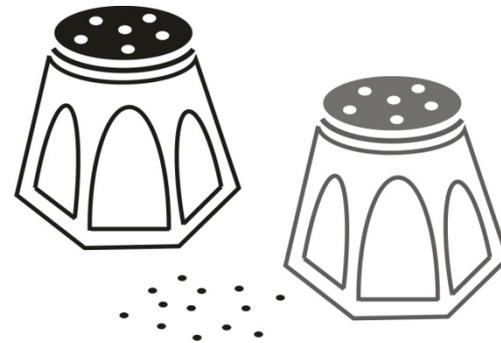


# Schaltungs-Simulation im Amateurfunk mit SPICE

Uwe Neibig, DL4AAE  
HAM RADIO Friedrichshafen  
29.06.2013

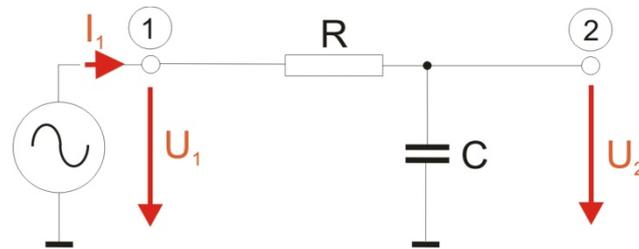
1. Einleitung
2. Das Programm SPICE
3. Ablauf einer Simulation
4. Anwendungsbeispiele
5. Literatur



# Einleitung

## Was ist Schaltungs-Simulation?

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



# Einleitung

## Was ist mit Schaltungs-Simulation 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 elektrisches Verhalten zu erreichen
- Beispiele: siehe Kap. 4

# Einleitung

## Was ist mit Schaltungs-Simulation nicht möglich?

- Entwurf einer Schaltung (Synthese): “Ideen finden im Kopf statt”
- Nachbildung der Realität, wenn Bauelemente-Modelle nicht vorhanden / nicht geeignet sind
- Berechnung elektromagnetischer Felder
- 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

Variante	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Quelle
<b>SPICE3</b>	Letzte Version des Berkeley-Projekts (1989)	C-Quelltext frei verfügbar	Schaltungs-Eingabe nur als Netzliste (SPICE-Input-File)	[2]
<b>WinSpice</b>	Portierung von SPICE3 auf Windows	Kompatibel zu SPICE3, freie Probelizenz für 30 Tage	Wie SPICE3, Lizenz: 45 £	[3]
<b>PSpice</b>	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]
<b>LTspice</b>	Portierung von SPICE3 auf Windows + GUI (von IC-Hersteller Linear Technology)	kompatibel zu SPICE3, grafische Schaltplan-Eingabe, Freeware	(keine)	[5]

# Ablauf einer Simulation

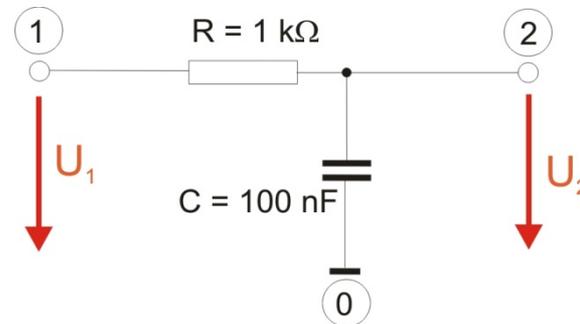
## Übersicht

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  $U_2 / U_1$
- → 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)
- Bauteile-Hersteller
- Literatur
- aus Datenblatt-Angaben
- aus Messungen



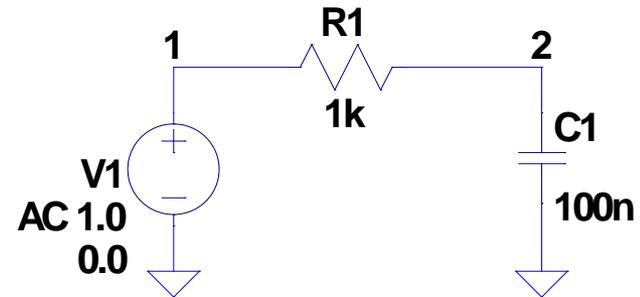
# Ablauf einer Simulation (Beispiel)

## 3. Schaltung in SPICE-lesbares Format umwandeln

### Netzliste (SPICE-Input-File)

```
V1 1 0 DC 0.0 AC 1.0  
R1 1 2 1k  
C1 2 0 100n
```

### “Schematic” (LTspice)



# Ablauf einer Simulation (Beispiel)

## Netzliste ↔ Schematic

	Netzliste	Schematic
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"><li>• automatisch erstellbar</li><li>• bei vielen Modellen oft einzig verfügbare Form</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Grafische Eingabe</li><li>• Dokumentation inbegriffen</li></ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bei großen Schaltungen unübersichtlich und fehlerträchtig</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Nicht für alle Modelle verfügbar</li></ul>

→ Schematic bevorzugen, aber Netzliste verstehen!

