

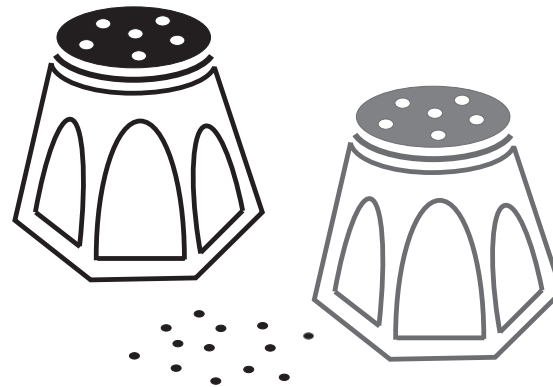
# Schaltungssimulation im Amateurfunk mit SPICE

Uwe Neibig, DL4AAE

OV-Abend P51

14.11.2008

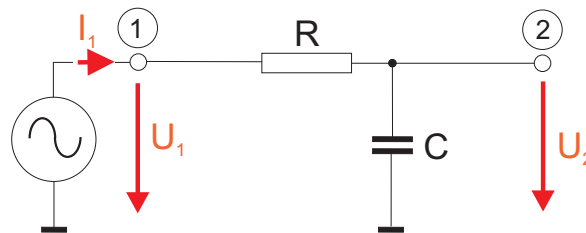
1. Einleitung
2. Das Programm SPICE
3. Ablauf einer Simulation
4. Anwendungsbeispiele
5. Literatur



# Einleitung

## Was ist Schaltungssimulation?

- Berechnung von Spannungen und Strömen
- in elektr. Schaltungen (Netzwerken)
- zur Nachbildung der Realität.



# Einleitung

## Was ist mit Schaltungssimulation möglich?

- Berechnung des elektr. Verhaltens einer gegebenen Schaltung (Analyse):  
Spannung, Strom, Impedanz, Leistung, Dämpfung, S-Parameter, ...
- Optimierung von Bauelement-Werten einer gegebenen Schaltung,  
um gewünschtes elektr. Verhalten zu erreichen
- Beispiele: siehe Kap. 4

# Einleitung

## Was ist mit Schaltungssimulation nicht möglich?

- Entwurf einer Schaltung (Synthese): "Ideen finden im Kopf statt!"
- Nachbildung der Realität, wenn Bauelement-Modelle nicht vorhanden / nicht geeignet sind
- Beispiel: "Entwurf einer Sommerzeit-Umschaltung"

# Das Programm SPICE

## Was ist SPICE?

- Abkürzung für: **S**imulation **P**rogram with **I**ntegrated **C**ircuit **E**mphasis (historisch bedingt)
- Ursprünglich entwickelt an der University of California at Berkeley (SPICE1, 1972)
- Programm zur Analyse von (nahezu) beliebigen Schaltungen (Berechnung der Knotenspannungen)
- Analysearten: nicht-linear DC, linear AC, nicht-linear transient
- Mögliche Schaltungselemente: Widerstand, Kondensator, Spule, Übertrager, Spannungs-/Stromquellen, Leitungen, Schalter, Halbleiter (Diode, Bipolar-/Feldeffekt-Transistoren)

# Das Programm SPICE

## Übersicht der Varianten (Auswahl)

Variante	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Quelle
SPICE3	letzte Version des Berkeley-Projekts (1985)	C-Quelltext frei verfügbar	Schaltungs-Eingabe nur als Netzliste (SPICE-Input-File)	[2]
WinSpice	Portierung von SPICE3 auf Windows	kompatibel zu SPICE3	wie SPICE3	[3]
PSpice	Erste PC-Version von SPICE (1984), GUI, zusätzliche Schaltungselemente	weite Verbreitung (Quasi-Standard), Modell-Vielfalt, grafische Schaltplan-Eingabe	max. 64 Knoten bei freier Demo-Version, nicht vollkommen kompatibel zu SPICE3	[4]
LTSpice	Portierung von SPICE3 auf Windows + GUI (von IC-Hersteller Linear Techn.)	kompatibel zu SPICE3, grafische Schaltplan-Eingabe	(keine)	[5]

# Ablauf einer Simulation

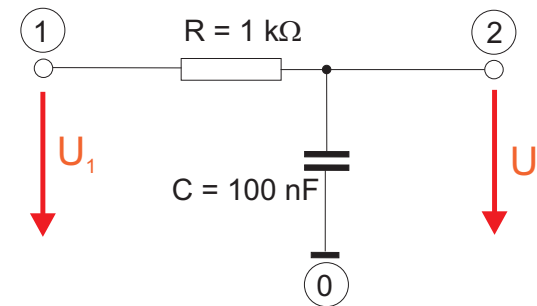
## Übersicht

1. Schaltung und Analyseart sind bekannt
2. Bauteil-Modelle beschaffen
3. Schaltung in SPICE-lesbares Format umsetzen
4. Analyse-Parameter festlegen
5. Analyse durchführen
6. Ergebnisse darstellen und überprüfen

# Ablauf einer Simulation (Beispiel)

## 1. Schaltung und Analyseart sind bekannt

- Schaltung: RC-Tiefpass
- Gesucht: Frequenzgang der Übertragungsfunktion  $U_2/U_1$
- $\Rightarrow$  lineare AC-Analyse





# Ablauf einer Simulation (Beispiel)

**2. Bauteil-Modelle beschaffen**  
⇒ in diesem Beispiel nicht erforderlich

Quellen für Bauteil-Modelle:

- SPICE-Modell-Bibliothek (P Spice, LTSpice)
- Bauteil-Hersteller (Internet)
- Literatur
- aus Datenblatt-Angaben
- aus Messungen

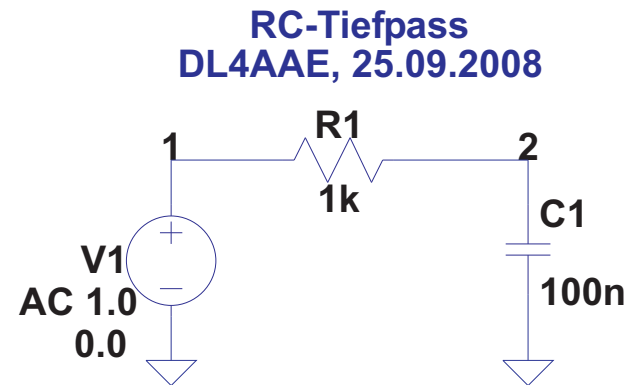
# Ablauf einer Simulation (Beispiel)

## 3. Schaltung in SPICE-lesbares Format umwandeln

### Netzliste (SPICE-Input-File)

```
.  
.br/>V1 1 0 DC 0.0 AC 1.0  
R1 1 2 1k  
C1 2 0 100n  
.br/>.
```

### "Schematic" (LTSpice)



# Ablauf einer Simulation (Beispiel)

## Netzliste $\Leftrightarrow$ Schematic

	Netzliste	Schematic
Vorteile	bei kleinen Schaltungen oft schneller, automatisch erstellbar, bei vielen Modellen oft einzige Form	grafische Eingabe, Dokumentation inbegriffen
Nachteile	bei großen Schaltungen unüber- sichtlich und fehlerträchtig	nicht für alle Modelle verfügbar

$\Rightarrow$  Schematic bevorzugen, aber Netzliste verstehen!

# Ablauf einer Simulation (Beispiel)

## 4. Analyse-Parameter festlegen

### Netzliste (SPICE-Input-File)

RC-Tiefpass

\* Autor: DL4AAE

\* Datum: 25.09.2008

```
V1 1 0 DC 0.0 AC 1.0
```

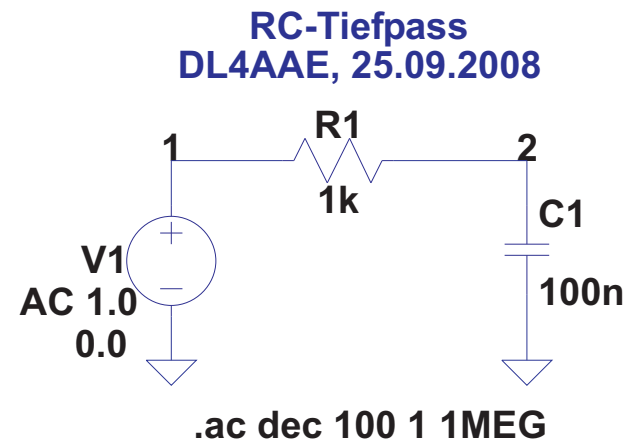
```
R1 1 2 1k
```

```
C1 2 0 100n
```

```
.AC DEC 100 1 1MEG
```

```
.END
```

### "Schematic" (LTSpice)



# Ablauf einer Simulation (Beispiel)

## 5. Analyse durchführen

### mit Netzliste (alle 4 SPICE-Varianten)

- Programm starten
- SPICE-Input-File laden
- Rechnung starten
- warten...

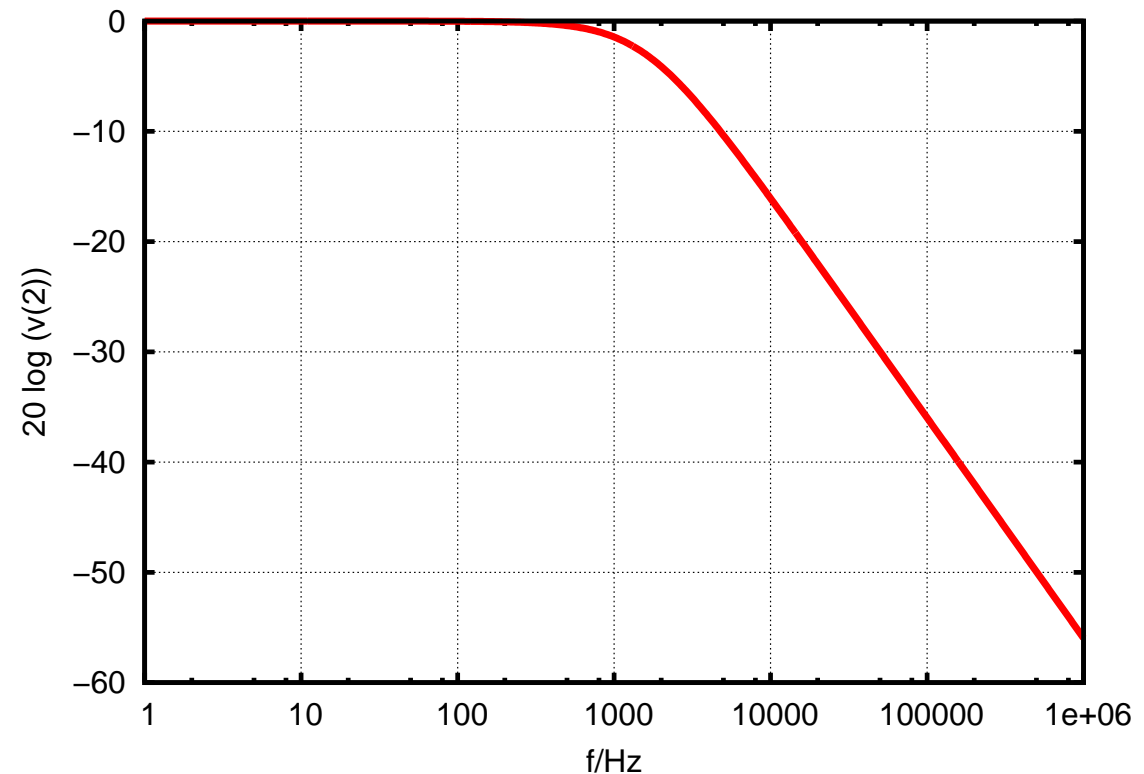
### mit "Schematic" (LTSpice)

- LTSpice starten
- "Schematic" laden
- Rechnung starten
- warten...

