



# Vortrag über die Bachelorarbeit

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

angefertigt von  
**Niklas Schulz**  
bei  
**Prof. Dr.-Ing. K. Solbach**  
Fachgebiet  
Hochfrequenztechnik  
an der  
Universität Duisburg-Essen



UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

Thema:

# **Control and Matching Circuit for Adaptive Impedance Matching System**

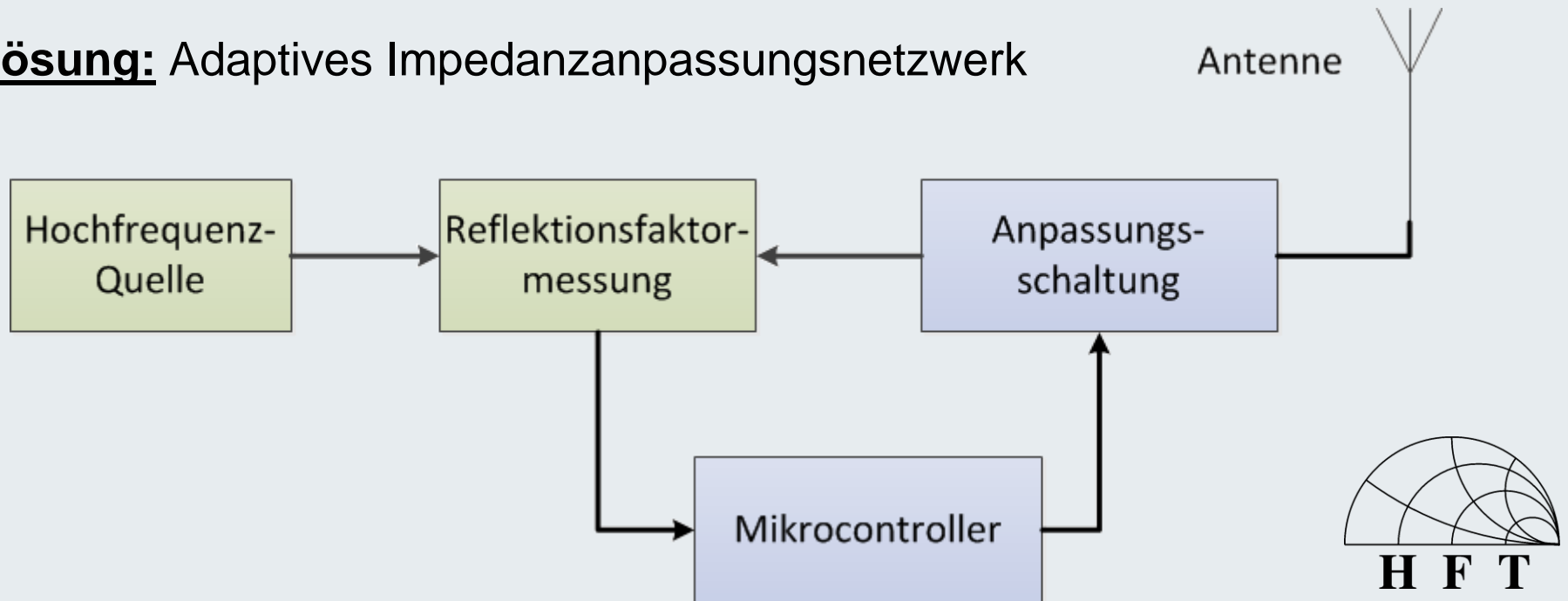
- Problemstellung
- Grundlagen
  - Impedanzanpassungsschaltung
  - Reflektometer
- Berechnung der Parameter der Anpassungsschaltung
- Das Board und der Mikrocontroller
- Schaltplan und Layout der Anpassungsschaltung
- Messergebnisse
- Zusammenfassung: Aussicht und Fazit

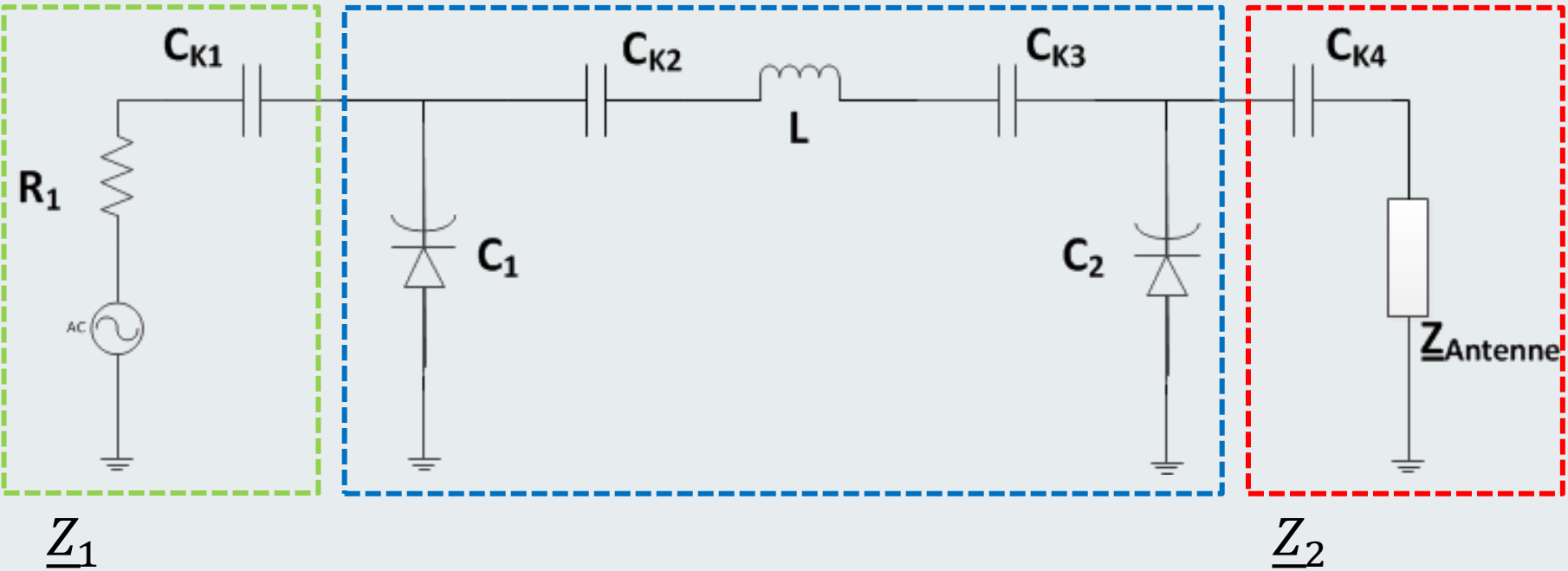


# Problemstellung

- Fehlanpassung einer Antenne durch Kontakt mit einem menschlichen Körper
- Einfluss auf die Qualität der Messung
- Anforderung an das System:
  - Frequenz von 880 MHz
  - Betrag des Reflektionsfaktors der Antenne kleiner -20 dB

