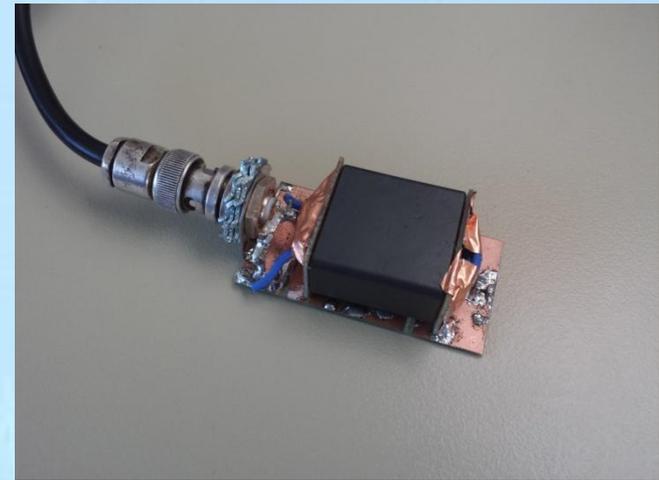


ohne Drossel,  
nur <30 dBc

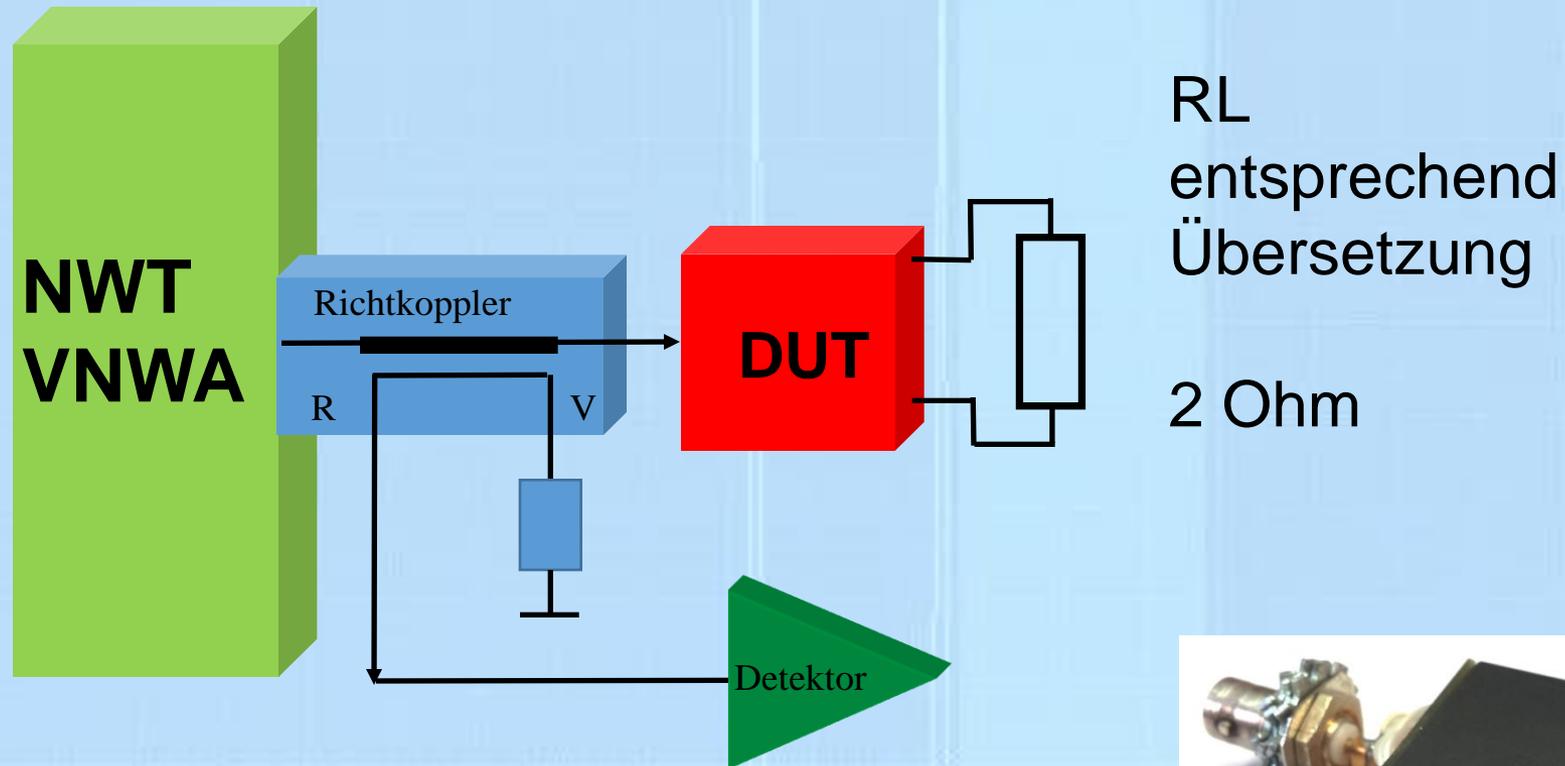


# ...nächste Baustelle Ausgangstrafo...

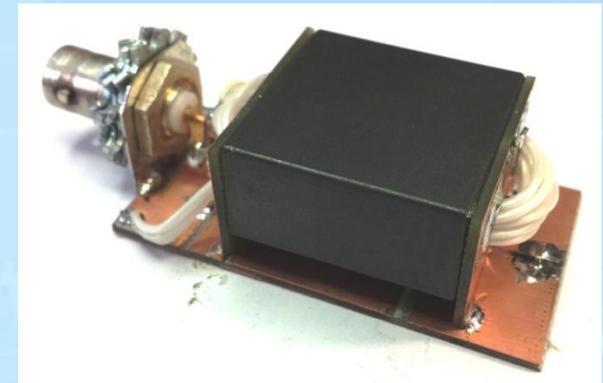
- Trafo 1:5 von 50 nach 2 Ohm fast nicht machbar
