

Messungen mit fortgeschrittenen Antennenanalysatoren

Leistungsmerkmale fortgeschrittener Antennenanalysatoren und deren Messmöglichkeiten

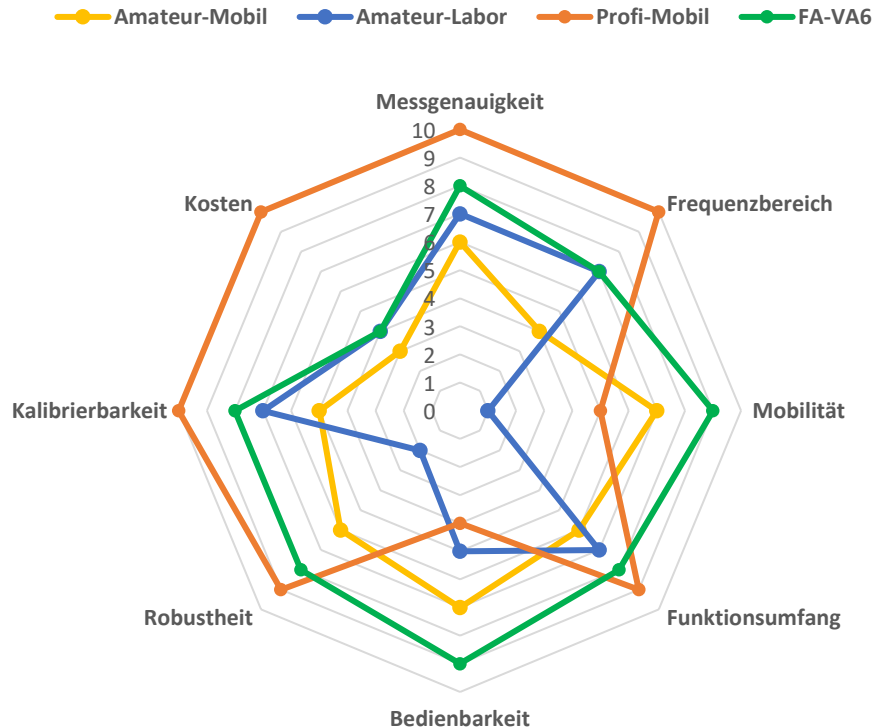


Agenda

- **Fortgeschrittene Antennenanalysatoren**
- Messung an Antennensystemen
- Messung an Bauelementen
- Zeitbereichsmessungen (TDR)
- Zusammenfassung

Merkmale nach Zielgruppe und Umsetzung beim FA-VA6

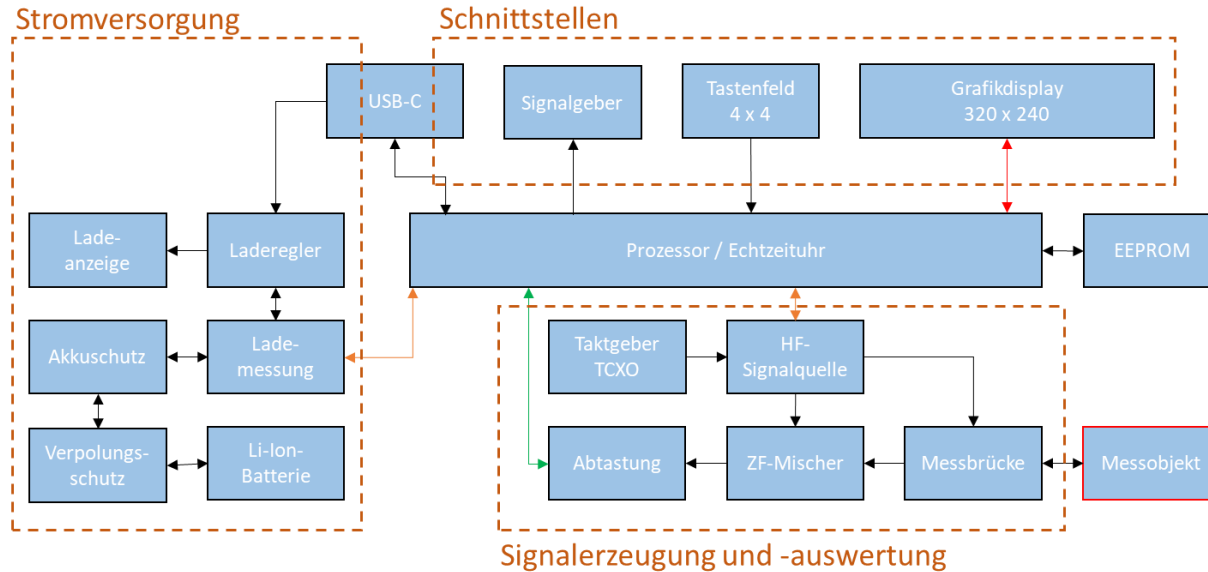
Zielanforderungen fortgeschrittener Analysator