**Lösung:** Adaptives Impedanzanpassungsnetzwerk

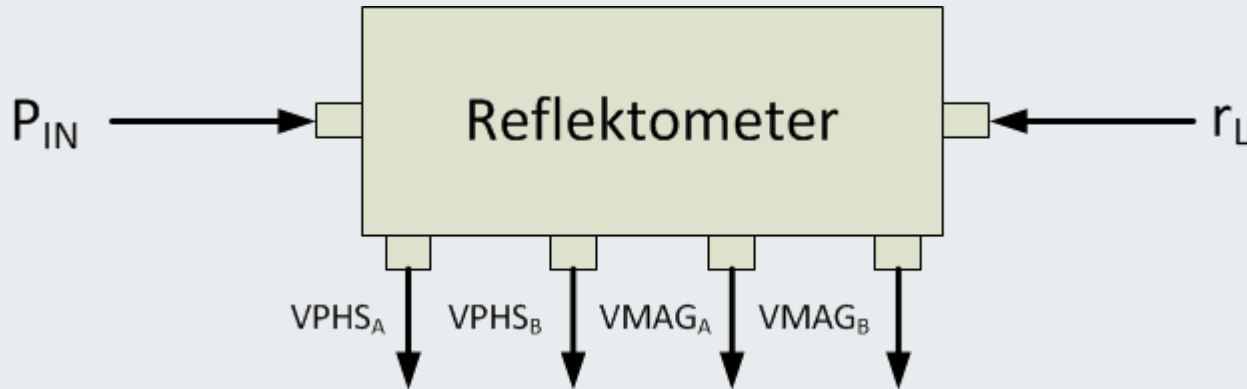




- **Pi-Filter zur Transformation der Antennenimpedanz in Generatorimpedanz**
  - Einsatz von Kapazitätsdioden
  - Feste Spule
- **Bekannte Generatorimpedanz  $\underline{Z}_1$**
- **Unbekannte Antennenimpedanz  $\underline{Z}_2$**
- **Koppelkondensatoren gegen Gleichspannungs-Einflüsse aufgrund der Kapazitätsdioden**



# Grundlagen - Reflektometer



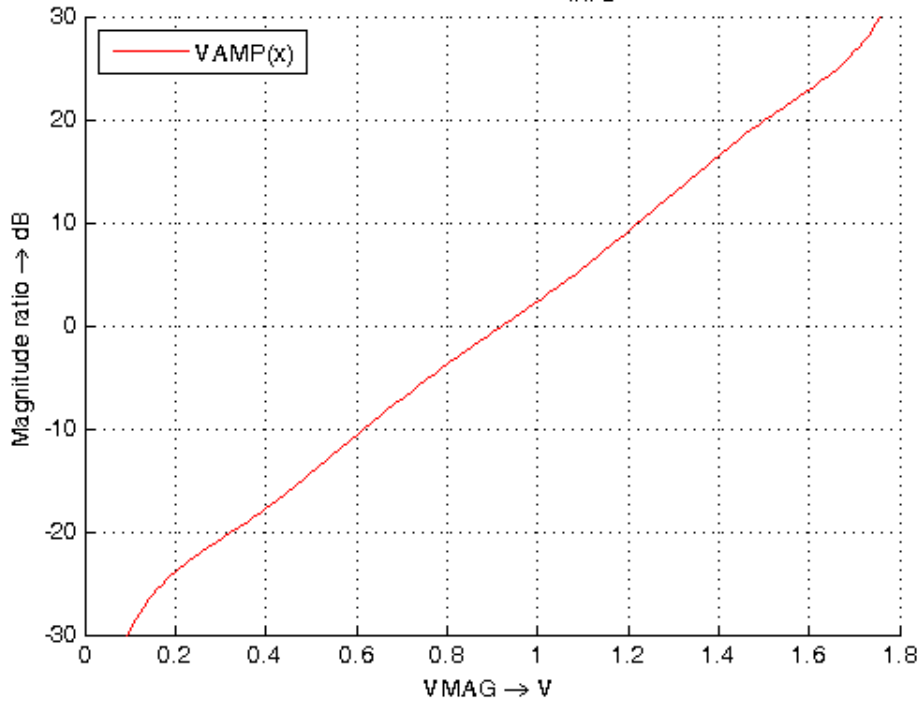
- Ausgangsspannungen  $VPHS$  und  $VMAG$  geben Auskunft über den nicht kalibrierten Reflektionsfaktor der Last
- Auswertung der Spannungen getrennt über zwei approximierte Kurven
- Normalisierung des Reflektionsfaktors über die Messung eines Kurzschlusses

$$GMC = \frac{GM \cdot e^{j \cdot 180^\circ}}{GMS}$$

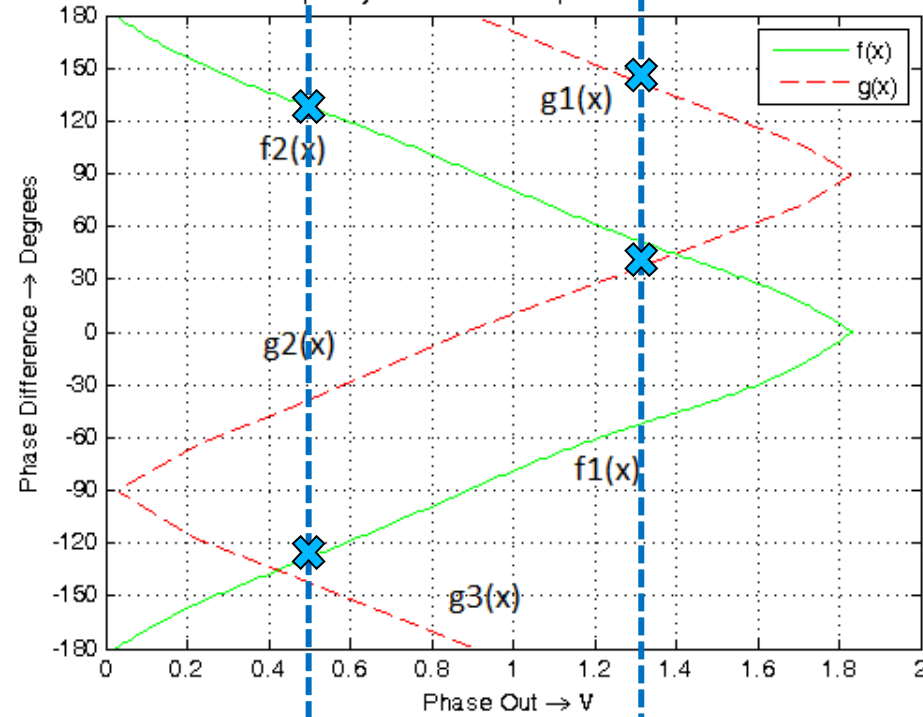
# Grundlagen – Reflektometer

## Berechnung des Betrags und der Phase

Input Level Ratio (Gain)  $V_{INPA}/V_{INPB}$  vs. Magnitude Output (VMAG)  
at Frequency 880 MHz with  $P_{INPB} = -30$  dBm



Input Phase Difference vs. Phase Output (VPHS)  
at Frequency 880 MHz with Input Levels = -30 dBm



