# Messung von Netzwerken im Amateurfunk

**Uwe Neibig, DL4AAE**

**OV-Abend P51**

**10.01.2020**

Smith-Diagramm: wikimedia [4]

# Inhalt

1. Was ist Netzwerkanalyse?
2. Grundlagen
3. Netzwerkanalysatoren
4. Messablauf
5. Messbeispiele
6. Literatur
7. Demonstration einer Messung

# Was ist Netzwerkanalyse?

- Genaue und effiziente Messung
- von Schaltungen (Netzwerken)
- im Hochfrequenz-Bereich.

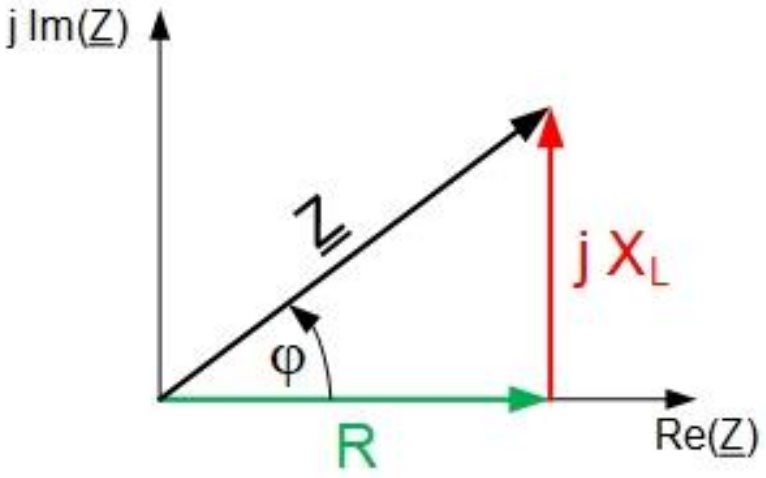
- Beispiele:
  - Bauelemente (Widerstand, Spule, Kondensator, …)
  - Antennen
  - Filter
  - Verstärker
  - Übertrager
  - Kabel, Leitungen
  - …

# Grundlagen: Impedanz

- Bezeichnung für Wechselstrom-Widerstand
- Beispiel: Reihenschaltung aus Widerstand  und Spule

- R = 80 Ω
- L = 1,364 µH
- Blindwiderstand $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 60\ \Omega$

  (bei f = 7,0 MHz)
- Darstellung in komplexer Ebene:
  - $\underline{Z} = R + jX_L = 80\ \Omega + j\ 60\ \Omega$
  - $\underline{Z} = |\underline{Z}|, \varphi = 100\ \Omega, 36{,}9°$



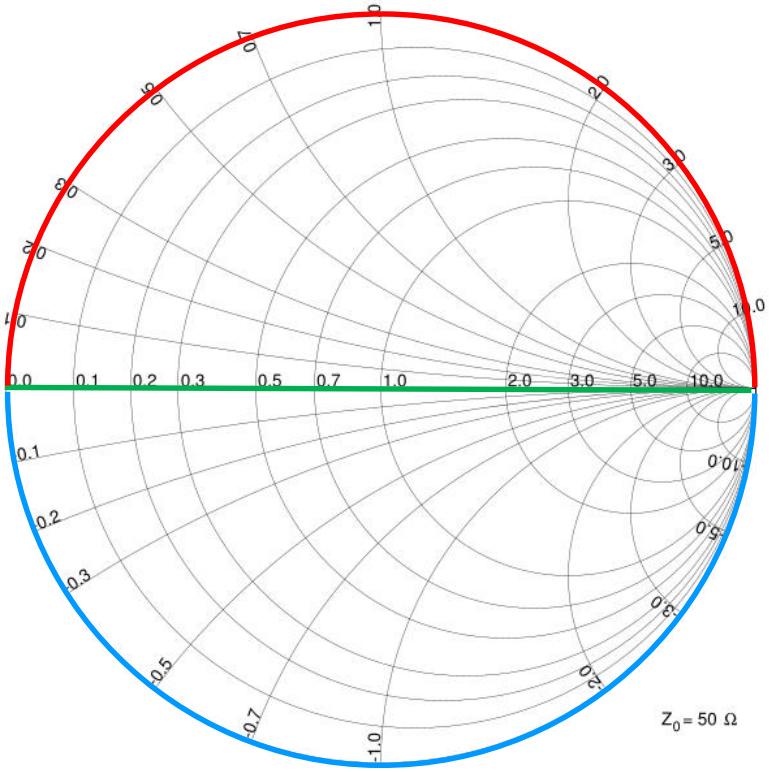
# Grundlagen: Smith-Diagramm

- Hilfsmittel zur komplexen Wechselstromrechnung
- Darstellung von Messdaten, z.B. von Netzwerkanalysatoren
- Merkmale:
  - Normierung auf Bezugs-Impedanz $Z_0$, üblich $Z_0 = 50\ \Omega$
  - $\underline{Z}' = \underline{Z} / Z_0$
  - Mittelpunkt: $\underline{Z}' = 1$
  - Reelle Achse $\underline{Z}' = 0 \ldots \infty$

    (Imaginärteil = 0)
  - Außenkreis, oben: $\underline{Z}' = 0 \ldots + j\,\infty$

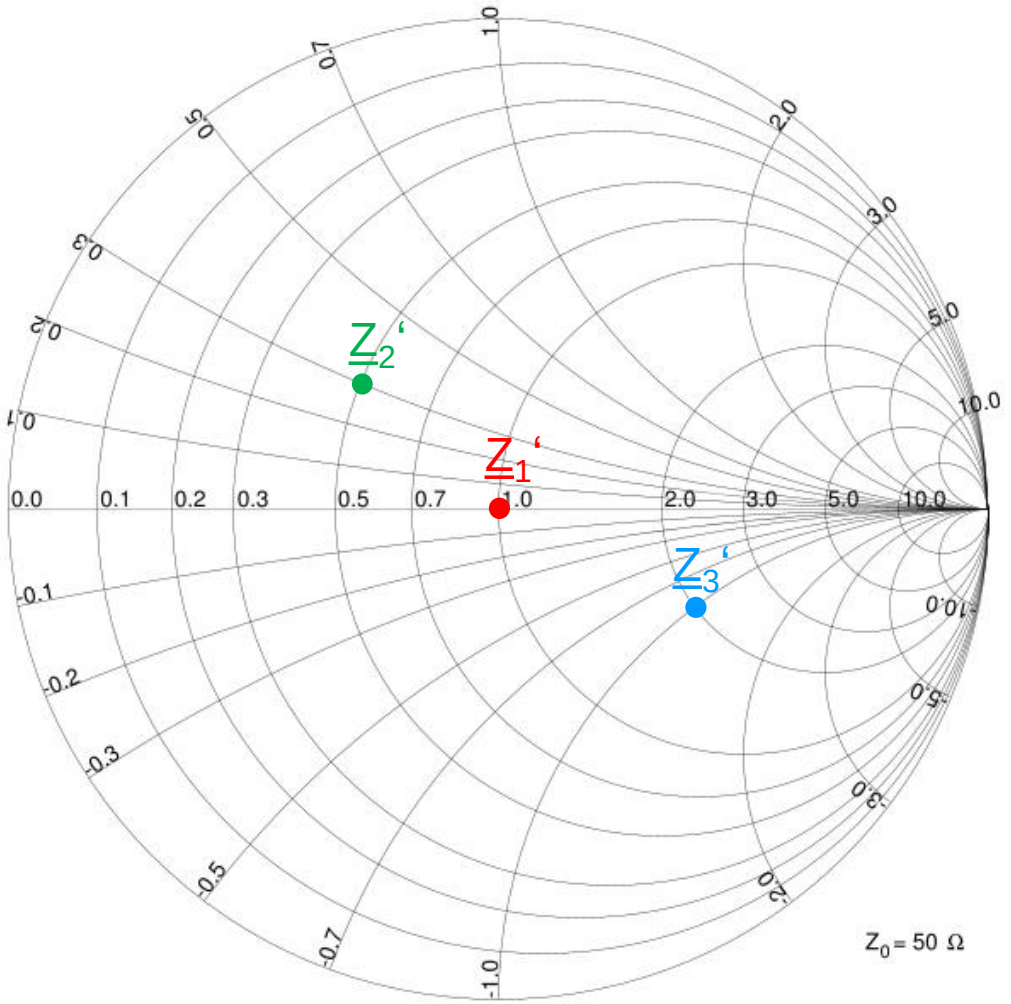
    (Realteil = 0)
  - Außenkreis, unten: $\underline{Z}' = 0 \ldots - j\,\infty$

