

**UNIVERSITÄT DUISBURG-ESSEN
FAKULTÄT FÜR INGENIEURWISSENSCHAFTEN
ABTEILUNG ELEKTROTECHNIK UND INFORMATIONSTECHNIK
LEHRSTUHL FÜR HOCHFREQUENZTECHNIK**

Diplomarbeit

Thema: Rectifier for Microwave Power RF-to-DC Conversion

**Student: Minghui Wei
Matr.Nr: 2221081**

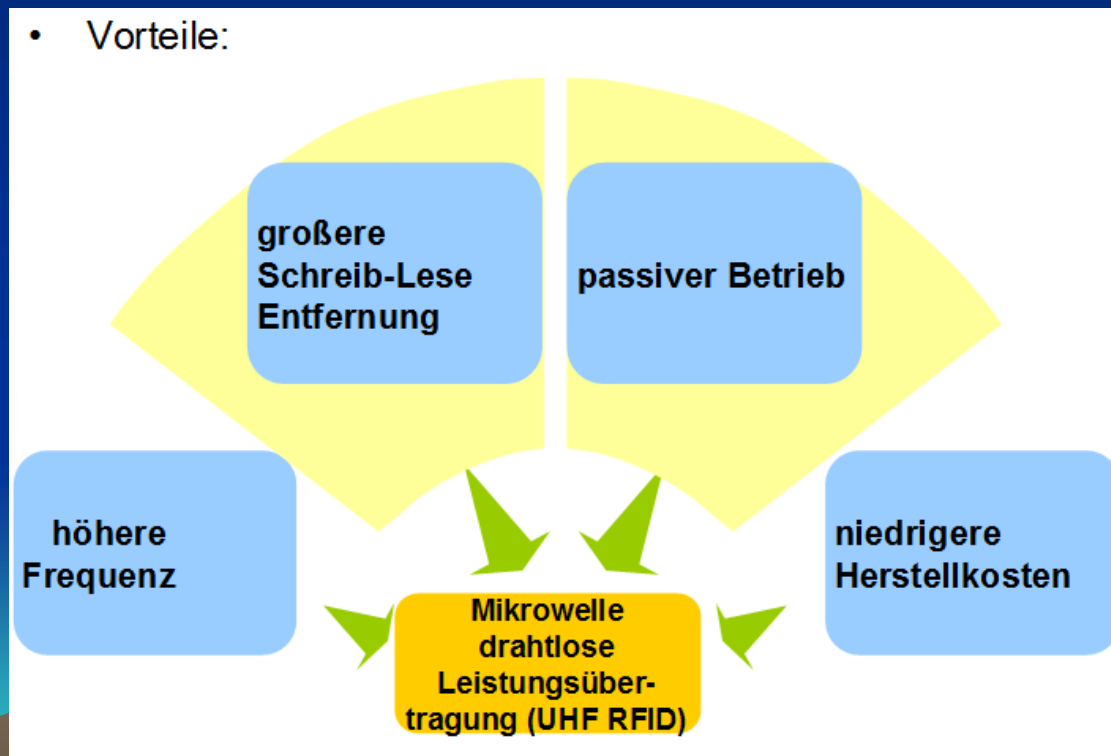
**Studiengang: Elektrotechnik und Informationstechnik DII
Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Solbach**

Inhaltsverzeichnis

1. **Aufgabenstellung**
2. **System-Struktur und Voltage-Multiplier-Gleichrichter**
3. **Test-Schaltung Simulation**
4. **Die hergestellte Leiterplatte**
5. **Der Test der gesamten Schaltung**
6. **Herstellung der parallelen Gleichrichterschaltung**
7. **Analyse der Schaltungen im Zeitbereich**
8. **Fehleranalyse**

1. Aufgabenstellung

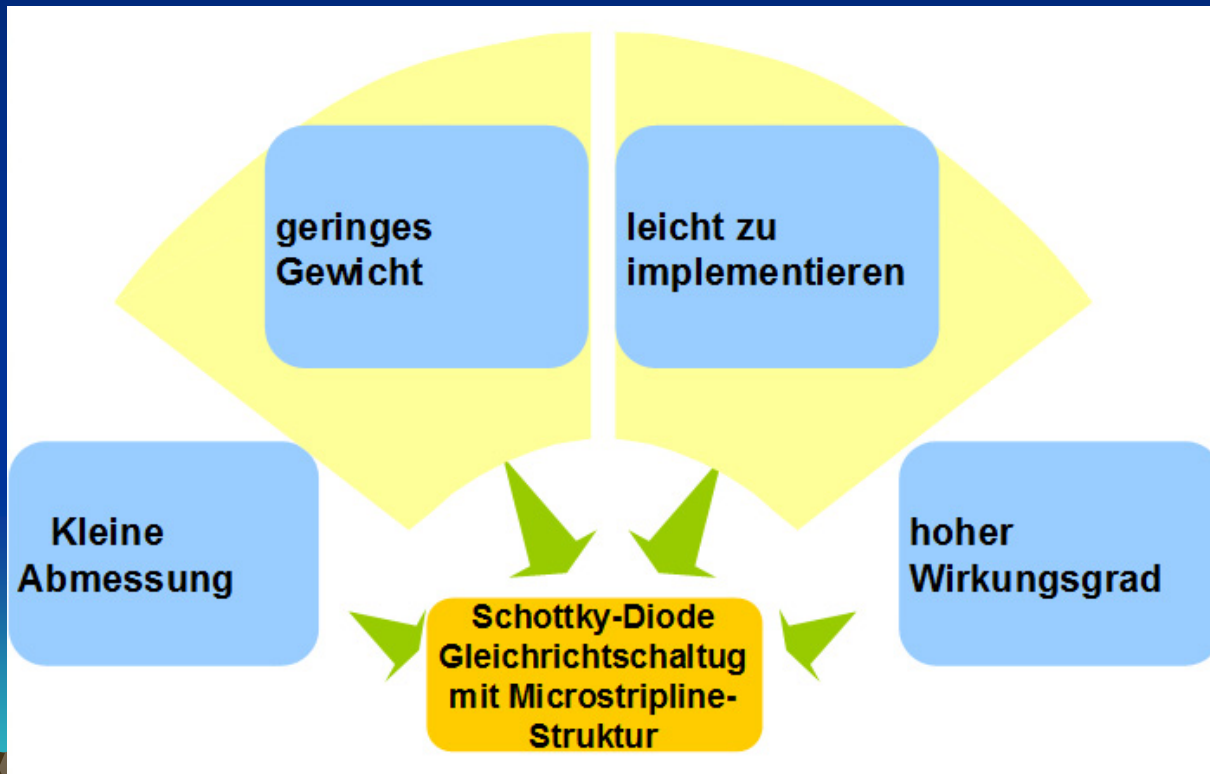
- Die drahtlose Leistungsübertragung mit Hilfe von Mikrowellen wird heutzutage verstärkt benutzt, wie z.B. im RFID (Radio Frequency Identification) System. Im Ultra-High Frequency (UHF) Bereich arbeitet der passive RFID-Tag im Frequenzbereich von 300MHz bis 3GHz.

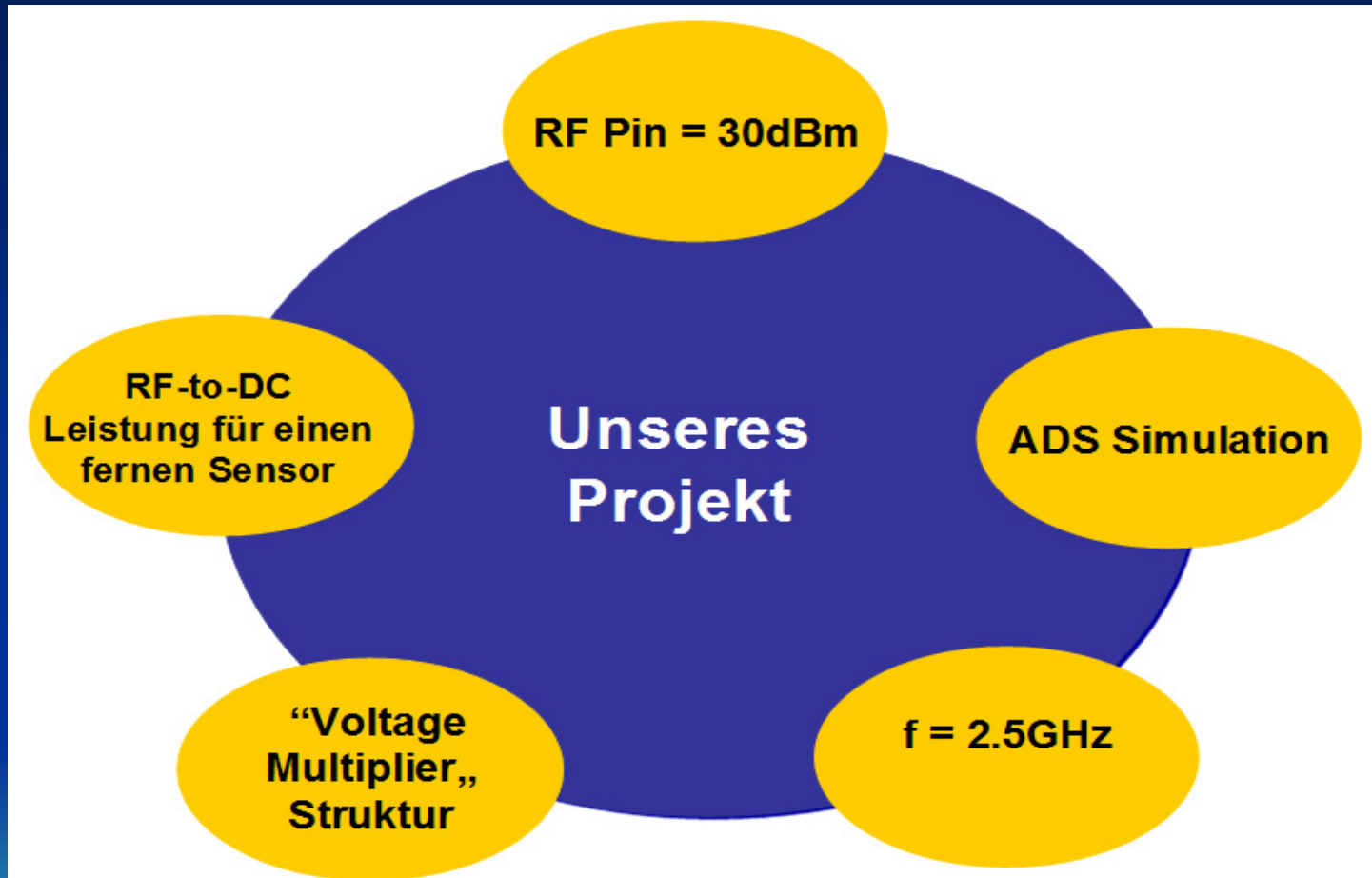


Rectifier for Microwave Power RF-to-DC Conversion

Mikrowellen-Gleichrichter

In der Microstripline-Struktur hat die Schottky-Dioden Gleichrichterschaltung folgende Vorteile:





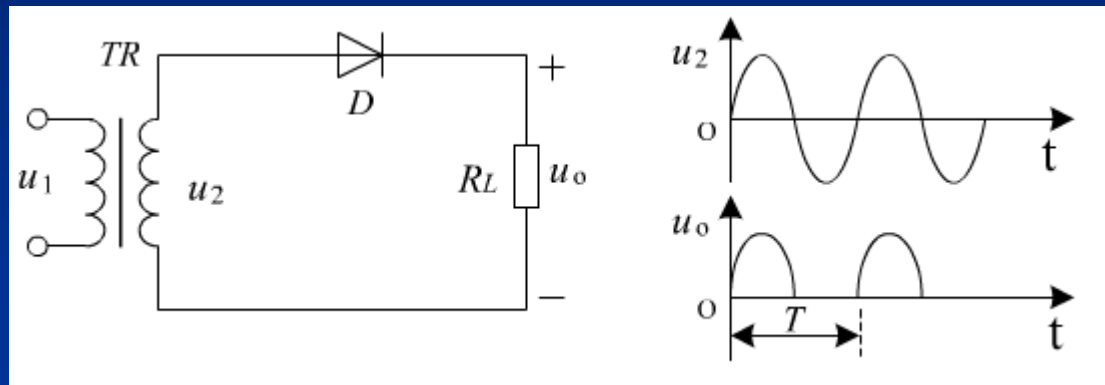
Ziele der Schaltung

- Hohe Konversionseffizienz / RF-to-DC Wirkungsgrad
- Geeignete Ausgangsspannung U_{out} und geeigneter Ausgangsstrom I_{out}
- Niedrige Auswirkung auf höhere Harmonische
- Langfristiger Betrieb der Schaltung

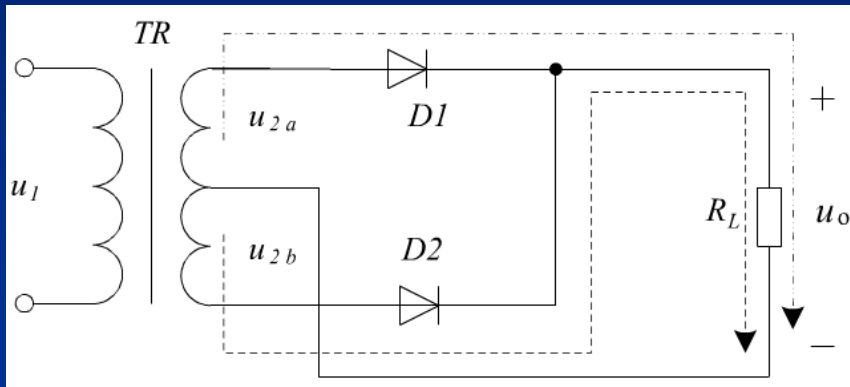
2. System-Struktur und Voltage-Multiplier-Gleichrichter



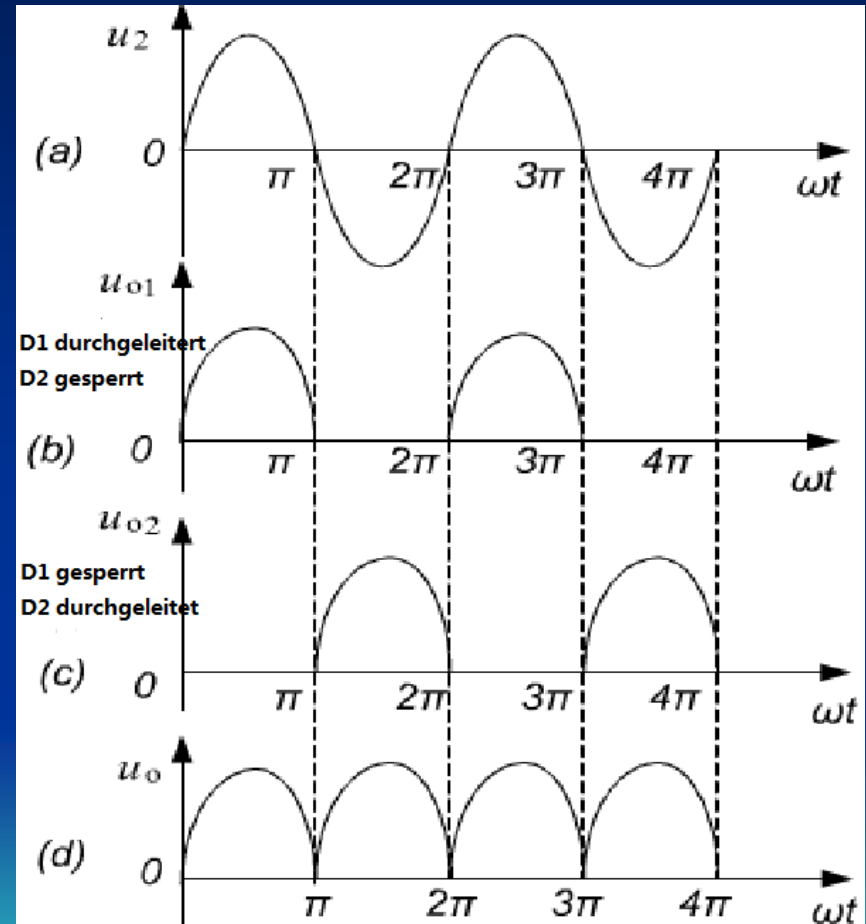
Einweggleichrichter



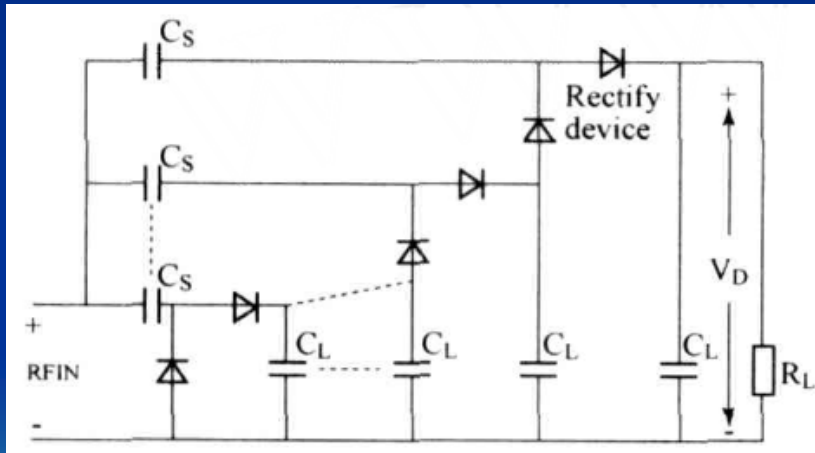
Vollweggleichrichter



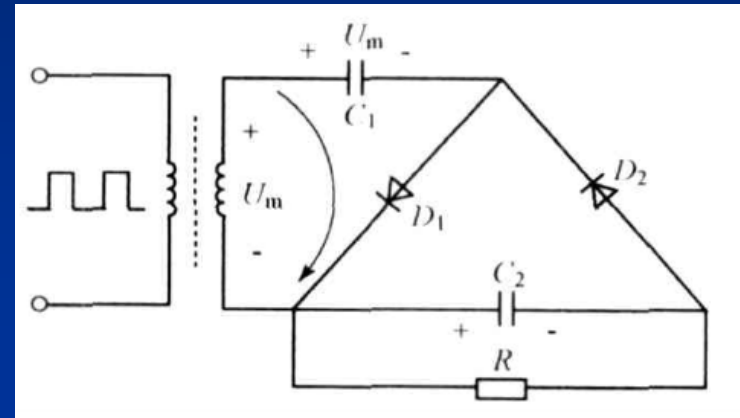
Durch die Leitung entstehen zwei Spannungen u_{2a} und u_{2b} mit gleicher Größe und entgegengesetztem Vorzeichen.