Betrag des Reflektionsfaktors vor  
der Normalisierung:

$$|\vec{r}| = 10^{\frac{ratio[dB]}{20}}$$

$$VPHS_A = 0.5 \text{ V} \quad VPHS_B = 1.3 \text{ V}$$

$$\Phi \sim 125^\circ$$

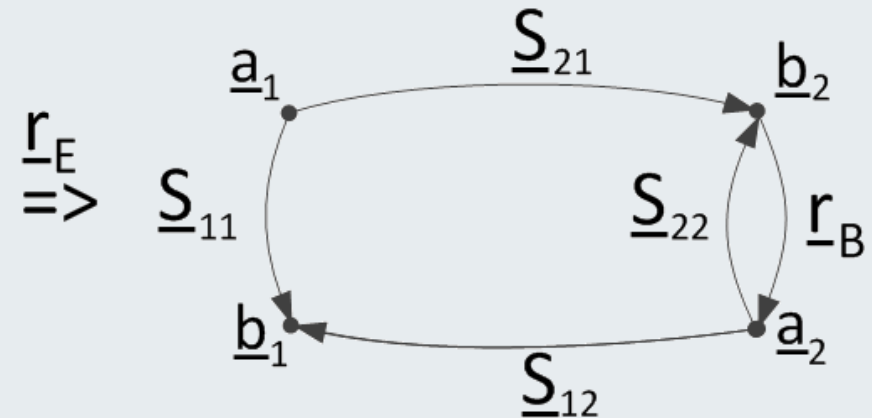


# Berechnung der Parameter der Anpassungsschaltung

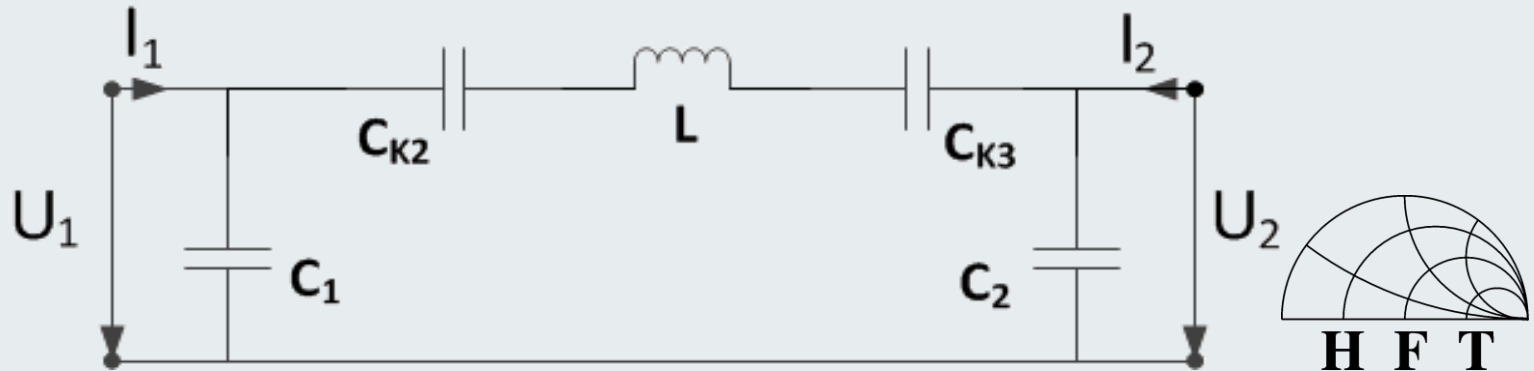
## Reflektionsfaktor der Antenne

- Eingang reflektionsfaktor der Schaltung durch Reflektometer bekannt
- Darstellung des Pi-Filters in Streuparametern

$$\vec{r}_B = \frac{\vec{r}_E - \underline{S}_{11}}{\underline{S}_{12} \cdot \underline{S}_{21} + \vec{r}_E \cdot \underline{S}_{22} - \underline{S}_{11} \cdot \underline{S}_{22}}$$



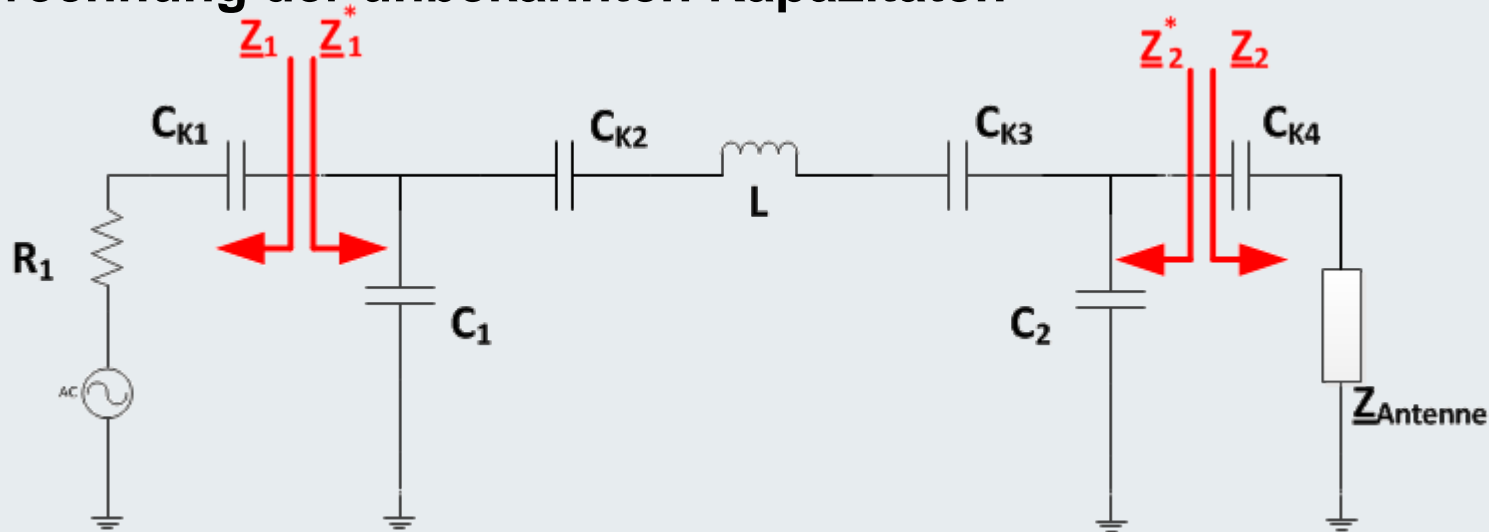
- Berechnung der S-Parameter aus den Z-Parametern des Zweitores (Pi-Filter)





# Berechnung der Parameter der Anpassungsschaltung

## Berechnung der unbekanntenen Kapazitäten



Impedanzanpassung an  $\underline{Z}_1$  und  $\underline{Z}_2$ :

$$\underline{Z}_1^* = [(\underline{Z}_2 \parallel (j \cdot X_{C2})) + j \cdot X_{L1}] \parallel (j \cdot X_{C1})$$

$$\underline{Z}_2^* = [(\underline{Z}_1 \parallel (j \cdot X_{C1})) + j \cdot X_{L1}] \parallel (j \cdot X_{C2})$$