    (Realteil = 0)



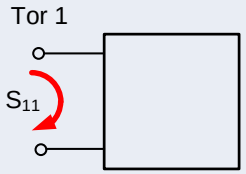
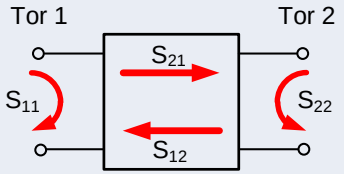
# Grundlagen: Smith-Diagramm

- Darstellung von Messdaten, $Z_0 = 50\ \Omega$, feste Frequenz (Beispiele):
  - $\underline{Z}_1 = 50\ \Omega$
  - $\underline{Z}_2 = 25\ \Omega + j\ 15\ \Omega$
  - $\underline{Z}_3 = 100\ \Omega - j\ 50\ \Omega$



# Grundlagen: S-Parameter

- Zur Beschreibung von (linearen) Netzwerken im Hochfrequenzbereich, besonders in der Messtechnik
- Messung von Wellengrößen (Spannung und Strom schwer messbar bei HF)
- Zählweise: Anzahl der Tore (≙ Paare von Anschlussklemmen)
- Hier: Beschränkung auf 1-Tore und 2-Tore

| | **1-Tor** | **2-Tor** |
|---|---|---|
| Beispiele | Bauelement, Antenne | Filter, Leitung |
| Anzahl der S-Parameter | 1 | $2 \cdot 2 = 4$ |
| Bedeutung der S-Parameter | $S_{11}$: (Eingangs-) Reflexionsfaktor | $S_{11}$: Eingangs-Reflexionsfaktor<br>$S_{22}$: Ausgangs-Reflexionsfaktor<br>$S_{21}$: Vorwärts-Transmissionsfaktor<br>$S_{12}$: Rückwärts-Transmissionsfaktor |
| Bild |  |  |

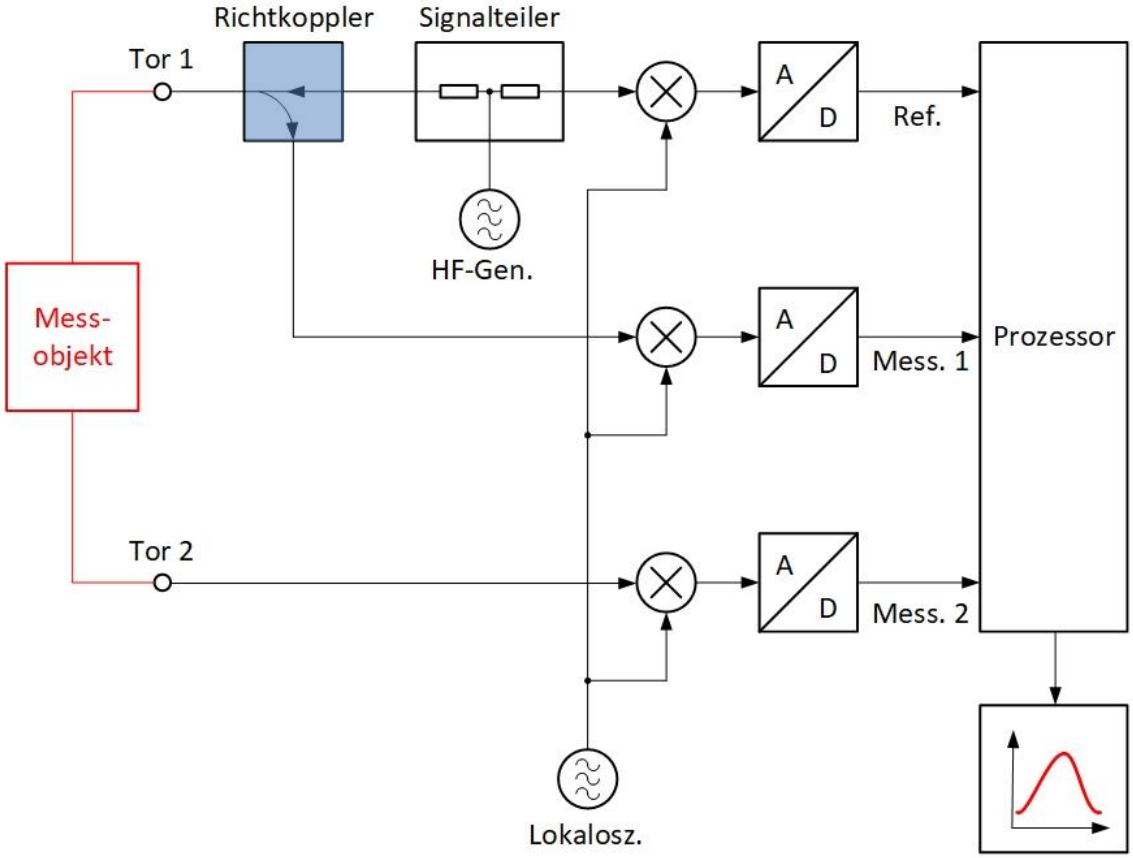
# Netzwerkanalysatoren: Klassen

| | **Skalar (nur Betrag)** | **Vektoriell (Betrag und Phase)** |
|---|---|---|
| 1-Tor | SWR-Meter | Antennen-Analysator |
| 2-Tor | Netzwerktester, Wobbel-Messplatz | Vektor-Netzwerkanalysator (VNA, VNWA) |

- Hier ausschließlich betrachtet: vektorielle Netzwerkanalyse
- Gründe:
  - Nur diese erlaubt vollständige Korrektur systematischer Fehler
  - Bestimmung komplexer Impedanzen
  - Zeitbereichs-Reflektometrie
  - Verschiebung der Messebene

# Netzwerkanalysatoren: Aufbau

- Blockschaltbild eines vektoriellen Netzwerkanalysators nach dem Heterodyn-Prinzip (nach [2])




- <u>Richtkoppler, ausgeführt als:</u>
- Messbrücke ≈ 10 kHz…4 GHz
- Leitungskoppler ≈ 1 GHz…10 GHz

# Netzwerkanalysatoren: Geräte

| Klasse | AFU-Bereich | Profess. Bereich |
|---|---|---|
| 1-Tor, vektoriell | • FA-VA5<br>• RigExpert<br>• … | |
| 2-Tor, skalar | • FA-NWT2 | |
| 2-Tor, vektoriell | • miniVNA<br>• NanoVNA<br>• VNWA2/VNWA3<br>• … | • HP 8753 (gebraucht)<br>• R&S<br>• Keysight<br>• Anritsu<br>• … |
| Preisklasse | ≈ 50…1000 EUR | ≈ Faktor 100 (Neugeräte) |

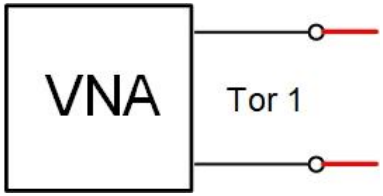
# Messablauf

1. Sweep-Parameter wählen (Start- und End-Frequenz, Anzahl Messpunkte, Bandbreite/Messzeit)
2. **Kalibrierung (1-Tor, 2-Tor)**
3. Format wählen (Smith-Diagramm, Betrag, Phase, …)
4. Evtl. „Port Extension“: Verschieben der Messebene (bei Verwendung von Adaptern sinnvoll)
5. Messung(en)
6. Speichern/Export
7. Überprüfung der Ergebnisse auf Plausibilität
8. Weiterverarbeitung: Berechnung R, L, C, … aus $S_{11}$, $S_{21}$

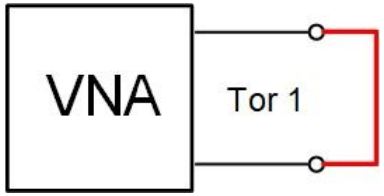
# Messablauf: 2. Kalibrierung

- Grund: Korrektur **systematischer** Messabweichungen
- Vorgehen: Bestimmung der VNA-Fehlergrößen durch Messung **bekannter** Kalibrierstandards
- Beispiel 1-Tor: **OSM**-Verfahren mit 3 Kalibrierstandards (Prinzip)