- extrem straffe Kopplung notwendig
- mehrere Drähte sekundär
- kürzeste Verbindung zu Drains
- Kompensation der Streuung



# Meßaufbau für Übertrager



Kontrolle  $S_{11}$  bzw. SWV



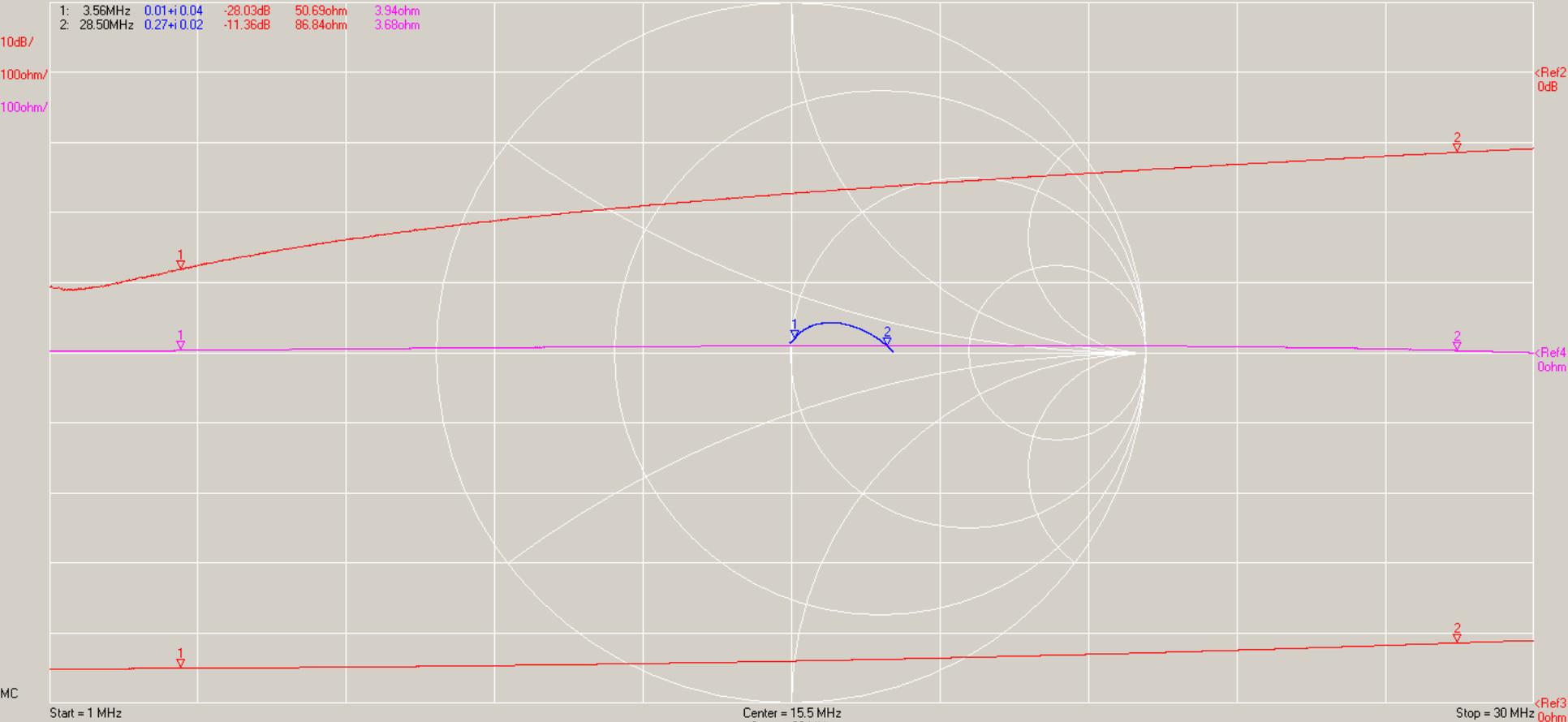
# Ausgangstrafo 1:5 !!!