# Berechnung der Parameter der Anpassungsschaltung

- **Herleitung des Zusammenhangs:**

$$X_{C2} = f(X_{C1}, \underline{Z}_1, \underline{Z}_2)$$

- **Einsetzen in Gleichung:**

$$[(\underline{Z}_2 || (j \cdot X_{C2}(X_{C1}, \underline{Z}_1, \underline{Z}_2))) + j \cdot X_{L1}] || (j \cdot X_{C1}) - \underline{Z}_2^* = 0$$

- **Einsetzen der einstellbaren Kapazitäten von  $C_1$  und Bestimmung des kleinsten Betrags der Differenz**

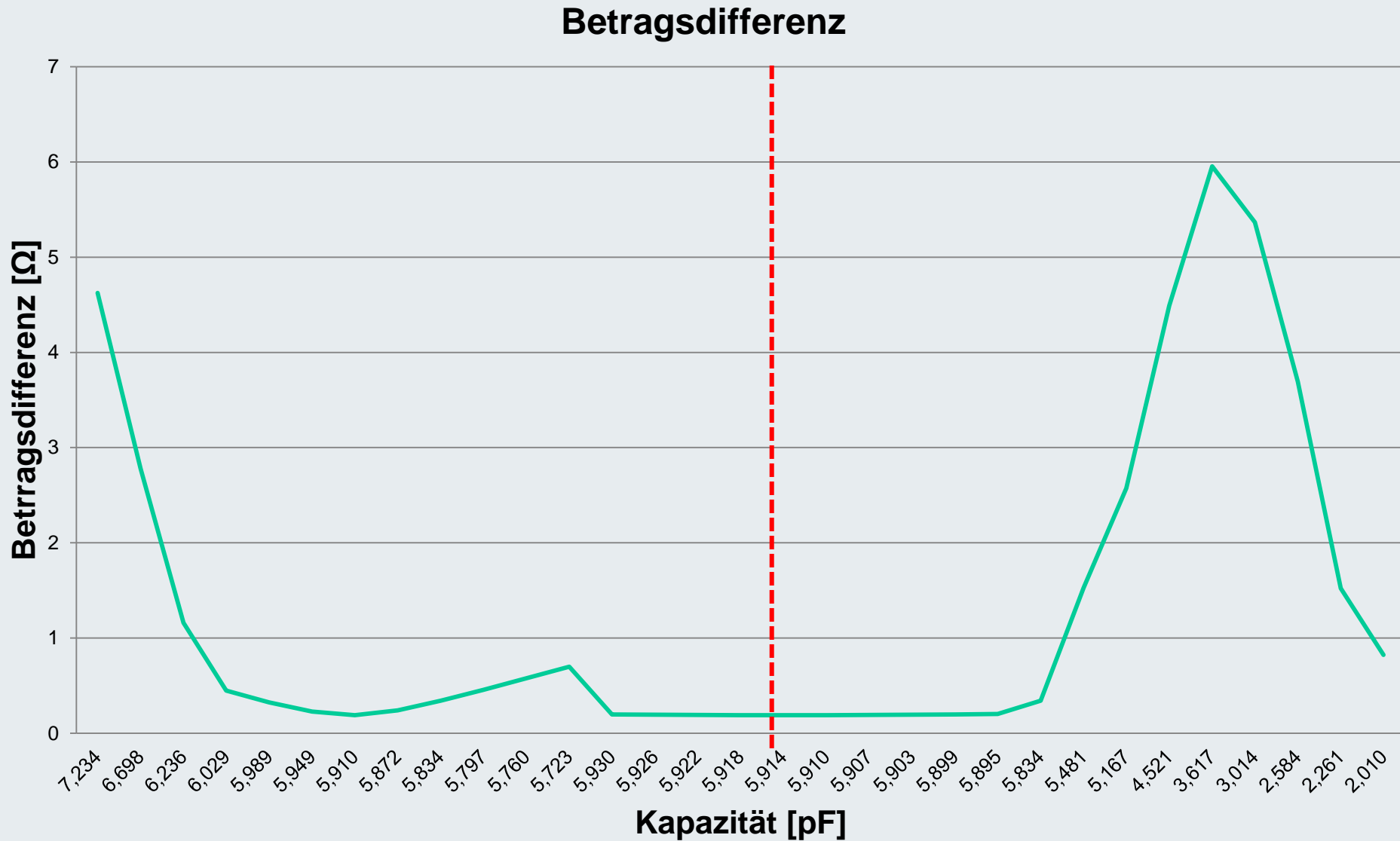
Parameter	Wert / Intervall
$C_1$	[2pF;15pF]
$C_2$	[2pF;15pF]
$L, Z_1$ und $Z_2$	Fest vorgegeben

- **Je genauer der Schrittabstand zwischen zwei eingesetzten Kapazitäten, desto genauer ist die Anpassung**



H F T

# Berechnung der Parameter der Anpassungsschaltung



# Berechnung der Parameter der Anpassungsschaltung

- Welche Impedanzen können angepasst werden?
- Vorgabe der einstellbaren Kapazitäten und der Induktivität  
→ Berechnung der Impedanz  $\underline{Z}_2$