- Voltage-Multiplier Gleichrichter / Kaskadenschaltung



- 1-stufige Voltage-Multiplier / Villard-Schaltung

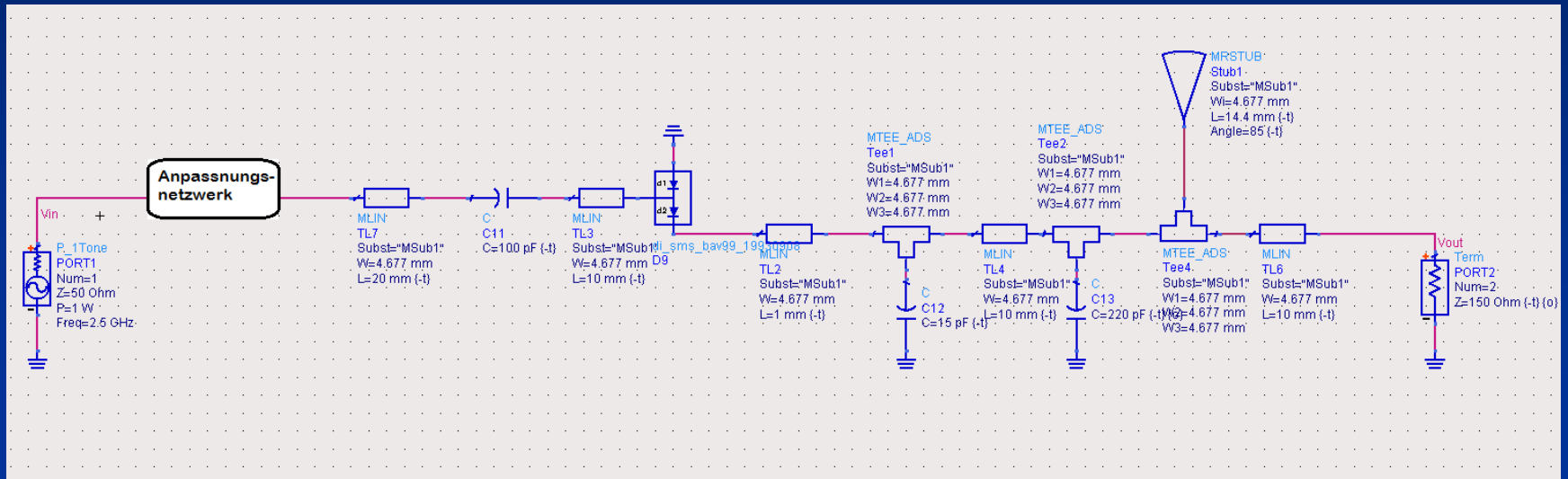


$$U_R (t_{2n} + 0) = 2 \left[1 - \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} \right)^n \right] U_m$$

RF-to-DC Konversionseffizienz

$$\eta = \frac{P_{\text{DC}}}{P_{\text{RF}}} = \frac{U_{\text{L}}^2}{R_{\text{L}} \cdot P_{\text{RF}}}$$

3. Test-Schaltung Simulation



RT Duroid 5870

Component

Type **MLIN** ID **MLIN: MLIN_DEFAULT**

Substrate Parameters

ID **MSUB_DEFAULT**

| | | |
|-------|----------|-----|
| Er | 2.330 | N/A |
| Mur | 1.000 | N/A |
| H | 1.575 | mm |
| Hu | 3.9e+34 | mil |
| T | 0.150 | mil |
| Cond | 4.1e7 | N/A |
| TanD | 9.000e-4 | N/A |
| Rough | 35.000 | um |

Physical

W **4.675860** mm

L **21.282000** mm

Synthesize Analyze

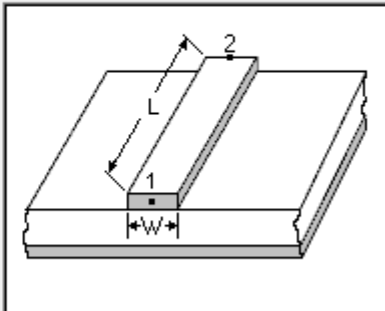
Electrical

Z0 **50.000** Ohm

E_Eff **90.000900** deg

Calculated Results

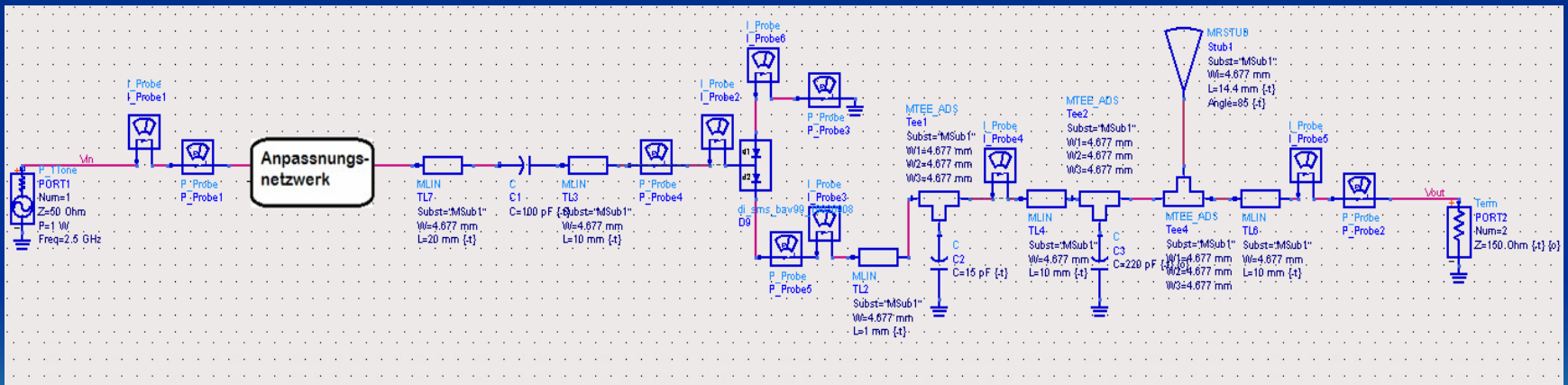
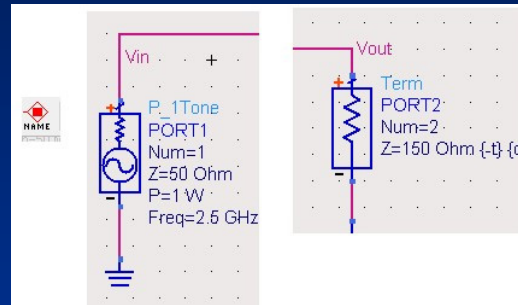
K_Eff = 1.984
A_DB = 0.017
SkinDepth = 1.572



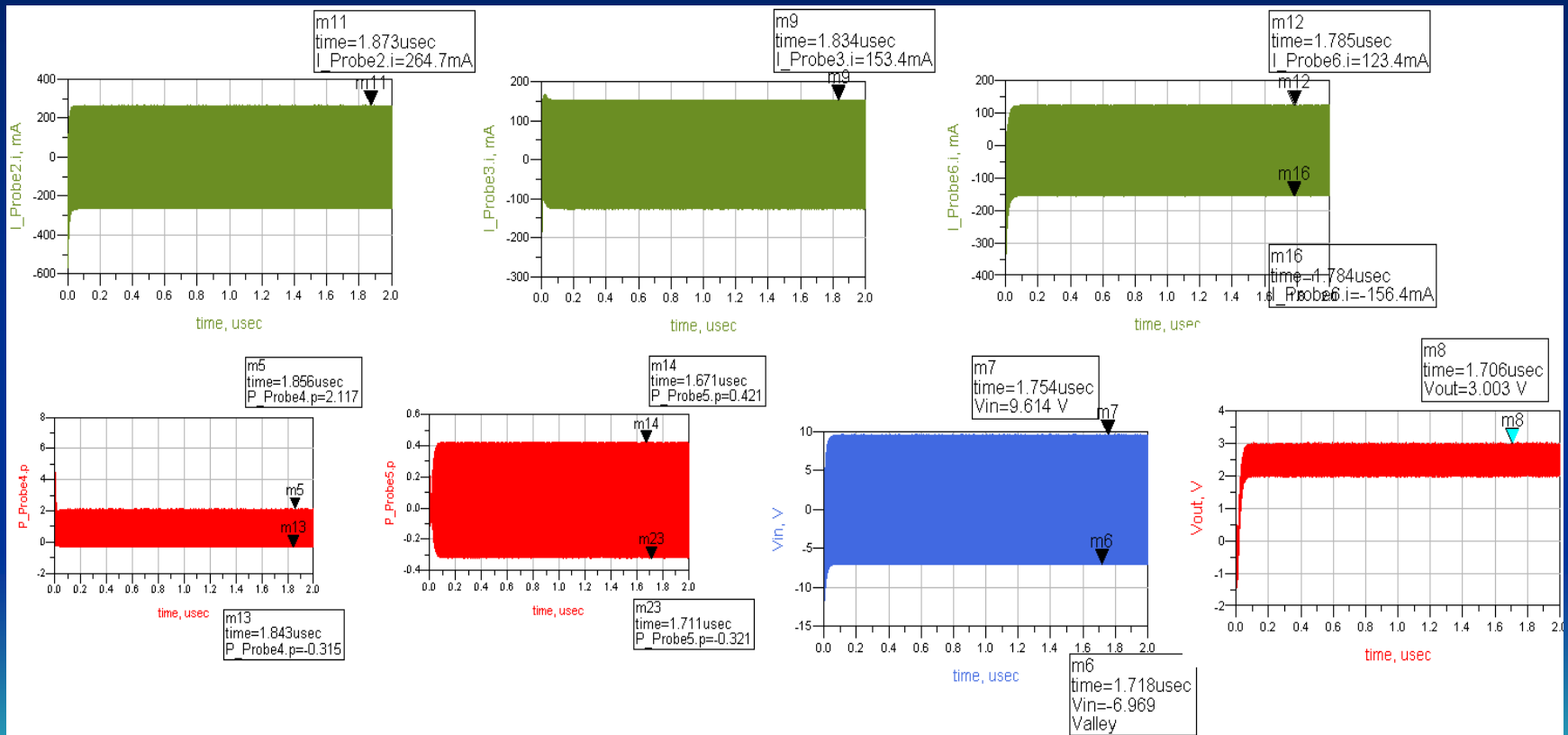
Die Test-Schaltung mit eingesetzten Probe-Komponenten

TRANSIENT

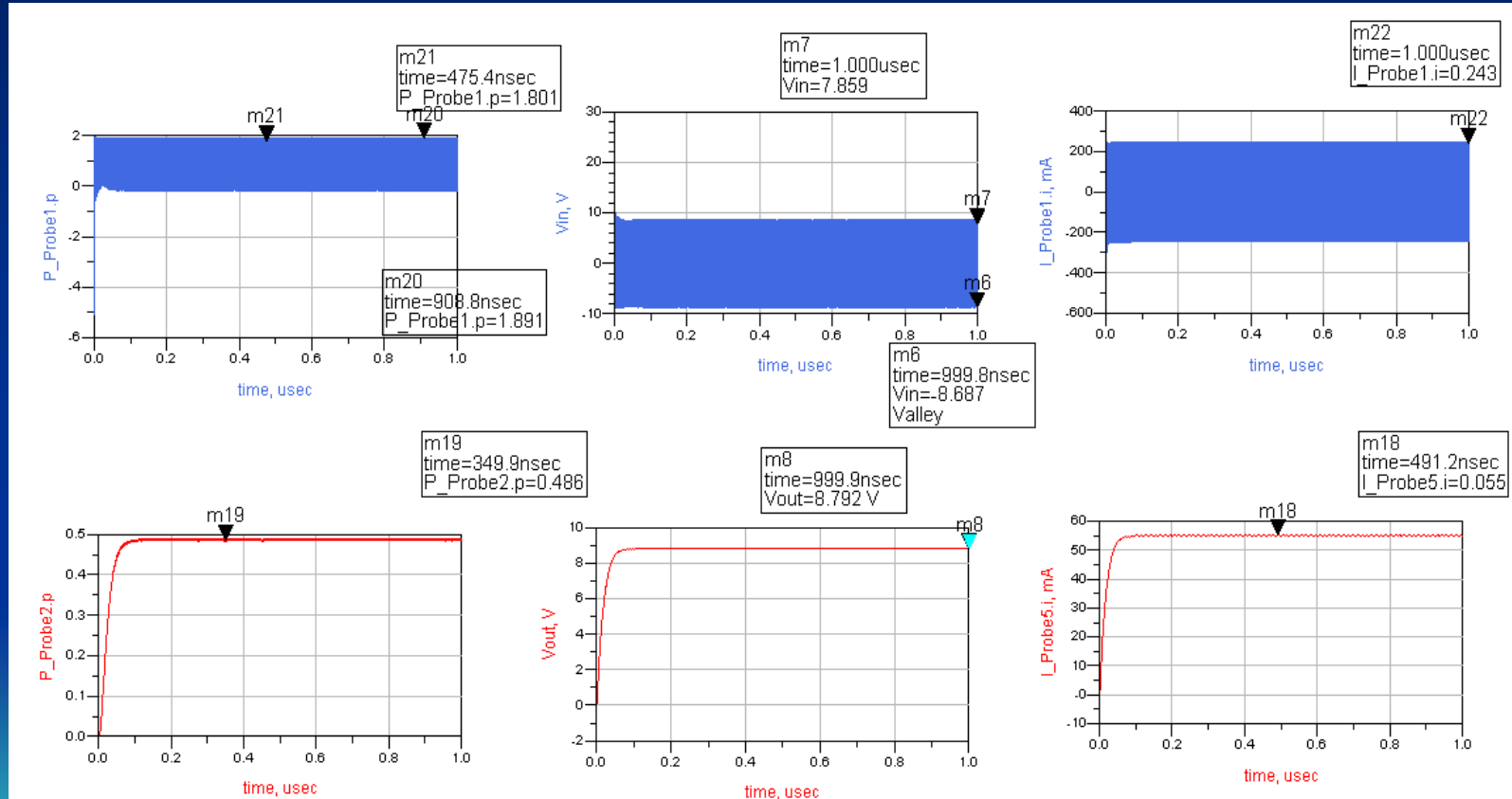
Tran
 Tran1
 StartTime=0 usec
 StopTime=2 usec
 MaxTimeStep=5 nsec
 Freq[1]=2.5 GHz
 Order[1]=4



Die an dem Dioden-Paar ermittelten Messwerte zur Bestimmung der geeigneten Diode



Die am Ein- und Ausgang der Schaltung ermittelten Messwerte



“Tuning,, aller Bauteile,
um die relevanten Bauteile zu ermitteln.