DG8SAQ Vector Network Analyzer Software

22.05.2014 08:56:43 1zu5\_Trafo\_kompensiert\_Rechteckkern\_blaue\_Siliconlitze\_Einzelröhren

Cursor Trace2: 4.42MHz -42.25dB

1:	3.56MHz	0.01+i0.04	-28.03dB	50.69ohm	3.94ohm
2:	28.50MHz	0.27+i0.02	-11.36dB	86.84ohm	3.68ohm



MC

Start = 1 MHz

Center = 15.5 MHz  
Span = 29 MHz

Stop = 30 MHz

=>  
TX Att. = 0 dB

S11	Smith	S11	RealZ
S11	dB	S11	ImagZ



# Kompensation der Streuung



# ... einzig brauchbare Anordnung - Spartrafo

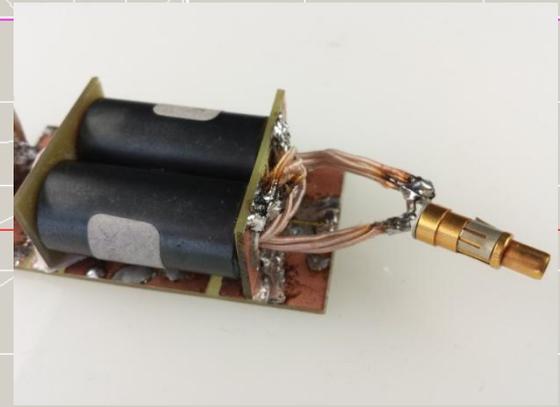
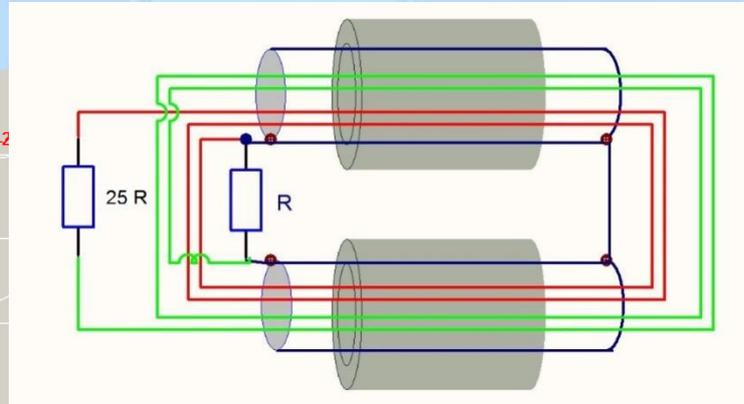
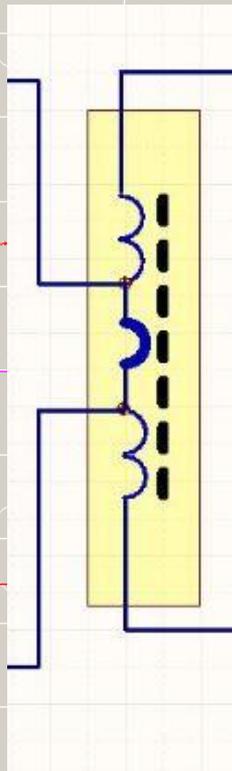
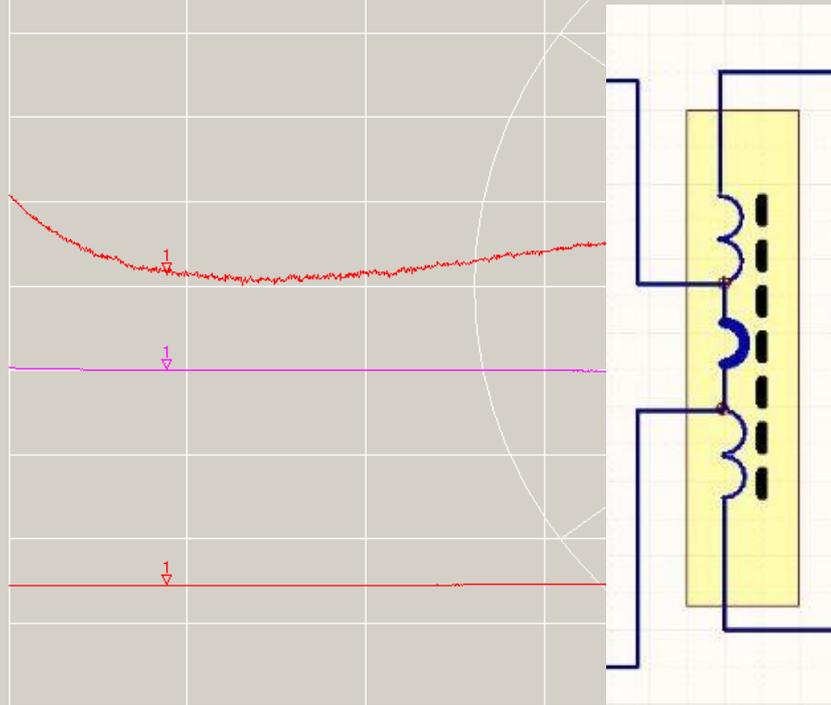
DG8SAQ Vector Network Analyzer Software