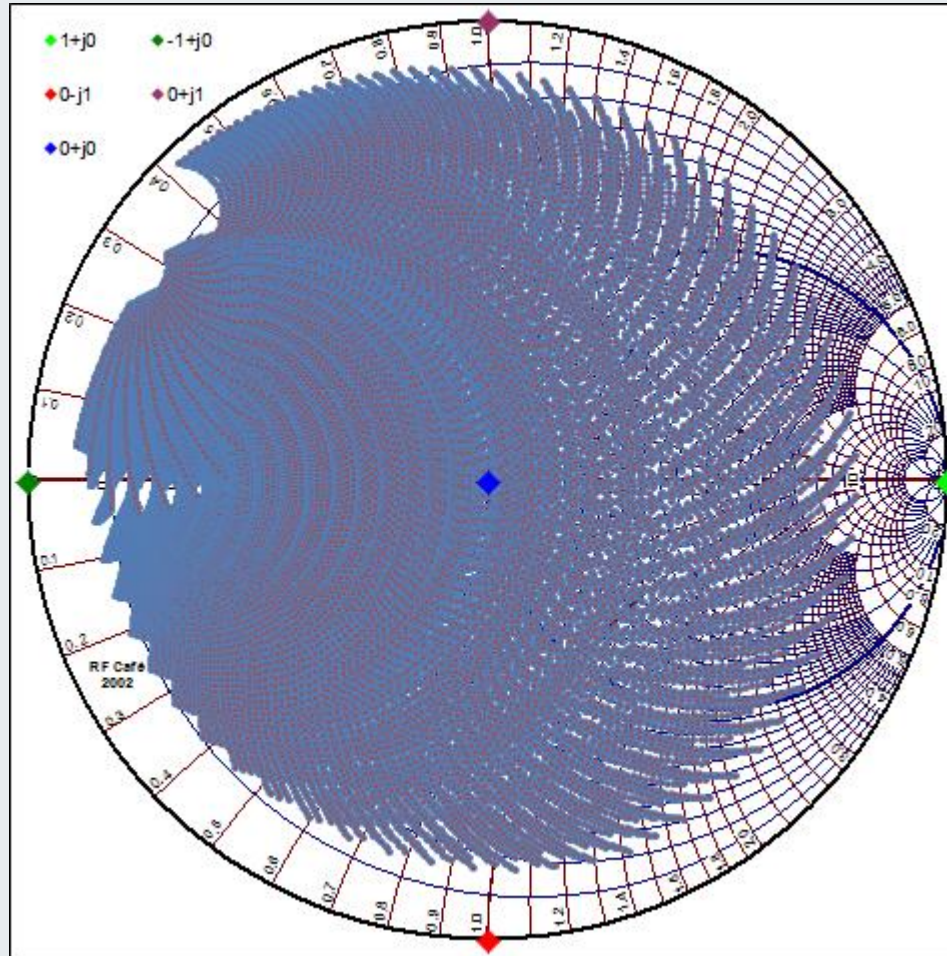
Z\* Berechnung für verschiedene C1,C2,L

	Untergrenze		Obergrenze	Schritte	Koppelkondensatoren
L	<input type="text" value="2"/> nH	-	<input type="text" value="4"/> nH	<input type="text" value="1"/>	CK1 <input type="text" value="200"/> nF
C1	<input type="text" value="2"/> pF	-	<input type="text" value="11"/> pF	<input type="text" value="80"/>	CK2 <input type="text" value="200"/> nF
C2	<input type="text" value="2"/> pF	-	<input type="text" value="11"/> pF	<input type="text" value="80"/>	CK3 <input type="text" value="200"/> nF
f	<input type="text" value="880"/> MHz				CK4 <input type="text" value="200"/> nF



# Berechnung der Parameter der Anpassungsschaltung

- Anpassbereiche im Smith-Chart dargestellt:



## Induktivität L



2 nH



5 nH



8 nH



12 nH



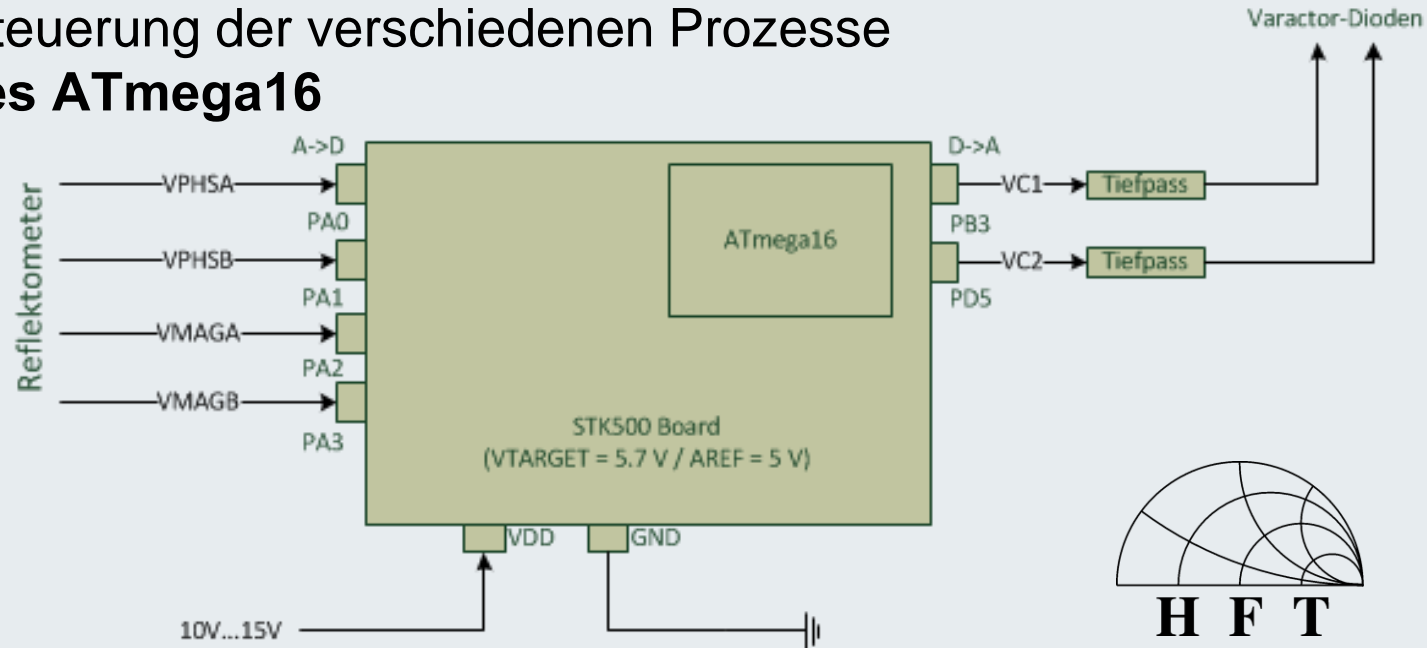
2 nH bis 10 nH  
20 Schritte



**H F T**

# Das Board und der Mikrocontroller

- **Verwendung des STK500-Boards**
    - 8 LEDs und 8 Schalter
    - RS232-Schnittstelle zum Programmieren des Microcontrollers mit dem AVR Studio 4
  - **Ansprüche an den Microcontroller**
    - 4 Analog-Digital-Eingänge
    - 2 Pulsweitenmodulationen zur Ansteuerung der Kapazitätsdioden
    - 1 Timer zur Steuerung der verschiedenen Prozesse
- **Verwendung des ATmega16**



### Register Allgemein:

- Speicher mit geringer Kapazität und kurzer Zugriffszeit.
- Werden hauptsächlich für CPU-Befehle genutzt (z.B. Addition).

### Special Function Register (SFR)

- Dient zur Steuerung der Funktionen und Module des Mikrocontrollers (z.B. Timer).
- Werden über andere Befehle als die normalen Register angesprochen.