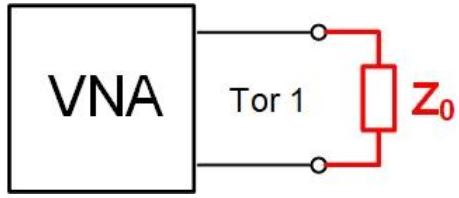
**O**PEN (Leerlauf)




**S**HORT (Kurzschluss)




**M**ATCH (Abschluss)




- Aus den 3 Kalibrier-Messergebnissen berechnet VNA die 3 Fehlergrößen
- Bei den Messungen berechnet VNA aus den Roh-Messdaten und den 3 Fehlergrößen die korrigierten Messdaten
- **Güte der Kalibrierstandards bestimmt Genauigkeit der VNA-Messergebnisse**

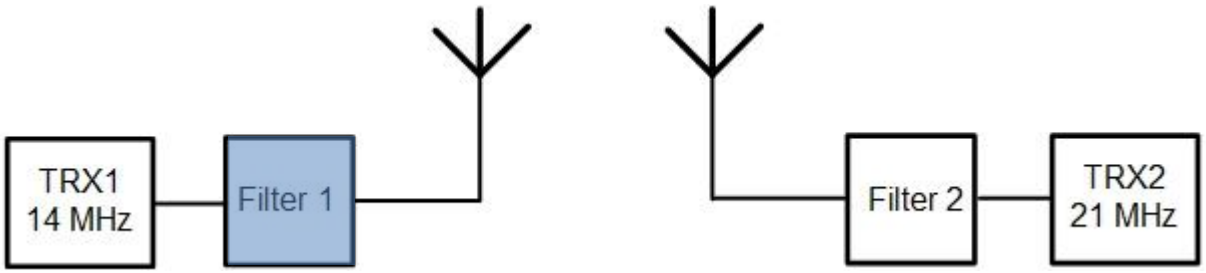
# Messbeispiele

| Nr. | Messobjekt | Typ | Gesuchte Größen, Aufgabe |
|---|---|---|---|
| 1 | Notchfilter für 21 MHz | 2-Tor | Dämpfung, Anpassung |
| 2 | Koaxialkabel als 1:1-Trafo auf 14 MHz | 1-Tor | Mechanische Leitungslänge bestimmen |
| 3 | Ringkernspule | 1-Tor | Impedanz $\underline{Z}$ → L, $R_V$, Güte |
| 4 | Delta-Loop-Antenne für 7 MHz | 1-Tor | Abgleich auf beste Anpassung an 50 Ω |

# Messbeispiel 1: Notchfilter für 21 MHz

- Aufgabe: Gleichzeitiger Betrieb von zwei dicht benachbarten Funkstationen,

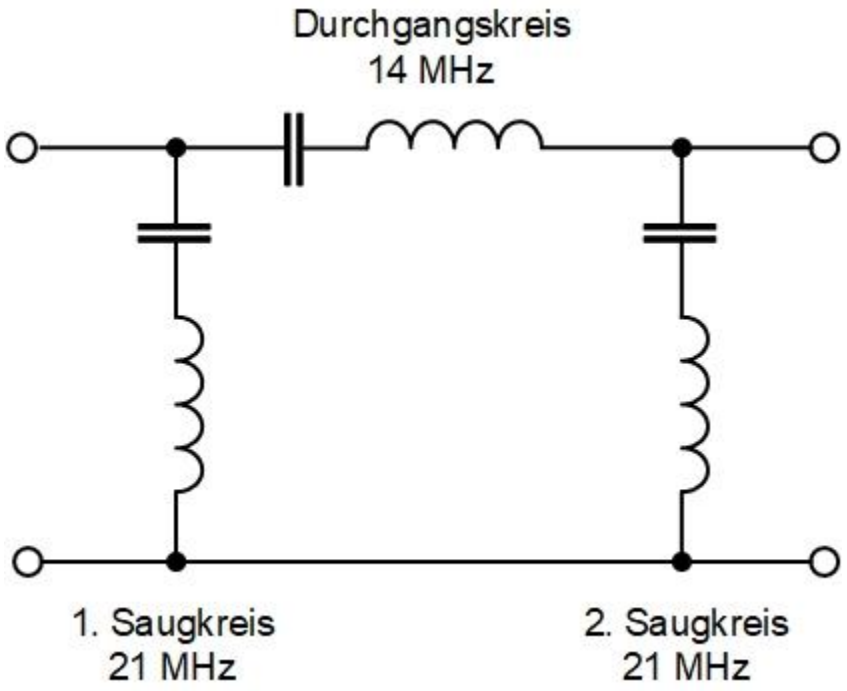
  TRX1 auf 14 MHz, TRX2 auf 21 MHz (Beispiel: HBØ-Expedition auf Augstenberg)




- Lösung: Notchfilter an jedem TRX-Ausgang
- Anforderungen, hier am Beispiel Filter 1:
  - Möglichst hohe Dämpfung des Störsignals (21 MHz) → Notch-Frequenz
  - Geringe Dämpfung des Nutzsignals (14 MHz)
  - Erhalt der Anpassung der 14-MHz-Antenne

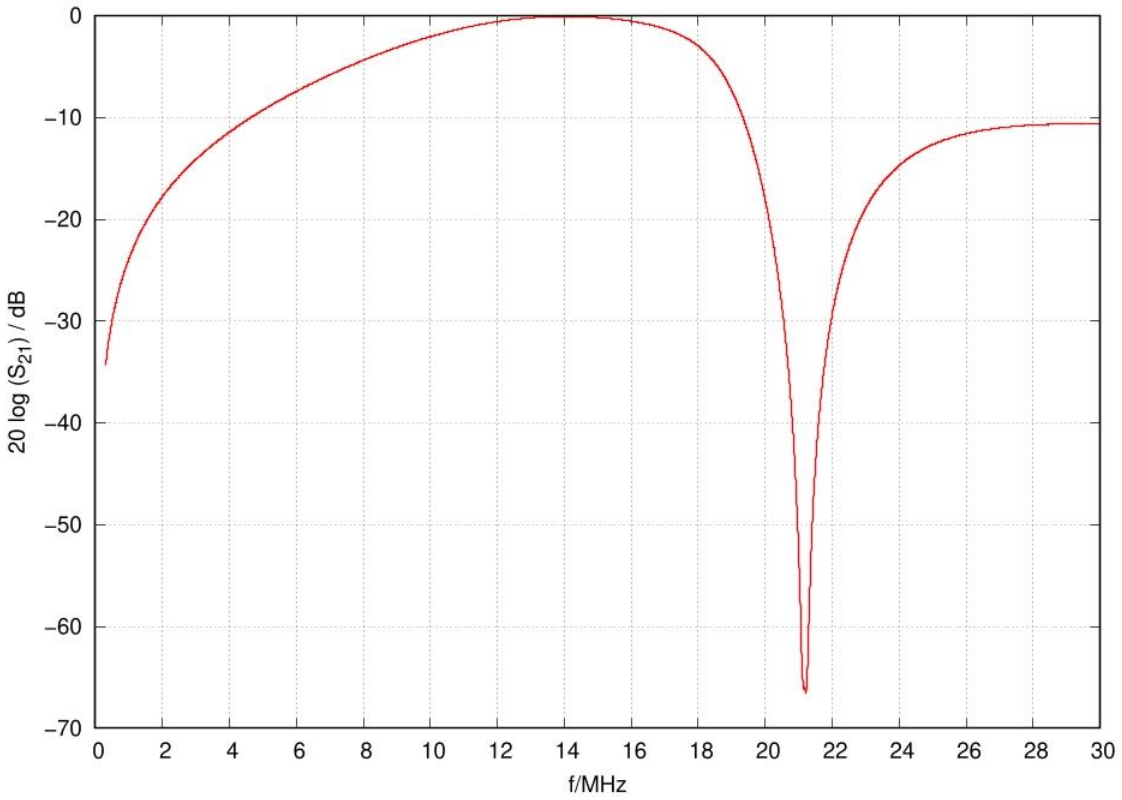
# Messbeispiel 1: Notchfilter für 21 MHz