13.06.2014 12:00:41 Spartrafo 1+2 mal 2 Windungen 4 Litzen CuLS symmetrisch

Cursor Trace2: 3.28MHz -2

1:	3.56MHz	0.00+i 0.01	-38.43dB	50.30ohm	1.16ohm
2:	28.50MHz	0.03+i 0.02	-27.90dB	53.42ohm	-2.37ohm

10dB/  
100ohm/  
100ohm/



Center = 15.5 MHz  
Span = 29 MHz

Stop = 30 MHz

MC

=>  
TX Att. = 0 dB

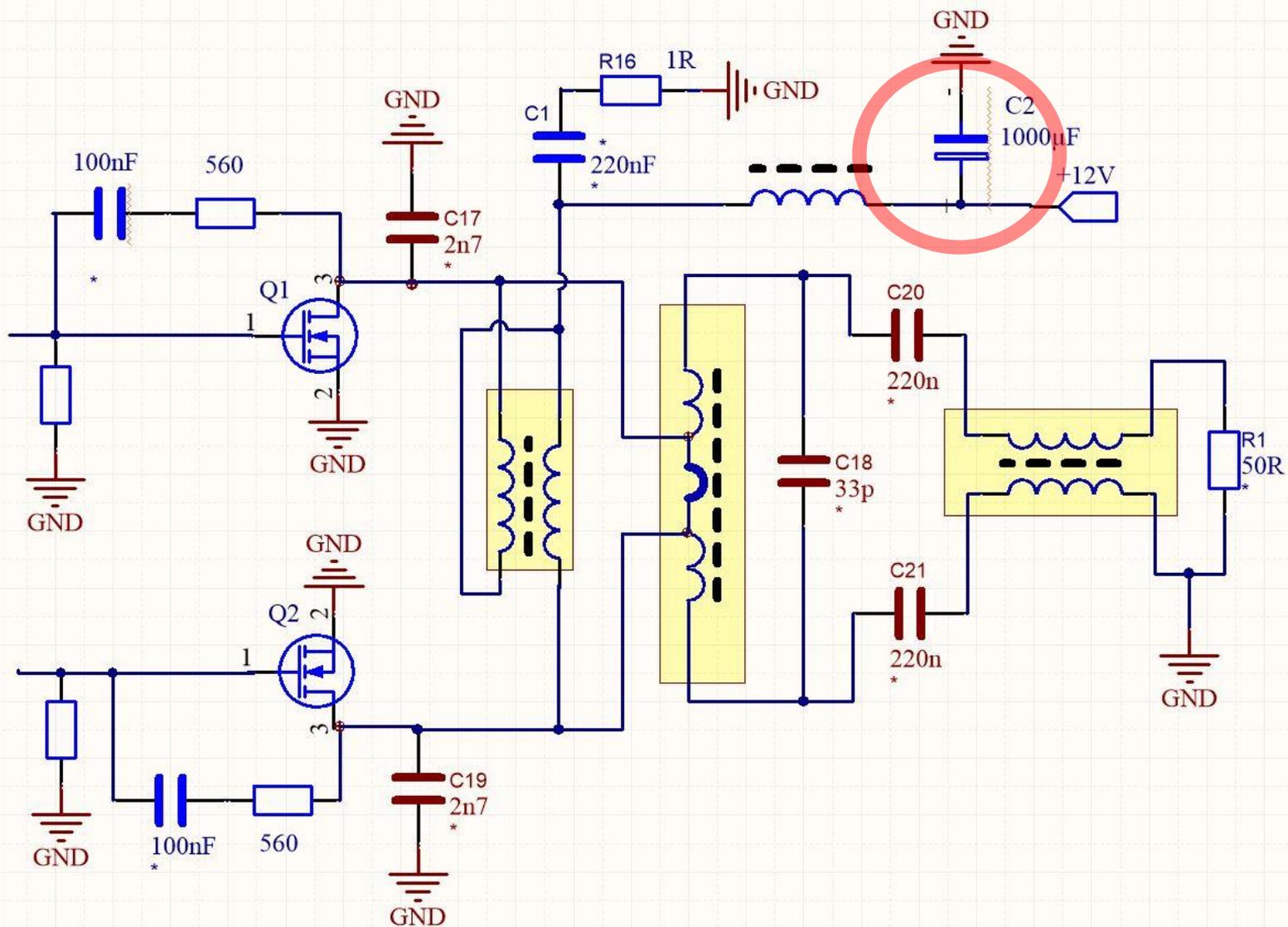
S11	Smith	S11	RealZ
S11	dB	S11	ImagZ

<Ref2  
0dB

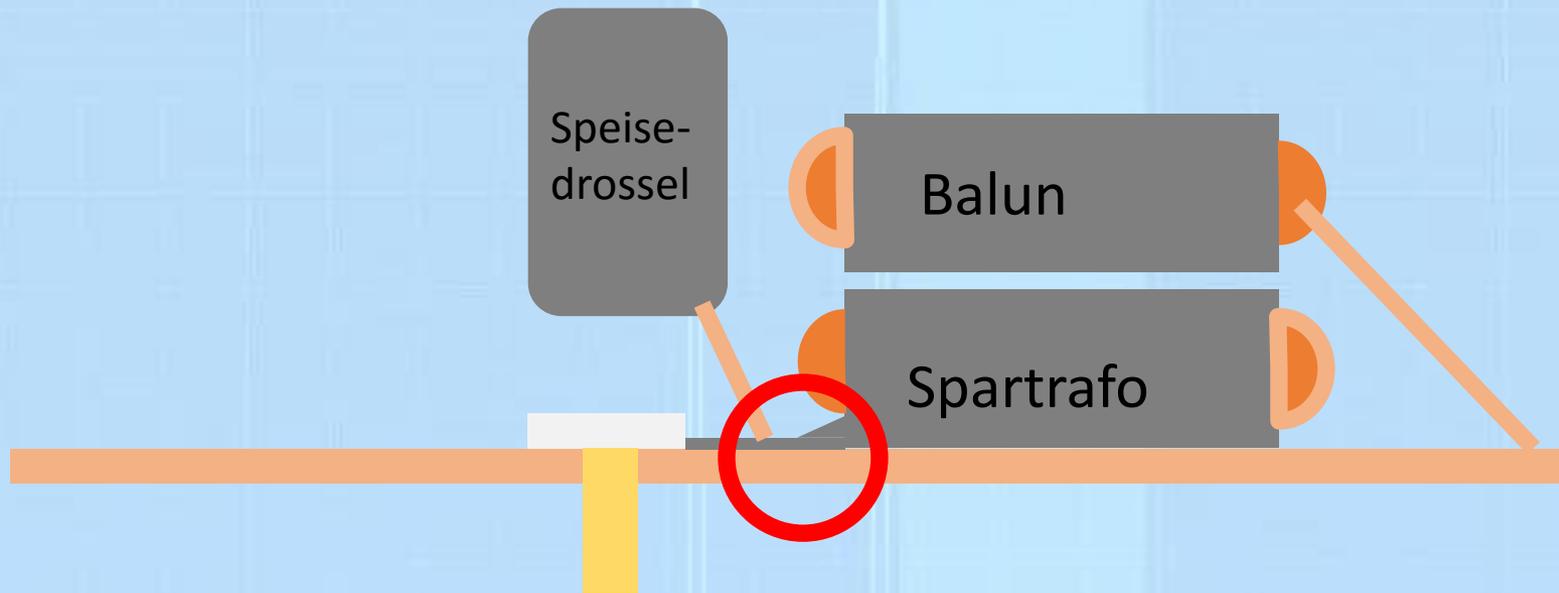
<Ref4  
0ohm

<Ref3  
0ohm

# Aktuell – Spartrafo



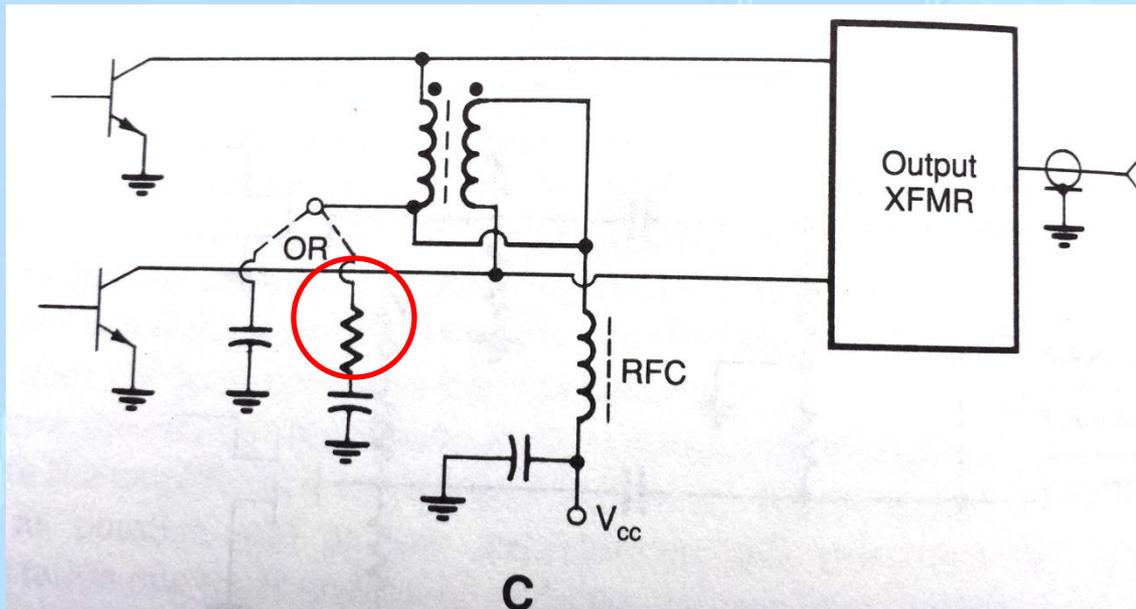
# Mechanische Anordnung



kürzeste Anschlüsse zwischen Drain und Spartrafo !