# Ablauf einer Simulation (Beispiel)

## 6. Ergebnisse darstellen und überprüfen

- $v(2)$  darstellen  
(da  $v(1) = 1$  gewählt)
- mit Theorie vergleichen:  
$$\left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \frac{1}{\sqrt{1+(2 \cdot \pi \cdot f \cdot R \cdot C)^2}}$$
- hier identisch!



# Anwendungsbeispiele

## Übersicht

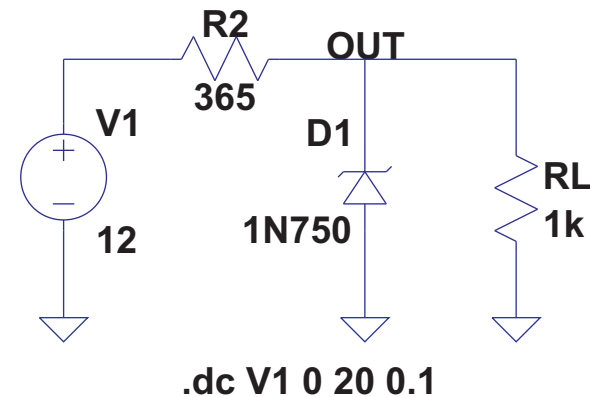
Nr.	Schaltung	Analyseart	Besonderheiten
1	Spannungs-Stabilisierung mit Zener-Diode	DC	
2	Spannungs-Stabilisierung mit Zener-Diode	DC	PARAMETER, .STEP
3	HF-Bandpass-Filter, Elecraft K3-Transceiver	AC	S-Parameter
4	ZF-Quarzfilter, Elecraft K3-Transceiver	AC	Quarz-Modellierung, Impedanz-Berechnung, S-Parameter, .MEAS
5	Antennen-Tuner	AC	Impedanz-Berechnung, Leistungs-Berechnung
6	70-cm-Notchfilter	AC	S-Parameter, .MODEL, .PARAM
7	VFO mit Colpitts-Oszillator	TRAN	Start einer Schwingung, FFT
8	Breitband-HF-Vorverstärker	TRAN	.MODEL, .PARAM, FFT

# Anwendungsbeispiele (1)

## Spannungs-Stabilisierung mit Zener-Diode

- Beispiel für nicht-lineare DC-Analyse
- Zener-Diode  $D1$  aus LTSpice-Modell-Bibliothek
- Gesucht: Ausgangsspannung  $V(\text{OUT})$  in Abhängigkeit von der Eingangsspannung  $V1$

Spannungs-Stabilisierung mit Zener-Diode  
Beispiel für DC-Analyse  
DL4AAE, 26.09.2008

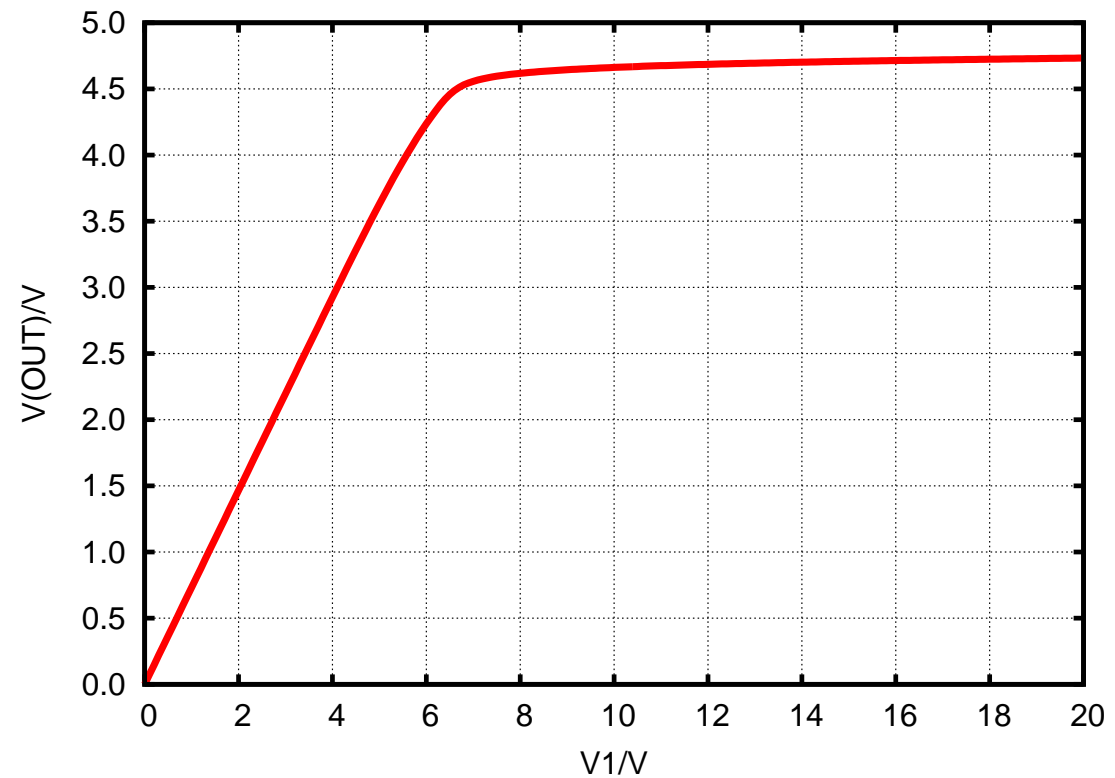




# Anwendungsbeispiele (1)

## Spannungs-Stabilisierung mit Zener-Diode

- für  $V_1$  oberhalb  $\approx 7\text{ V}$  ist  $V(OUT)$  konstant bei  $\approx 4,7\text{ V}$

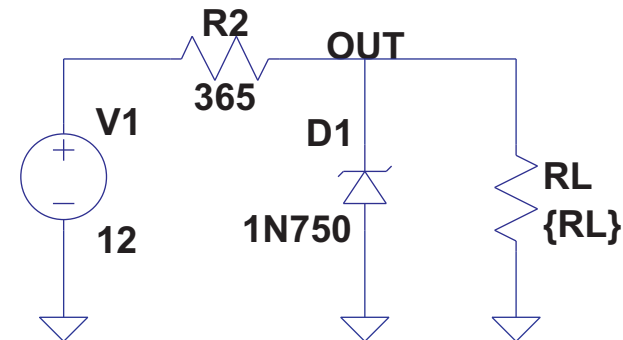


# Anwendungsbeispiele (2)

## Spannungs-Stabilisierung mit Zener-Diode

- Beispiel für nicht-lineare DC-Analyse mit **Parameter**
- Gesucht: Ausgangsspannung  $V(\text{OUT})$  in Abhängigkeit von der Eingangsspannung  $V1$  und vom **Last-Widerstand  $RL$**

Spannungs-Stabilisierung mit Zener-Diode  
Beispiel für DC-Analyse mit Parameter  
DL4AAE, 29.09.2008

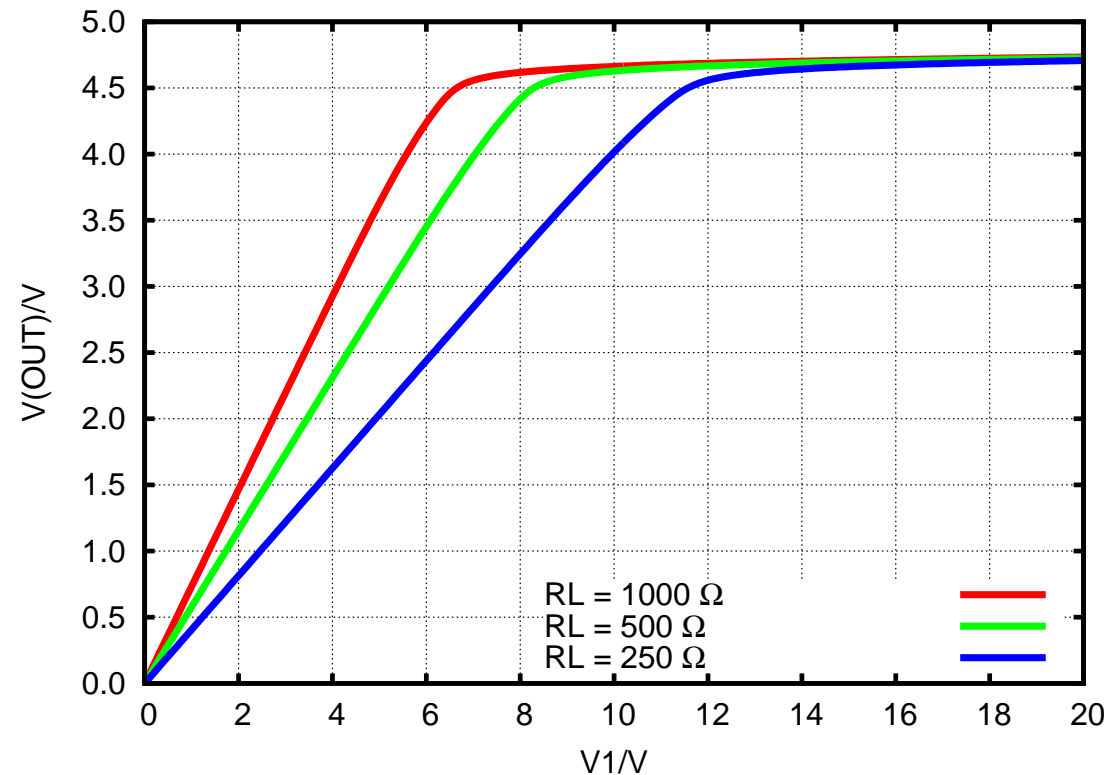


```
.STEP PARAM RL LIST 1k 500 250  
.dc V1 0 20 0.1
```

# Anwendungsbeispiele (2)

## Spannungs-Stabilisierung mit Zener-Diode

- Knick-Spannung, ab der  $V(OUT)$  konstant ist, steigt mit kleinerem  $RL$
- für  $V1$  oberhalb  $\approx 14\text{ V}$  ist  $V(OUT)$  für alle betrachteten Lastfälle konstant bei  $\approx 4,7\text{ V}$