### Beispiel eines Timer-Registers: Timer/Counter Interrupt Mask

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	OCIE2	TOIE2	TICIE1	OCIE1A	OCIE1B	TOIE1	OCIE0	TOIE0	TIMSK
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initialwert	0	0	0	0	0	0	0	0	



- **Auf dem ATmega16 befinden sich 3 Timer:**

Timer	Art	Verwendung
0	8-Bit	Digital-Analog-Wandler
1	16-Bit	Digital-Analog-Wandler
2	8-Bit	Überprüfung der Prozesse jede 0.5 Sekunden

- **Ein 8-Bit Timer führt bei einem Takt von 1 MHz jede  $1\mu\text{s} \cdot 2^8 = 256\mu\text{s}$  einen Overflow-Interrupt aus**
- **Für einen Funktionsaufruf alle 0.5 Sekunden ergibt sich somit folgender Zusammenhang:  $\frac{0.5\text{ s}}{256\ \mu\text{s}} = 1954$  Overflow Interrupts**





- **Einlesen der Spannungen des Reflektometers**  
→ **Umwandlung in digitalen Wert**
- **Konfiguration des ADCs:**
  - Externe Spannung als Referenzspannung AREF
  - Single-Conversion-Mode
  - Interrupt Enable
- **Jeden Durchlauf der Hauptfunktion werden die vier Spannungen des Reflektometers eingelesen**
- **Bei einer AREF-Spannung von 4 V und einer Auflösung von 10-Bit ergibt sich ein Ziffernschritt von:**  $\frac{4 V}{1024} = 3.9 mV$

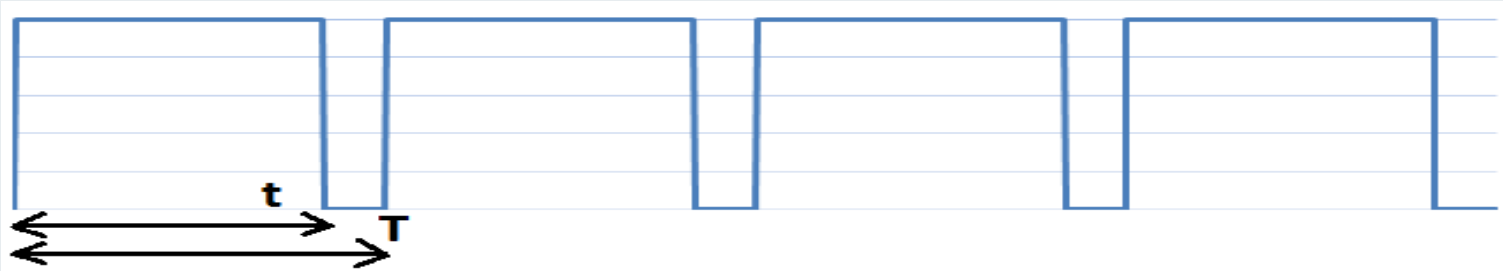
### Datenblatt

Acht Analog/Digital-Pins

Auflösung von 10-Bit



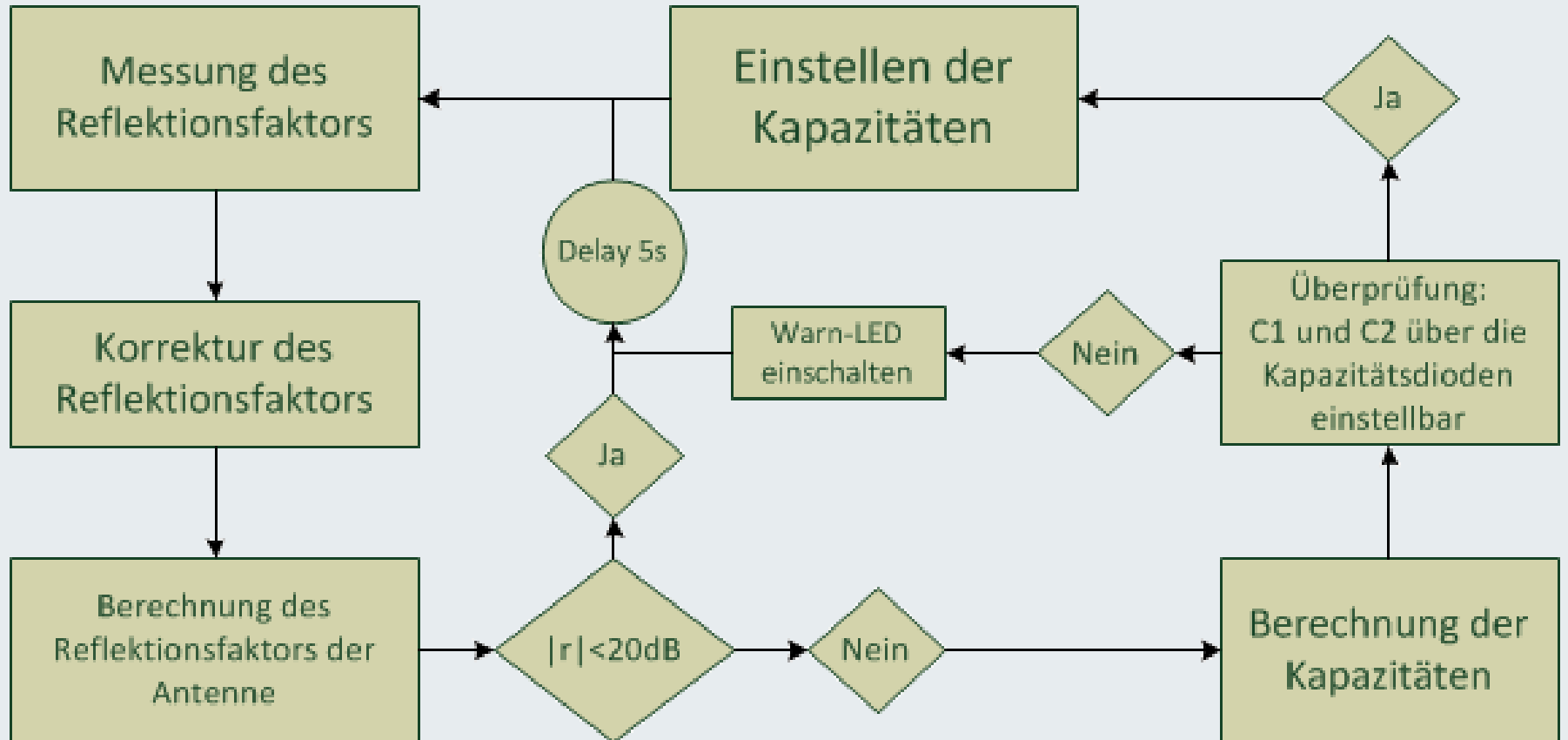
- **Kein direkter Digital-Analog-Wandler auf dem ATmega16**  
→ **Pulsweitenmodulation mit Timer0 und Timer1**
- **An- und Ausschalten der Ausgangsspannung führt zu einer ausgegeben Leistung  $\frac{t}{T} \cdot 100\%$  der Gesamtleistung**



- **Beide Timer haben unterschiedliche Auflösungen bei der Ausgangsspannung**  
→ **Einfluss auf die Genauigkeit der Kapazitäten**
- **Filterung des Ausgangssignal mit einem Tiefpass 2. Ordnung**