# Ablauf einer Simulation (Beispiel)

## 4. Analyse-Parameter festlegen

### Netzliste (SPICE-Input-File)

RC-Tiefpass

\* Autor: DL4AAE

\* Datum: 12.02.2013

V1 1 0 DC 0.0 AC 1.0

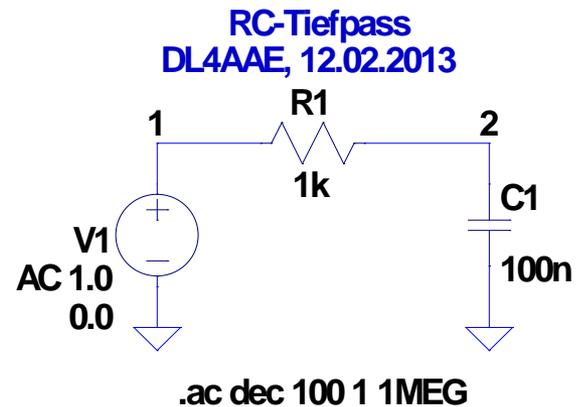
R1 1 2 1k

C1 2 0 100n

.AC DEC 100 1 1MEG

.END

### “Schematic” (LTspice)



# Ablauf einer Simulation (Beispiel)

## 5. Analyse durchführen

### Netzliste (SPICE-Input-File)

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

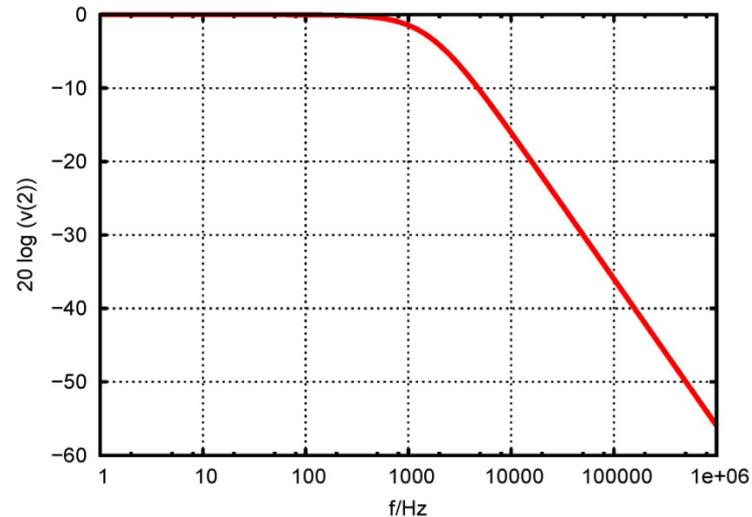
### “Schematic” (LTspice)

- 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

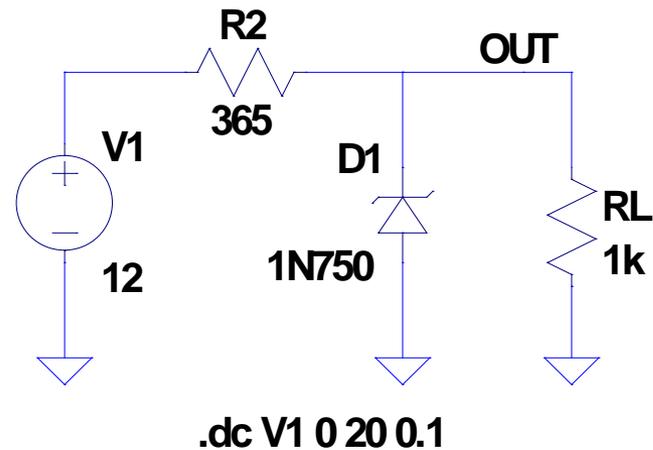
Nr.	Schaltung	Analyseart	Besonderheiten
<u>1</u>	Spannungs-Stabilisierung mit Zener-Diode	.DC	
<u>2</u>	Spannungs-Stabilisierung mit Zener-Diode	.DC	.PARAM .STEP
<u>3</u>	HF-Bandpassfilter, Elecraft K3-Transceiver	.AC	S-Parameter
<u>4</u>	ZF-Quarzfilter, Elecraft K3-Transceiver	.AC	Quarz-Modellierung Impedanz-Berechnung S-Parameter .MEAS
<u>5</u>	Breitband-HF-Vorverstärker	.TRAN	.MODEL .PARAM FFT IP3-Berechnung

# Anwendungsbeispiele (1)

## Spannungs-Stabilisierung mit Zener-Diode

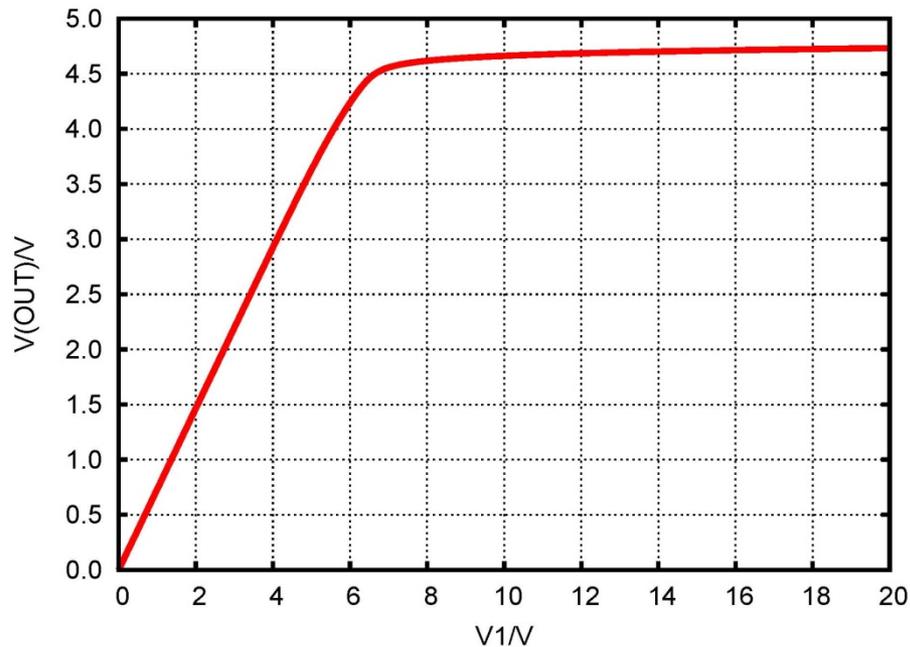
- Beispiel für nicht-lineare DC-Analyse
- Zener-Diode D1 aus LTspice-Modell-Bibliothek
- Gesucht: Ausgangsspannung  $V(OUT)$  in Abhängigkeit von der Eingangsspannung  $V1$

Spannungs-Stabilisierung mit Zener-Diode  
Beispiel für DC-Analyse  
DL4AAE, 01.03.2013



# Anwendungsbeispiele (1)

## Spannungs-Stabilisierung mit Zener-Diode



- Für  $V1$  größer etwa 8 V ist  $V(OUT)$  konstant bei  $\approx 4,7$  V

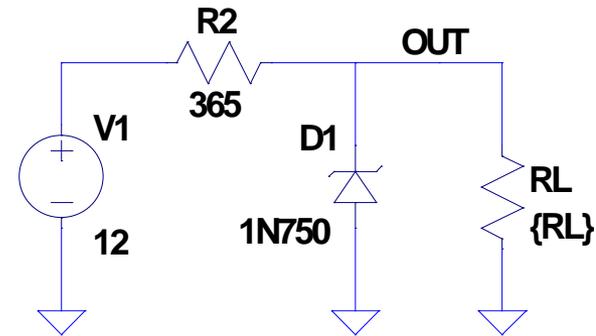


# Anwendungsbeispiele (2)

## Spannungs-Stabilisierung mit Zener-Diode

- Beispiel für nicht-lineare DC-Analyse **mit Parameter**
- Gesucht: Ausgangsspannung  $V(OUT)$  in Abhängigkeit von der Eingangsspannung  $V1$  und vom Lastwiderstand  $RL$

Spannungs-Stabilisierung mit Zener-Diode  
Beispiel für DC-Analyse mit Parameter  
DL4AAE, 01.03.2013