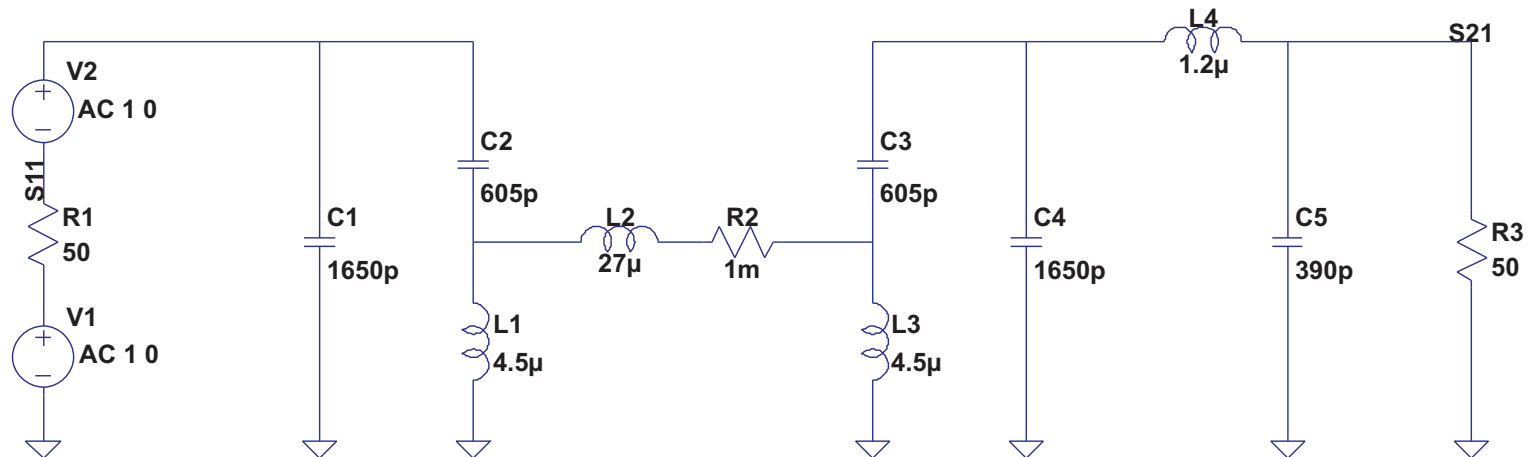


# Anwendungsbeispiele (3)

## HF-Bandpass-Filter, Elecraft K3-Transceiver [6]

- Beispiel für lineare AC-Analyse
- Gesucht: S-Parameter  $|S_{11}|$  und  $|S_{21}|$

HF-Bandpass-Filter, Elecraft K3-Transceiver  
Quelle: K3 schematics, [www.elecraft.com](http://www.elecraft.com)  
DL4AAE, 24.07.2008

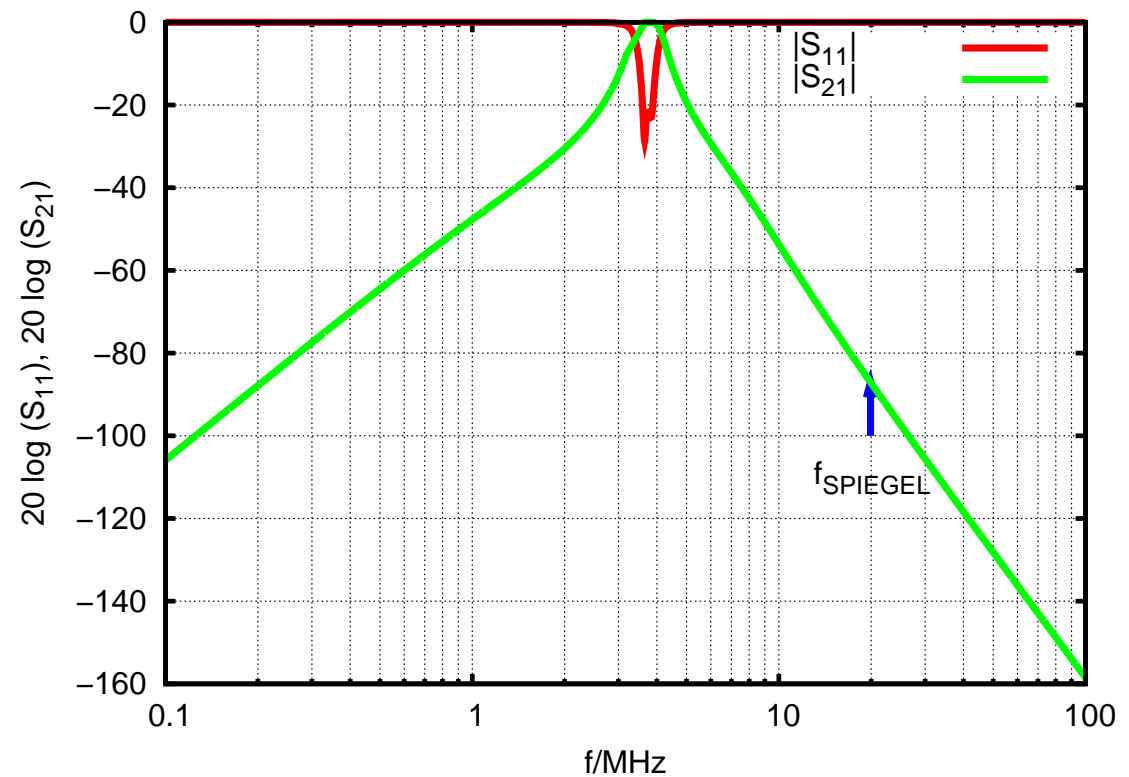


.ac dec 1000 0.1MEG 100MEG

# Anwendungsbeispiele (3)

## HF-Bandpass-Filter, Elecraft K3-Transceiver

- Geringe Dämpfung und gute Anpassung zwischen 3,5..4,0 MHz (80-m-US-Band)
- Dämpfung bei  
 $f_{\text{SPIEGEL}} = 3,5 \text{ MHz} + 2 \cdot f_{\text{ZF}} = 19,928 \text{ MHz}$ :  
 $\approx 87 \text{ dB}$

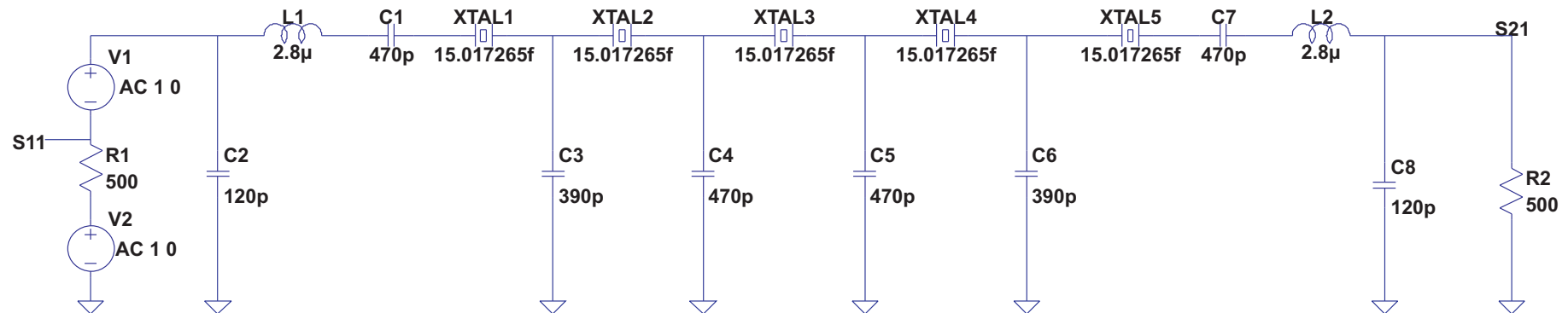


# Anwendungsbeispiele (4)

## ZF-Quarzfilter, Elecraft K3-Transceiver [6]

- Beispiel für lineare AC-Analyse
- Gesucht: Durchlasskurve, 6-dB-Bandbreite

ZF-Quarzfilter, Elecraft K3-Transceiver  
Quelle: K3 schematics [www.elecraft.com](http://www.elecraft.com)  
DL4AAE, 26.09.2008



© DL4AAE 11/2008

# Anwendungsbeispiele (4)

## ZF-Quarzfilter, Elecraft K3-Transceiver Quarz-Modellierung

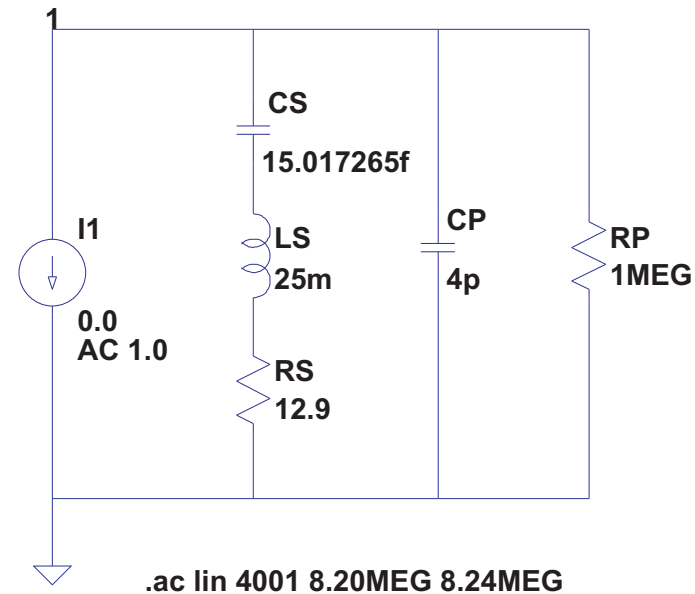
### Angaben im K3-schematic:

- $f_{RES} = 8,214 \text{ MHz}$
- $LS = 25 \text{ mH}$
- $CP < 4 \text{ pF}$
- $Q > 100000$

### daraus berechnete Werte:

- $CS = 15,017265 \text{ fF}$
- $RS = 12,9 \text{ } \Omega$  (für  $Q = 100000$ )