- Realisierung: eigener Entwurf



# Messbeispiel 1: Notchfilter für 21 MHz

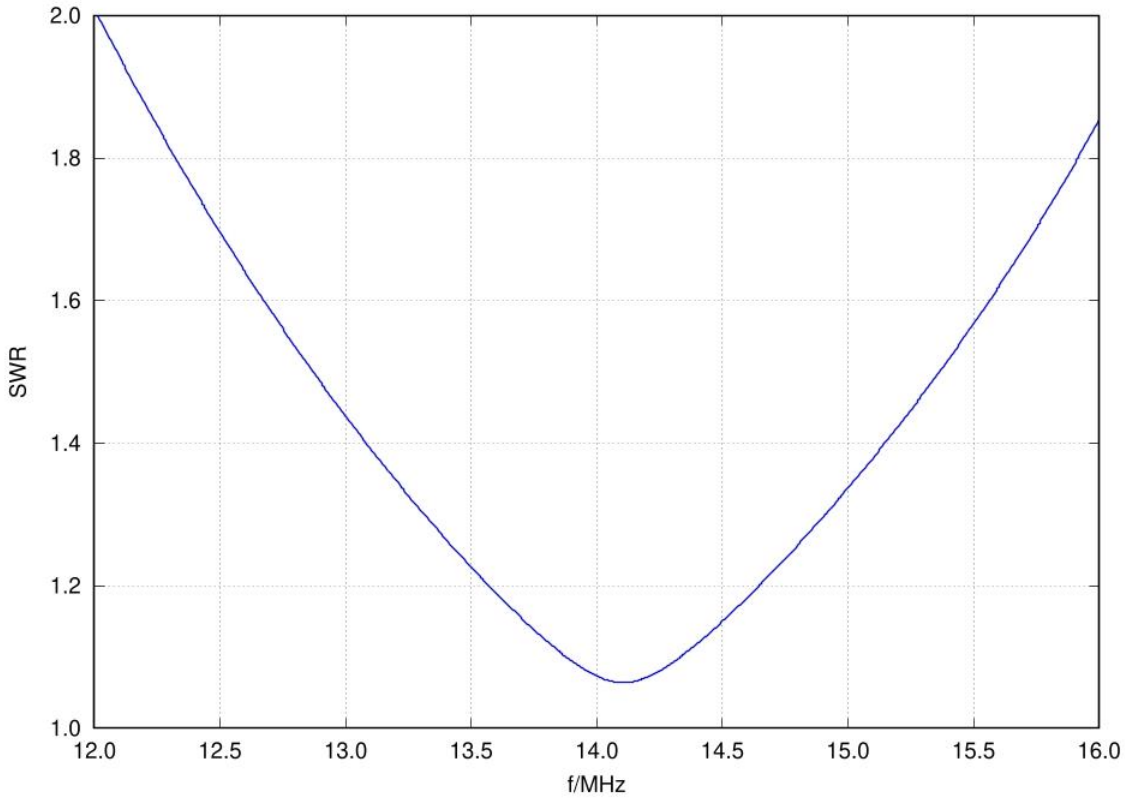
- Notchfilter ist 2-Tor → VNA-Messung $S_{11}$, $S_{21}$
- Messergebnis $20 \cdot \log(S_{21})$ nach Abgleich




- Max. Dämpfung 66 dB auf 21,18 MHz
- Min. Dämpfung 0,08 dB auf 14,03 MHz

# Messbeispiel 1: Notchfilter für 21 MHz

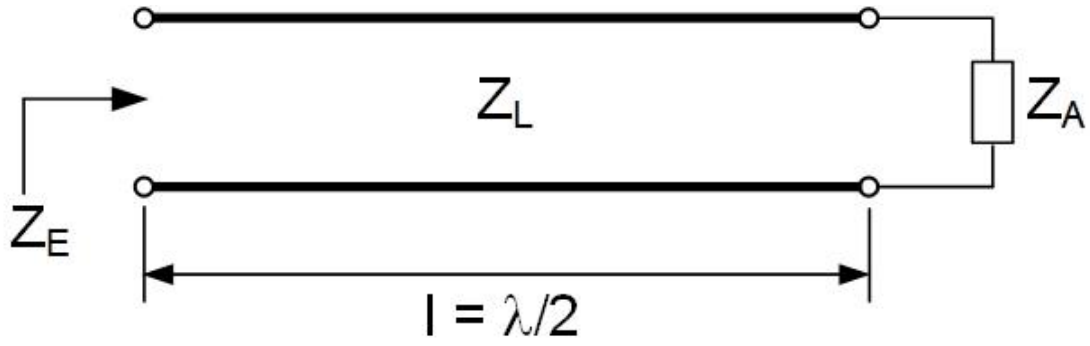
- Notchfilter ist 2-Tor → VNA-Messung $S_{11}$, $S_{21}$
- Aus $\underline{S}_{11}$-Messergebnis berechnetes SWR




- SWR = $(1 + |\underline{S}_{11}|) / (1 - |\underline{S}_{11}|)$
- Min. SWR 1,06 auf 14,1 MHz

# Messbeispiel 2: Koaxialkabel als 1:1-Trafo

- Gegeben: RG-58-Koaxialkabel
- Aufgabe: **mechanische** Leitungslänge bestimmen, so dass Kabel als 1:1-Trafo auf 14,1 MHz wirkt (z.B. als Phasenleitung bei Richtantennen)
- Lösung: 1:1-Trafo ($Z_E = Z_A$) → $\lambda/2$ **elektrische** Leitungslänge



# Messbeispiel 2: Koaxialkabel als 1:1-Trafo

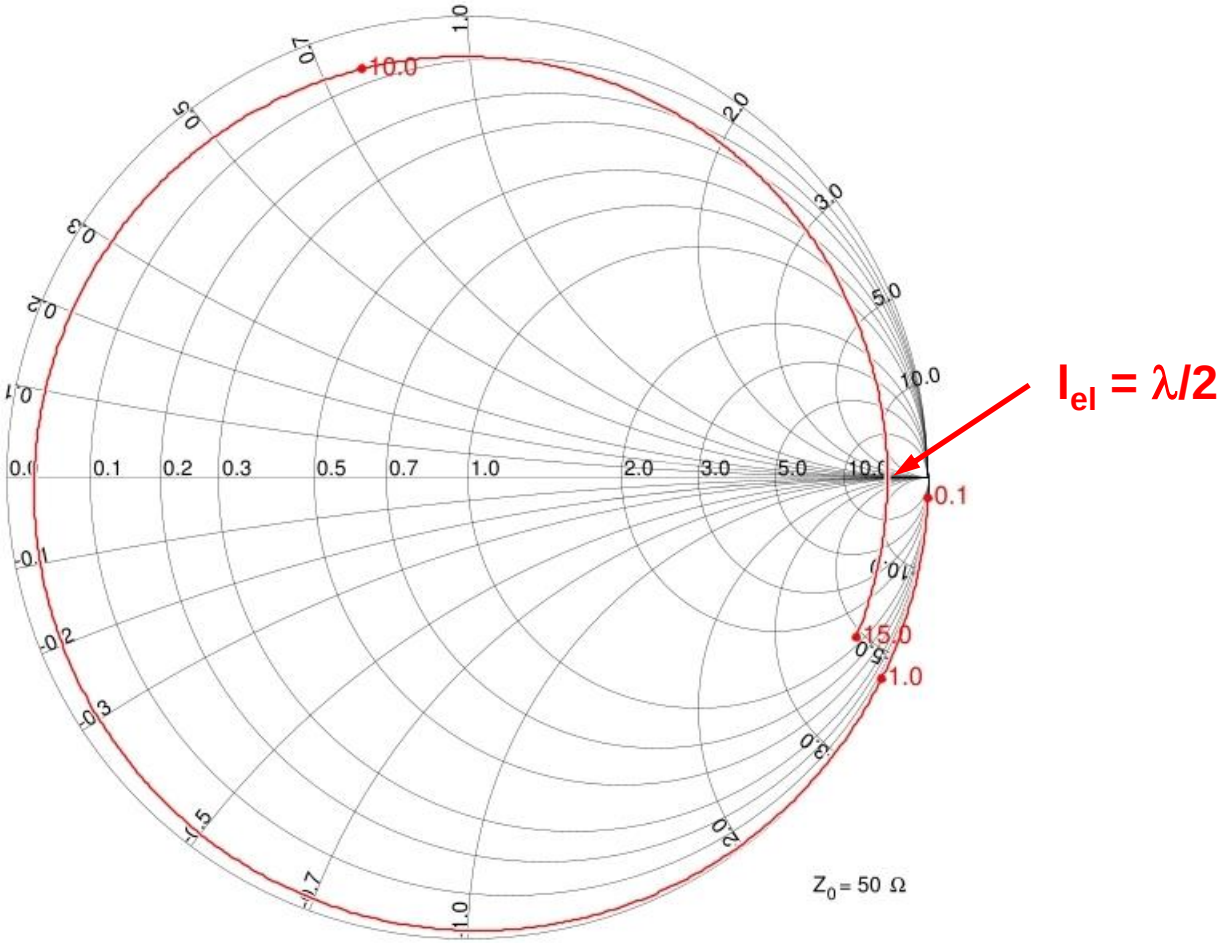
- <u>Lösung, rechnerisch</u>:
  - $l_{mech} = l_{el} \cdot VF = \lambda/2$, VF: Verkürzungsfaktor (VF = 0,66 für RG-58)
  - → $l_{mech} = \lambda/2 \cdot VF =$ **7,02 m** ($\lambda = c_0/f$ = 21,26 m für f = 14,1 MHz)