The screenshot shows the 'Tune Parameters' dialog box in a software application. The dialog is titled 'Tune Parameters' and has a 'Simulate' section with a dropdown menu set to 'While Slider Moves' and a 'Tune' button. Below this is a 'Parameters' section with 'Include Opt Params' and 'Enable/Disable...' buttons. There is also a 'Snap Slider to Step' checkbox. The 'Traces and Values' section contains 'Store...', 'Recall...', 'Trace Visibility...', and 'Reset Values' buttons. At the bottom of this section are 'Update Schematic', 'Close', and 'Help' buttons.

The main area of the dialog is titled 'HB' and contains a table of parameters for tuning. Each parameter has a value field, a max field, a slider, and a scale dropdown menu.

| Parameter | Unit | Value | Max | Min | Step | Scale |
|-----------|-------|-------|------|-----|------|-------|
| C1.C | (pF) | 100 | 500 | 0.5 | 0.1 | Lin |
| C2.C | (pF) | 15 | 100 | 0.5 | 0.1 | Lin |
| C3.C | (pF) | 220 | 705 | 150 | 47 | Lin |
| PORT2.Z | (Ohm) | 160 | 5000 | 50 | 5 | Lin |
| TL7.L | (mm) | 20 | 20 | 1 | 0.01 | Lin |
| TL3.L | (mm) | 10 | 20 | 1 | 0.01 | Lin |
| TL2.L | (mm) | 1 | 20 | 1 | 0.01 | Lin |
| TL4.L | (mm) | 10 | 15 | 5 | 0.1 | Lin |
| TL6.L | (mm) | 10 | 15 | 1 | 0.1 | Lin |

Optimierung durchführen und Einstellungen von R_L und $TL2$ ermitteln, ohne Anpassungen.

- V_{out} : 8.5V ~ 9V
- P_{out} : 0,5W ~ 0,7W
- $C3$: 100pF ~ 500pF
- $TL2$: 0mm ~ 20mm
- Es gilt:
$$P_{out} = \frac{U_{out}^2}{R_L}$$
- R_L : 103.2 Ohm ~ 162 Ohm
- Die optimierten Werte:
- $C3 = 250\text{pF}$ --- 220pF ,
- $R_L = 160\text{ Ohm}$, $TL2 = 5\text{mm}$
- (für HSMS2822)

The image shows two panels from a software interface. The left panel, titled 'OPTIM', contains the following settings:

- Optim
- Optim1
- OptimType=Random
- MaxIters=50
- DesiredError=0.0
- StatusLevel=4
- FinalAnalysis="None"
- NormalizeGoals=no
- SetBestValues=yes
- SaveSolns=no
- SaveGoals=no
- SaveOptimVars=yes
- UpdateDataset=yes
- SaveNominal=no
- SaveAllIterations=no
- UseAllOptVars=yes
- UseAllGoals=yes

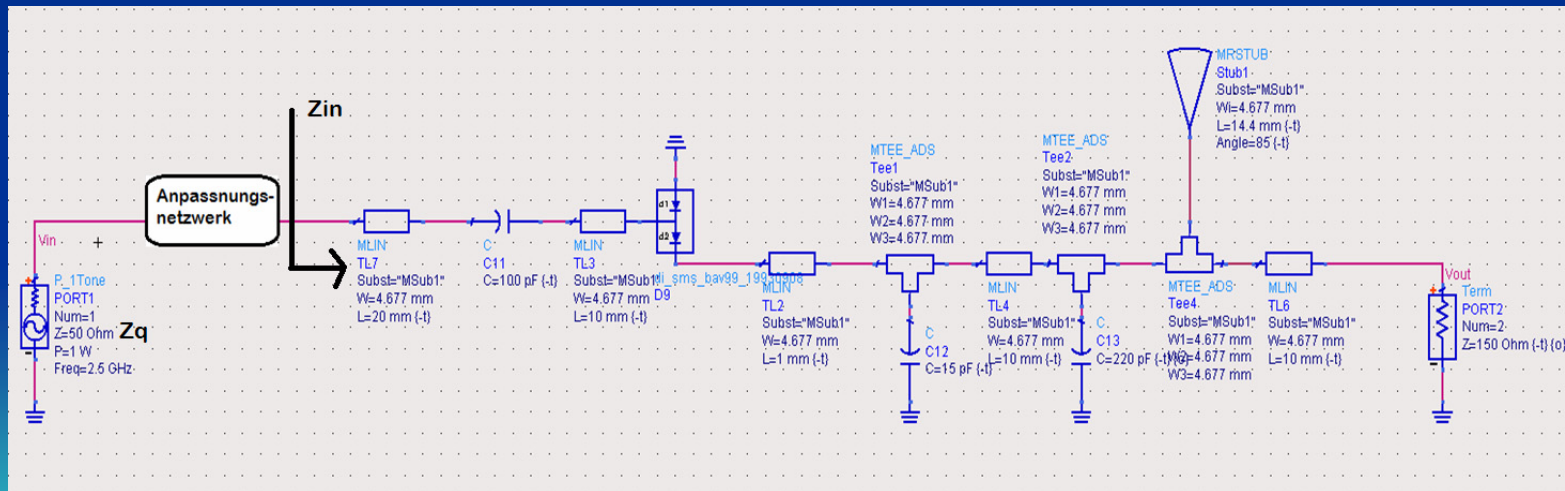
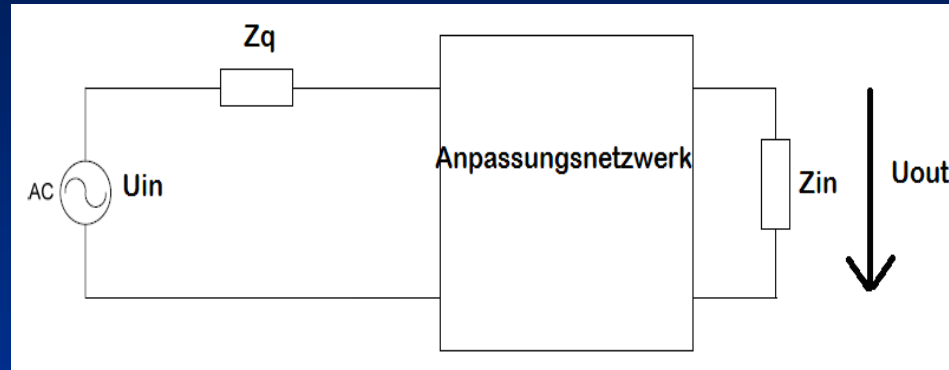
The right panel, titled 'GOAL', contains the following settings:

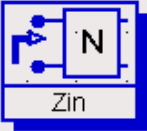
- Goal
- OptimGoal1
- Expr="Vout"
- SimInstanceName="Tran1"
- Weight=1

Below these panels is a dialog box titled 'Goals for 'nominal' type optimization:1'. It has the following fields and options:

- Goal: OptimGoal1
- Instance Name (name[<start:stop>]):
- Select Parameter: Expr="Vout"
- SimInstanceName="Tran1"
- Min=8.5V
- Max=9V
- Weight=1
- RangeVar[1]=
- RangeMin[1]=
- RangeMax[1]=
- Measurement Equations: Pout, VoltGain1, Zin1, DCtoRF1, PfcTran1, PwrGain1
- Selection: Vout
- Display parameter on schematic
- Buttons: Add, Cut, Paste, Component Options...
- Expr : Goal expression
- Buttons: OK, Apply, Cancel, Reset, Help

Bestimmung der Eingangsimpedanz Z_{in} und S_{11} mit den sog. „Large Signal S-Parametern“ / LSSP

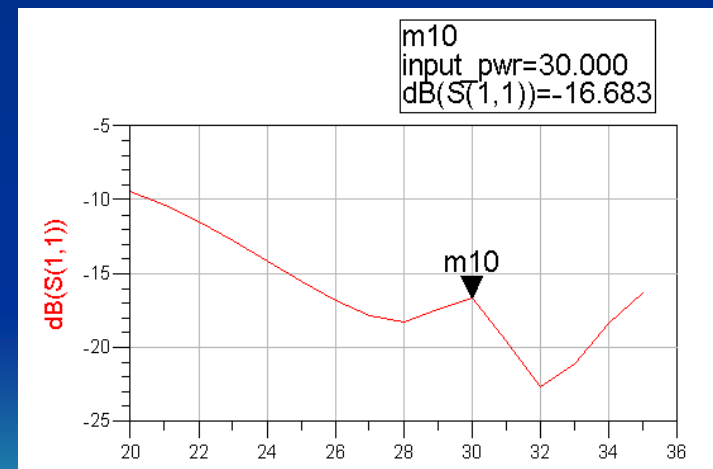
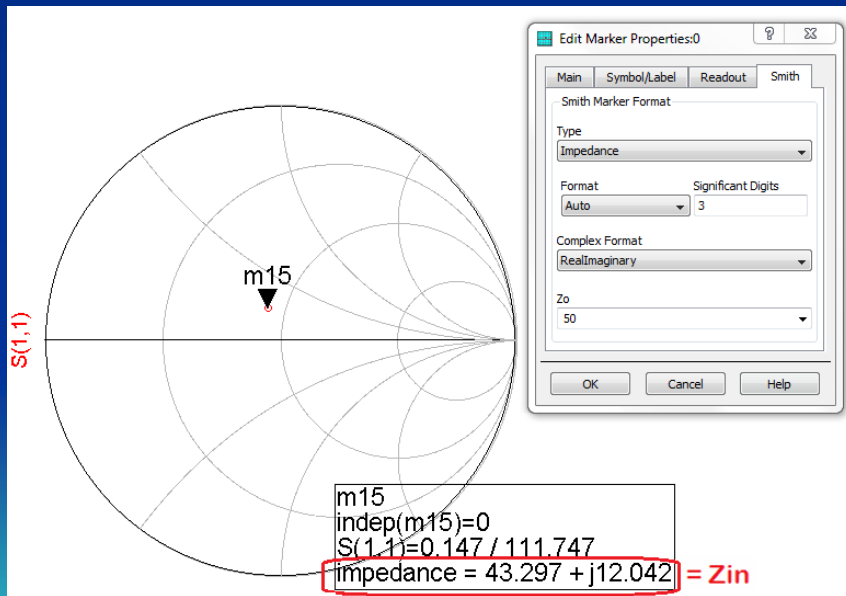




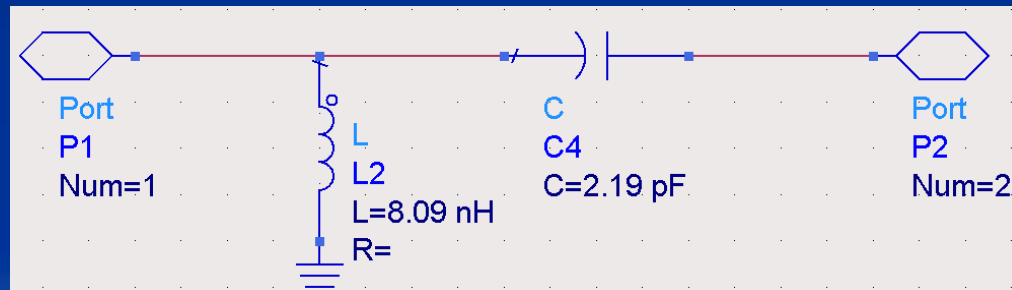
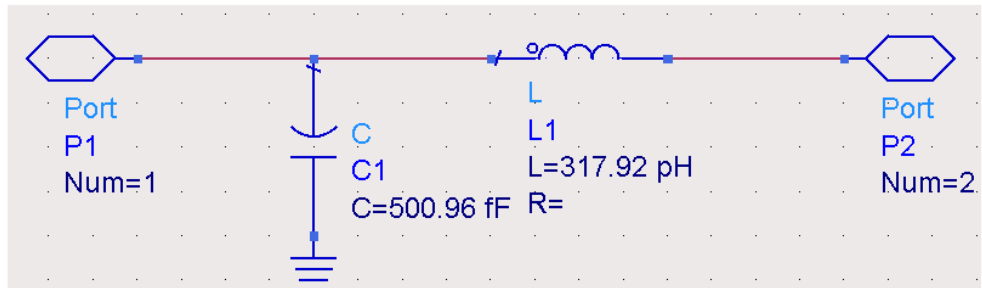
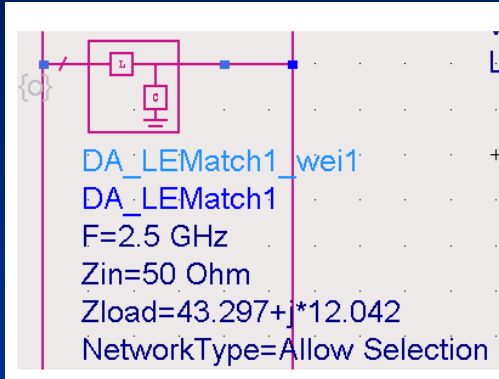
Zin
Zin1
Zin1=zin(S11,50)



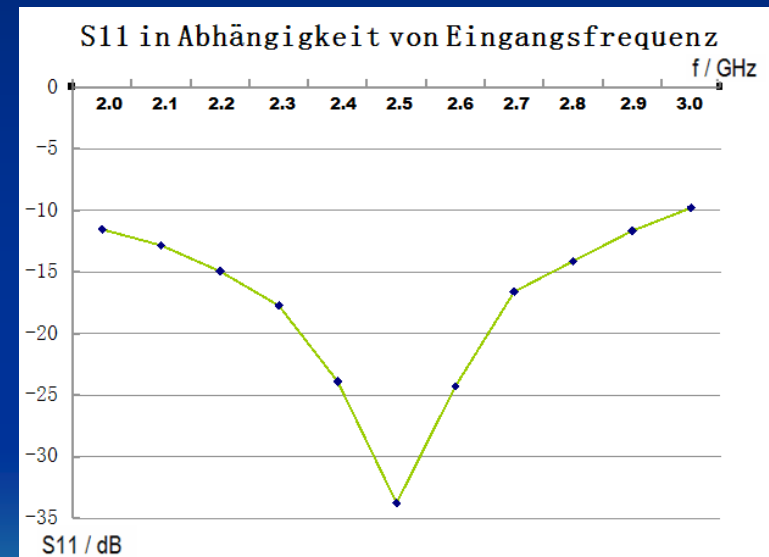
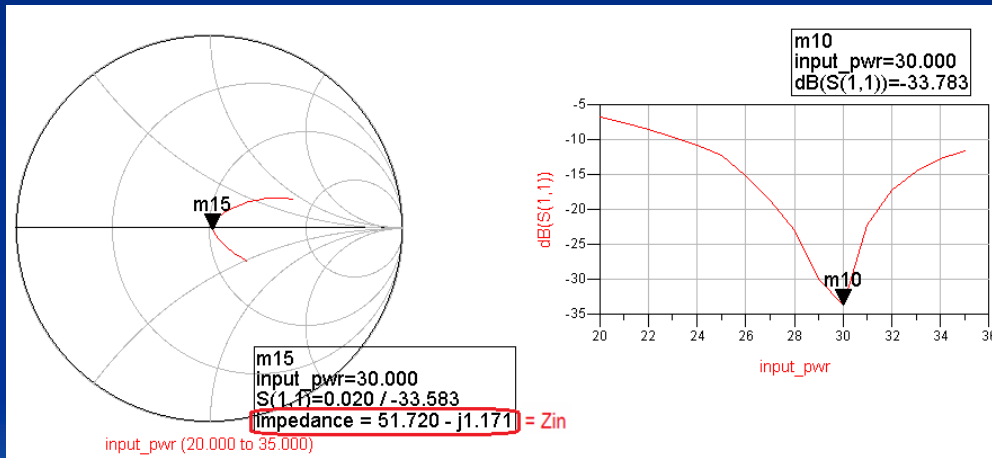
LSSP
LSSP
HB1
Freq[1]=2.5 GHz
Order[1]=7
LSSP_FreqAtPort[1]=2.5 GHz