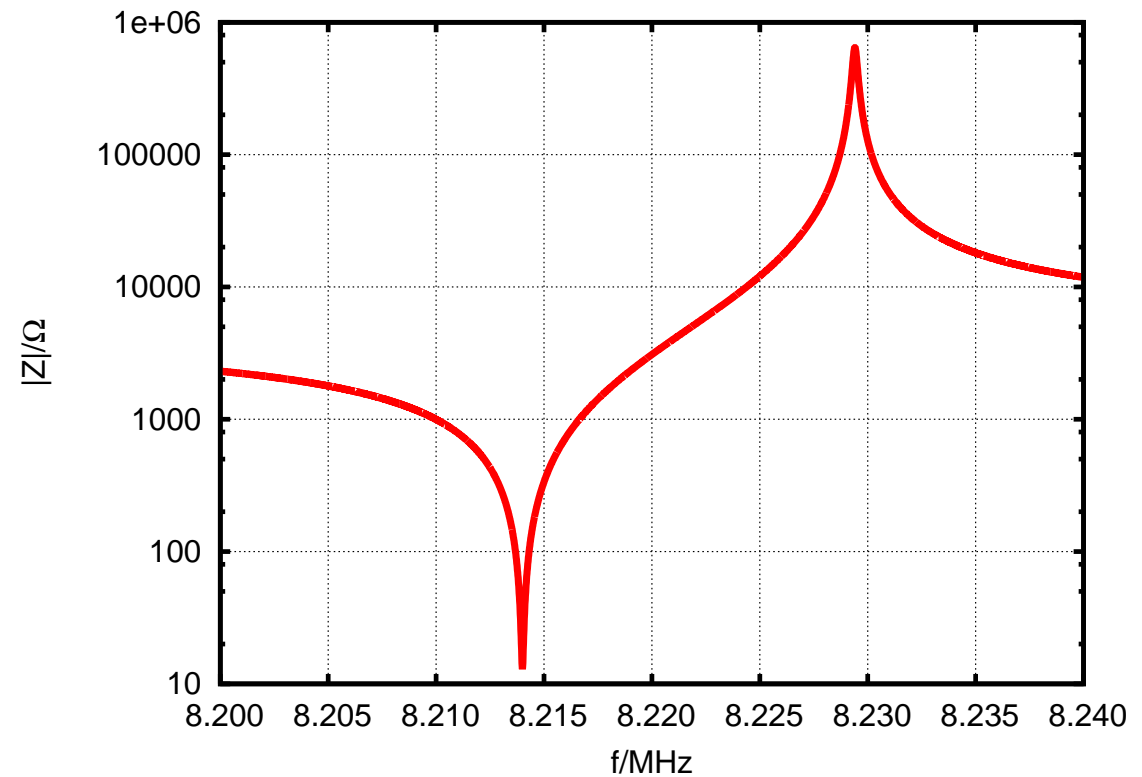
Modell für ZF-Quarz, Elecraft K3-Transceiver  
Quelle: K3 schematics [www.elecraft.com](http://www.elecraft.com)  
DL4AAE, 30.09.2008



# Anwendungsbeispiele (4)

## ZF-Quarzfilter, Elecraft K3-Transceiver Quarz-Modellierung

- Dargestellt:  
Eingangs-Impedanz  $Z$   
 $= U_1/I_1 \hat{=} V(1)$
- Serien-Resonanz bei  
8,214 MHz
- Parallel-Resonanz bei  
8,229 MHz  
(Ursache:  $CP$ )



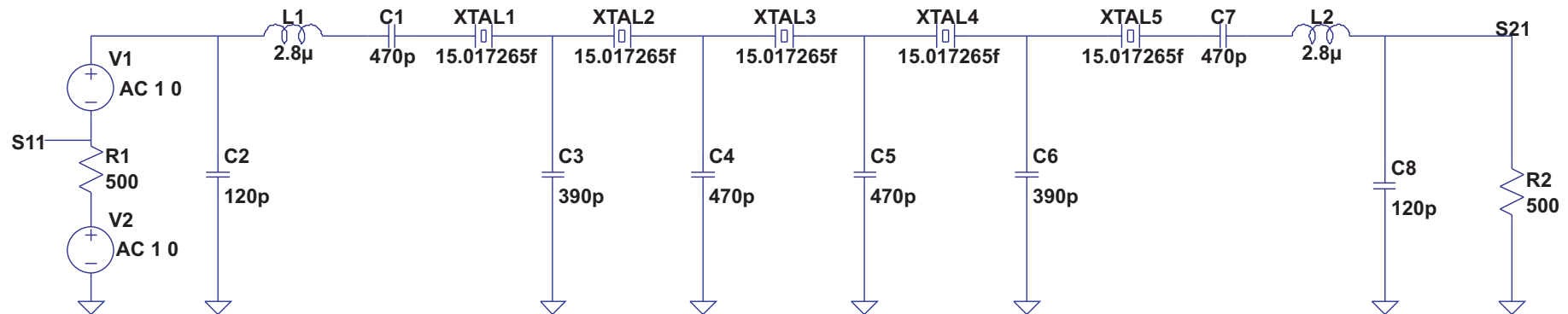


# Anwendungsbeispiele (4)

## ZF-Quarzfilter, Elecraft K3-Transceiver

- 6-dB-Bandbreite manuell mit Cursor im  $S_{21}$ -Frequenzgang bestimmen
- 6-dB-Bandbreite von LTSpice mit `.MEAS`-Befehl bestimmen lassen

ZF-Quarzfilter, Elecraft K3-Transceiver  
Quelle: K3 schematics [www.elecraft.com](http://www.elecraft.com)  
DL4AAE, 26.09.2008



```
.ac lin 1001 8.212MEG 8.216MEG
```

```
.MEAS AC tmp max mag(V(s21))  
.MEAS AC 6dB-BW trig mag(V(s21))=tmp/2.0 rise=1  
+ targ mag(V(s21))=tmp/2.0 fall=last
```

© DL4AAE 11/2008

# Anwendungsbeispiele (4)

## ZF-Quarzfilter, Elecraft K3-Transceiver

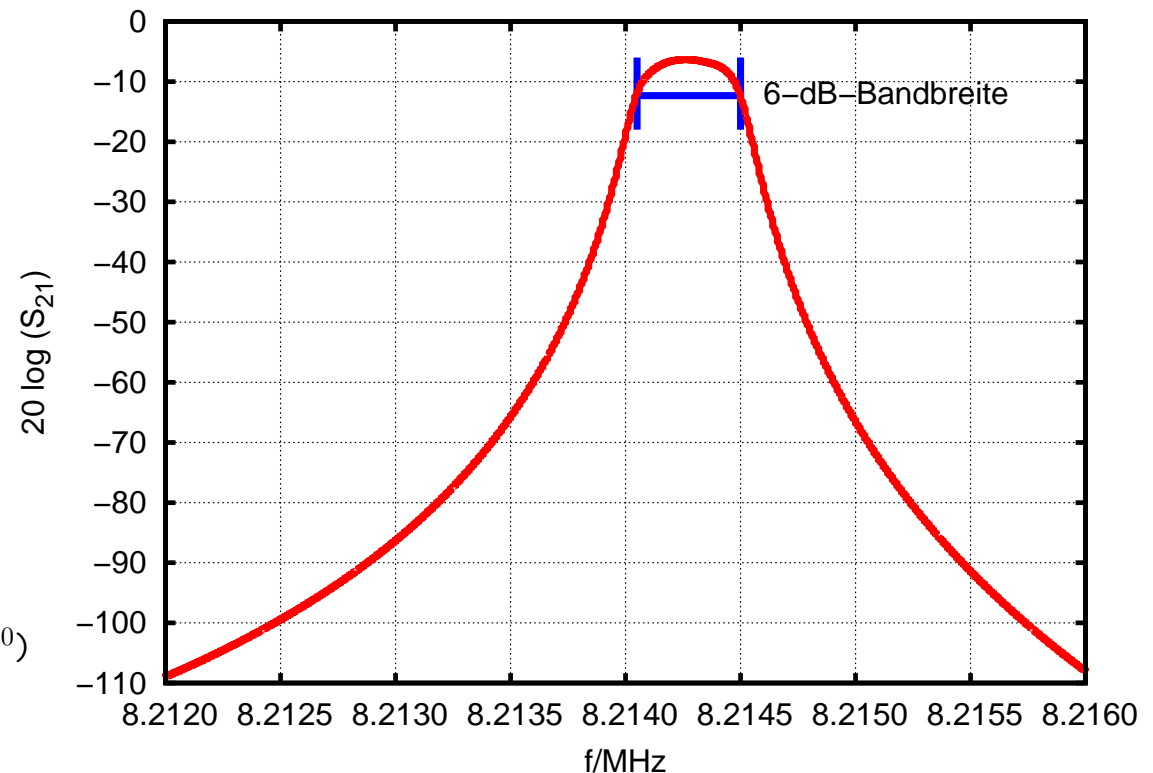
manuell (mit Cursor):

- Max. suchen: -6,33 dB
- Eck-Frequenzen mit -6 dB vom Maximum suchen:  
8,21405 MHz und 8,21450 MHz
- Differenz ist Bandbreite: **450 Hz**

mit .MEAS-Befehl in LTSpice:

Auszug aus "SPICE Error Log":

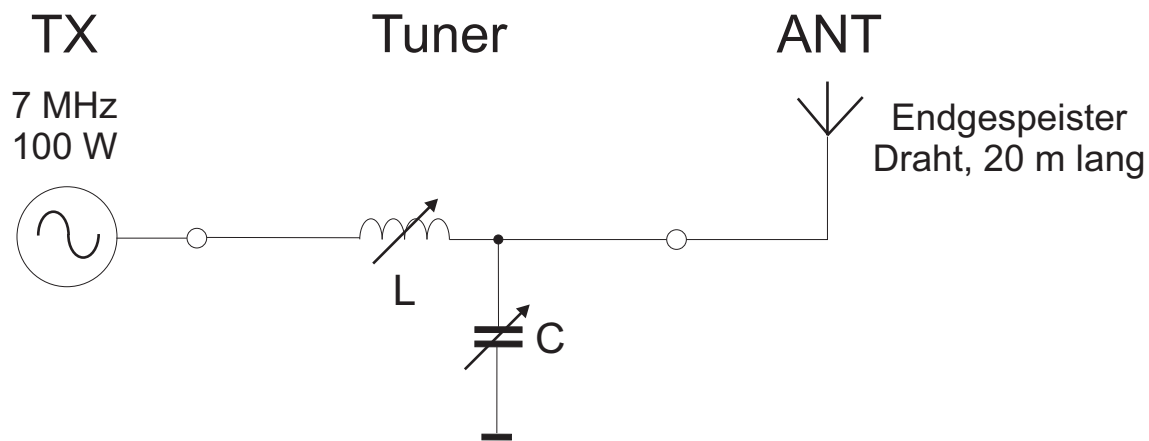
```
.  
.br/>tmp: MAX(mag(v(s21)))=(-6.32962dB,0^0)  
6db-bw=453.22 from...
```