# Das Board und der Mikrocontroller

C-Programmcode



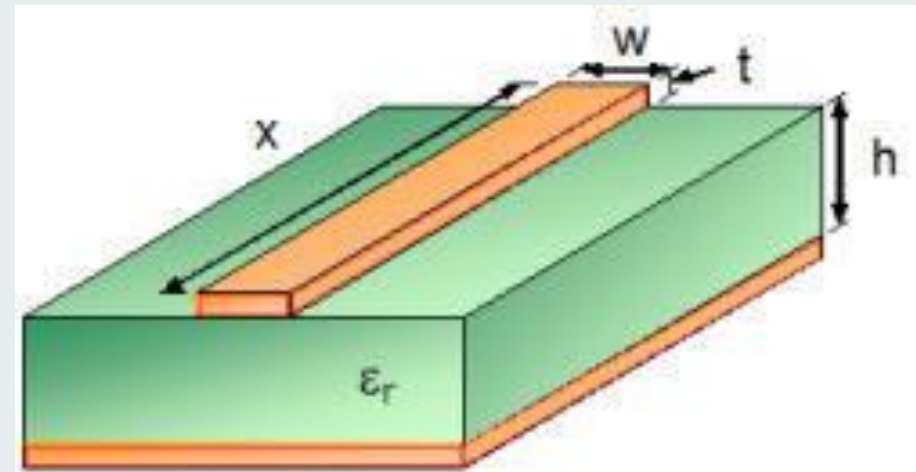
# Layout der Anpassschaltung

## Erstellung unter EAGLE

- Bauelemente der SMD-Technologie in der Dimension 0603 und 0805
- Leitung mit einer 50 Ohm Wellenimpedanz

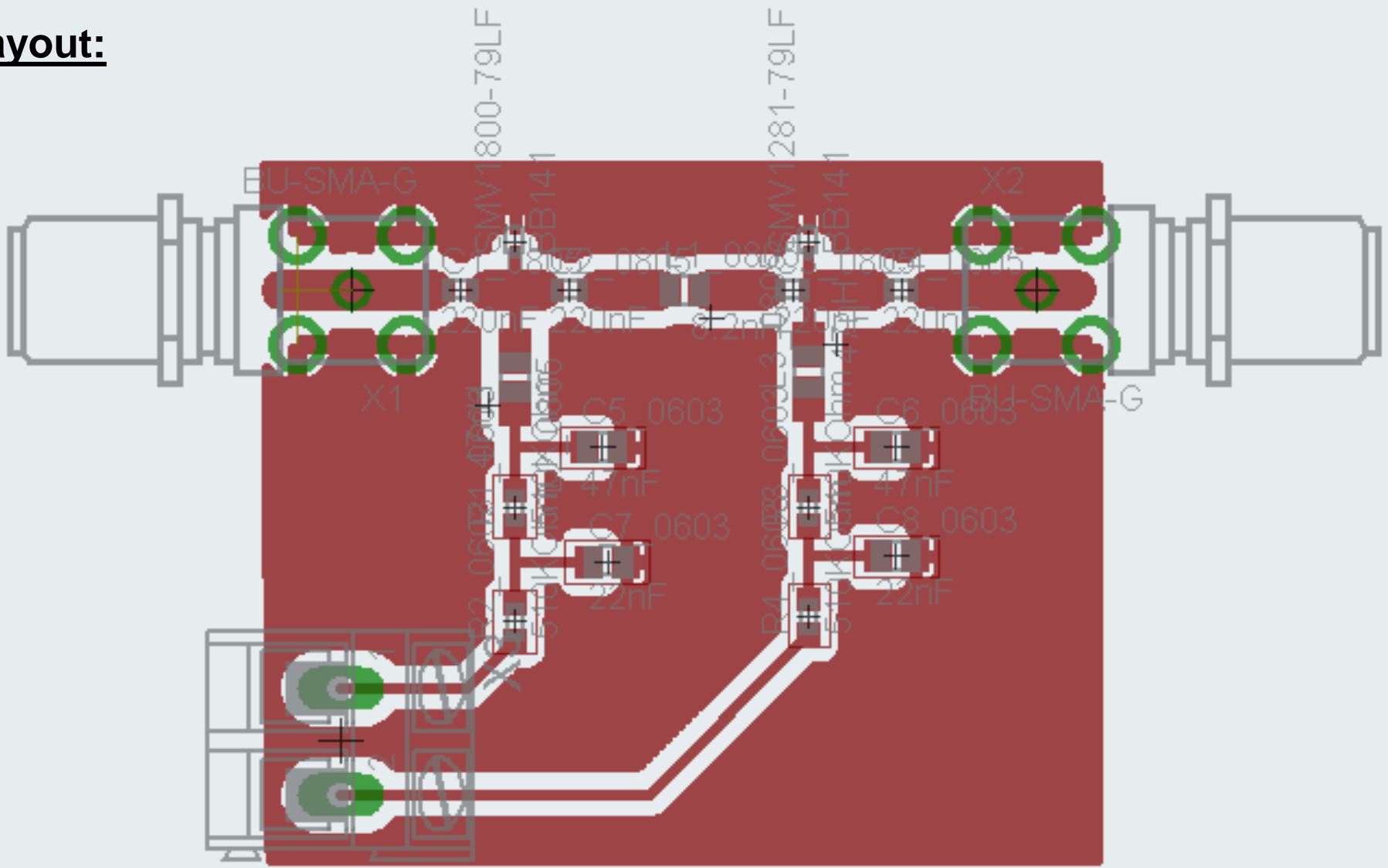
## Mikrostreifentechnik

- Substrat RO4003C mit:
  - elektr. Permittivität  $\epsilon_r = 3.55$
  - Dicke  $h = 0.833$  mm
- Breite der Leitung  $w = 1.88$  mm



# Layout der Anpassschaltung

## Layout:



# Messergebnisse

Reflektometer

## Vergleich Reflektometer und Network Analyzer:

Gemessener Reflektionsfaktor des Kurzschlusses für die Normalisierung:

$$GMS = 7.6559 \cdot e^{j \cdot 45.95^\circ}$$

Parameter	Einstellung
Spannung Reflek.	5 V
$V_{REF}$	1.8 V
<b>RF-Quelle</b>	
Frequenz	880 MHz
Power Level	5 dBm

## Messergebnisse:

$ \vec{r} $ Norm.	$\angle \vec{r}$ Norm.	$\Delta$ Betrag	$\Delta$ Phase	$ \vec{r} $ Fehler	$\angle \vec{r}$ Fehler
0.3122	168.47°	0.01275	3.27°	3.92 %	0.91 %
0.2491	166.66°	0.00982	3.16 °	3.79 %	0.88 %
0.1286	161.39°	0.00067	2.99 °	0.53 %	0.83 %
0.3284	-100.66°	0.0084	0.06 °	2.65 %	0.02 %
0.2612	-101.03°	0.0162	0.57 °	6.62 %	0.16 %
0.1350	-100.29°	0.0150	3.71 °	12.54 %	1.03 %

### Vermessung der einzelnen Schritte des Mikrocontrollers und Vergleich mit berechneten Werten mit Matlab:

- **Testlauf 1:** Leitungsstück 2, Leitung 4, Dämpfung 4 dB
- **Testlauf 2:** Leitungsstück 2, Leitung 5, Dämpfung 5 dB