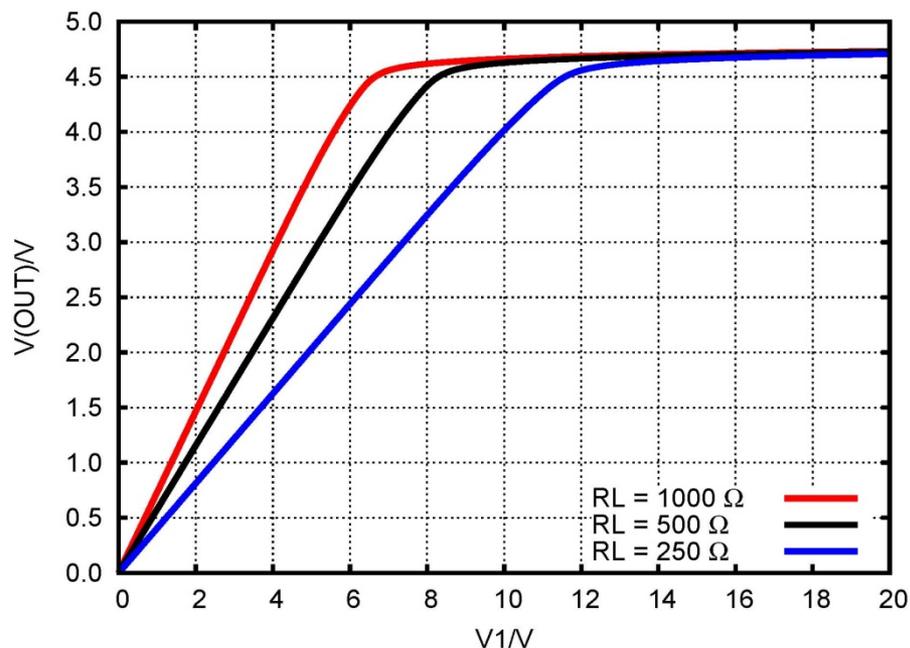


```
.STEP PARAM RL LIST 1k 500 250
```

```
.dc V1 0 20 0.1
```

# Anwendungsbeispiele (2)

## Spannungs-Stabilisierung mit Zener-Diode



- Knickspannung, ab der  $V(OUT)$  konstant ist, steigt mit kleinerem  $R_L$
- Für  $V1$  oberhalb etwa 14 V ist  $V(OUT)$  für alle betrachteten Lastfälle konstant bei  $\approx 4,7$  V

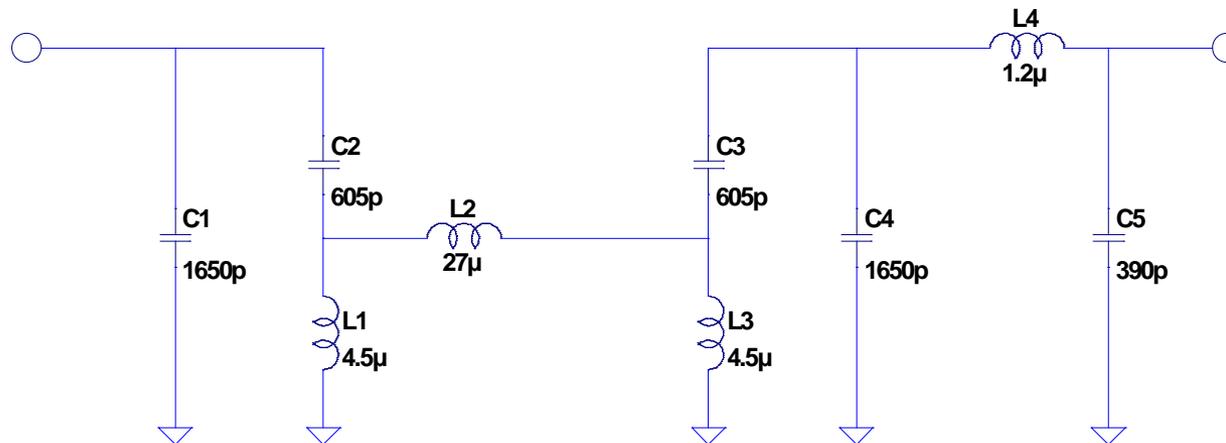


# Anwendungsbeispiele (3)

## HF-Bandpassfilter, Elecraft K3-Transceiver [6]

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

HF-Bandpass-Filter, Elecraft K3-Transceiver  
Quelle: K3 schematics, www.elecraft.com  
DL4AAE, 12.02.2013

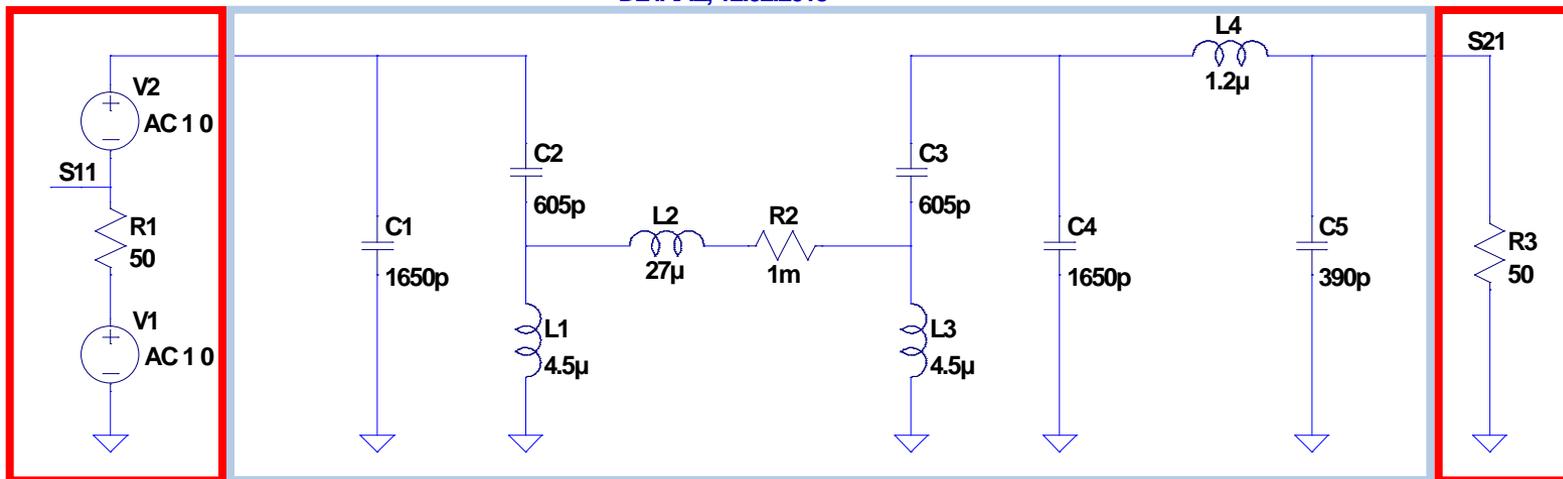


# Anwendungsbeispiele (3)

## HF-Bandpassfilter, Elecraft K3-Transceiver [6]

- Bestimmung von  $S_{11}$  und  $S_{21}$  mit Beschaltung des Filters nach [7]