# Bifilardrossel - Hybridcombiner

- Streuinduktivität der Drosseln
- Kriterium Symmetrie des Verstärkers
- Unterdrückung gradzahliger Harmonischer
- Mehrere Drähte verdrillt - multifilar
- Niedrige Impedanz –  $180^\circ$  Hybridcombiner



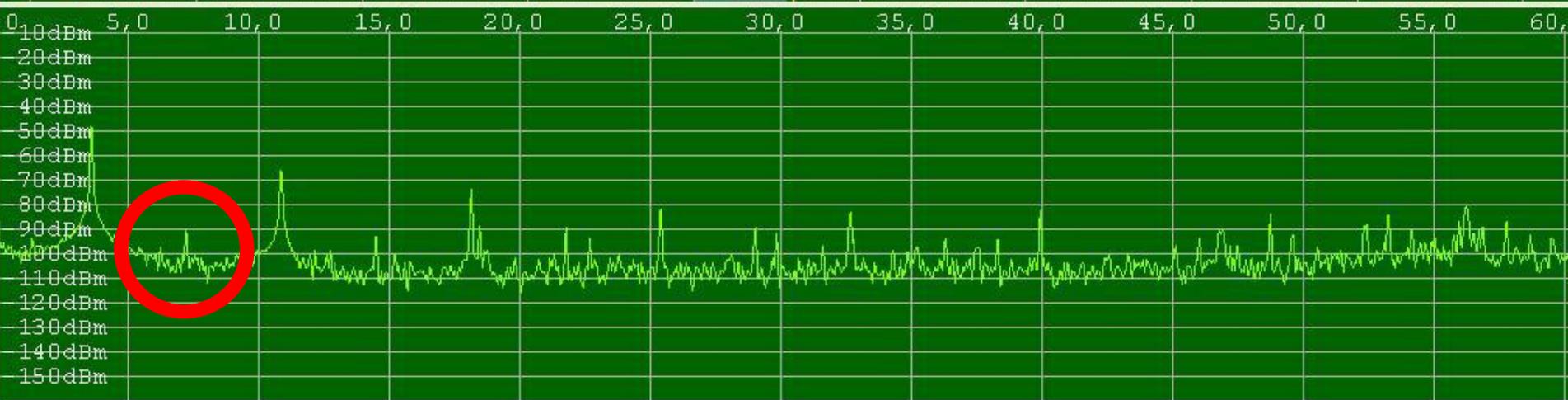
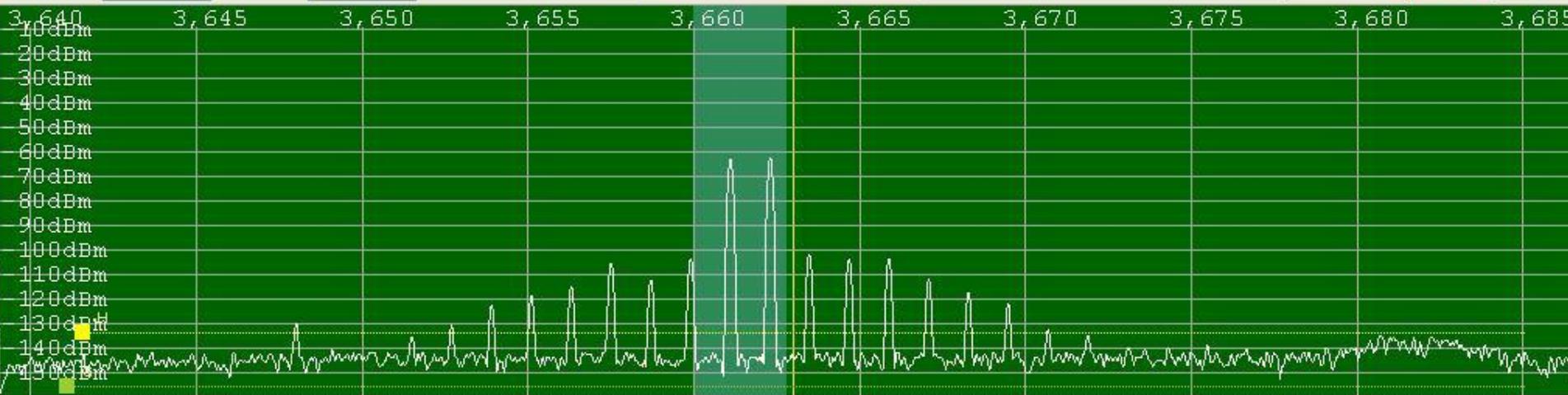
Setup Connection Type About

3.663 000

SMeter: Avg -59.9 : Inst -60.2



FWD Pwr [ ] REV Pwr [ ]



[ON] [Sync] [ADC]

Band 80m

AGC Long

Show Spectrum

Quick Memory

ANF  NR

Bass Cut  Mic AGC

[MOX] [TUN]

Step Size 1kHz

Mode LSB

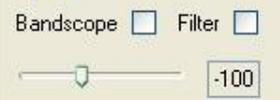
Show Wide Spectrum

[STO] [RCL]

NB1  NB2

Speech Processor 0 dB

Squelch Bandscope  Filter



Preamp

VOX 400 Hang (mS)

Mic Gain [ ] Clip

Noise Gate [ ]