	FA-VA6 Umsetzung
Messgenauigkeit	Hohe Ausgangsleistung > 2 dBm, hoher Dynamikumfang: > 80 dB / 69 dB / 57 dB bei 200 MHz / 600 MHz / 1 GHz
Frequenzbereich	10 kHz – 1 GHz
Mobilität	Sonnenlichttaugliches Display, 1000 nits Gut bedienbare, professionelle Silikon-Tastatur Industrie-Akku mit > 12 h Betriebszeit Kompakt, leicht: 85 x 135 x 28 mm, 270 g Hochwertiger Transportkoffer mit Zubehör
Funktionsumfang	Umfangreiche Ausstattung inklusive Zeitbereichsmessungen, Kabel-Tools und Rechner
Bedienbarkeit	Intuitive Bedienung, eingebaute Hilfe, optimierte Darstellung von Zeichen und Kurven mit Anti-Aliasing. Hochleistungs-Betriebssystem: Alles reagiert direkt, läuft flüssig und schnell. Bis zu 120 Hz Bild-Wiederholrate.
Robustheit	Aluminium-Gehäuse, V2A Komponenten Robuste Mischer Umfangreiche Schutz- und Ladelektronik
Kalibrierbarkeit	Präzise Fabrikkalibrierung, umfangreiche Kalibriermöglichkeiten mit Angabe von Parametern für Standards, Port-Erweiterung
Kosten	Bausatz, UVP € 299 inkl. Steuer

Hardwareüberblick des FA-VA6

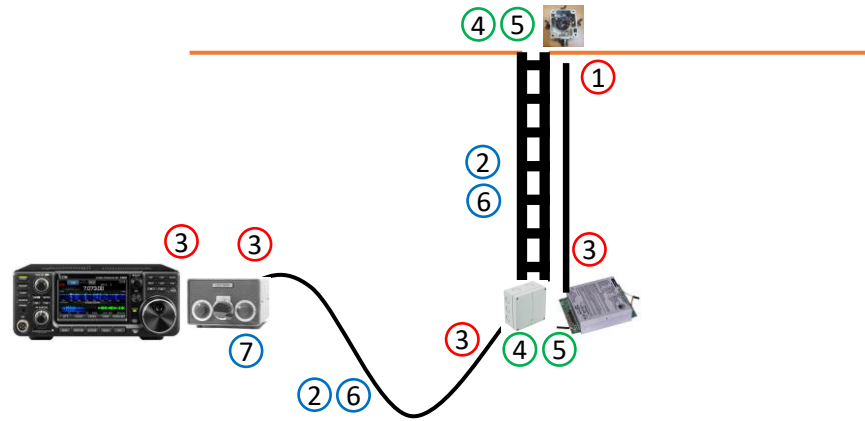
- Die präzise Signalkette wurde weitestgehend vom Vorgänger übernommen, andere Baugruppen wurden in Hinblick auf einen fortgeschrittenen Antennenanalysator neu entworfen.



Agenda

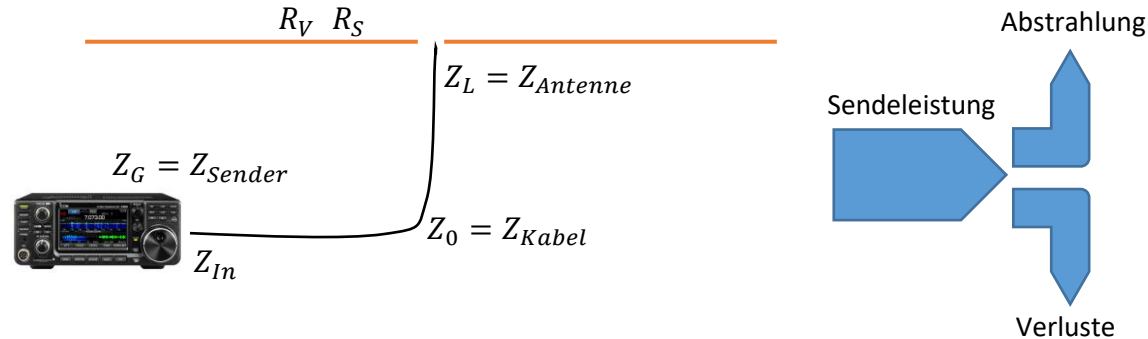
- Fortgeschrittene Antennenanalysatoren
- **Messung an Antennensystemen**
- Messung an Bauelementen
- Zeitbereichsmessungen (TDR)
- Zusammenfassung

Antennensystem-Varianten / Ansatzpunkte Messungen mit Antennenanalysator.



- ① Antennenimpedanz (SWV)
- ② Wellenwiderstand und Verlust der Leitung
- ③ Eingangsimpedanz (VSWV) an Leitungen und Anpassgliedern
- ④ Durchgangs- und Sperrwirkung von Anpassgliedern (Baluns)
- ⑤ Werte der Bauelemente bei Anpassgliedern
- ⑥ Verkürzungsfaktor und Leitungslängen
- ⑦ Fehlstellen Kabel und Adapter

Ziel Antennensystem: Maximale Wirkleistung zur Antenne für Abstrahlung.