# Anwendungsbeispiele (5)

## Antennen-Tuner

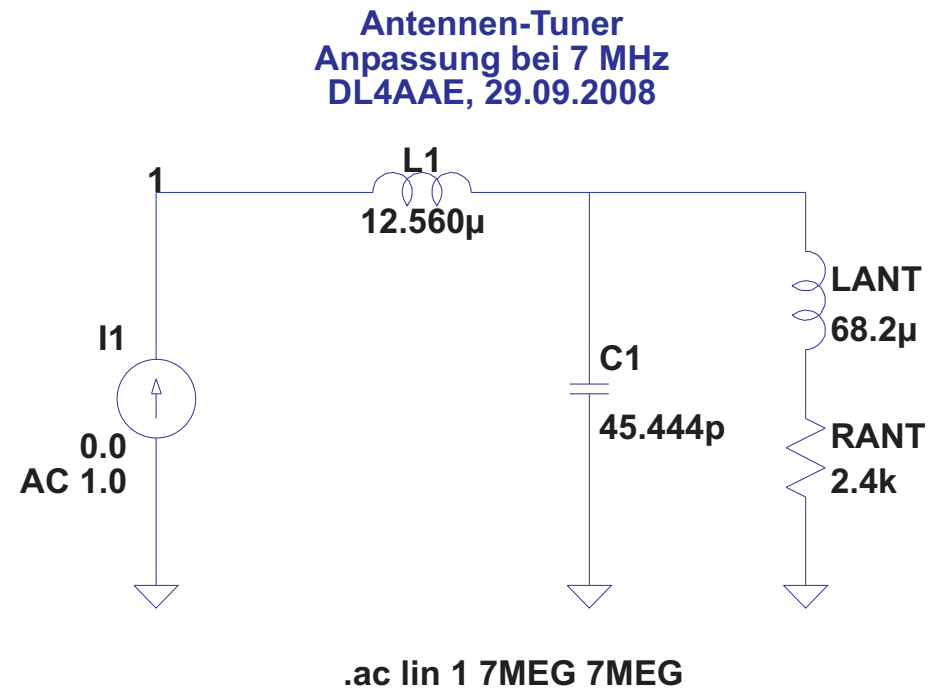
- Beispiel für lineare AC-Analyse
- Gesucht: Werte von  $L$  und  $C$  für  $50\text{-}\Omega$ -Anpassung, Verluste im Tuner



# Anwendungsbeispiele (5)

## Antennen-Tuner Abgleich

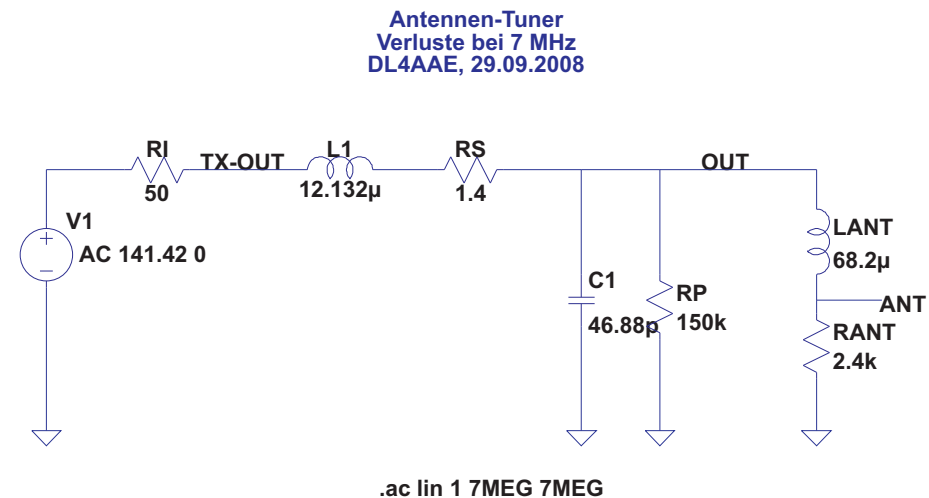
- $R_{ANT}$  und  $L_{ANT}$  aus NEC-2-Rechnung
- Berechnung der Eingangs-Impedanz  $Z = \underline{U}_1 / \hat{I}_1 \hat{=} V(1)$
- Abgleich von  $L1$  und  $C1$  so, dass  $Z = (50 + j 0) \Omega$
- $\Rightarrow L1 = 12,56 \mu\text{H}, C1 = 45,444 \text{ pF}$



# Anwendungsbeispiele (5)

## Antennen-Tuner Verluste

- $RS$ : Summe der Verluste in  $L1$ , berechnet mit "SOLNOID3.exe" [7]
- $RP$ : Verluste im Drehko  $C1$  unter Annahme einer Güte von 300
- in Tuner eingespeiste Leistung: 100 W auf 7,000 MHz
- Gesucht: Verluste im Tuner, Leistung in Antenne



# Anwendungsbeispiele (5)

## Antennen-Tuner Leistungsbilanz

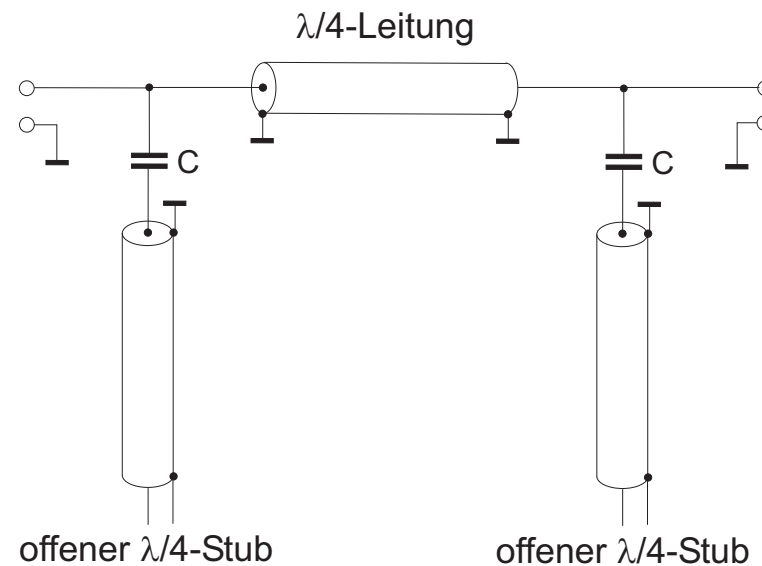
Leistung in	Bauteil	Formel	Zahlenwert aus LTSpice ) <sup>1</sup>	Ergebnis
Spule	$RS$	$(I(RS))^2 \cdot RS$	$(1,4141)^2 \cdot 1,4$	2,80 W
Drehko	$RP$	$(V(OUT))^2 / RP$	$(757,71)^2 / 150000$	3,83 W
Antenne	$RANT$	$(V(ANT))^2 / RANT$	$(473,38)^2 / 2400$	93,37 W
Summe				<b>100,00 W</b>

)<sup>1</sup>: bei AC-Analyse mit nur einer Frequenz gibt LTSpice alle Spannungen und Ströme als Text aus

# Anwendungsbeispiele (6)

## 70-cm-Notchfilter

- Beispiel für lineare AC-Analyse
- Gesucht: Dämpfung bei 432 MHz, Reflexion (SWR) bei 144 MHz

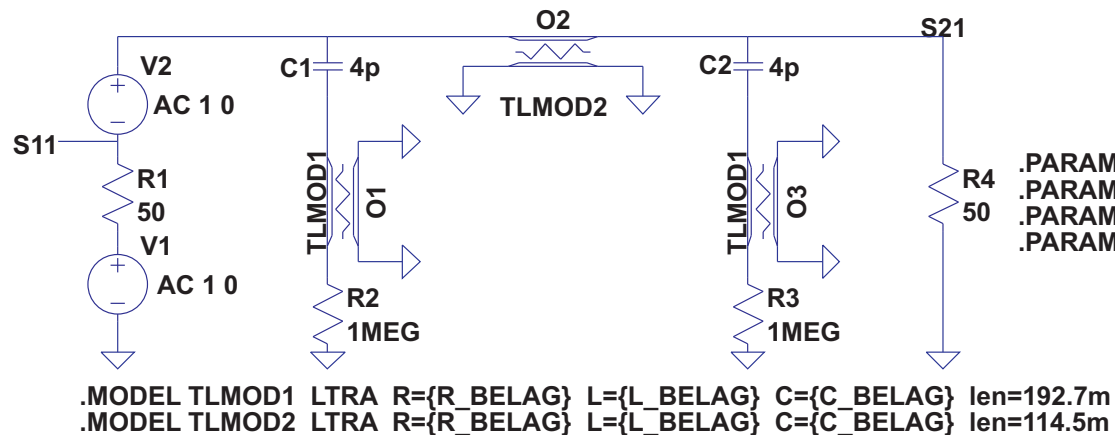


# Anwendungsbeispiele (6)

## 70-cm-Notchfilter Modellierung der Koaxialkabel

- Verwendung des .MODEL-Befehls zur Definition eines LTRA-Leitungsmodells
- Vorgabe Leitungsimpedanz, Verkürzungsfaktor und Widerstandsbelag mit .PARAM-Befehl
- LTSpice berechnet sich mit .PARAM-Befehl die notwendigen Werte für LTRA-Modell selbst

70-cm-Notchfilter mit Koaxialkabeln  
DL4AAE, 30.09.2008



```
.PARAM ZL=50 verk=0.66 c0=2.99792e8  
.PARAM R_BELAG=2.6; fuer RG213 mit 14.8 dB/100m @ 432 MHz  
.PARAM L_BELAG=ZL/(verk*c0)  
.PARAM C_BELAG=1/(ZL*verk*c0)
```