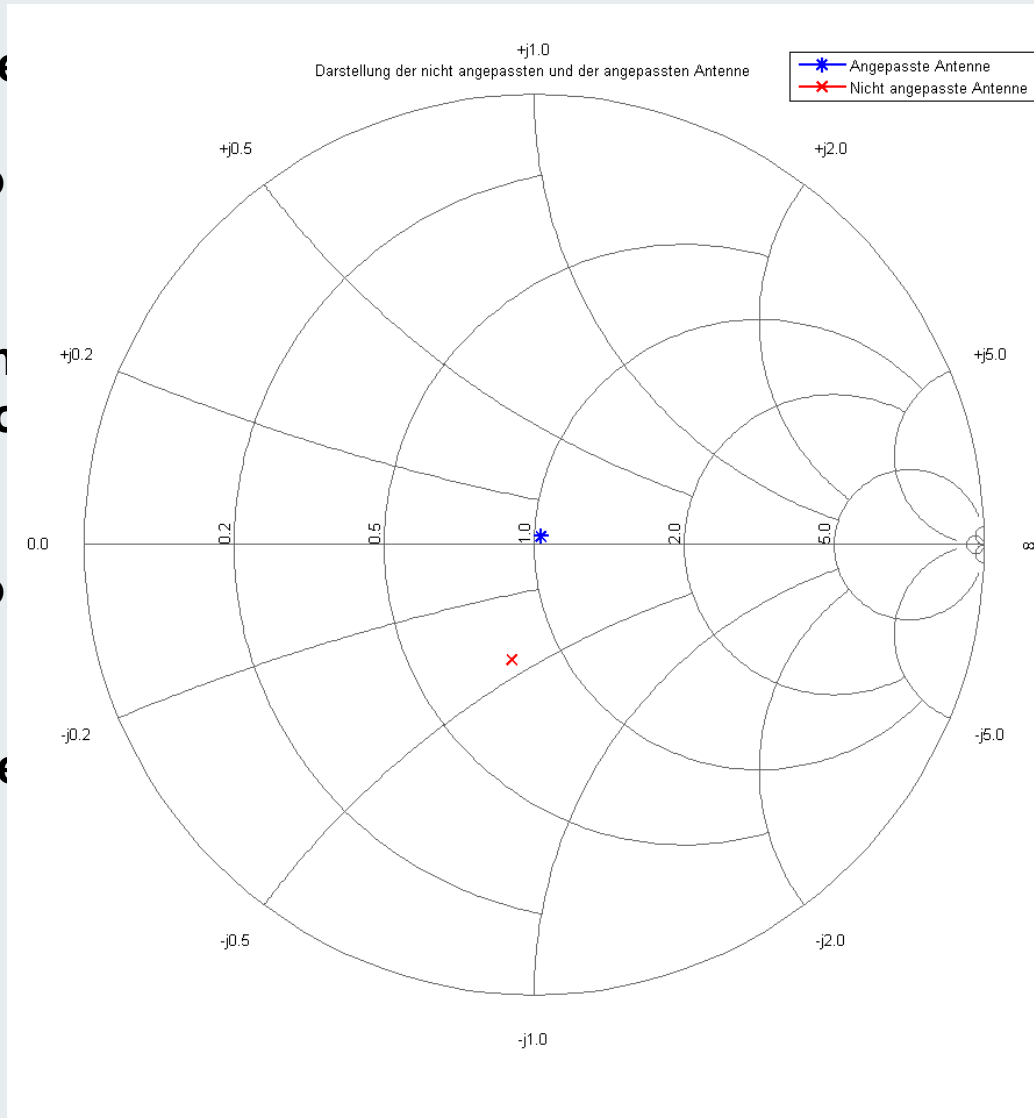
	Testlauf 1 Mikrocontroller	Berechnung	Testlauf 2 Mikrocontroller	Berechnung
Phase Reflek.	167 °	168.47 °	-101 °	-101.03 °
Betrag Reflek.	0.315	0.3122	0.2625	0.2612
Impedanz Antenne	$(34 + 78 \cdot j)\Omega$	$(34.1943 + 78.46 \cdot j)\Omega$	$(79 + 83 \cdot j)\Omega$	$(80.0466 + 83.98 \cdot j)\Omega$
$C_1$	11.5 pF	11.53 pF	10.4 pF	10.46 pF
$C_2$	7.7 pF	7.7 pF	7.05 pF	7.05 pF

- **Kapazitätsdioden werden mit einer Spannung von 5 V initialisiert**  
→ **C = 3.76 pF**
- **Für die angeschlossene Last berechnete Impedanz:  $\underline{Z} = (46.4 + 68.08 \cdot j) \Omega$**
- **Starke Abweichung von der gemessenen Last mit dem Network Analyzer:**  
 **$\underline{Z} = (36.78 - 25.78 \cdot j) \Omega$**
- **Der Reflektionsfaktor vor und nach der Anpassung durch den Mikrocontroller**
  - Vorher:  $\underline{\vec{r}} = 0.63 \cdot e^{j \cdot -126.42^\circ}$
  - Nachher:  $\underline{\vec{r}} = 0.92 \cdot e^{j \cdot 138.31^\circ}$
- **Anpassung des Mikrocontrollers auf Grund der nicht mit einzuberechnenden parasitären Effekte nicht möglich.**

Parameter	Einstellung
Betriebsspannung Board	12 V
int. Spannung	5.1 V
Kapazitätsdiode	SMV1800-79LF
Reaktanz Spule	45.339 $\Omega$
Frequenz	880 MHz
Leitungsstück	2
Leitung	5
Dämpfung	5 dB



- Simulation der
- Der Reflektio
- Der Mikrocon
- Der Reflektio
- Der Betrag de



realer Parameter

nnungen an die

controller:

3

- **Einzelmessungen der Spule mit dem Network Analyzer zeigen einen starken Einfluss auf den Reflektionsfaktor**
  - Dieser Einfluss kann in der Simulation unter ADS nicht nachgestellt werden.
  - Die Spule wird nicht oberhalb der Resonanz betrieben.
- **Der Koaxialstecker hat einen geringen Einfluss auf die Phase und Betrag des Reflektionsfaktors**
- **Beim Layout ist keine Durchkontaktierung der Massefläche durchgeführt worden**
  - Dies kann zu einem Einfluss auf den Reflektionsfaktor der Anpassschaltung führen
- **Zu viele einzelne Störungen, die in der Berechnung des Mikrocontrollers nicht berücksichtigt werden können**

- **Neuberechnung der Werte für die approximierten Kurven des Reflektometers**
- **Verwendung einer neuen Mikrocontrollergeneration zur Verbesserung der Leistung und des Speichers**
- **Verwendung eines neuen Layouts mit Durchkontaktierung der Massefläche**
- **Kommunikation mit externe Peripherie**
- **Höhere Anzahl von Impedanzen anpassbar durch einstellbare Spule:  
 $\frac{\lambda}{4}$ -Leitung mit Kapazitätsdiode**
- **Anderes Verfahren zur Einstellung der Kapazitätsdioden (kontinuierliches Anpassen)**

- **Passende Anpassungsschaltung mit Kapazitätsdioden ausgewählt**
- **Einlesen und Umrechnen des Reflektionsfaktors durch den Mikrocontroller wurde realisiert**
- **Vorgestellte Verfahren zur Berechnung der Kapazitäten konnte im Mikrocontroller umgesetzt werden**
- **Anpassungsschaltung zu parasitär belastet**  
→ **Anderes Verfahren zur Anpassung oder Verbesserung des Layouts**

**Danke für Ihre  
Aufmerksamkeit!**