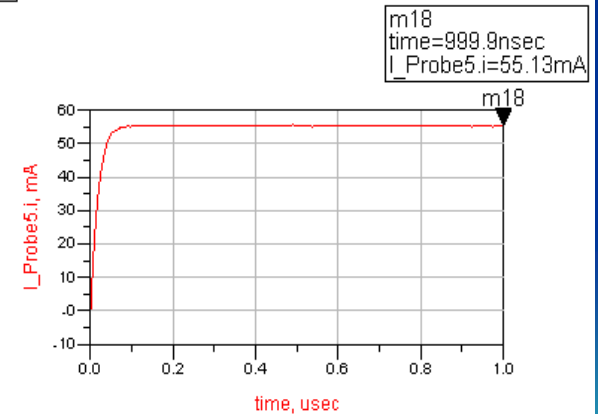
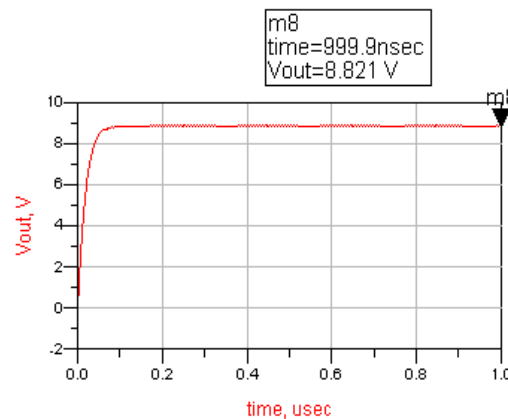
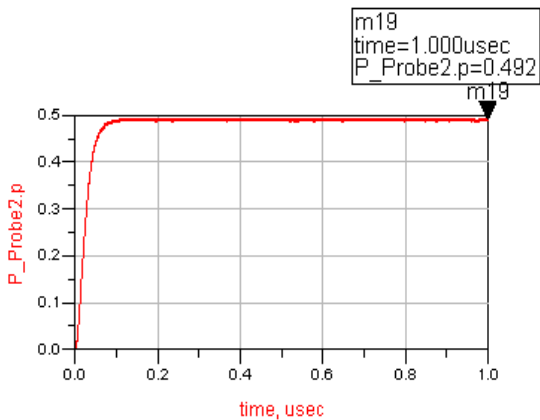
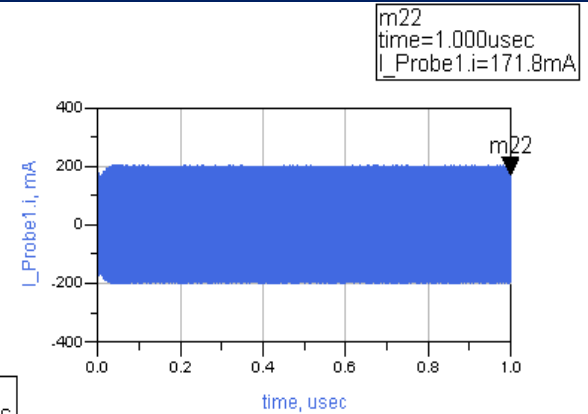
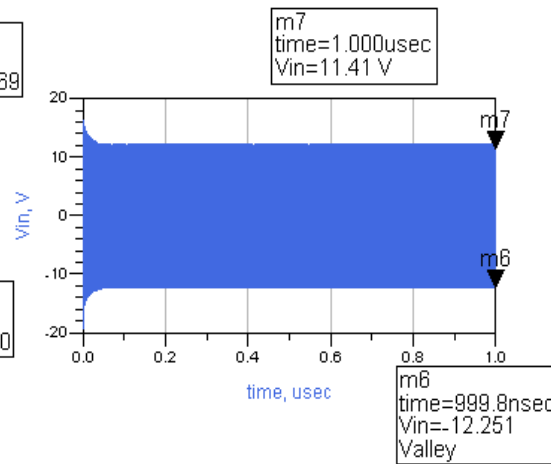
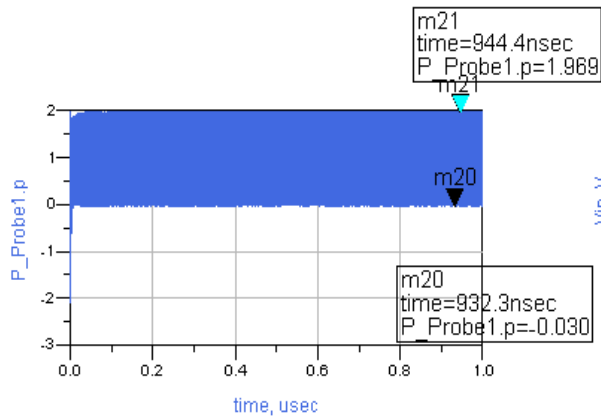
Smart Komponente zur L-C Anpassung



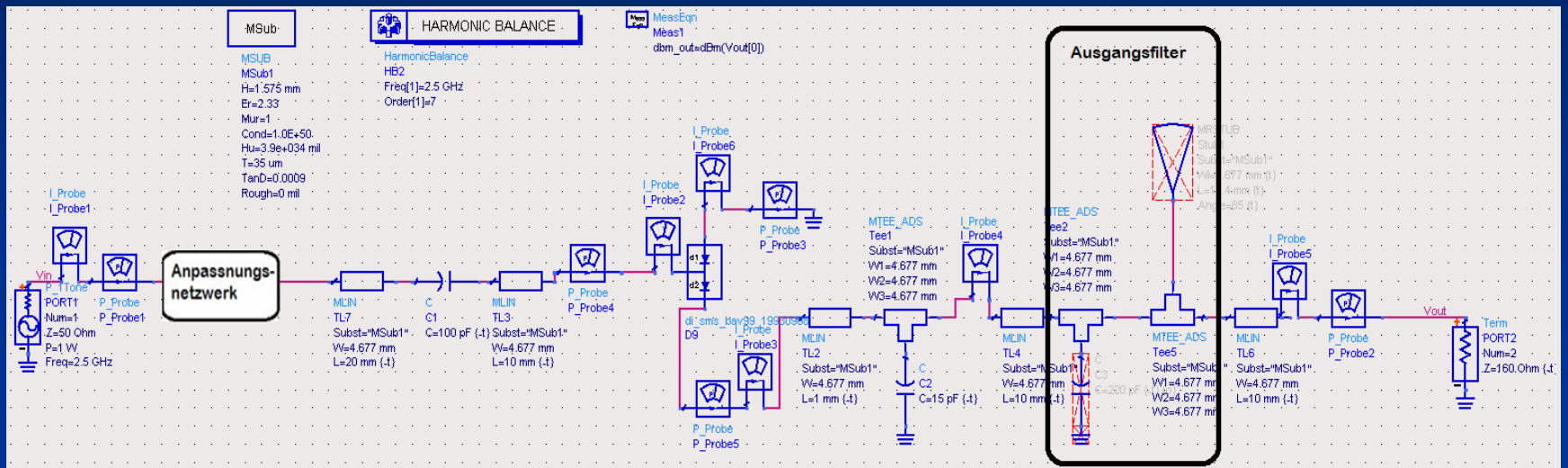
Messwerte bei Anpassung für $P_{in}=30\text{dBm}$



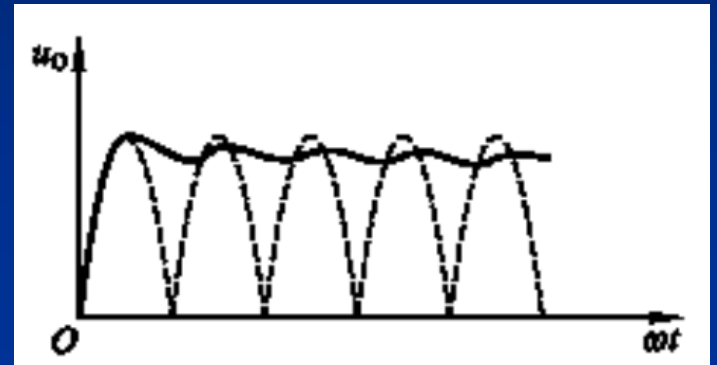
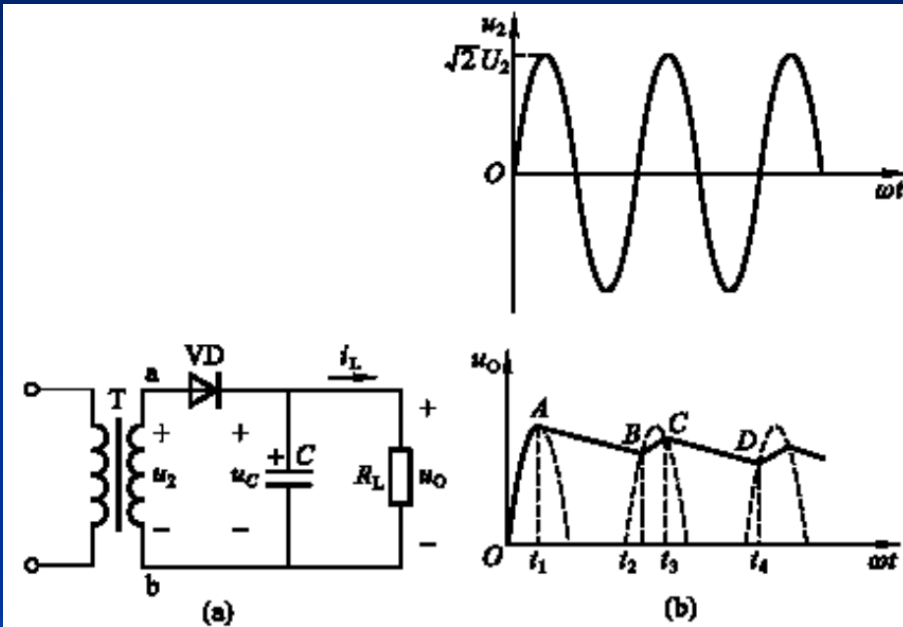
Messwerte bei der Anpassung



Bestimmung des Ausgangsfilters

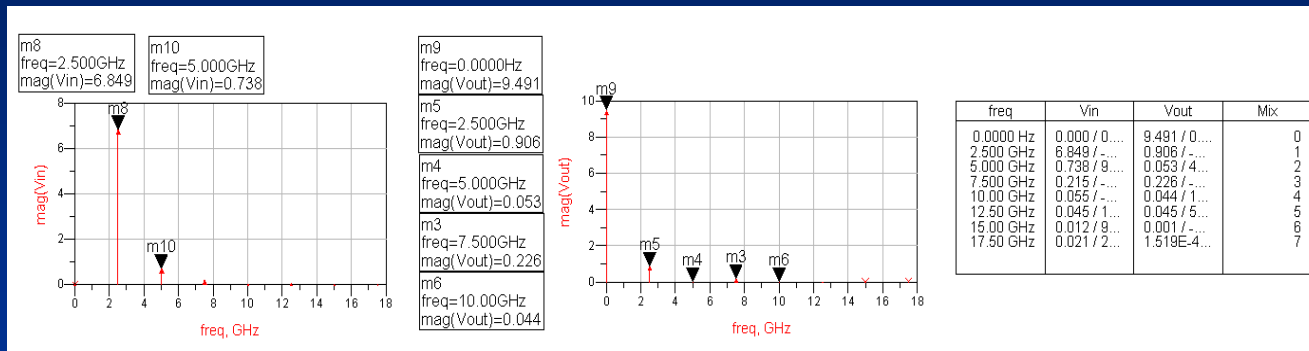


Kapazitätsfilter

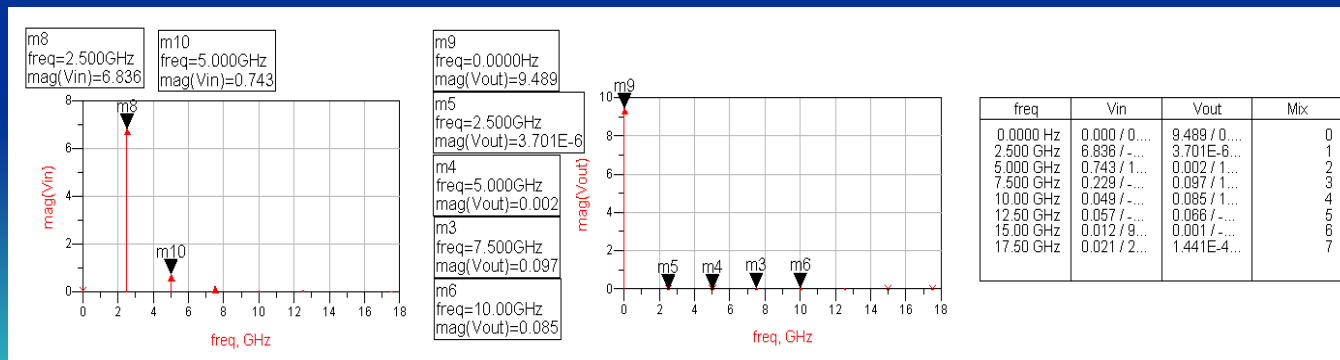


„Harmonic Balance“ Simulation, Bestimmung der radialen Stubs

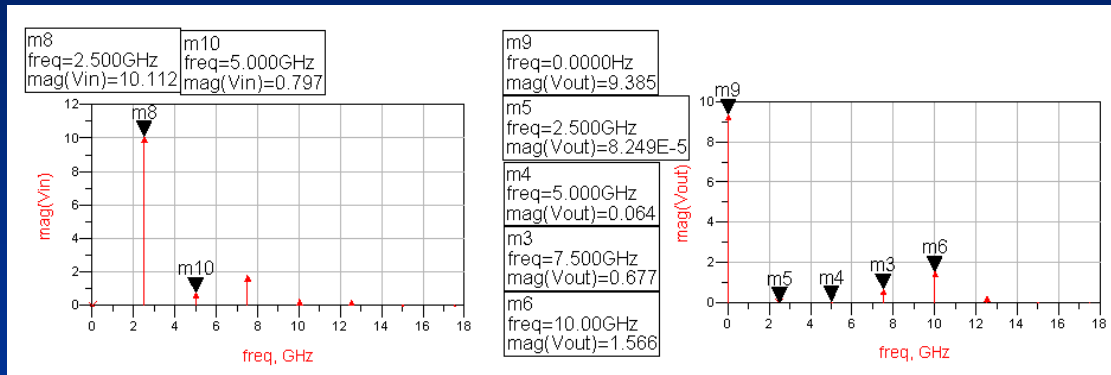
- Für Diode BAV99:



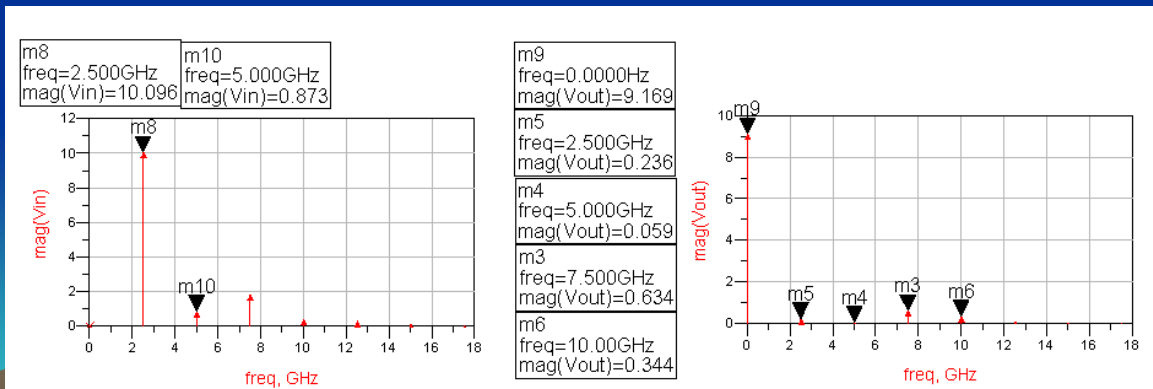
- Optimierter Stub1: L=14.4mm, B=4,677mm, Winkel=85°