# Messbeispiel 2: Koaxialkabel als 1:1-Trafo

- Lösung, messtechnisch mit VNA:
  - $S_{11}$-Messung des am Ausgang offenen RG-58-Kabels
  - Abgleich: Kabellänge auf **6,99 m** gekürzt, so dass Impedanz $\underline{Z}_E$ am Eingang des Kabels bei 14,1 MHz maximal
  - $\underline{Z}_E = Z_0 \cdot (1 + \underline{S}_{11}) / (1 - \underline{S}_{11})$, $Z_0 = 50\ \Omega$

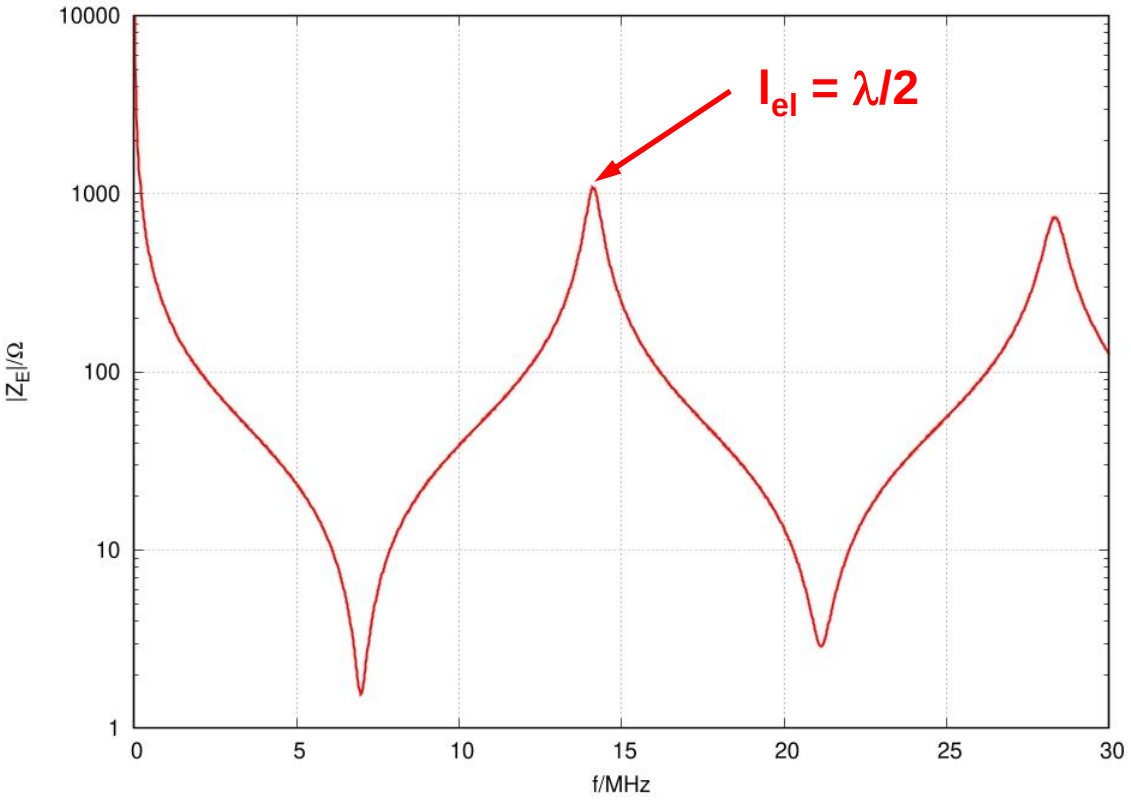
# Messbeispiel 2: Koaxialkabel als 1:1-Trafo

- Lösung, messtechnisch mit VNA:
  - $S_{11}$-Messung des am Ausgang offenen RG-58-Kabels



# Messbeispiel 2: Koaxialkabel als 1:1-Trafo

- Lösung, messtechnisch mit VNA:
  - Eingangs-Impedanz $|Z_E|$ des am Ausgang offenen RG-58-Kabels



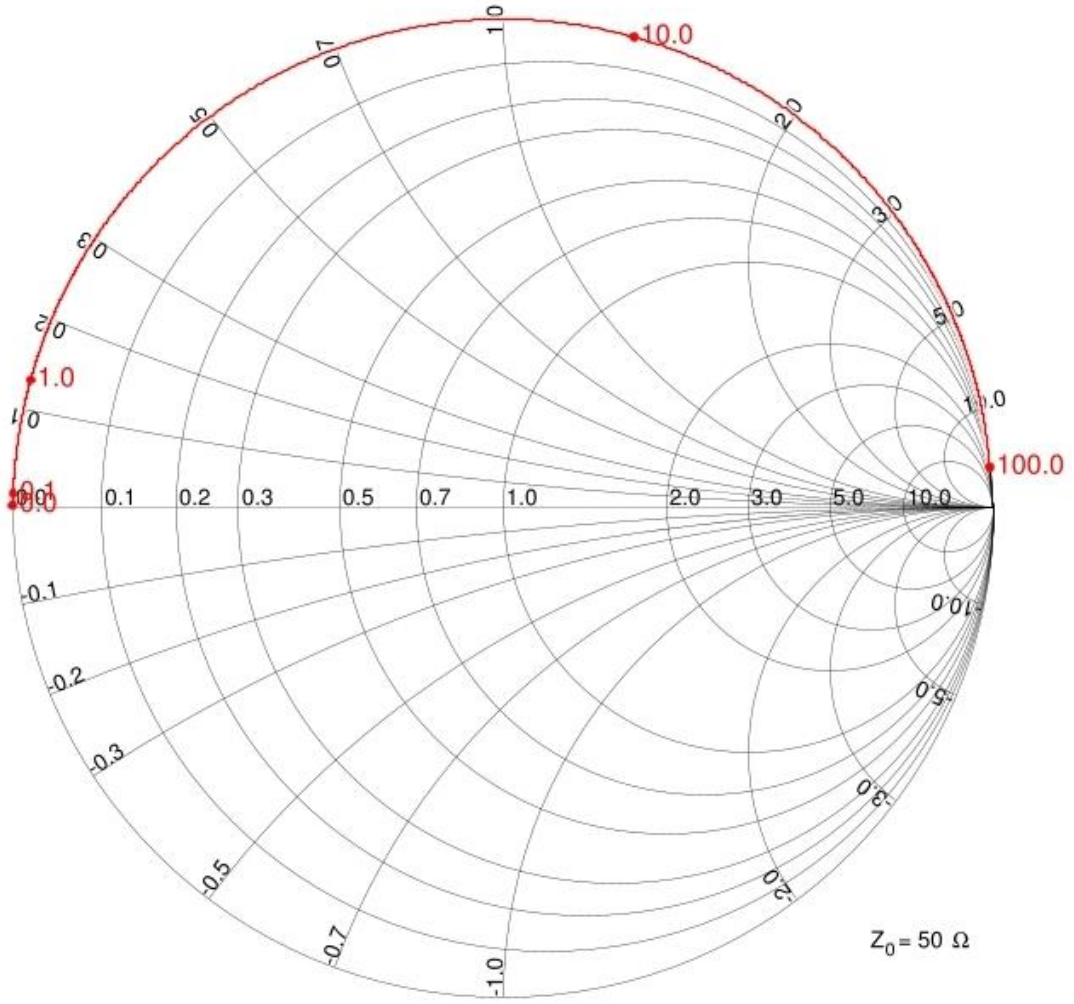

- $l_{el} = \lambda/2$ bei 14,10 MHz

# Messbeispiel 3: Ringkernspule

- Gegeben: Ringkern T130-17 (Amidon) mit 14 Windungen
- Gesucht: Impedanz Z und daraus (Verlust-)Widerstand $R_V$, Induktivität L, Güte Q
- Lösung: $S_{11}$-Messung mit VNA, daraus Berechnung der gesuchten Größen