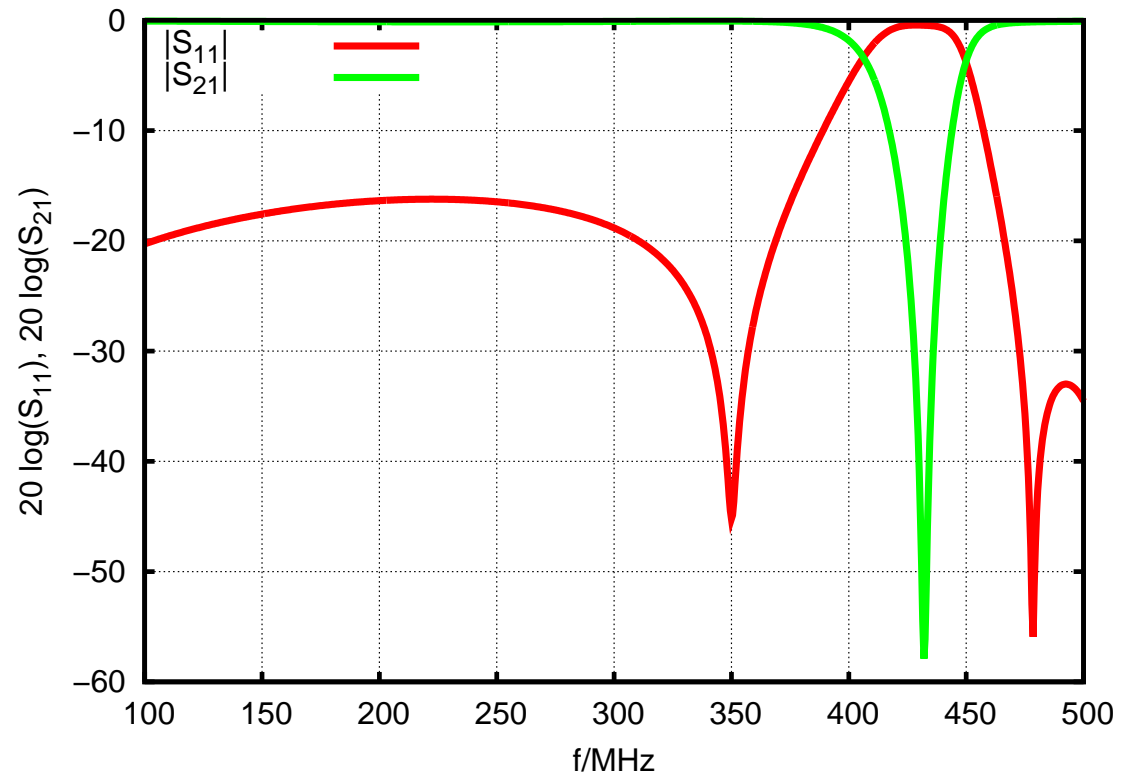
```
.ac lin 801 100MEG 500MEG
```



# Anwendungsbeispiele (6)

## 70-cm-Notchfilter Rechenergebnis $|S_{11}|$ und $|S_{21}|$

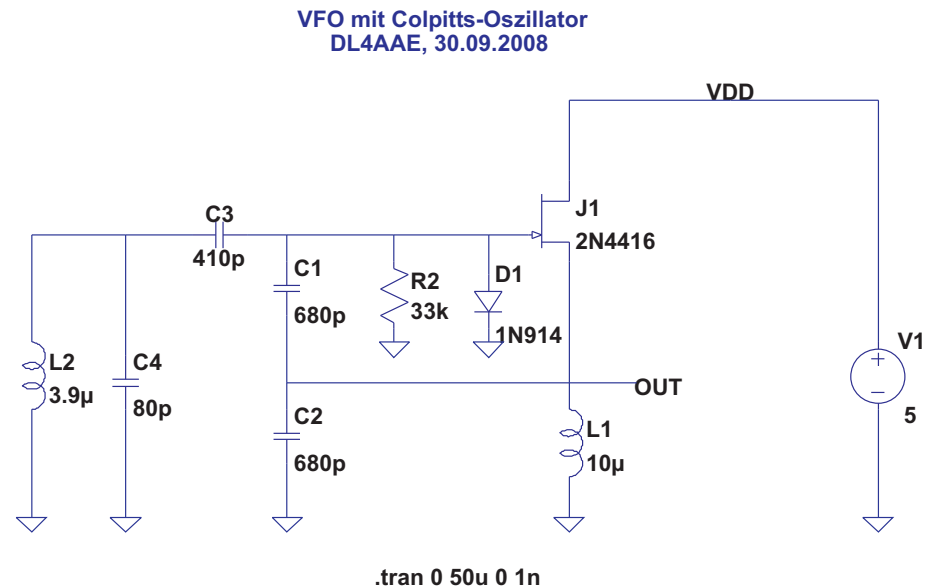
- Dämpfung bei 432 MHz: 58 dB
- Reflexions-Dämpfung bei 144 MHz: 17,8 dB  $\hat{=}$  SWR von 1,3



# Anwendungsbeispiele (7)

## VFO mit Colpitts-Oszillator

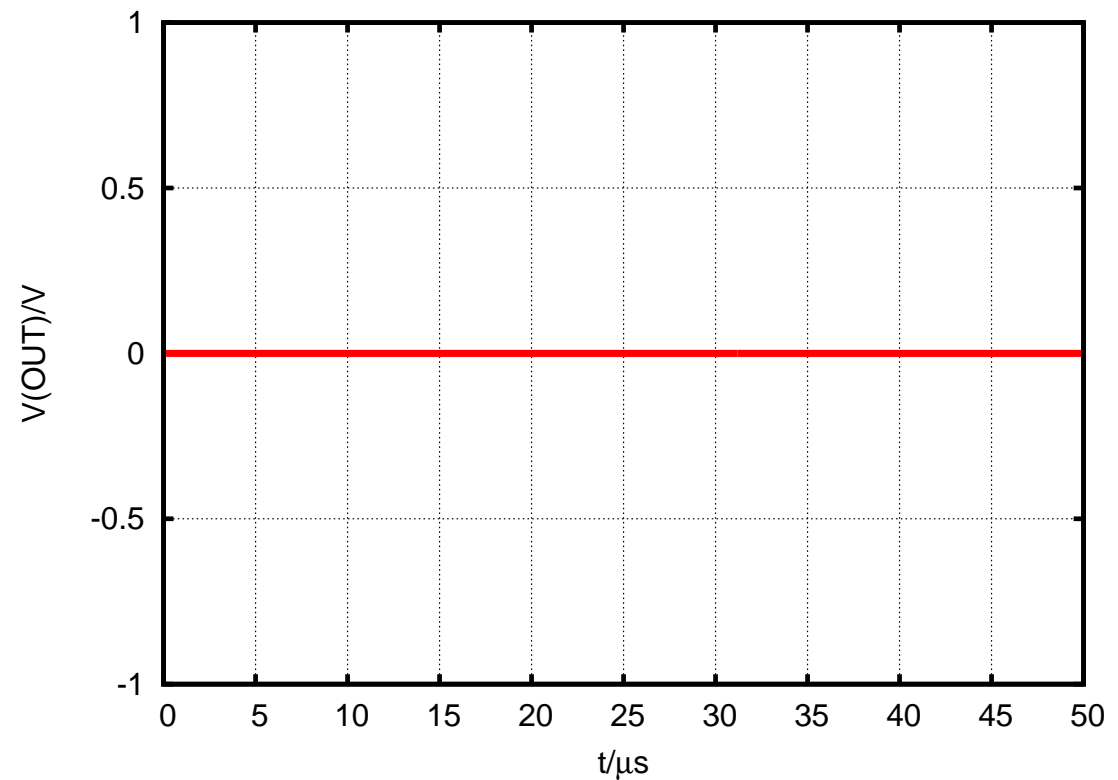
- Beispiel für nicht-lineare transiente Analyse (Zeitbereich)
- Gesucht: Ausgangsspannung  $V(\text{OUT})$
- Diode  $D1$  und JFET  $J1$  aus LTSpice-Modell-Bibliothek



# Anwendungsbeispiele (7)

## VFO mit Colpitts-Oszillator Berechnete Ausgangsspannung $V(OUT)$

- Oszillator schwingt nicht an!
- Grund: es fehlt der "Kick"

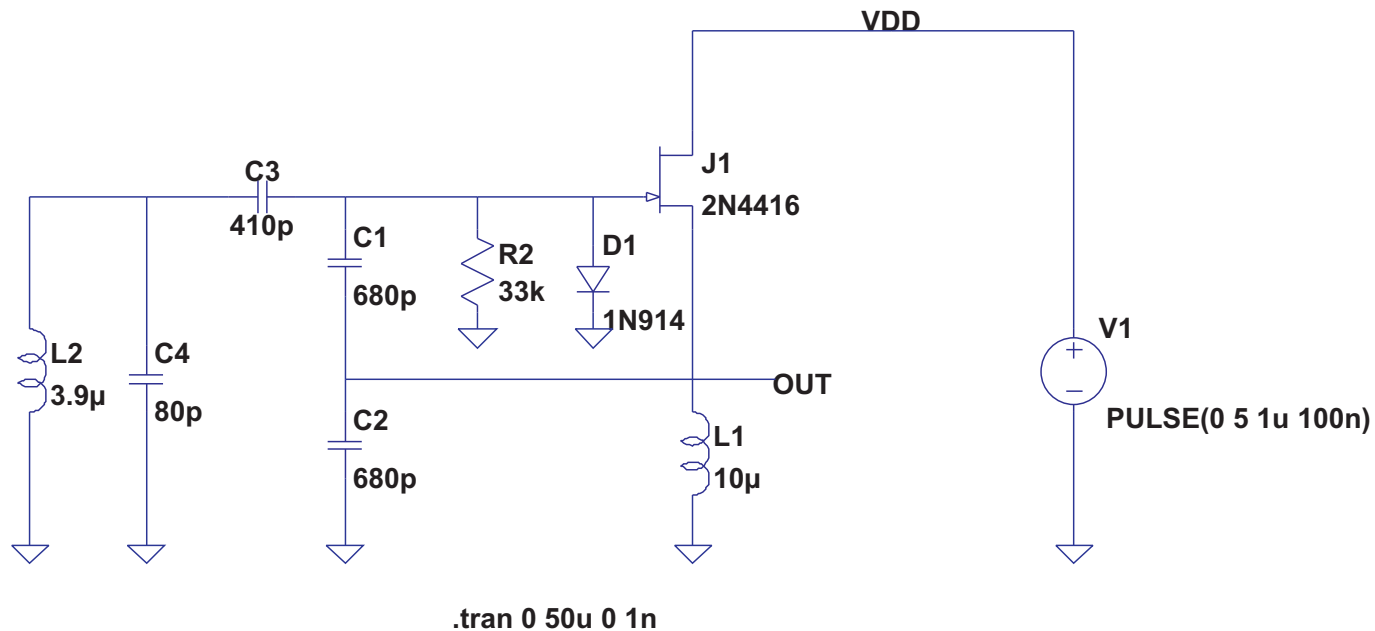


# Anwendungsbeispiele (7)

## VFO mit Colpitts-Oszillator

Start der Schwingung durch Einschalten der Betriebsspannung  $V_{DD}$  [1]