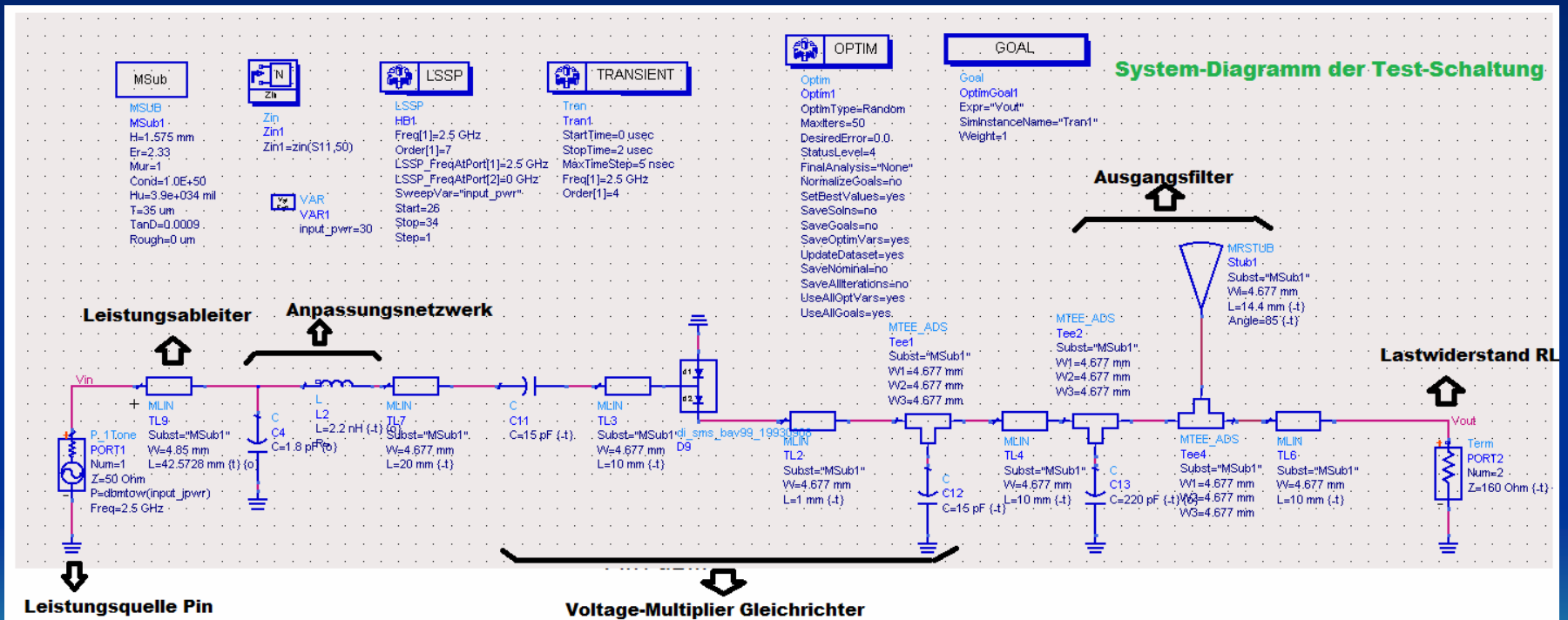


- Gleiche Daten des Stubs1 für die Diode HSMS-2812:



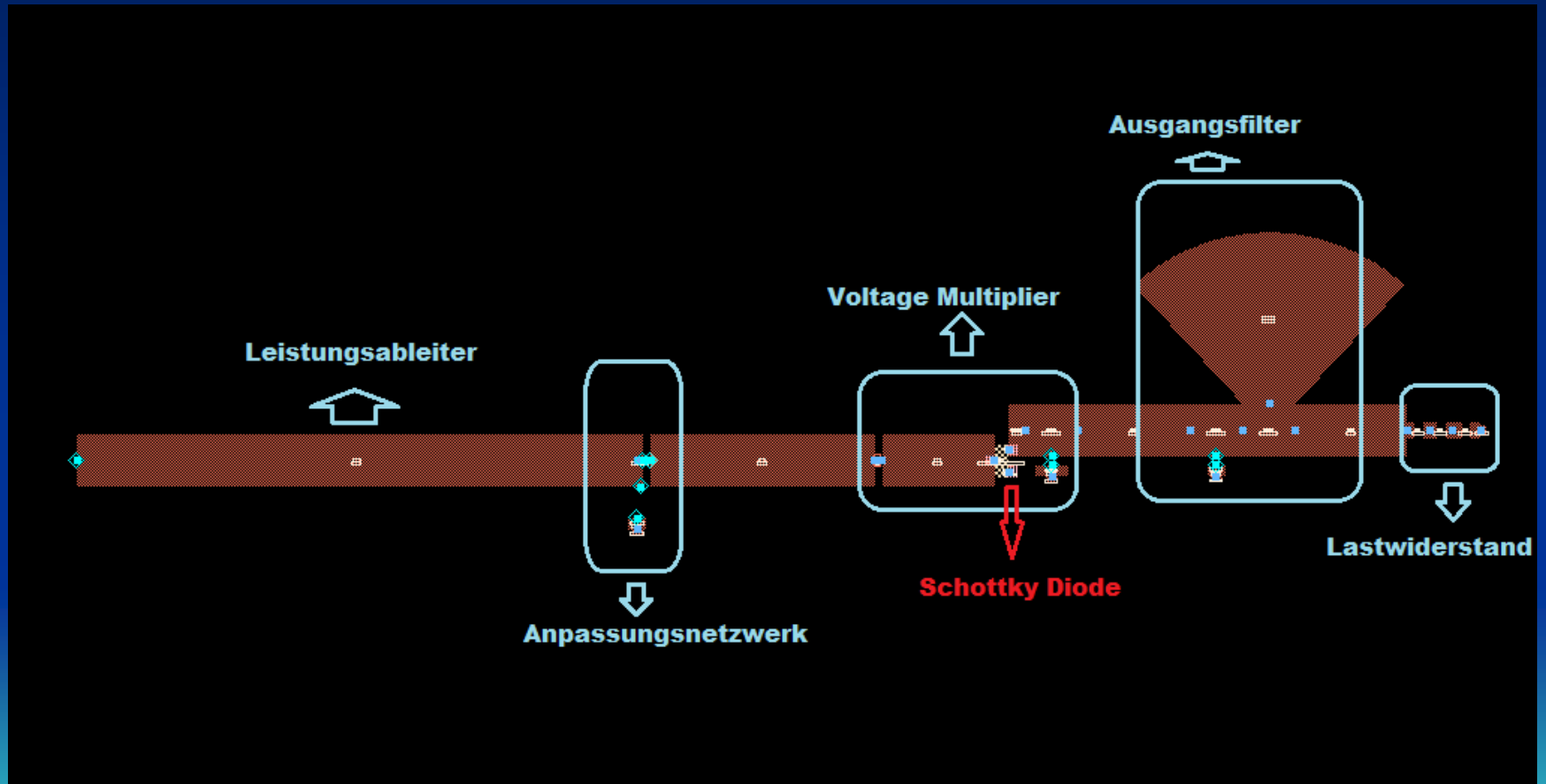
- Optimierung für HSMS-2812: L=10.8mm



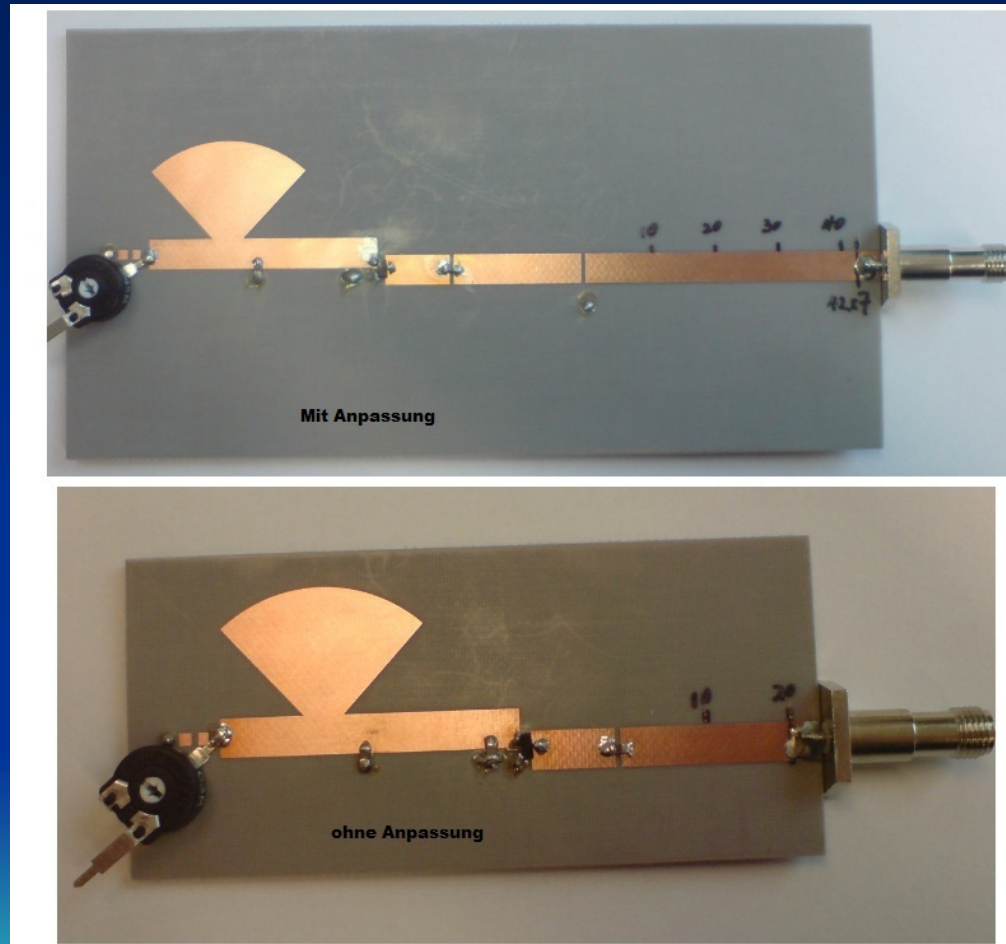


Rectifier for Microwave Power RF-to-DC Conversion

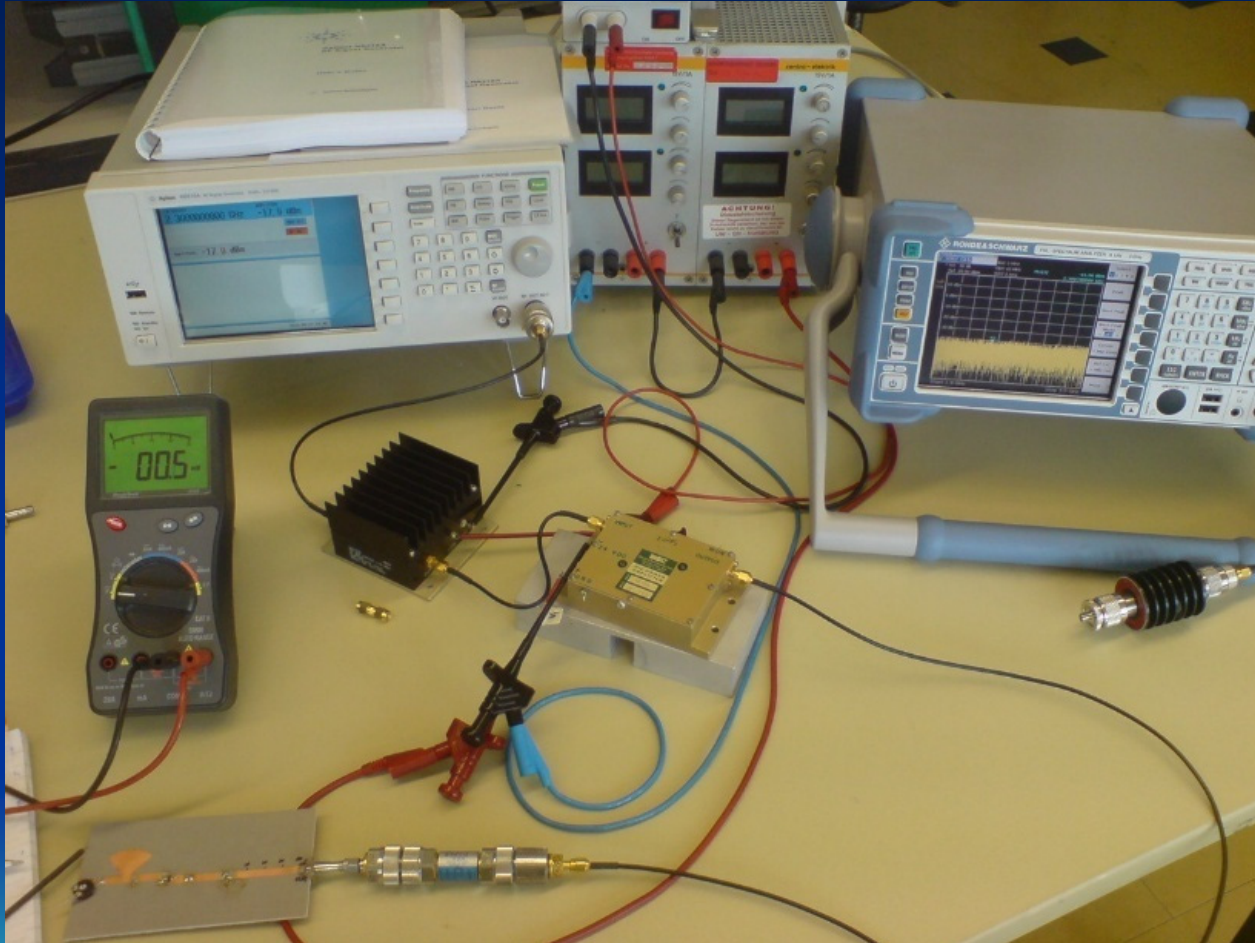
Schaltungslayout der Test-Schaltung



4. Die hergestellten Leiterplatten

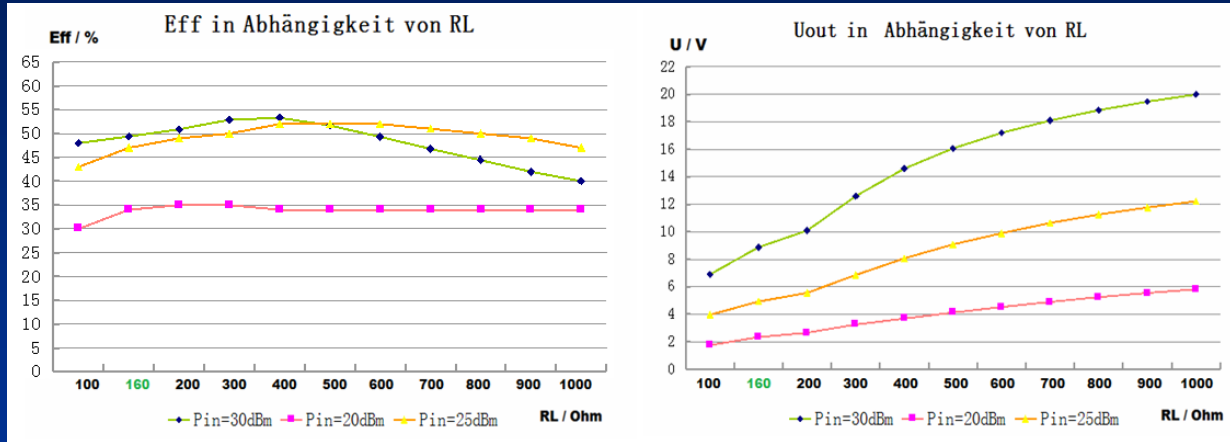


5. Der Test der gesamten Schaltung

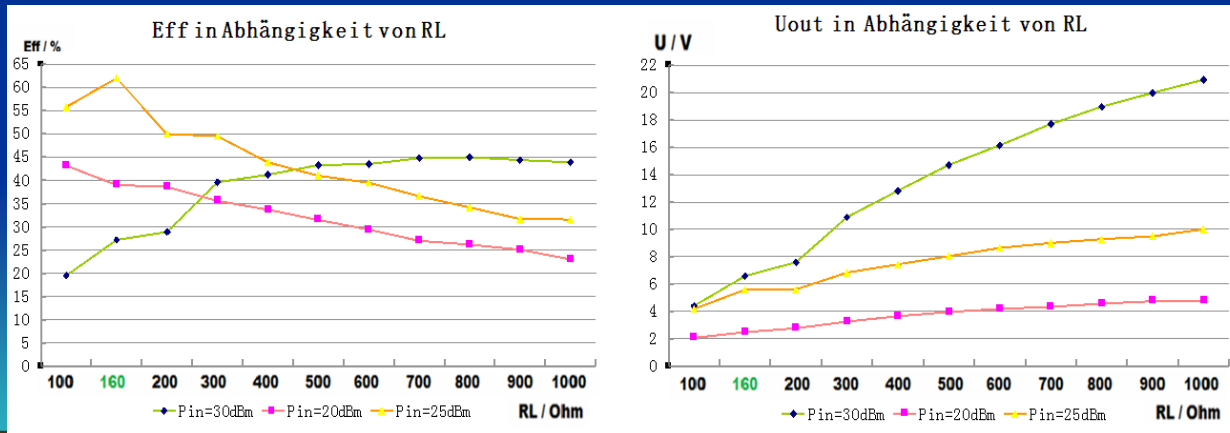


Simulationen und Messungen der Schaltung mit Anpassung

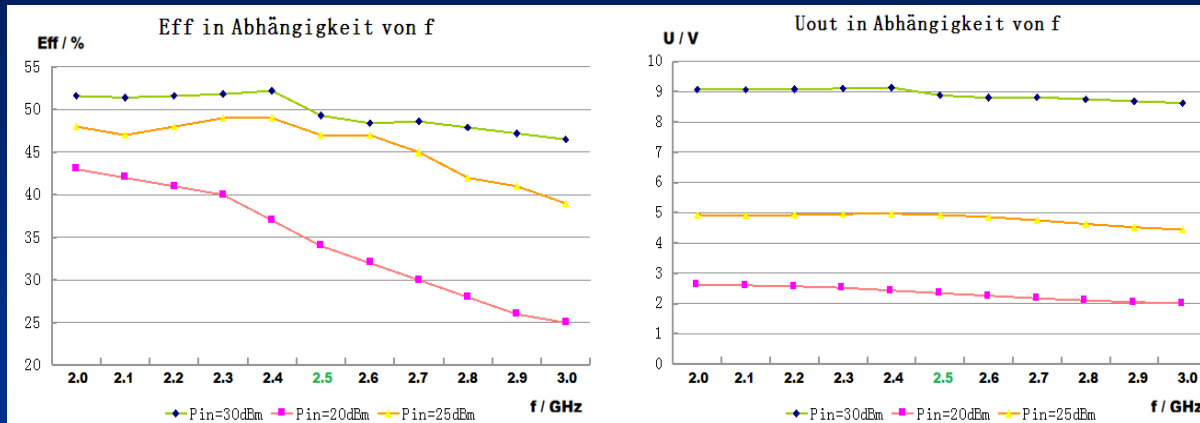
- Simuliertes E_{ff} und U_{out} in Abhängigkeit von R_L mit festen $C4$, $L2$, $TL2$ und f