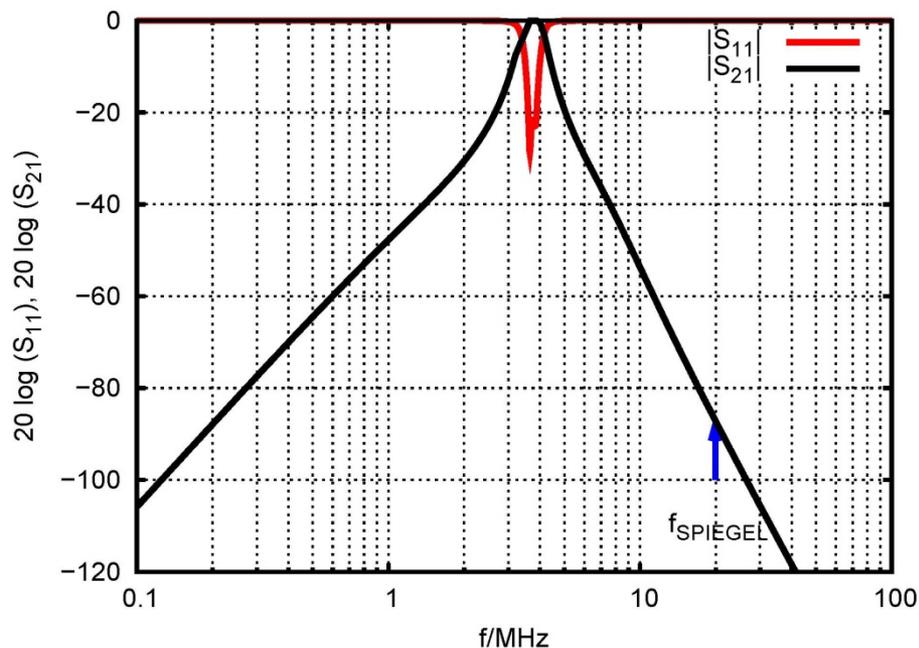
HF-Bandpass-Filter, Elecraft K3-Transceiver  
Quelle: K3 schematics, www.elecraft.com  
DL4AAE, 12.02.2013



.ac dec 1000 0.1MEG 100MEG

# Anwendungsbeispiele (3)

## HF-Bandpassfilter, Elecraft K3-Transceiver [6]



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

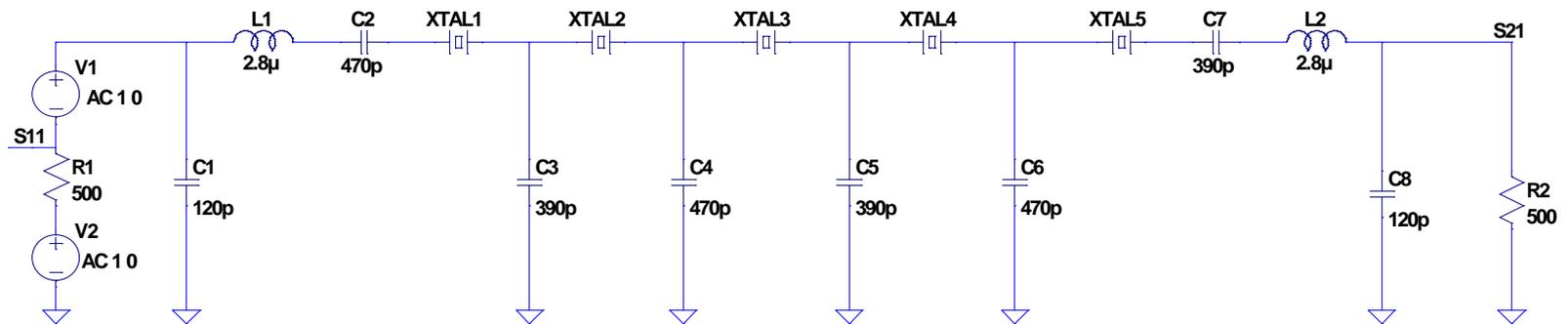


# Anwendungsbeispiele (4)

## 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, 16.01.2013



# Anwendungsbeispiele (4)

## ZF-Quarzfilter, Elecraft K3-Transceiver [6]: Quarz-Modellierung

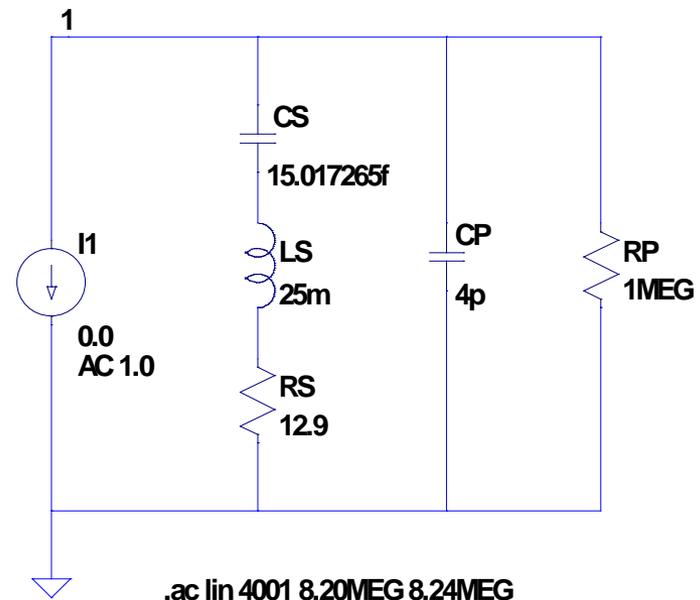
### Angaben im K3 schematic:

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

### daraus berechnete Werte:

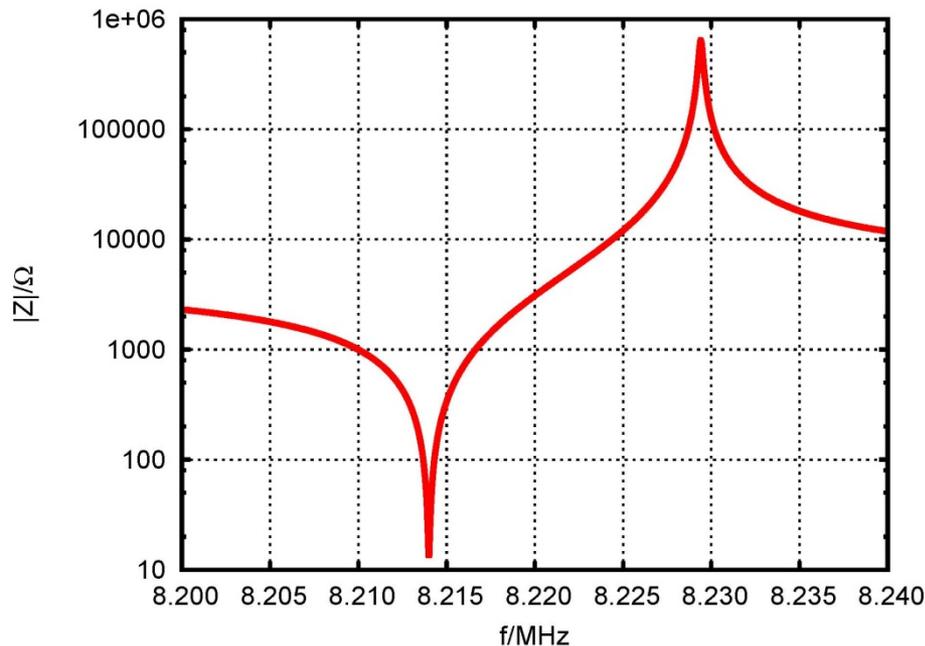
- $CS = 15.017265 \text{ fF}$
- $RS = 12,9 \text{ } \Omega$  (für  $Q = 100000$ )

Modell für ZF-Quarz, Elecraft K3-Transceiver  
Quelle: K3 schematics [www.elecraft.com](http://www.elecraft.com)  
DL4AAE, 13.02.2013



# Anwendungsbeispiele (4)

## ZF-Quarzfilter, Elecraft K3-Transceiver [6]: Quarz-Modellierung

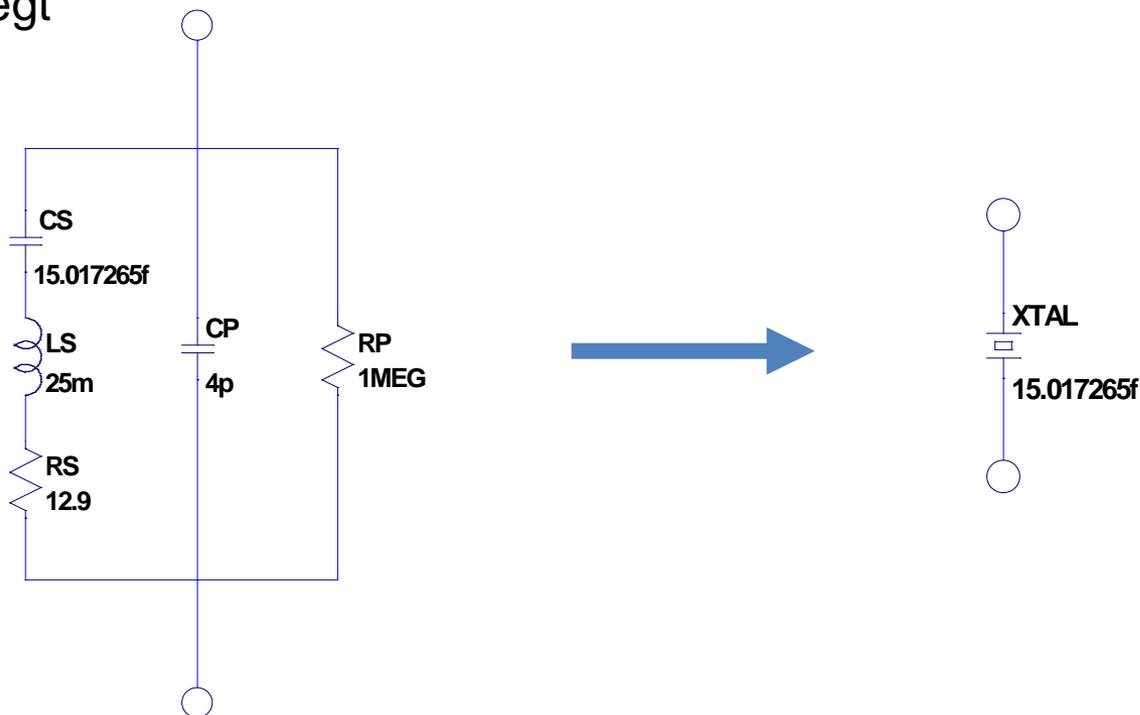


- Dargestellt:  
Eingangs-Impedanz  $\underline{Z}$   
 $= \underline{U}_1 / \underline{I}_1 \triangleq V(1)$
- Serien-Resonanz bei  
8,214 MHz
- Parallel-Resonanz bei  
8,229 MHz (Ursache: CP)