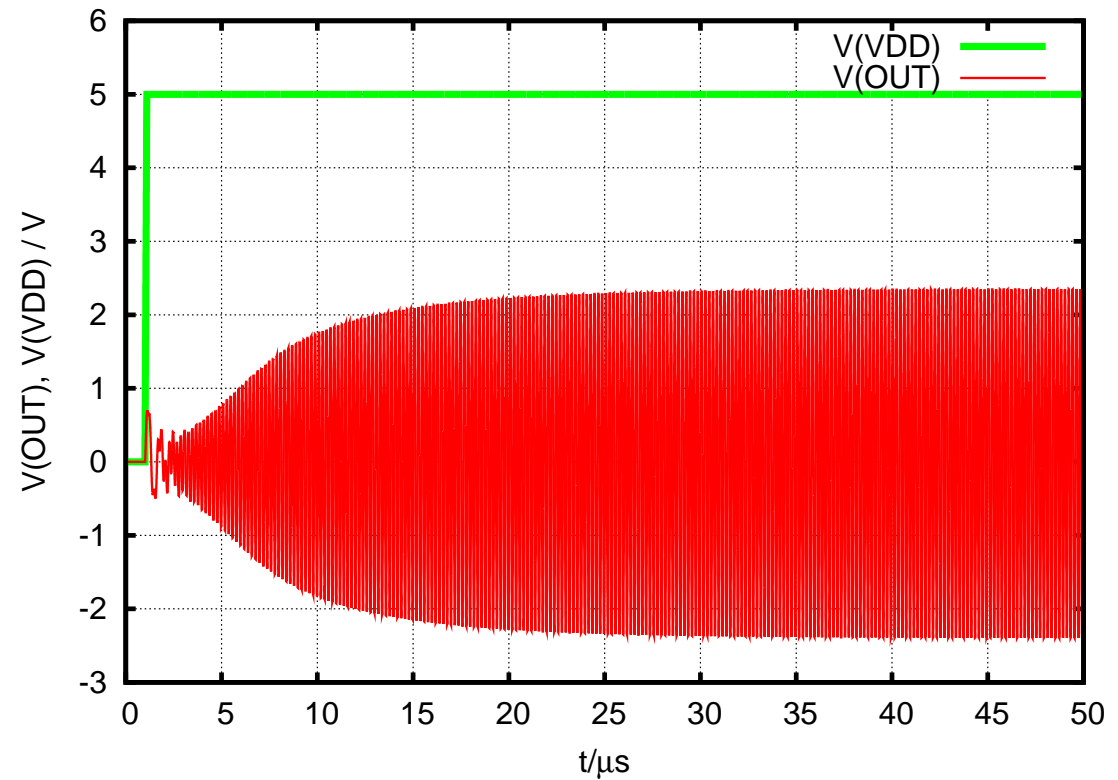
VFO mit Colpitts-Oszillator  
DL4AAE, 30.09.2008



# Anwendungsbeispiele (7)

## VFO mit Colpitts-Oszillator Berechnete Ausgangsspannung $V(OUT)$

- Oszillator schwingt!
- Schwingung erreicht nach etwa  $40 \mu\text{s}$  stabilen Endwert

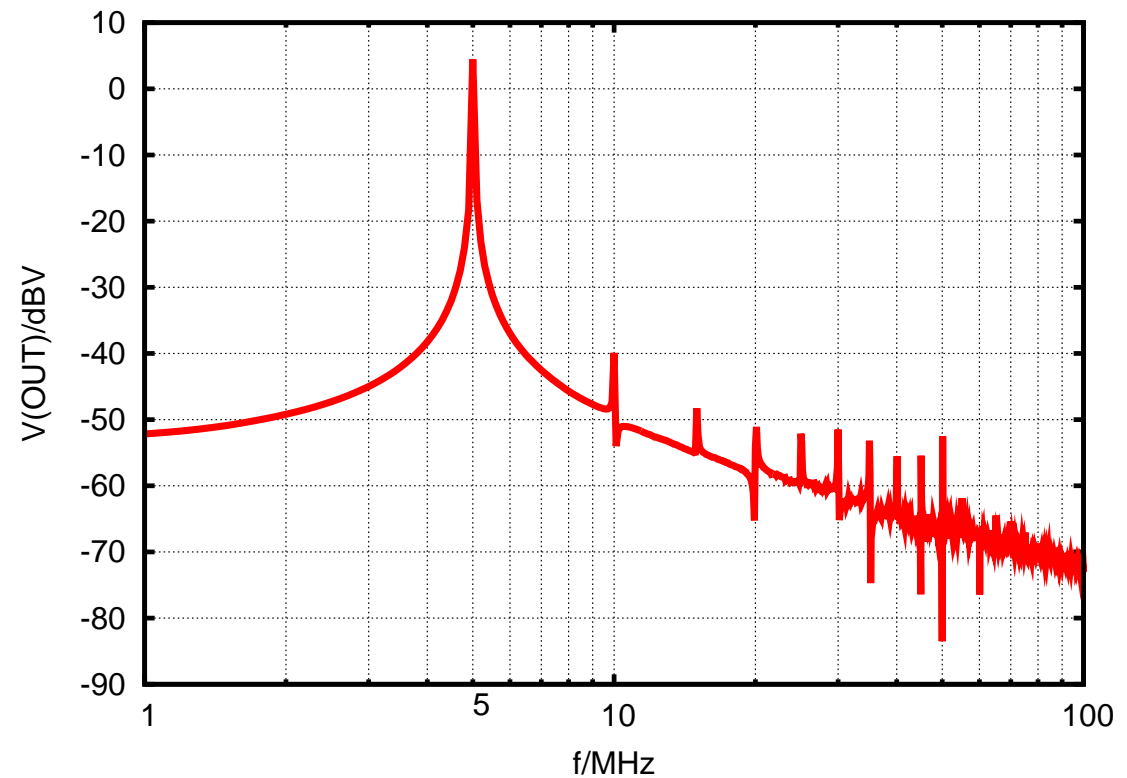


# Anwendungsbeispiele (7)

## VFO mit Colpitts-Oszillator

### Berechnung des Spektrums von $V(OUT)$ mit FFT-Funktion in LTSpice

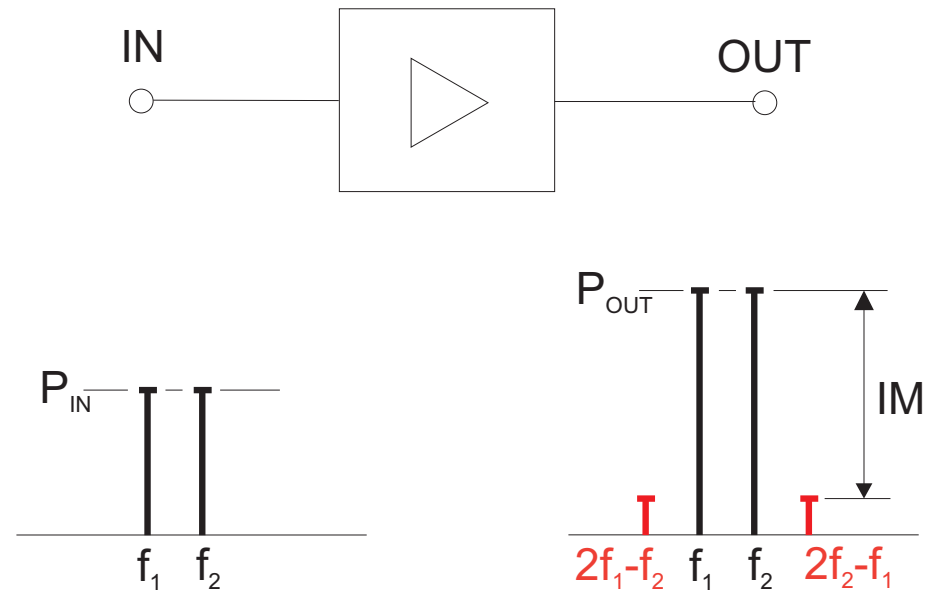
- Anwendung der FFT auf die letzten  $10 \mu\text{s}$  (Schwingung stabil)
- VFO-Frequenz: 5,0 MHz
- Oberwellen hier sichtbar (im Zeitbereich kaum)



# Anwendungsbeispiele (8)

## Breitband-HF-Vorverstärker

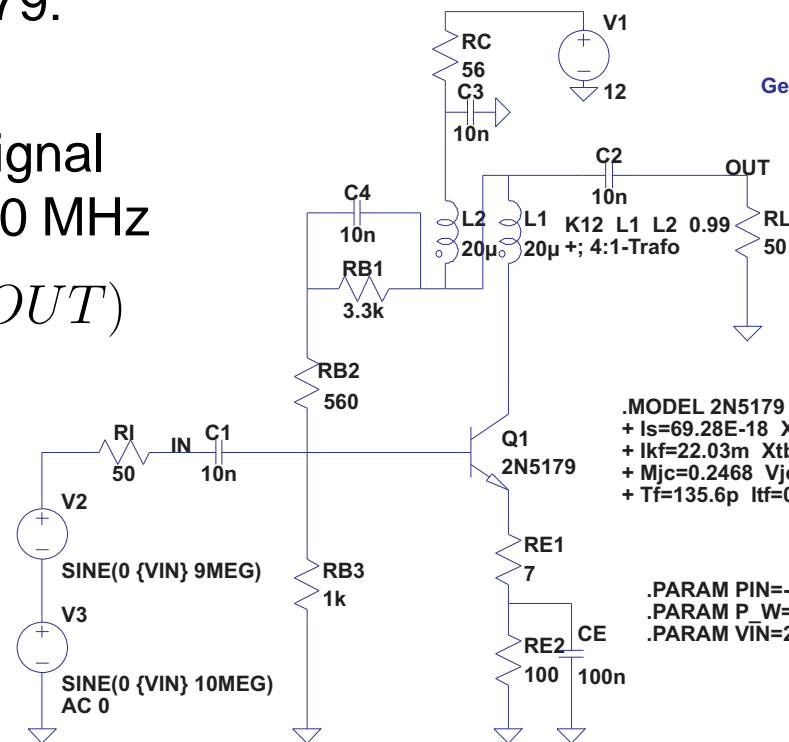
- Beispiel für nicht-lineare transiente Analyse (Zeitbereich)
- Gesucht: Intercept-Punkt 3. Ordnung (IP3, Maß für Großsignalfestigkeit)
- $IP3 = \frac{1}{2} \cdot IM + P_{IN}$
- Bestimmung mit 2-Ton-Signal



# Anwendungsbeispiele (8)

## Breitband-HF-Vorverstärker [8]

- Transistor 2N5179:  
Fairchild-Modell
- $V(IN)$ : 2-Ton-Signal  
mit 9 MHz und 10 MHz
- Berechnung  $V(OUT)$   
im Zeitbereich
- $P_{IN} = -40$  dBm



HF-Vorverstärker mit 2N5179  
Quelle: ARRL-Handbuch 1989, p. 12-12  
Geändert: RE1 von 10R auf 7R, CE von 10n auf 100n  
Bestimmung IP3  
DL4AAE, 21.10.2008

```
.MODEL 2N5179 NPN (
+ Is=69.28E-18 Xti=3 Eg=1.11 Vaf=100 Bf=282.1 Ne=1.177 Ise=69.28E-18
+ Ikf=22.03m Xtb=1.5 Br=1.176 Nc=2 Isc=0 Ikr=0 Rc=4 Cjc=1.042p
+ Mjc=0.2468 Vjc=0.75 Fc=0.5 Cje=1.52p Mje=0.3223 Vje=0.75 Tr=1.588n
+ Tf=135.6p Itf=0.27 Vtf=10 Xtf=30 Rb=10)
```

```
.PARAM PIN=-40;           Eingangsleistung/dBm
.PARAM P_W=10**((PIN-30)/10); Eingangsleistung/W
.PARAM VIN=2.0*sqrt(2.0*50*P_W); Quellen-Spannung (Spitzenwert)
```