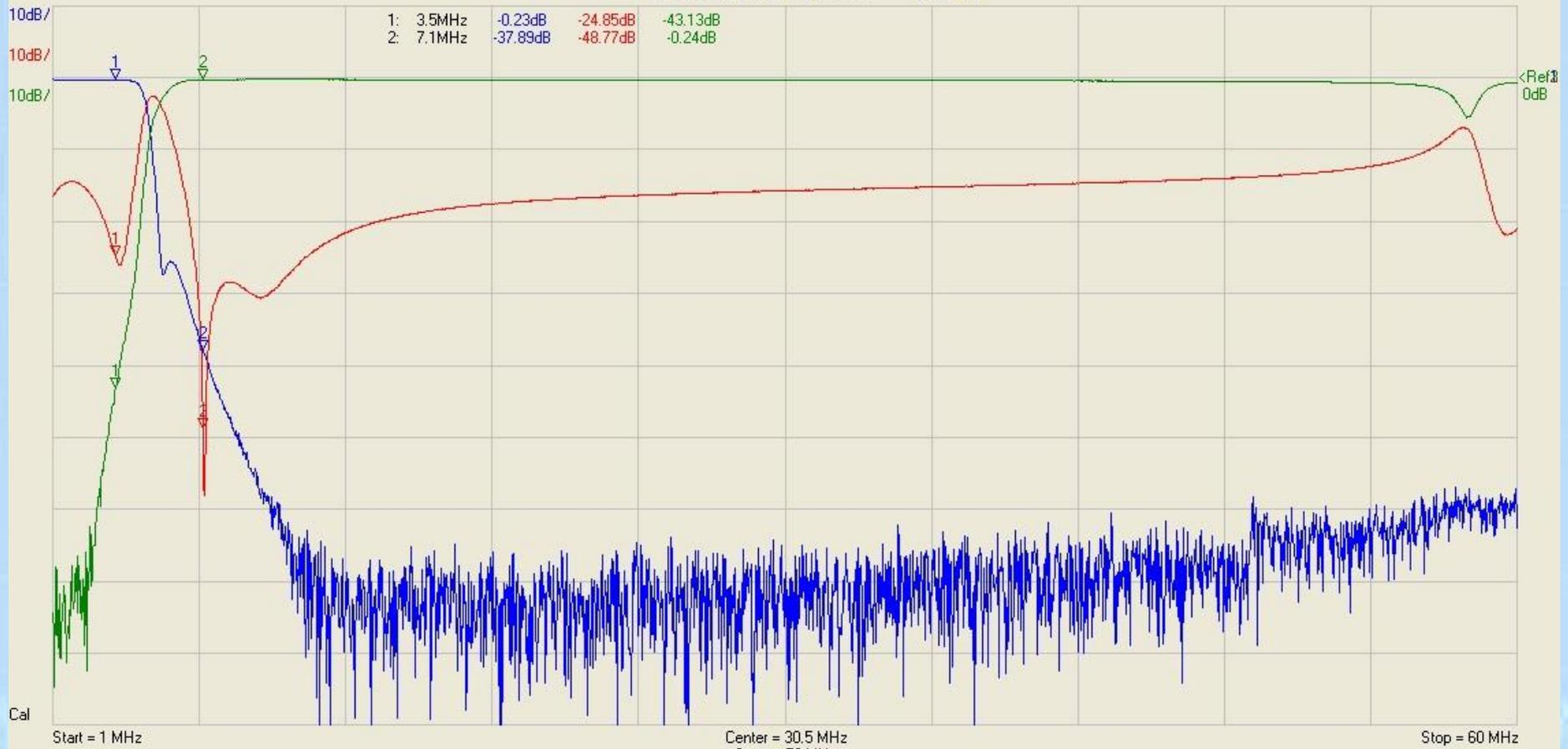
Drive 16

# Splitfilter - Beispiel

DG8SAQ Vector Network Analyzer Software

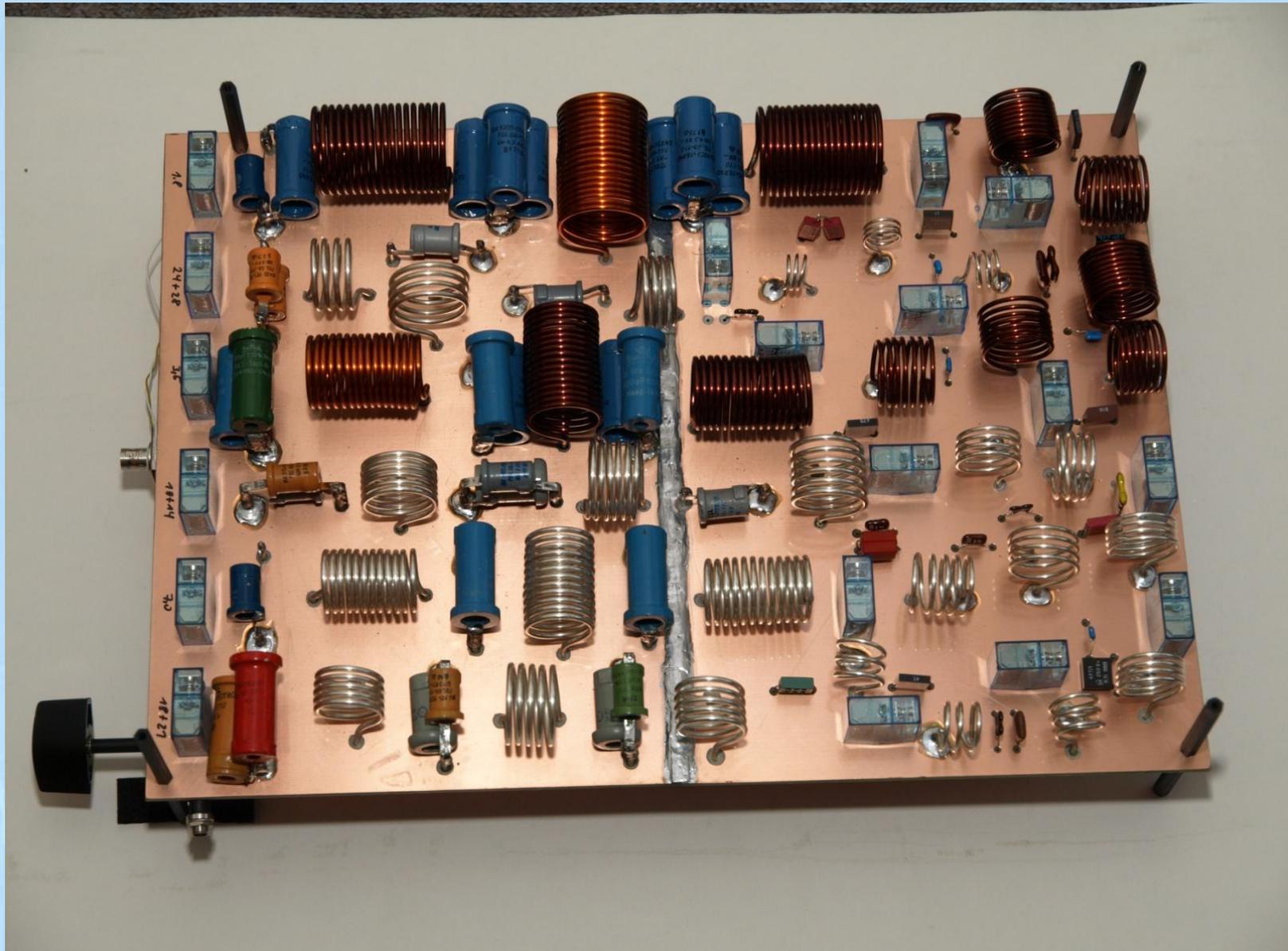
04.12.2011 18:52:04 Splitfilter

Cursor Trace1: 1.0MHz 11.13dB



=> TX Att. = 0 dB  
S21 dB Mem1 dB  
S11 dB

# Splitfilter, gebaut von DL4PT

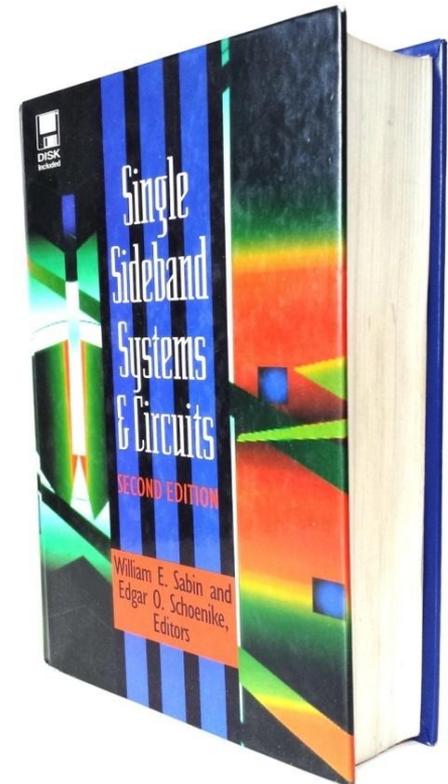


# Zusammenfassung

- Transformation oder Abschaltinduktion ?
- ...nur bei AB-Betrieb und Röhrentrafo
- Drossel als Autotrafo als Ergänzung **empfehlenswert**
- Keine Gegenkopplung - Ruhestrom
- Leistungsverstärkung +
- Linearität +
- Wirkungsgrad +
- Oberwellen --

# Literatur

- [1] Manfred Mornhinweg, XQ6FOD, [www.ludens.cl](http://www.ludens.cl)
- [2] Prof. Dr. Ing Jochen Jirmann, DB1NV, Manuskript UKW-Tagung Weinheim 2012, u.a.
- [3] **“Single Sideband Systems and Circuits”**  
Edgar O. Schoenike, William E. Sabin  
Rockwell Collins  
McGraw Hill Higher Education; 2nd edition  
(August 1, 1987) 1995  
ISBN-10: 0070544077, ISBN-13: 978-0070544079
- [4] Lechner, Detlef, Kurzwellensender



# Fragen



**Danke**  
für die Aufmerksamkeit



....awdh 2017?

28.06.2016 19:30:41