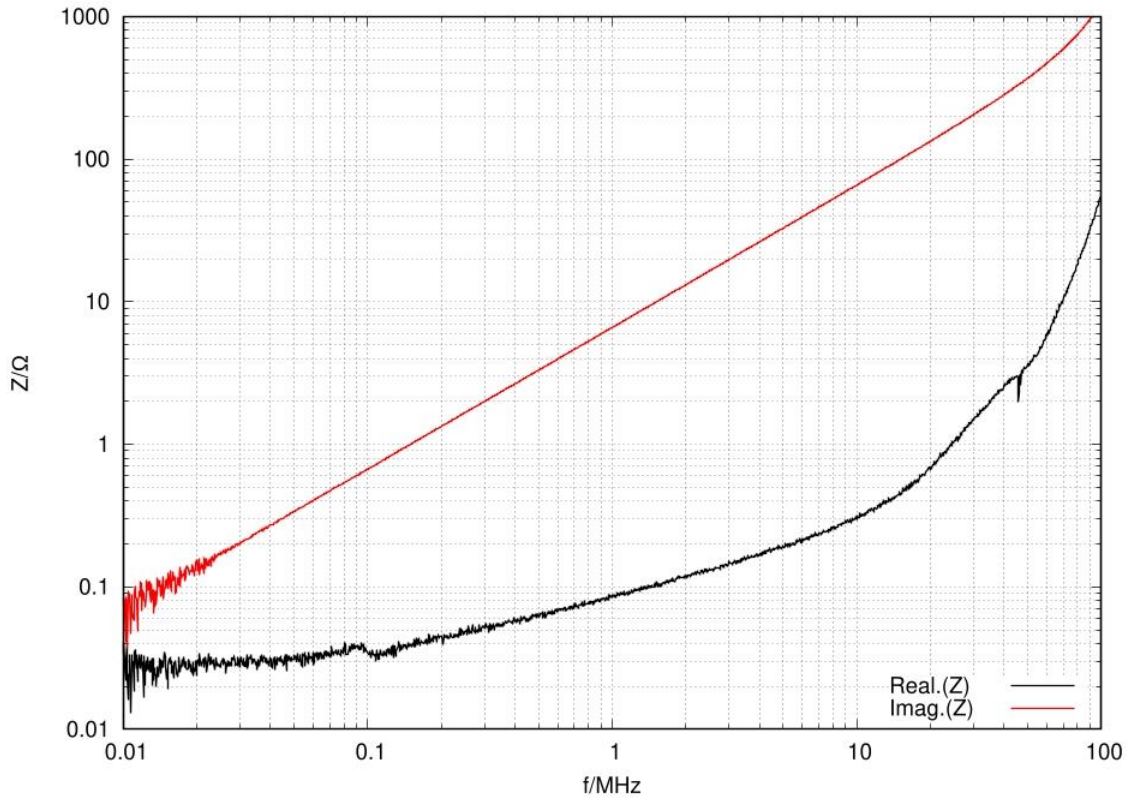
# Messbeispiel 3: Ringkernspule

- Messergebnis $\underline{S}_{11}$ im Smith-Diagramm



# Messbeispiel 3: Ringkernspule

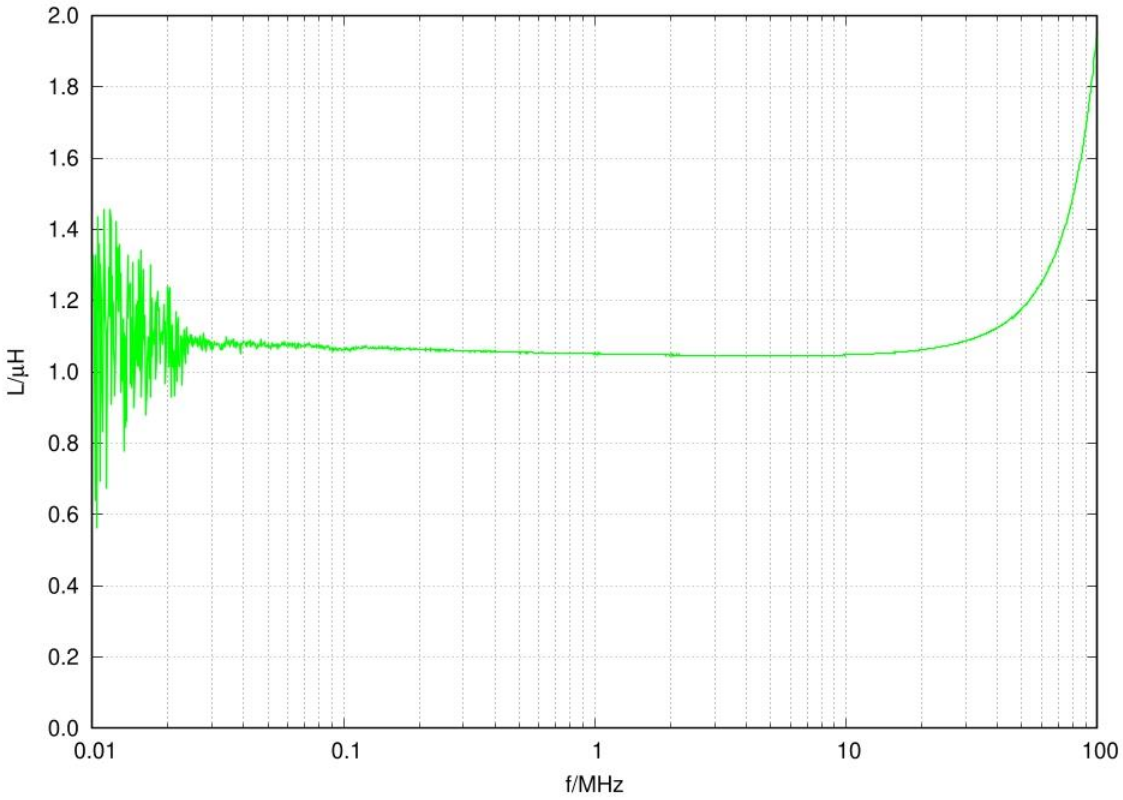
- Aus $\underline{S}_{11}$-Messergebnis berechnete Größen: Impedanz $\underline{Z}$




- $\underline{Z} = Z_0 \cdot (1 + \underline{S}_{11}) / (1 - \underline{S}_{11})$, $Z_0 = 50\ \Omega$
- **Imaginärteil ($\underline{Z}$) = Blindwiderstand**
- **Realteil ($\underline{Z}$) = Verlustwiderstand $R_V$**
- $R_V$ nimmt mit steigender Frequenz zu (Verluste im Kernmaterial)