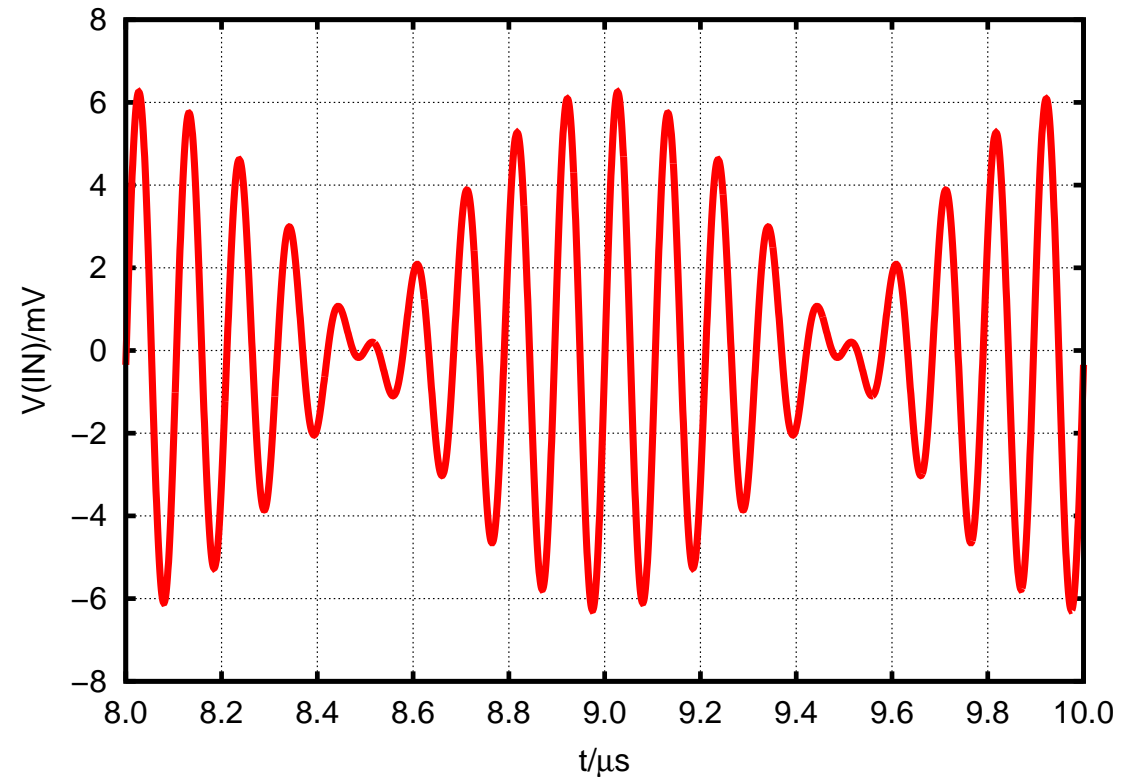
```
.tran 0 10u 0 1n
```



# Anwendungsbeispiele (8)

## Breitband-HF-Vorverstärker Berechnete Eingangsspannung $V(IN)$

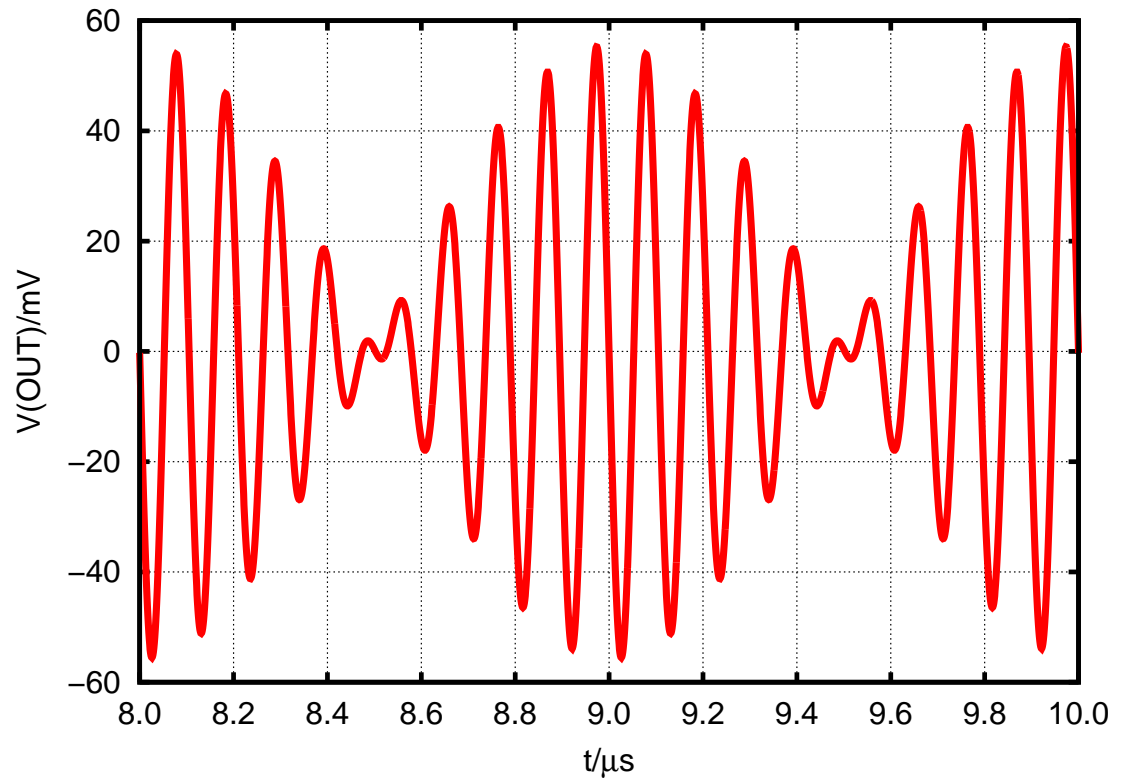
- Schwebung mit Differenzfrequenz von 1 MHz
- Amplitude: 6,3 mV (Spitzenwert)
- Kontrolle:  
 $P_{IN} = -40 \text{ dBm} = 0,1 \mu\text{W}$   
 $\hat{=} 2,24 \text{ mV an } 50 \Omega$   
(Effektivwert eines Tones)



# Anwendungsbeispiele (8)

## Breitband-HF-Vorverstärker Berechnete Ausgangsspannung $V(OUT)$

- Amplitude: 55,2 mV  
(Spitzenwert)
- Verstärkung:  
$$\frac{V(OUT)}{V(IN)} = \frac{55,2 \text{ mV}}{6,3 \text{ mV}} \approx 19 \text{ dB}$$
- Intermodulationen  
hier kaum sichtbar!

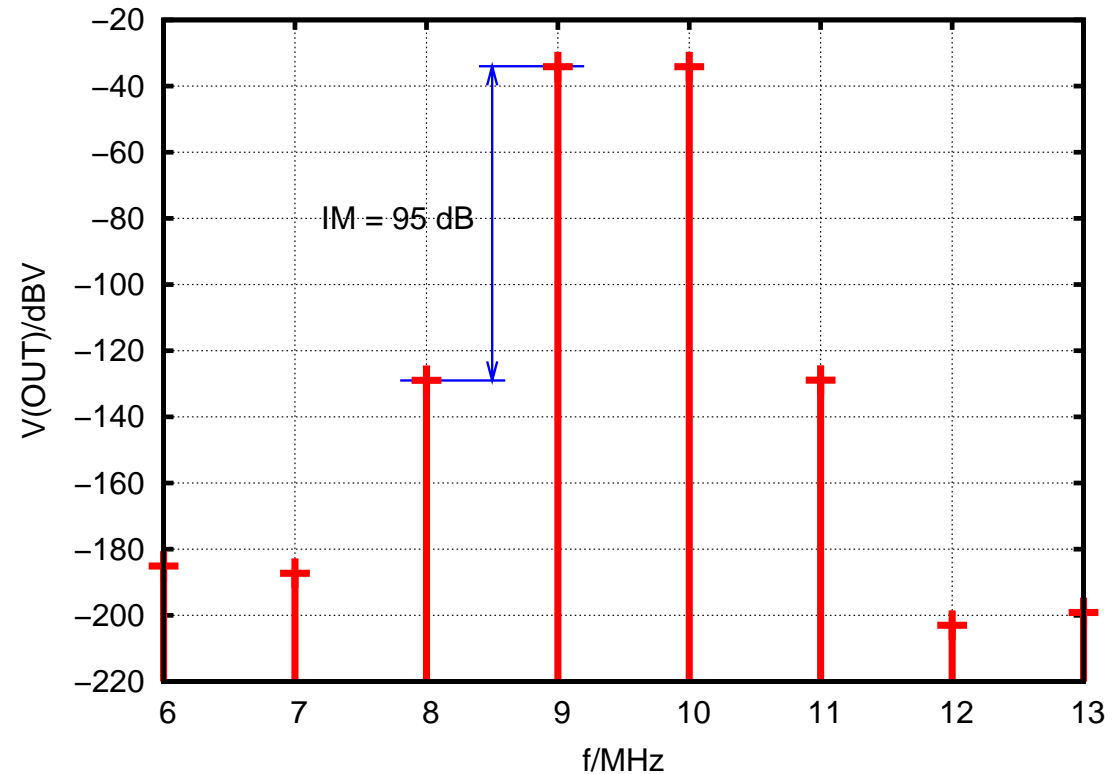


# Anwendungsbeispiele (8)

## Breitband-HF-Vorverstärker

### Berechnung des Spektrums von $V(OUT)$ mit FFT-Funktion in LTSpice

- Anwendung der FFT auf die letzte  $\mu s$  ( $9 \mu s..10 \mu s$ , Schwingung stabil)
- Intermodulationsabstand  $IM = 95 \text{ dB}$
- $IP3 = \frac{1}{2} \cdot 95 + (-40 \text{ dBm}) = +7,5 \text{ dBm}$



# Literatur

- [1] Vladimirescu, A.: *The SPICE Book*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994  
(ca. 50 EUR, aber empfehlenswert)
- [2] "The Spice Home Page": <http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Classes/lcBook/SPICE>  
(Zu Berkeley-SPICE3, mit Link zu Download des Source-Codes)
- [3] URL von WinSpice: <http://www.ousetech.co.uk/winspice2/>
- [4] URL zum Anfordern einer CD mit Demo-Version von PSpice:  
<http://www.flowcad.de/DemoCD.php>
- [5] URL zum Download von LTSpice: <http://www.linear.com/designtools/software/>
- [6] Homepage Elecraft Inc.: <http://www.elecraft.com>  
(Schaltpläne für HF-Bandpass-Filter und ZF-Quarzfilter aus K3-Transceiver)
- [7] Edwards, R.J., G4FGQ (SK): *Program SOLNOID3.exe*, May 2003,  
Download unter <http://zerobeat.net/G4FGQ/>
- [8] The American Radio Relay League: *ARRL Handbook*, Newington, CT, 1989, p. 12-12

**...auf den  
(SPICE-)Geschmack  
gekommen?**