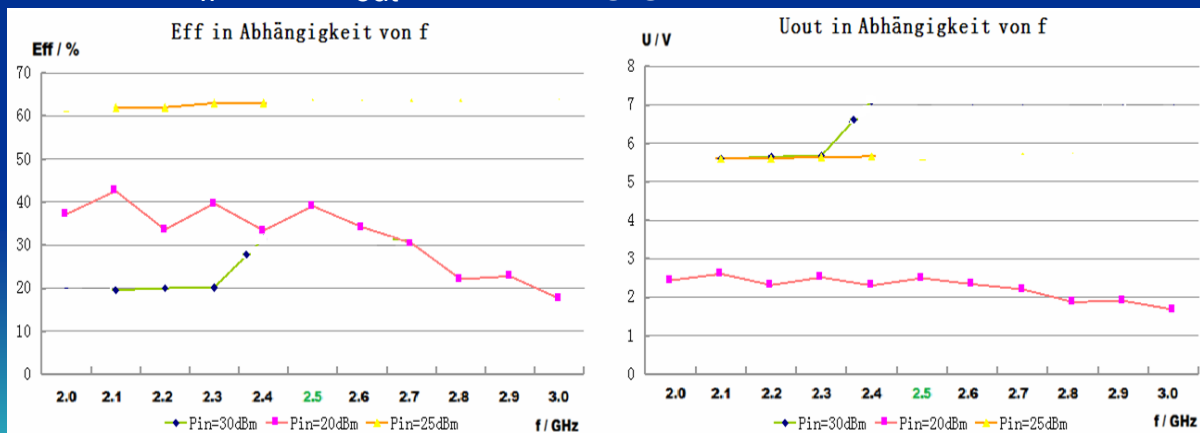
- Gemessenes E_{ff} und U_{out} in Abhängigkeit von R_L mit festen $C4$, $L2$, $TL2$ und f



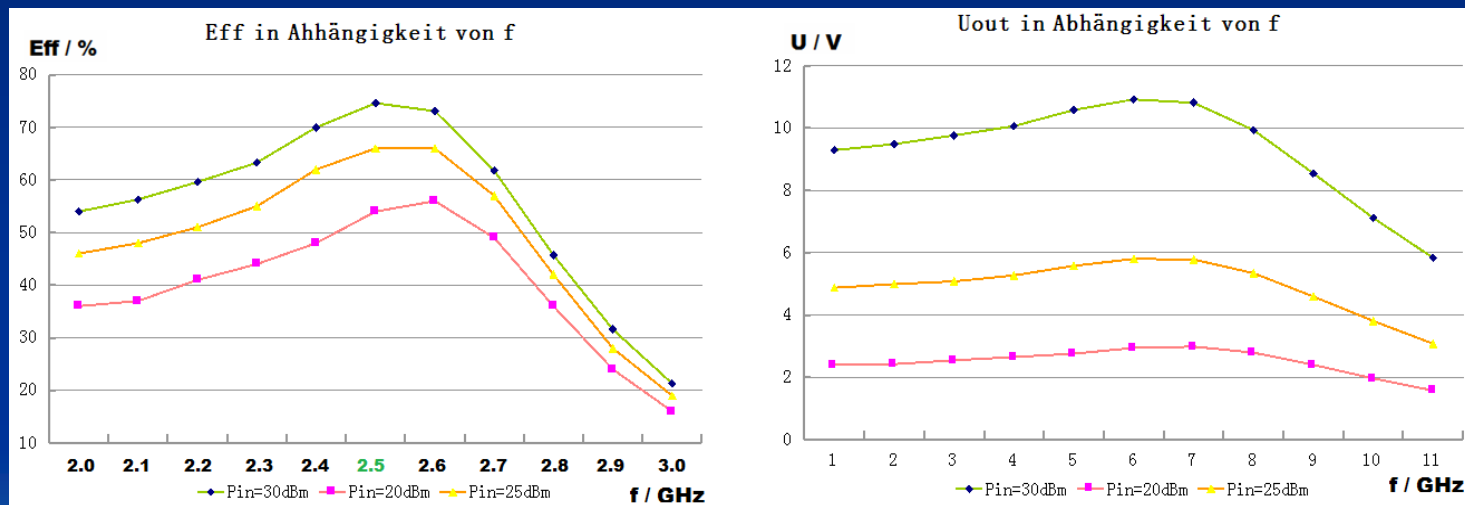
- Simuliertes E_{ff} und U_{out} in Abhängigkeit von f mit festem $C4, L2, TL2$ und R_L



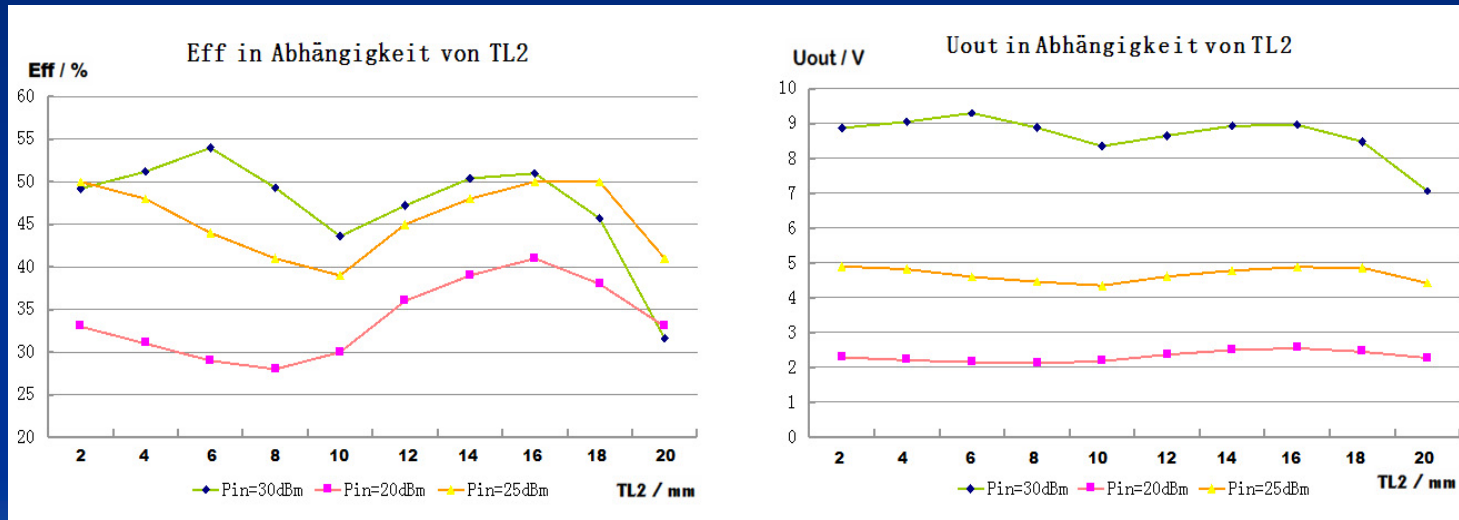
- Gemessenes E_{ff} und U_{out} in Abhängigkeit von f mit festem $C4, L2, TL2$ und R_L



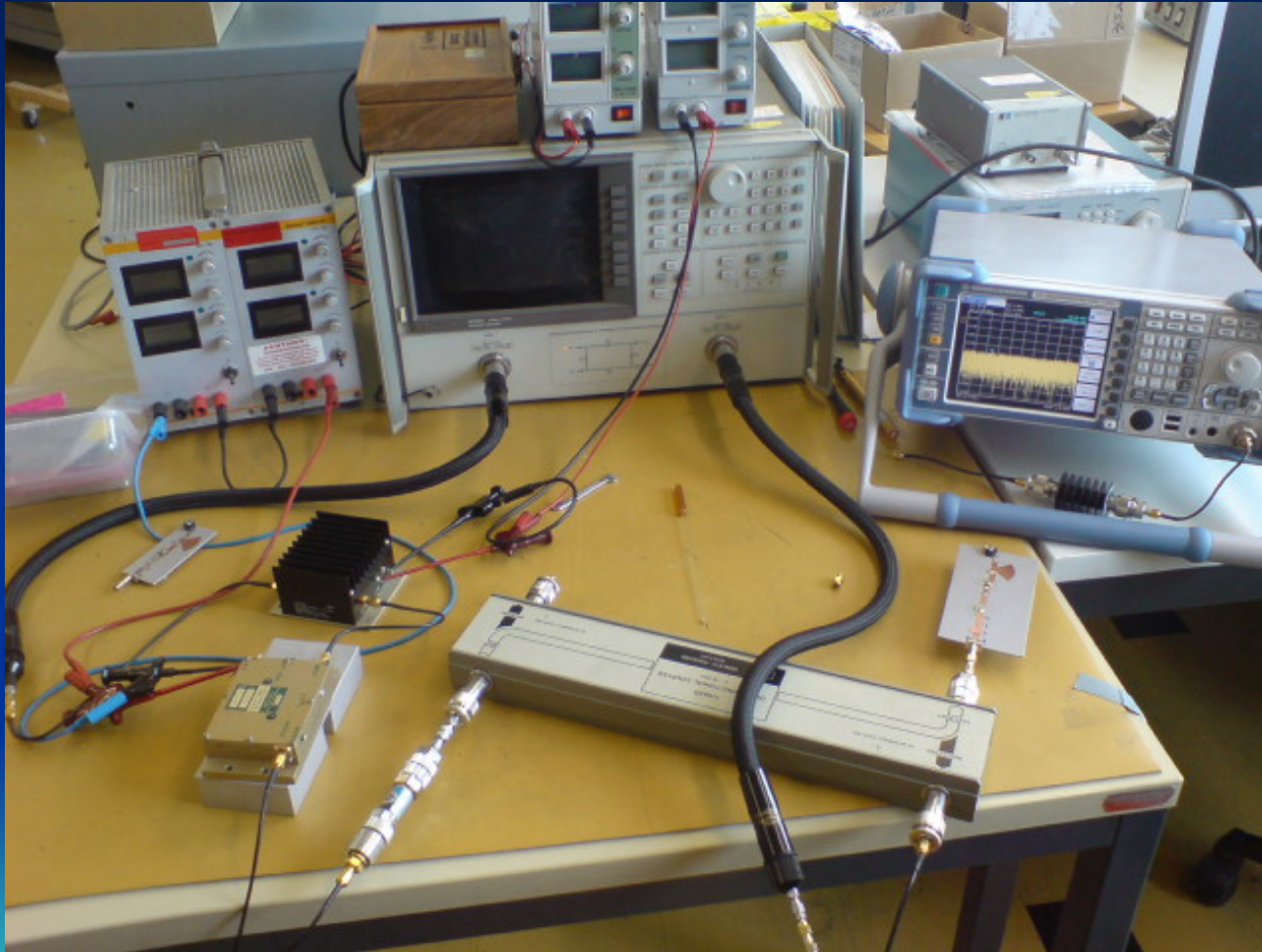
- Simuliertes E_{ff} und U_{out} in Abhängigkeit von f für die Diode BAV99 mit festem $C4$, $L2$, $TL2$ und R_L
 (Deutliche Anpassungsauswirkung)



- Simuliertes E_{ff} und U_{out} in Abhängigkeit von $TL2$ ohne Anpassung der Schaltung