# Messbeispiel 3: Ringkernspule

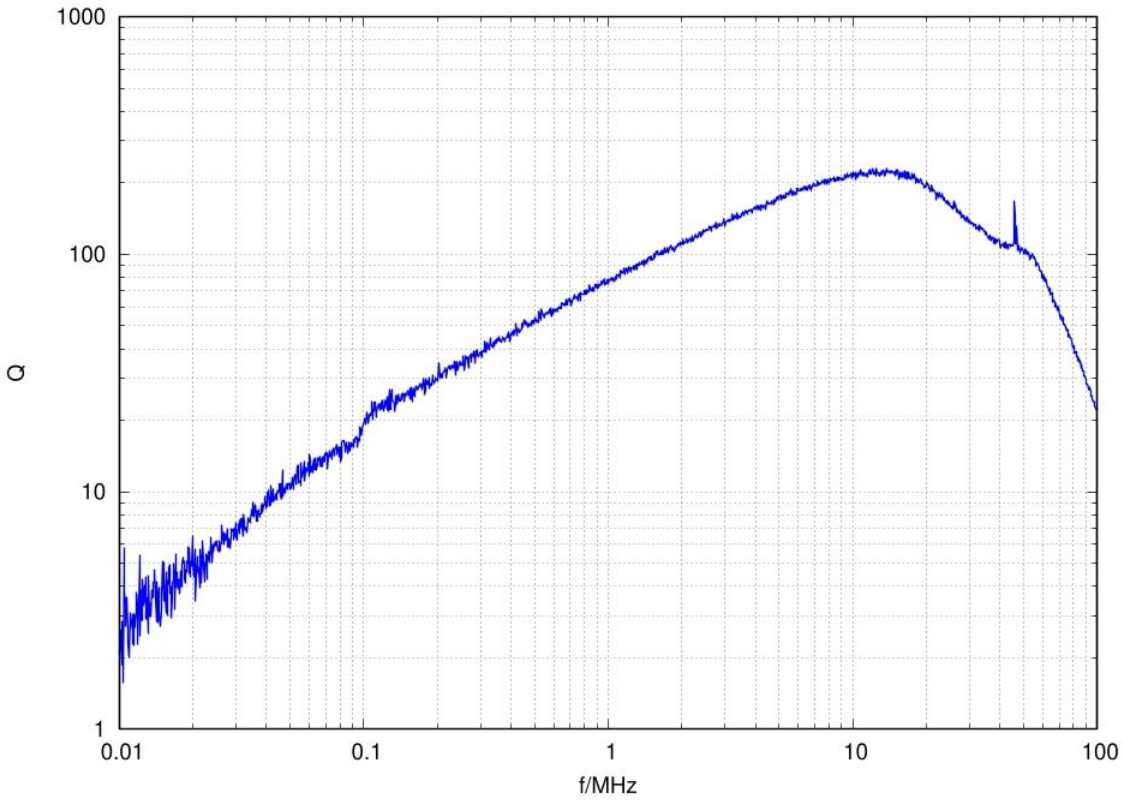
- Aus $\underline{S}_{11}$-Messergebnis berechnete Größen: Induktivität L




- Aus Blindwiderstand $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$ →
- $L = X_L / (2 \cdot \pi \cdot f)$
- L = 1,05 µH (bei 1 MHz)
- L nimmt oberhalb ca. 10 MHz zu →
- Scheinbare Zunahme, verursacht durch Parallel-Resonanz oberhalb 100 MHz

# Messbeispiel 3: Ringkernspule

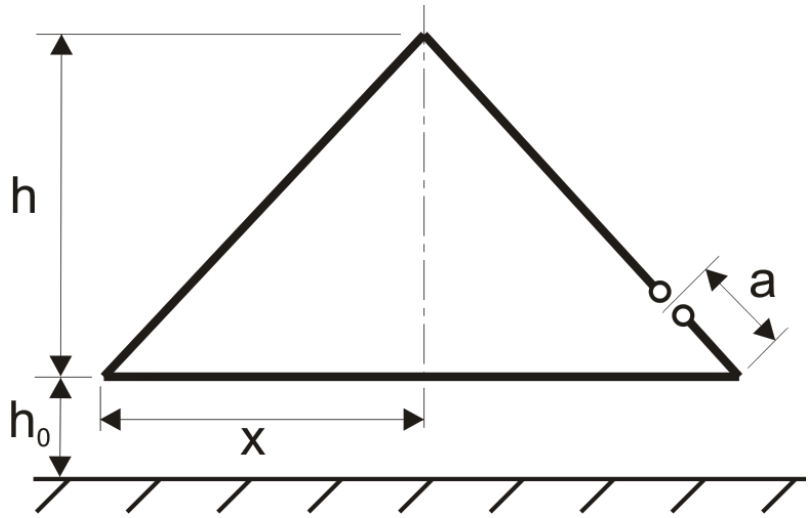
- Aus $\underline{S}_{11}$-Messergebnis berechnete Größen: Güte Q




- Güte Q = Im {$\underline{Z}$} / Re {$\underline{Z}$} (Definition)
- Q > 100 im Bereich 1,8…50 MHz
- Max. Q = 220 bei 14 MHz

# Messbeispiel 4: Delta-Loop-Antenne für 7 MHz

- Aufgabe: Abgleich einer Delta-Loop-Antenne auf beste Anpassung bei 7,04 MHz (notwendig wegen Einfluss der Draht-Isolation und des Bodens [3])
- Ansatz: $S_{11}$-Messung mit VNA im **Speisepunkt** der Antenne, in ca. 2,7 m Höhe!




**Auslegung mit NEC-2-Simulation:**

**$h_o$**= 2 m

**h** = 7,6 m

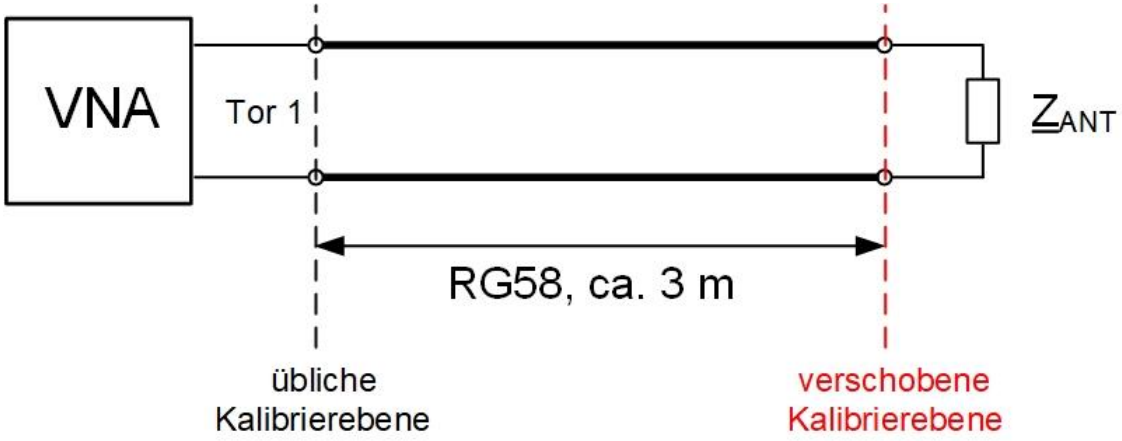
**a** = 1,25 m

**U** = 44,10 m

**x** = 9,715 m

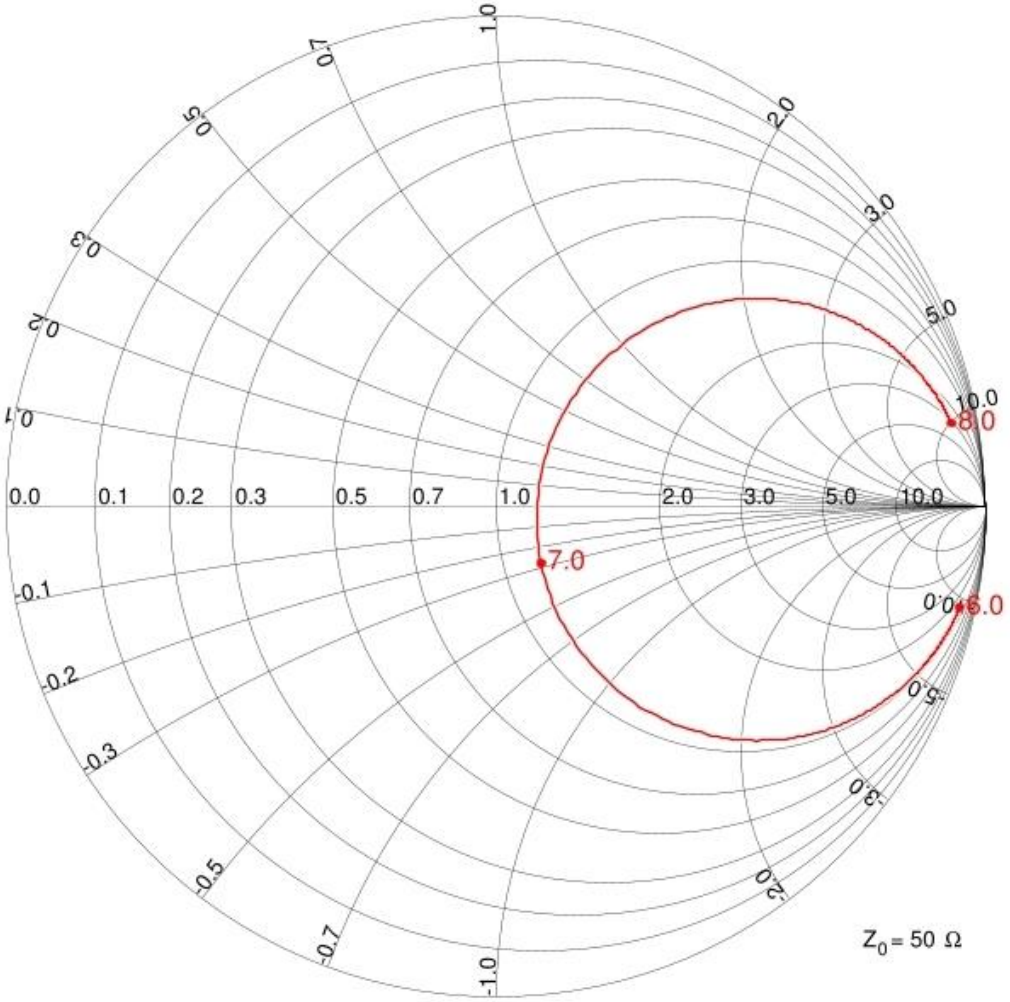
# Messbeispiel 4: Delta-Loop-Antenne für 7 MHz