# Anwendungsbeispiele (4)

## ZF-Quarzfilter, Elecraft K3-Transceiver [6]: Quarz-Modellierung in LTspice

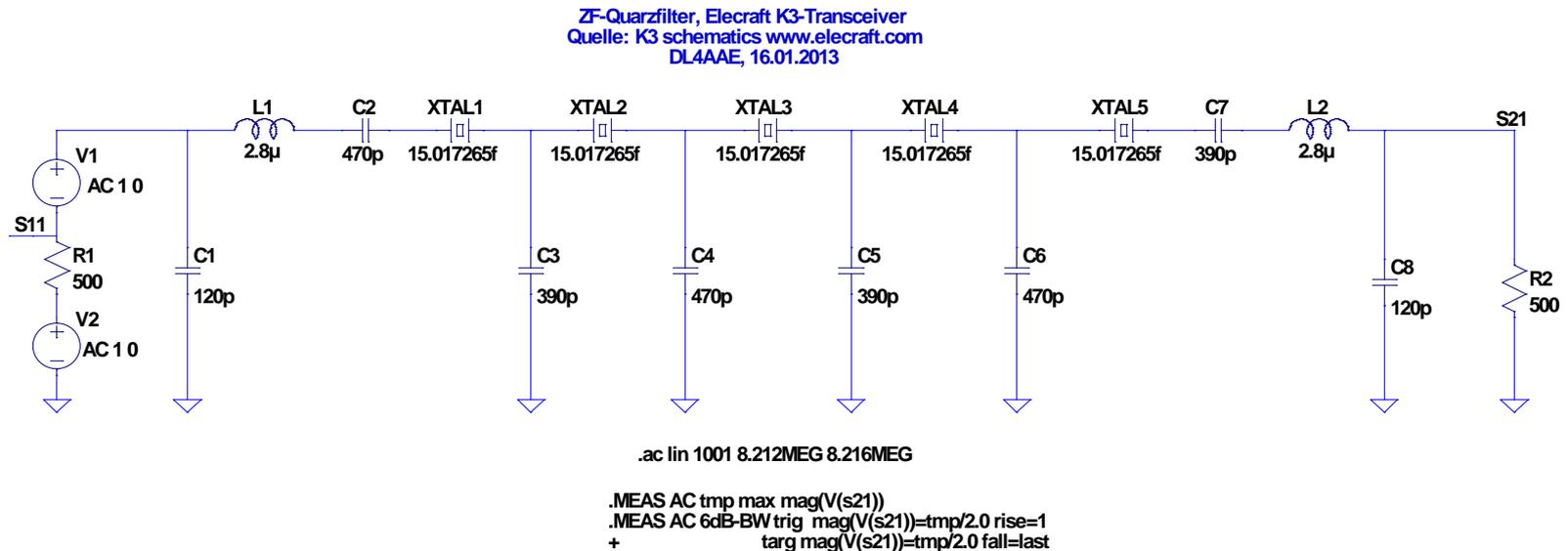
- Ersatzschaltbild ist dem Symbol "xtal" aus der LTspice-Modell-Bibliothek hinterlegt



# Anwendungsbeispiele (4)

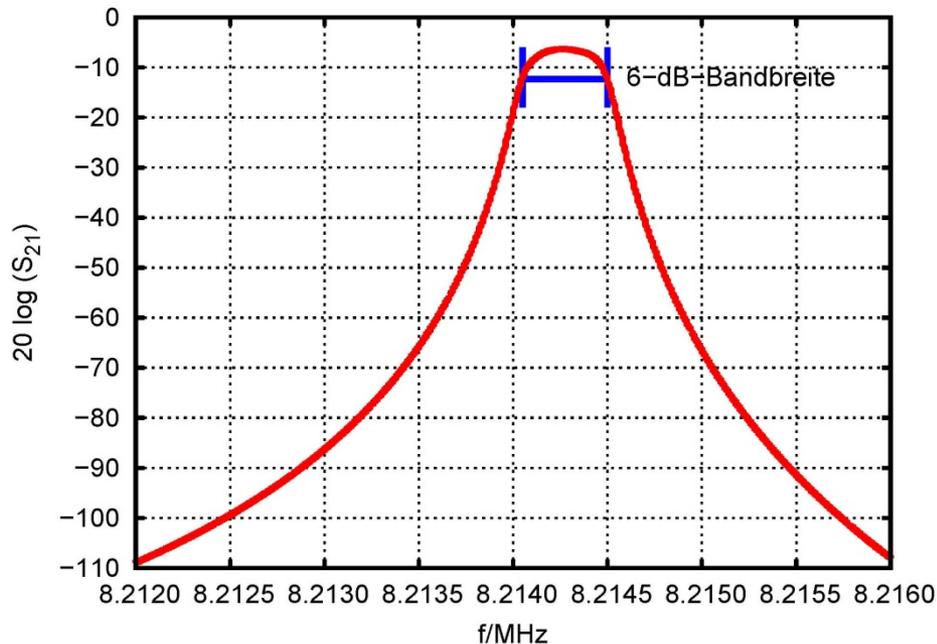
## ZF-Quarzfilter, Elecraft K3-Transceiver [6]

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



# Anwendungsbeispiele (4)

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



### Manuell (mit Cursor):

- Maximum suchen: -6,73 dB
- Eck-Frequenzen mit -6 dB vom Maximum suchen:  
8,21451 MHz und 8,21405 MHz
- Differenz ist 6-dB-Bandbreite:  
**460 Hz**

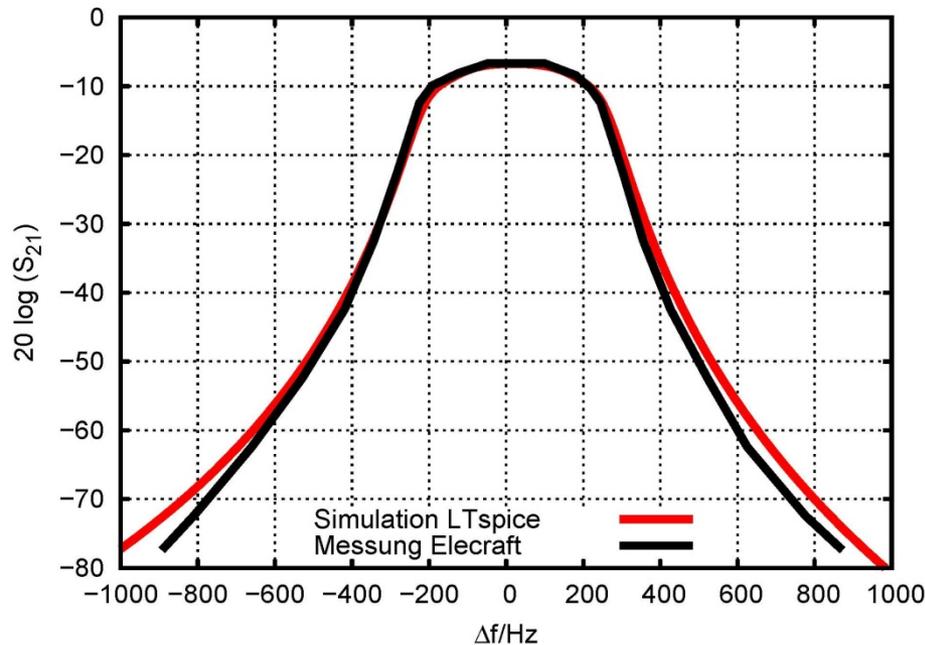
### Mit .MEAS-Befehl in LTspice:

Auszug aus „SPICE Error Log“:

```
...  
tmp: MAX(mag(v(s21)))=(-6.73427dB,0°)...  
6db-bw=465.936 FROM ...  
...
```