Messschaltung zur Bestimmung des Reflektionsfaktors



Rectifier for Microwave Power RF-to-DC Conversion

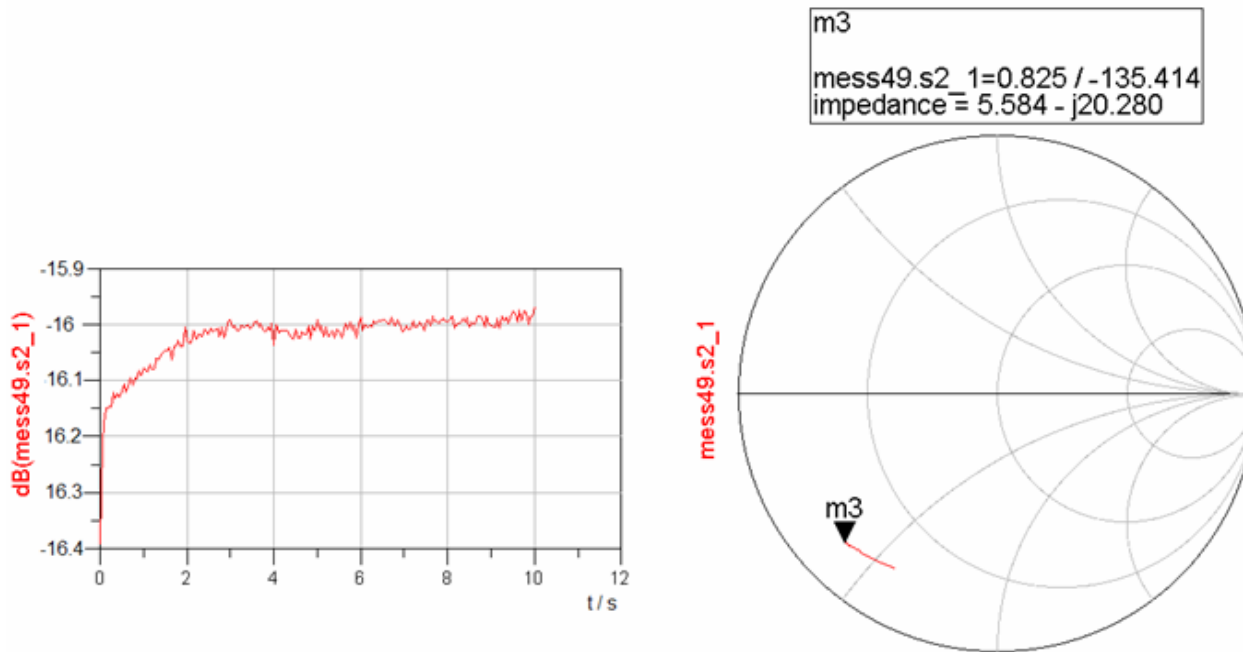


Abb.5d S_{11} für die Schaltung mit Anpassungsbereich

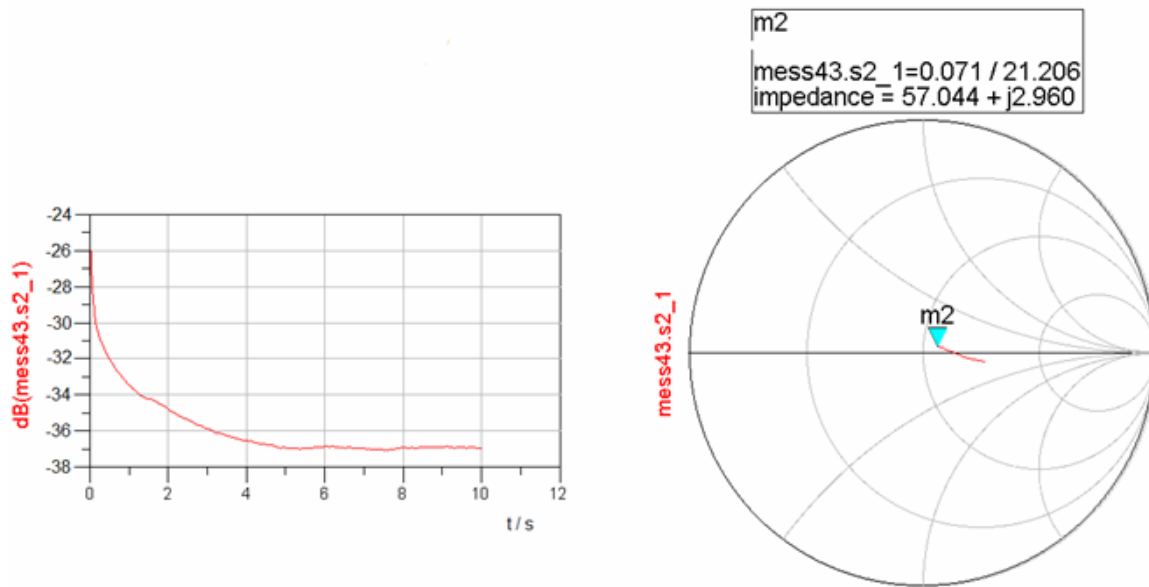
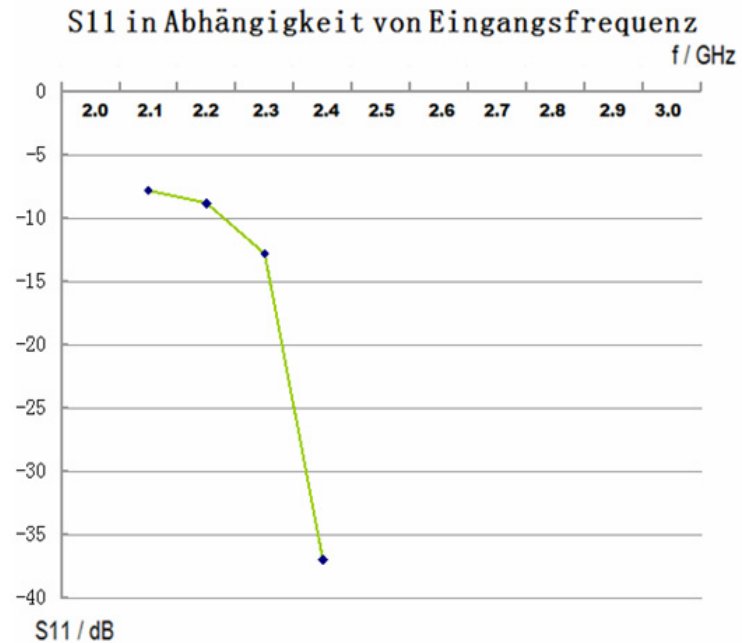


Abb. 5e S_{11} für die Schaltung mit Anpassungsbereich mit optimierter Anpassung

Frequenzabhängiges S_{11} für die Schaltung mit Anpassung und mit festgestelltem Blech

| f/GHz | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.4 |
|--------|------|------|-------|-----|
| S11/dB | -7.8 | -8.8 | -12.8 | -37 |

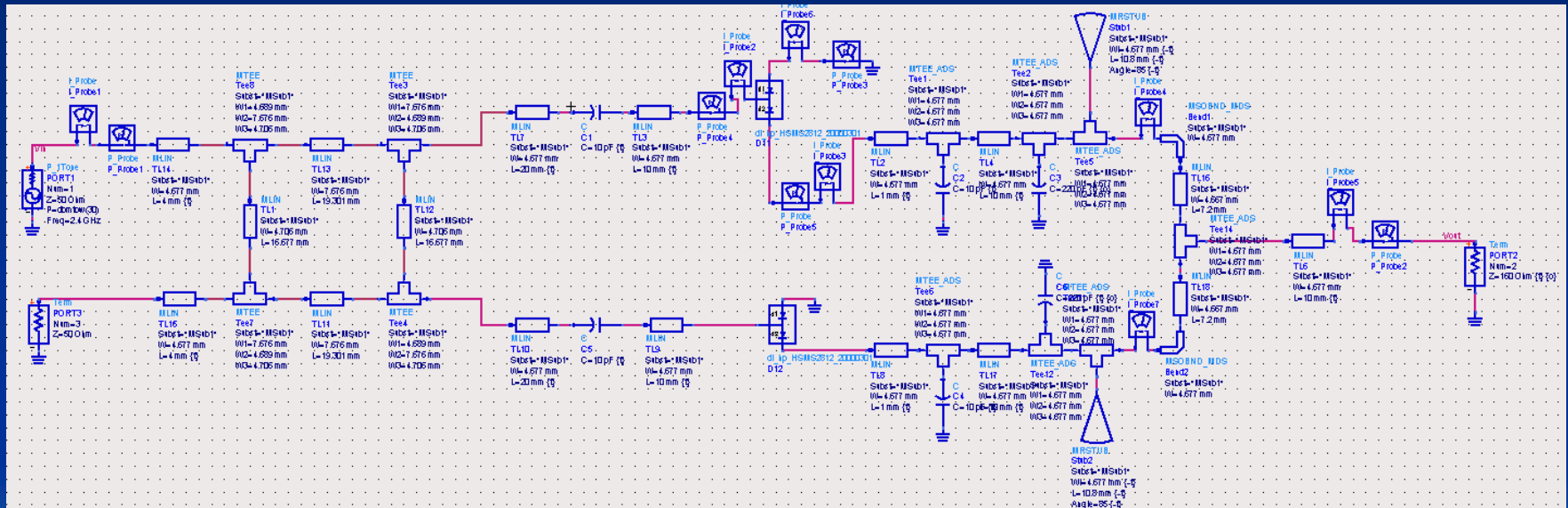
Tab.5c S_{11} in der Abhängigkeit von f



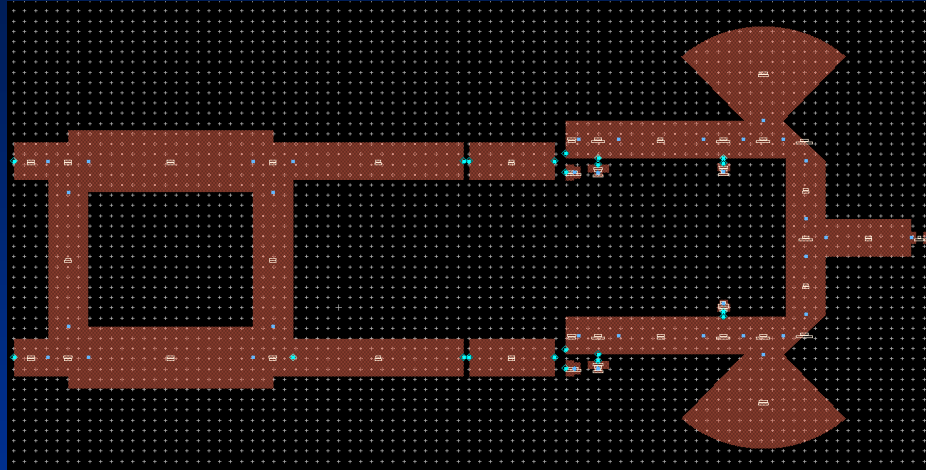
Graf.5c S_{11} in der Abhängigkeit von f

6. Herstellung der parallelen Gleichrichterschaltung

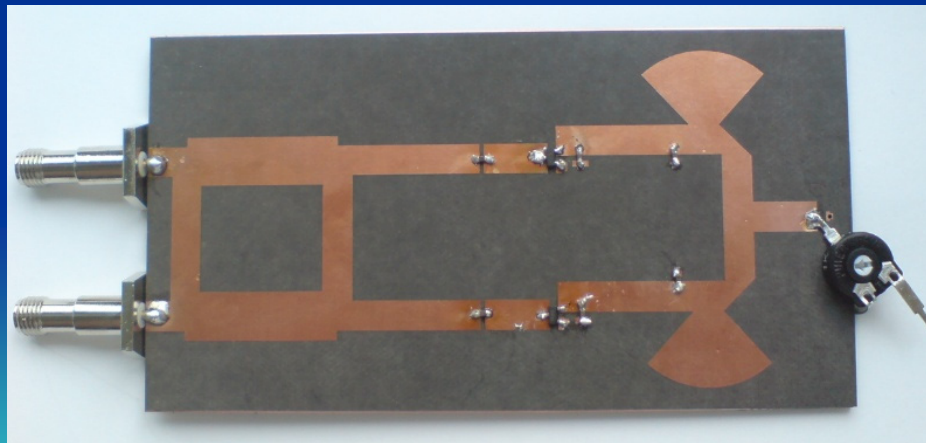
- Parallele Gleichrichterschaltung mit Branch-Line Koppler



Schaltungslayout der parallelen Gleichrichterschaltung



Parallele Gleichrichterschaltung

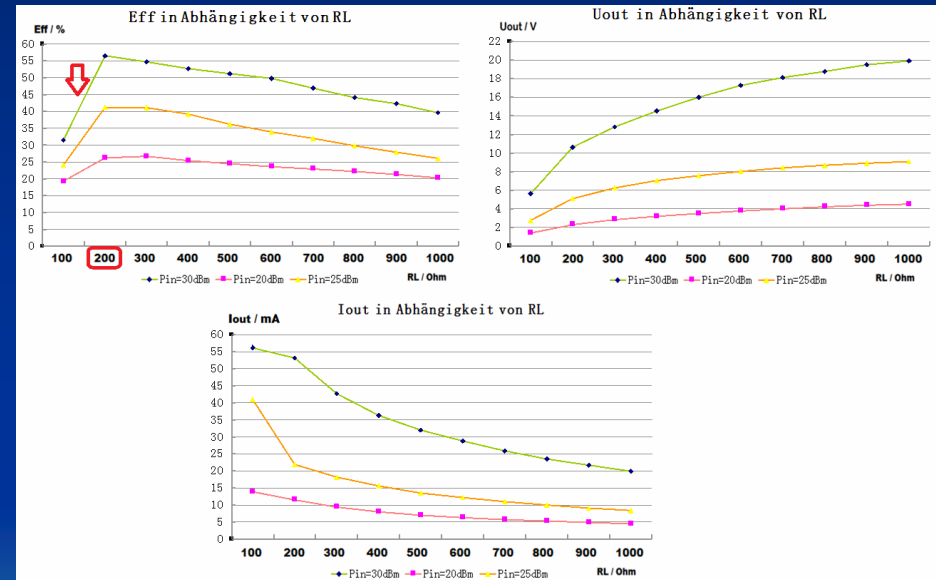
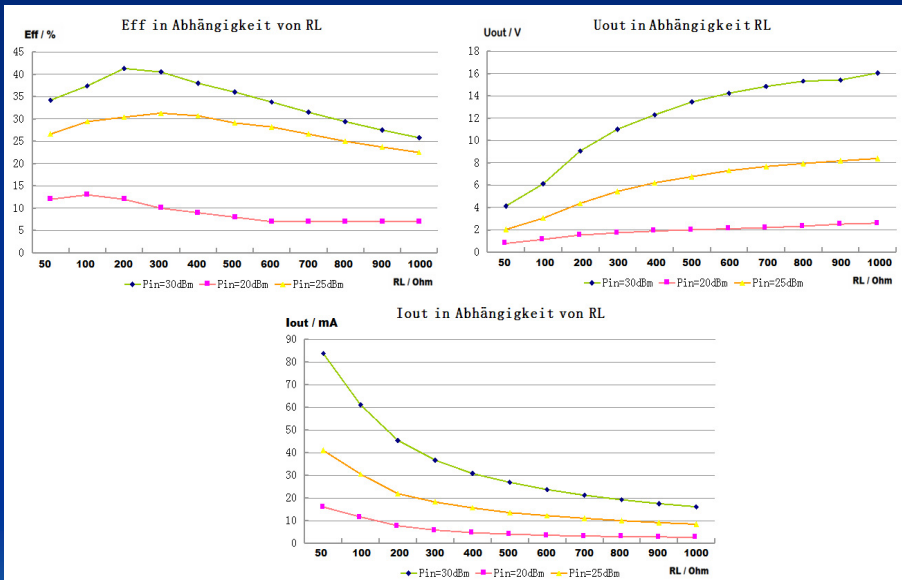


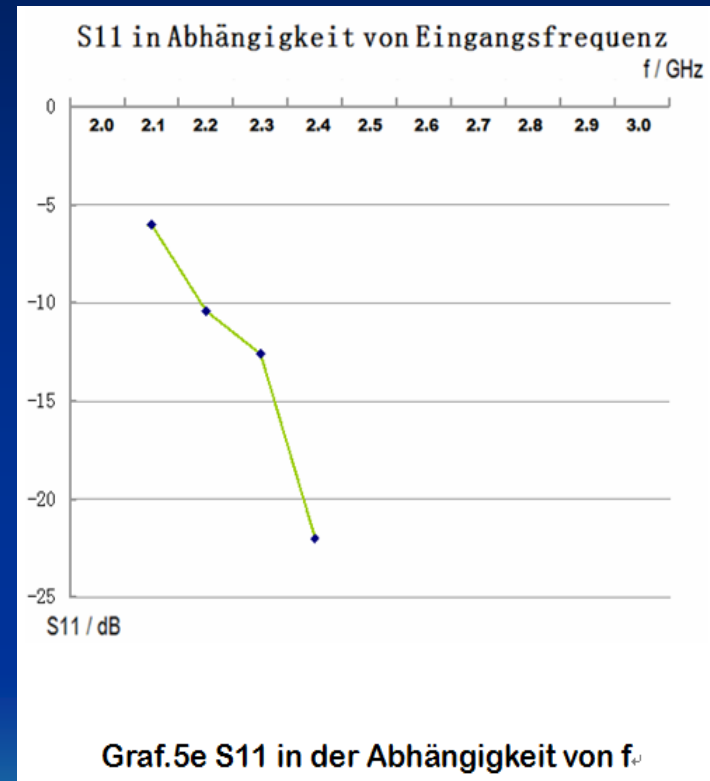
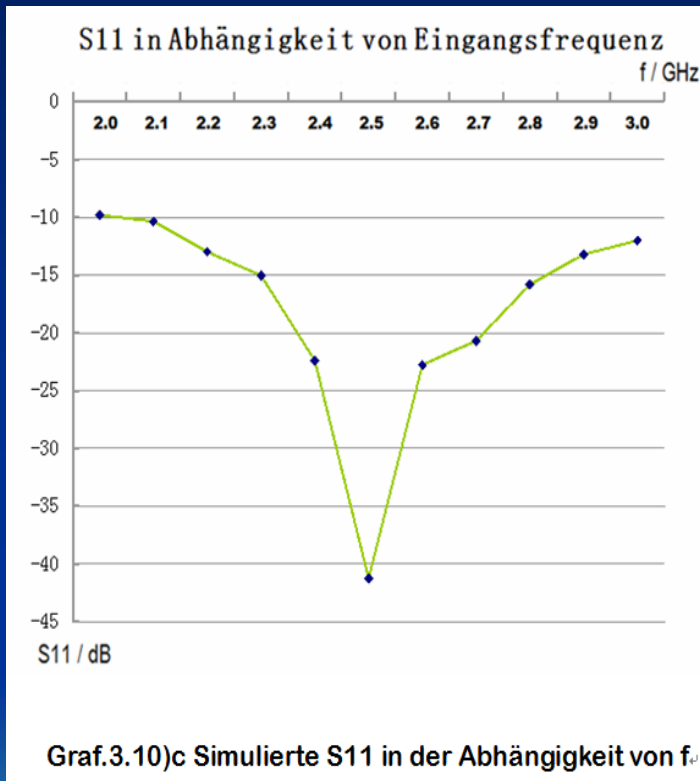
Rectifier for Microwave Power RF-to-DC Conversion