- Herausforderung: übliche Kalibrierung am Port des VNA = Messebene
- Mögliche Lösungen:
  1. VNA auf 2,7 m Höhe bringen → unpraktisch
  2. Messung über λ/2-Leitung (≙ 1:1-Trafo, siehe Beispiel 2) → Aufwand
  3. **Kalibrierung am Ende eines kurzen Messkabels (gewählt 3 m RG58) → Verschiebung der Kalibrierebene in Speisepunkt der Loop**



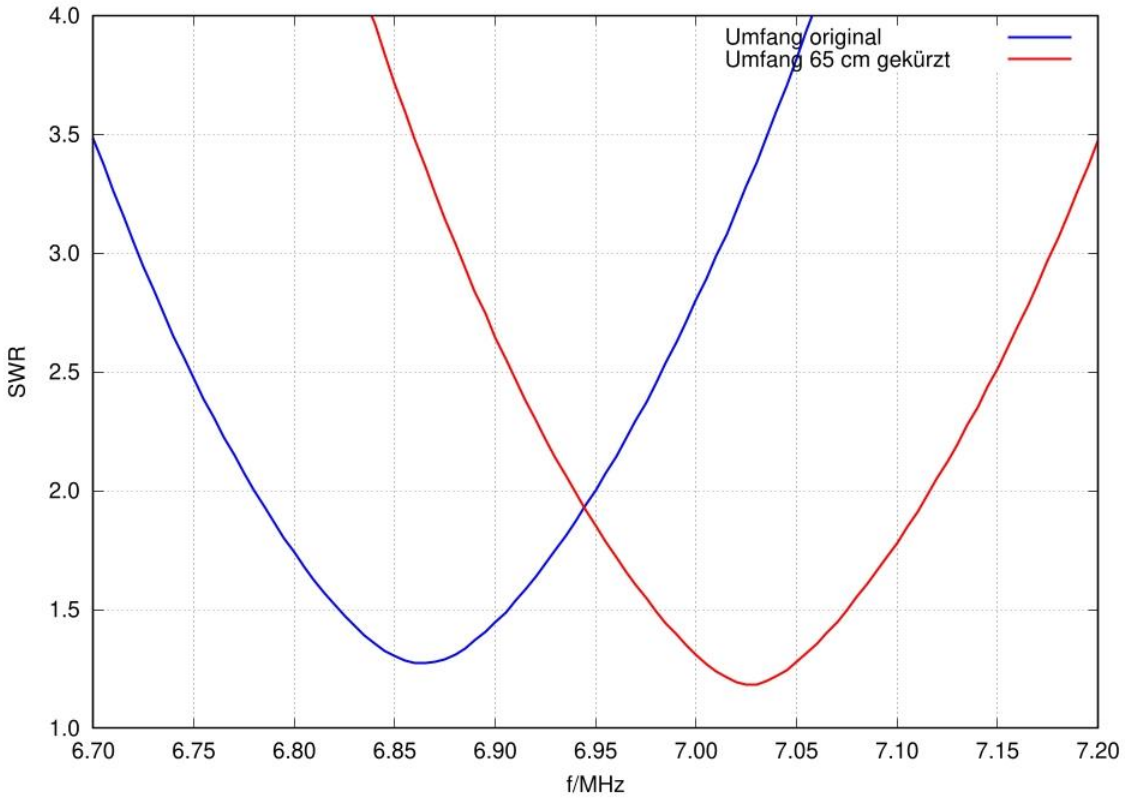
# Messbeispiel 4: Delta-Loop-Antenne für 7 MHz

- Messergebnis $\underline{S}_{11}$ im Smith-Diagramm (nach Kürzung des Umfangs um 65 cm):



# Messbeispiel 4: Delta-Loop-Antenne für 7 MHz

- Aus $\underline{S}_{11}$-Messergebnis berechnetes SWR




- SWR = $(1 + |\underline{S}_{11}|) / (1 - |\underline{S}_{11}|)$
- Resonanz vor Abgleich: 6,86 MHz
- Resonanz nach Abgleich: **7,03 MHz** mit SWR = 1,2

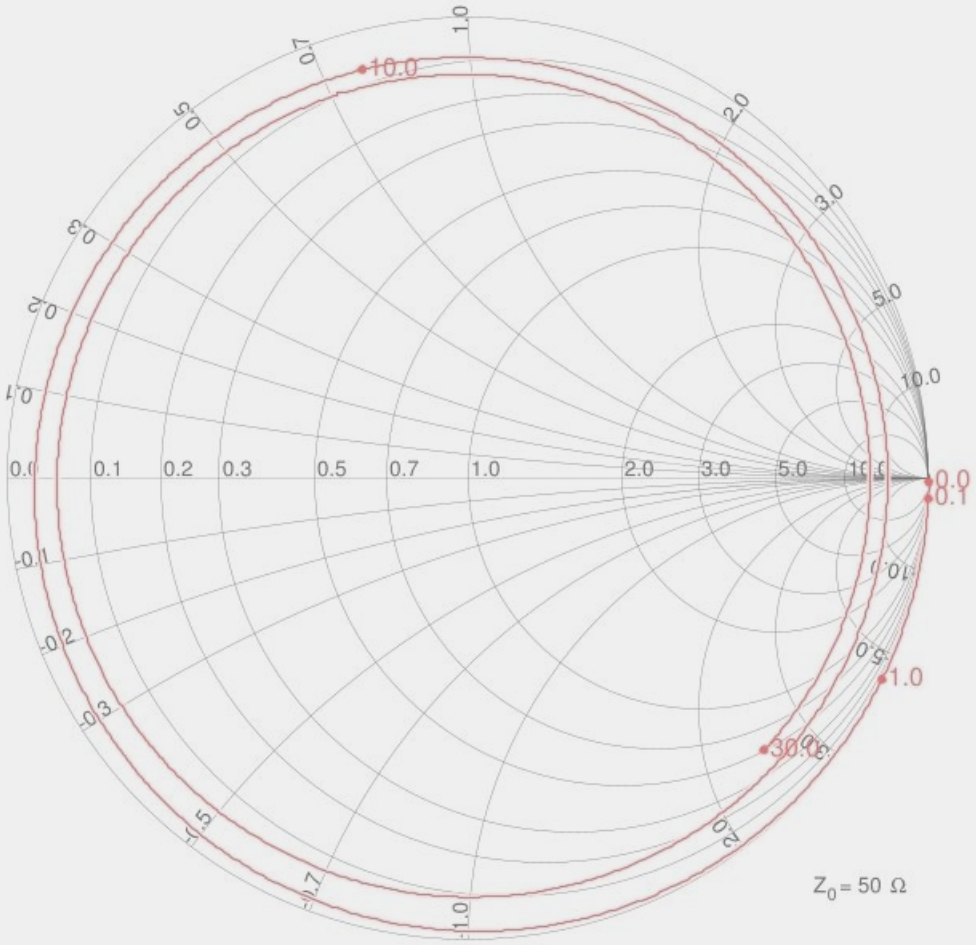
# Literatur

[1] Meinke; Gundlach (Hrsg.): „Taschenbuch der Hochfrequenztechnik“, 5. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg, 1992

[2] Hiebel, M.: „Grundlagen der vektoriellen Netzwerkanalyse“, 2. Auflage, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, München, 2007

[3] Neibig, U., DL4AAE: „Delta-Loop-Antennen – neu optimiert für DX“, Vortrag auf P51-OV-Abend, 09.03.2012, http://www.dl4aae.darc.de/download

[4] Von Wdwd - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11539005

# Demonstration einer Messung

- Koaxialkabel als 1:1-Trafo auf 14 MHz