# Anwendungsbeispiele (4)

## ZF-Quarzfilter, Elecraft K3-Transceiver [6] Vergleich mit Messergebnis



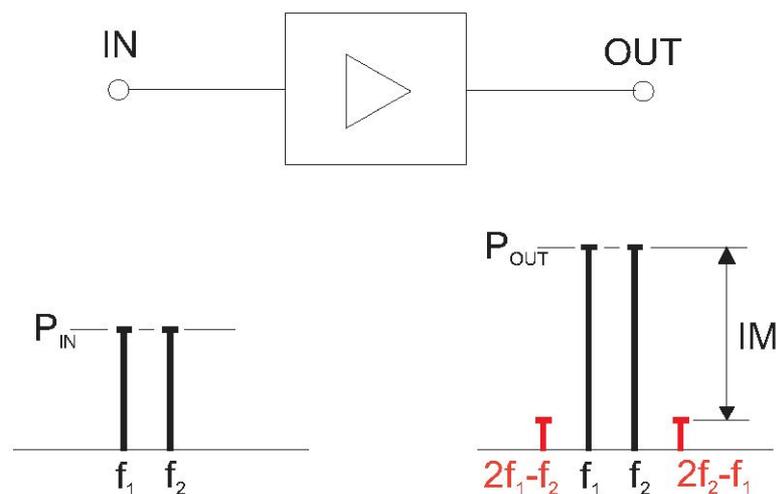
- Elecraft-Messergebnis des Filters KFL3A-500
- sehr gute Übereinstimmung!



# Anwendungsbeispiele (5)

## Breitband-HF-Vorverstärker

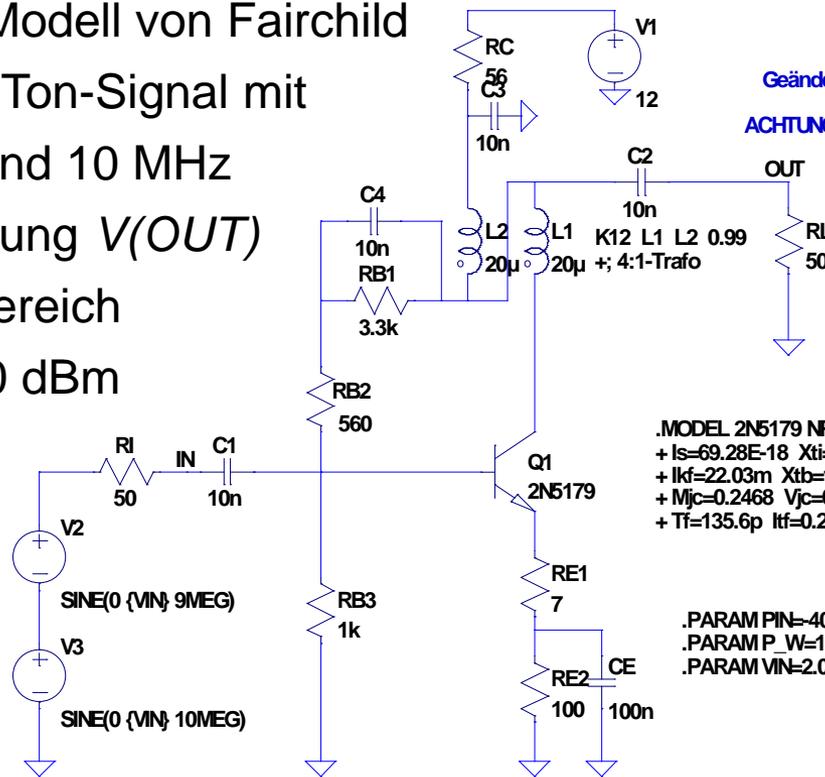
- Beispiel für nicht-lineare transiente Analyse (Zeitbereich)
- Gesucht: Intercept-Punkt 3. Ordnung (IP3, Maß für Großsignalverhalten)
- Bestimmung mit 2-Ton-Signal
- $IP3 = 0,5 \cdot IM + P_{IN}$



# Anwendungsbeispiele (5)

## Breitband-HF-Vorverstärker [8]

- Transistor 2N5179:  
SPICE-Modell von Fairchild
- $V(IN)$ : 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  
 ACHTUNG: Compression abschalten (im Control Panel)  
 DL4AAE, 14.02.2013