Simulationen und Messungen der parallelen Gleichrichterschaltung

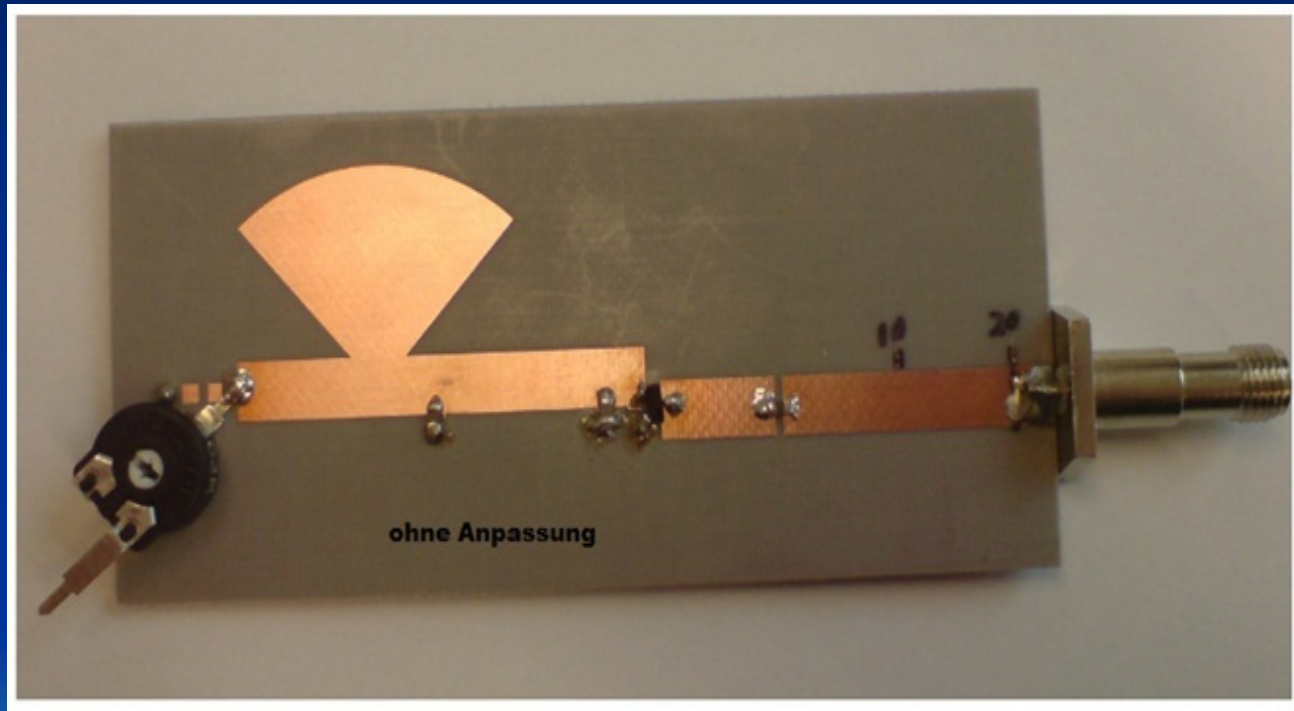
Simuliertes E_{ff} , U_{out} und I_{out} in Abhängigkeit vom Lastwiderstand R_L

Gemessenes E_{ff} , U_{out} und I_{out} in Abhängigkeit vom Lastwiderstand R_L

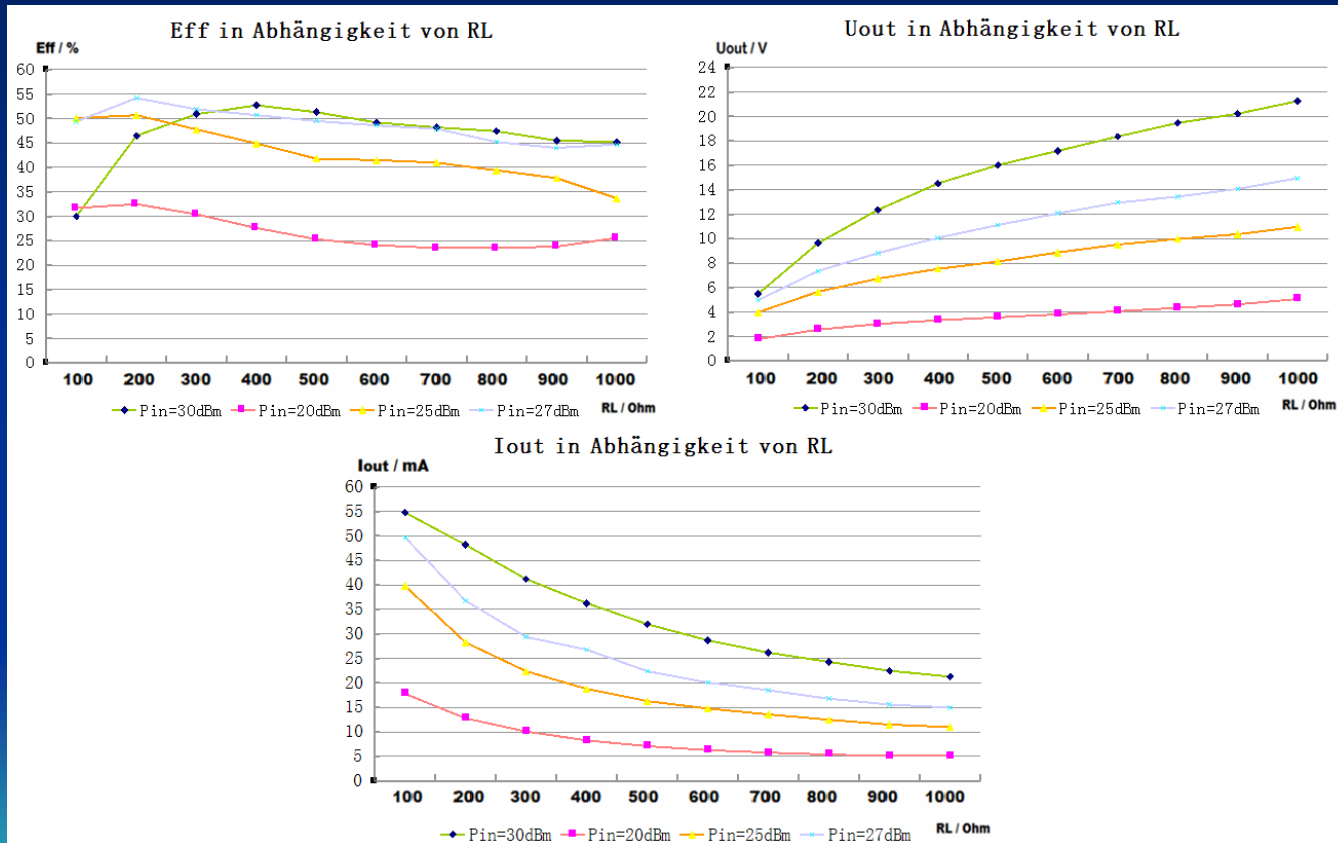




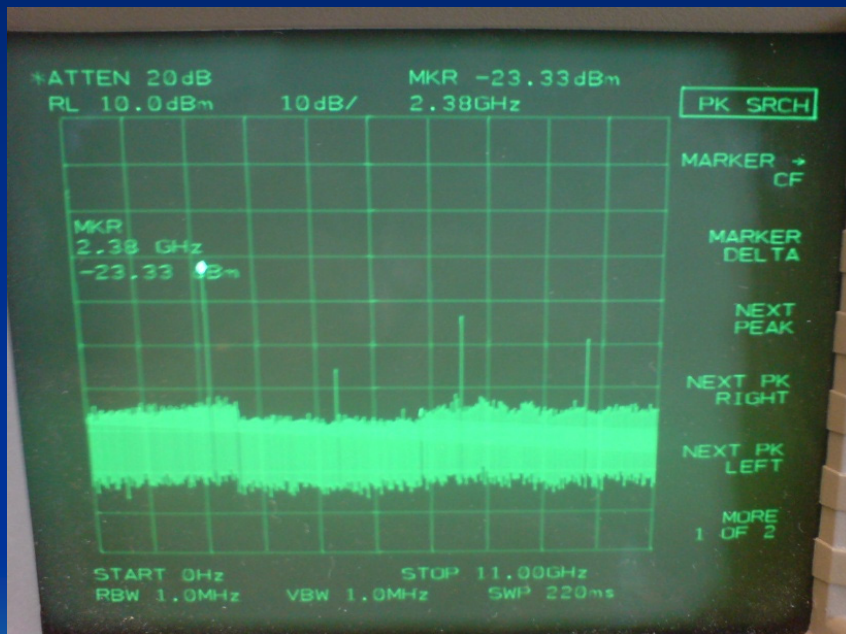
Test der Schaltung ohne Anpassungsbereich



Gemessenes E_{ff} , U_{out} und I_{out} in Abhängigkeit vom Lastwiderstand R_L für die Schaltung ohne Anpassungsbereich



Test der Harmonischen 1. bis 4. Ordnung bei $f = 2.4\text{GHz}$ und $P_{in} = 30\text{dBm}$ von parallelen Gleichrichtern

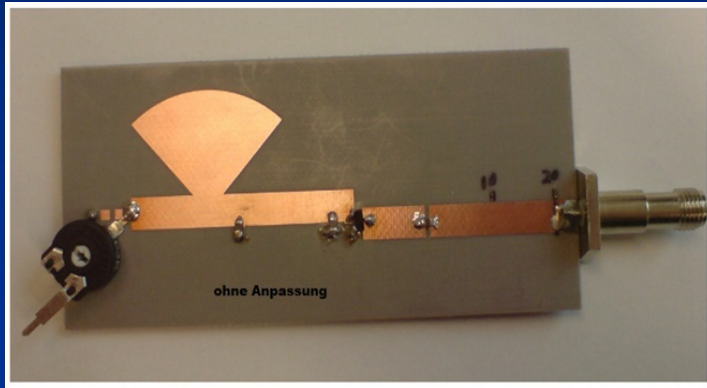


- Grundwelle: -3.33dBm
- Erste Harmonische: -27.83dBm
- Zweite Harmonische: -13.50dBm
- Dritte Harmonische: -18.67dBm

7. Analyse der Schaltungen im Zeitbereich

- Die Temperatur der Diode erhöht sich bis auf einen Wert, bei dem die Wärme aufgrund des Temperaturgefälles von der Sperrschicht über das Gehäuse an die Umgebung abgeführt werden kann.

Test der Schaltung ohne Anpassungsbereich bei $f = 2.4\text{GHz}$ und $R_L = 160\text{Ohm}$

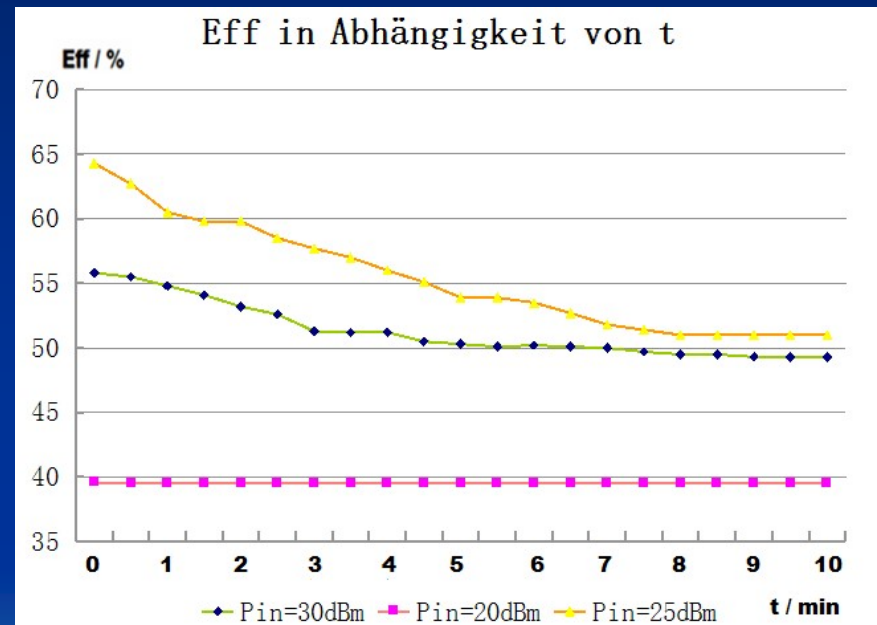


Zeitabhängige Spannungsabfälle U_{ab} :

$$U_{ab}(P_{in}=20\text{dBm})=0\text{V},$$

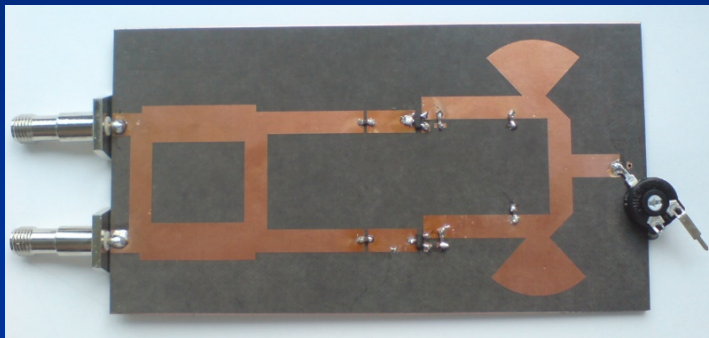
$$U_{ab}(P_{in}=25\text{dBm})=0.63\text{V}$$

$$U_{ab}(P_{in}=30\text{dBm})=0.57\text{V}$$



- Wir erhalten zwei Ergebnisse:
- 1) Je kleiner die Eingangsleistung P_{in} ist, desto schneller wird E_{ff} konstant.
- 2) Bei einer Eingangsleistung $P_{in} < 25\text{dBm}$ ist der zeitabhängige Spannungsabfall oder Effizienzabfall relativ kleiner.

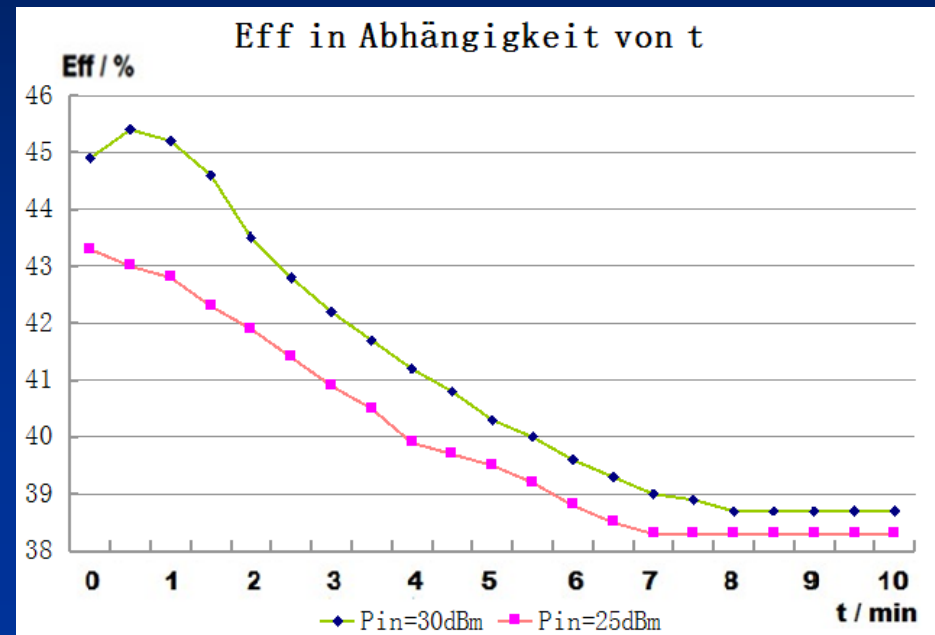
Test der
parallelen Gleichrichterschaltung bei
 $f = 2.4\text{GHz}$ und $R_L = 160\text{Ohm}$



Zeitabhängige Spannungsabfälle U_{ab} :

$$U_{ab}(P_{in}=25\text{dBm})=0.28\text{V}$$

$$U_{ab}(P_{in}=30\text{dBm})=0.60\text{V}$$



8. Fehleranalyse

- Spice-Modell der Diode
- Schwingneigung des Verstärkers
- U_{out} sinkt nach Anschluss der Schaltung auf einen konstanten Wert.
- Raumtemperatur von 25°C
- Empfindlichkeit des Trimmwiderstandes R_L

Vielen Dank!