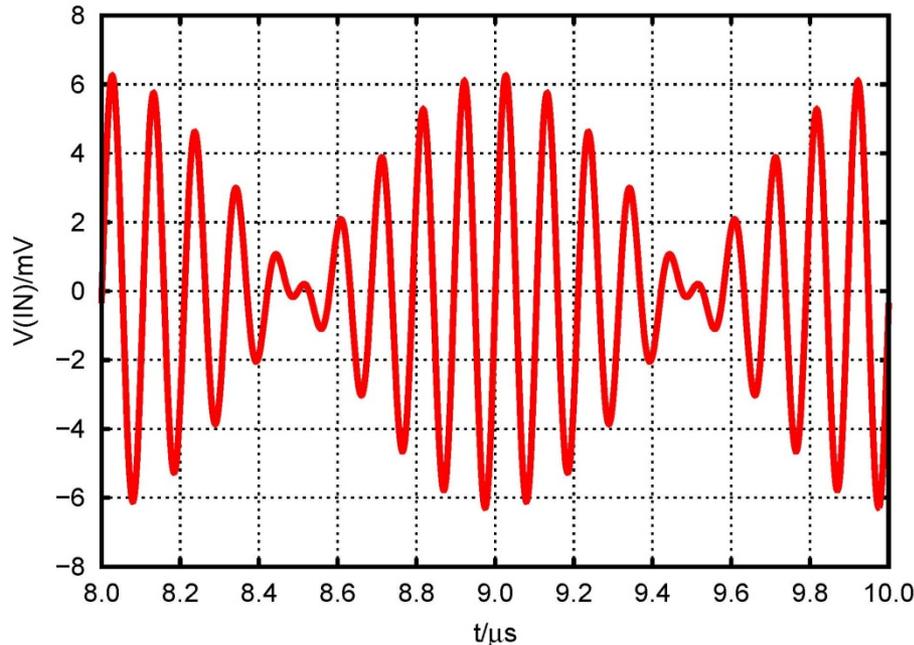
```
.MODEL 2N5179 NPN(
+ Is=69.28E-18 Xti=3 Eg=1.11 Vaf=100 Bf=282.1 Ne=1.177 Ise=69.28E-18
+ Ikf=22.03m Xtb=1.5 Br=1.176 Nc=2 Isc=0 Ikr=0 Rc=4 Cjc=1.042p
+ Mjc=0.2468 Vjc=0.75 Fc=0.5 Cje=1.52p Mje=0.3223 Vje=0.75 Tr=1.588n
+ Tf=135.6p Itf=0.27 Vtf=10 Xtf=30 Rb=10)
```

```
.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 (5)

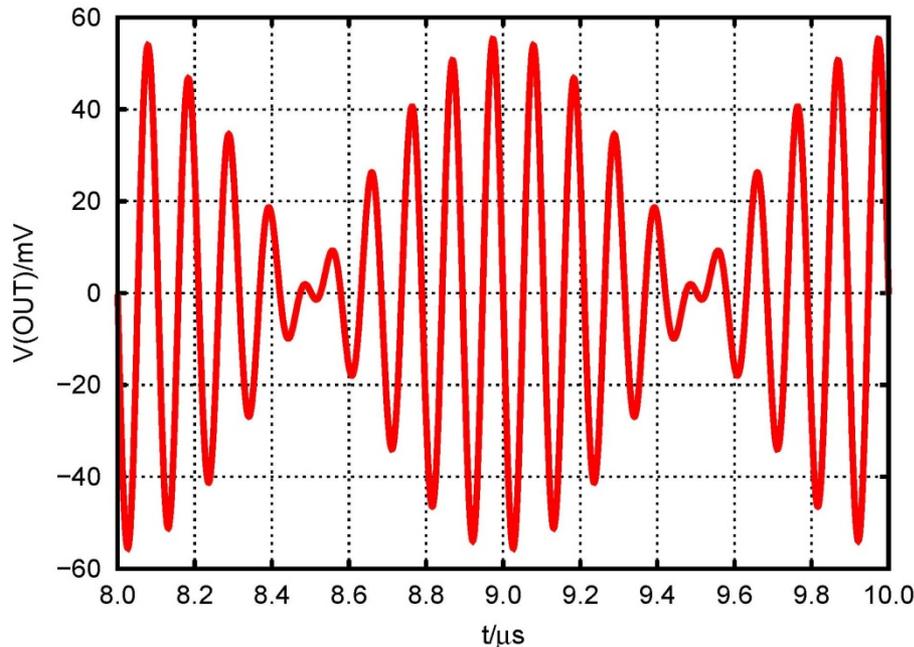
## Breitband-HF-Vorverstärker: berechnete Eingangsspannung $V(IN)$



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

# Anwendungsbeispiele (5)

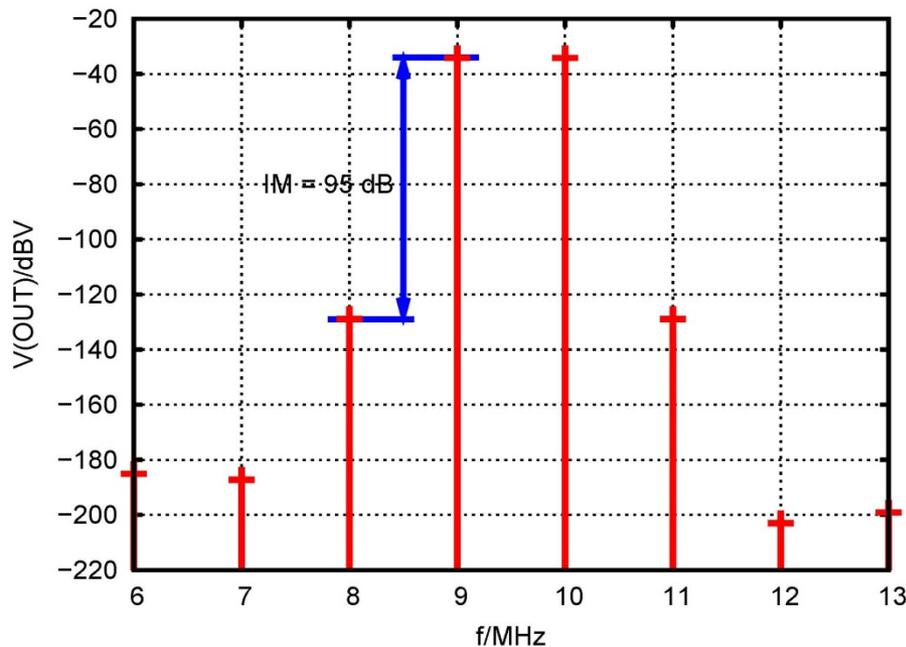
Breitband-HF-Vorverstärker:  
berechnete Ausgangsspannung  $V(OUT)$



- Amplitude: 55,2 mV  
(Spitzenwert)
- Verstärkung:  
 $V(OUT)/V(IN) =$   
 $55,2 \text{ mV} / 6,3 \text{ mV} = 8,76$   
( $\approx 19 \text{ dB}$ )
- Intermodulationen hier kaum sichtbar!

# Anwendungsbeispiele (5)

Breitband-HF-Vorverstärker:  
Berechnung des Spektrums von  $V(OUT)$  mit  
FFT-Funktion in LTspice



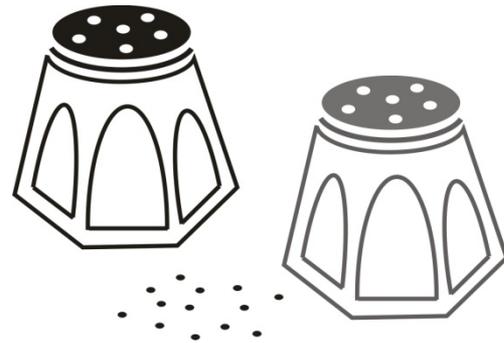
- Anwendung der FFT (Fast Fourier Transformation) auf die letzte  $\mu$ s (9  $\mu$ s..10  $\mu$ s, Schwingung stabil)
- Intermodulationsabstand  $IM = 95$  dB
- $IP3 = 0.5 \cdot IM + P_{IN} = 0,5 \cdot 95 \text{ dBm} + (-40 \text{ dBm}) = +7,5 \text{ dBm}$



# Literatur

- [1] Vladimirescu, A.: *The SPICE Book*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994  
(neu ca. 100 €, aber empfehlenswert)
- [2] SPICE auf der Homepage von Prof. Donald O. Pederson, Berkeley:  
<http://embedded.eecs.berkeley.edu/pubs/downloads/spice/>  
(Zu Berkeley-SPICE3, mit Link zu Download des Source-Codes)
- [3] URL von WinSpice: <http://www.winspice.co.uk>
- [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] Gerig, John S.: *Create S-Parameter Subcircuits for Microwave and RF Applications*. MicroSim Application Notes, Version 8.0, MicroSim Corporation, Irvine, CA, June 1997
- [8] The American Radio Relay League: *The ARRL Handbook*, Newington, CT, 1989, p. 12-12

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



Vortragsfolien als PDF-Datei unter: <http://www.mydarc.de/dl4aae>