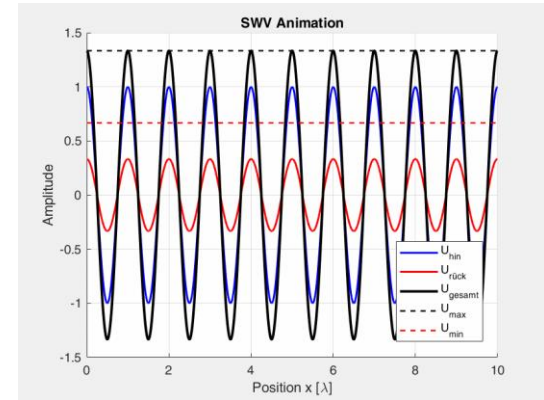
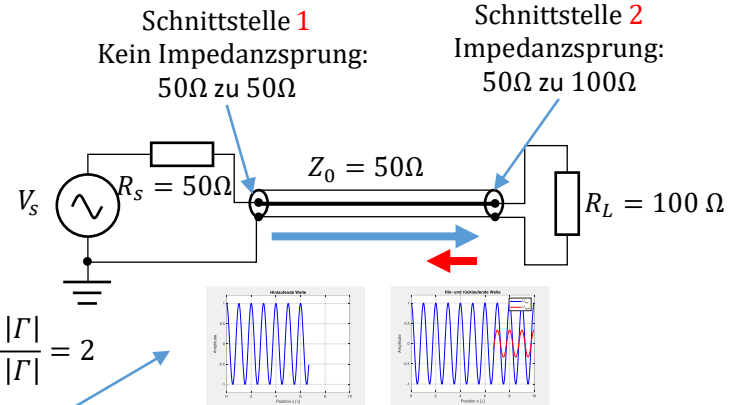
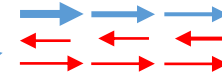
- Antennenverluste oft vernachlässigbar ($R_V = 0$). Es wirkt der Strahlungswiderstand R_S .
- Leitungen wirken als Leitungstransformatoren.
- Verluste durch Leitungsdämpfung (angepasste- und Zusatzdämpfung SWV) und andere Komponenten.
- Maximale Wirkleistung bei **Leistungsanpassung**, Impedanzen der Schnittstellen dann gleich (konjugiert komplex). Impedanzübergänge in beide Richtungen betrachten!
- Leistungsanpassung mit **minimalen Verlusten**?

Was bedeuten eigentlich SWV, Reflexion und Impedanz?

- Bei zwei **unterschiedlichen Impedanzen** an einer Schnittstelle findet eine **Teilreflexion** statt, vergleichbar zu einem Lichtstrahl in der Optik bei einem (Halb-)Spiegel.
- Das Verhältnis reflektierter- (rot) zu hinlaufender Welle (blau) ist der **Reflexionsfaktor**.
- Die Überlagerung dieser Wellen führt zu einer stehenden oder wandernden Welle. Maximale und minimale Amplitude sind das **Stehwellenverhältnis**.
- Schnittstelle 1:
 - Ohne Tuner: Scheinbare Impedanz ungleich Z_0 (Leitungslänge). Die reflektierte Welle wird komplett im Generator **absorbiert**.
 - Mit Tuner: Scheinbare Impedanz (Eingang des Tuners) gleich Z_0 . Ausgang des Tuners hat andere Impedanz. **Mehrfachreflexionen** entstehen.
- Die Leitung dämpft alle Wellen. Bei hohem SWR geht nur ein geringer Teil direkt zur Last und weitere Teile werden, je nach Leitung, stark bedämpft.

$$\Gamma = \frac{U_r}{U_h} = \frac{1}{3}$$

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = 2$$



Hoher Dynamikbereich des Analysators für Messung relevant?

- Ein Antennenanalysator misst rücklaufende zu hinlaufenden Wellen als Reflexionsfaktor Γ . Andere Werte werden berechnet.
- Reflexionsfaktor: Vektor im Smith-Diagramm.
- Der Analysator misst zum Anpassungspunkt hin am genauesten.
- Fehlerprojektion Analysator 40 dB vs. 80 dB Dynamikbereich:

Dipol $Z_L = 72 - j10$		End Fed $Z_L = 1800 - j2200$	
$\Gamma_{40\text{ dB}} = \pm 0,01$	$\Gamma_{80\text{ dB}} = \pm 0,0001$	$\Gamma_{40\text{ dB}} = \pm 0,01$	$\Gamma_{80\text{ dB}} = \pm 0,0001$
$Z_{L,+40\text{ dB}} =$ 73,73 – j8,73	$Z_{L,+80\text{ dB}} =$ 72,02 – j9,99	$Z_{L,+40\text{ dB}} =$ 2832 – j3867	$Z_{L,+80\text{ dB}} =$ 1807 – j2210
$Z_{L,-40\text{ dB}} =$ 70,29 – j11,20	$Z_{L,-80\text{ dB}} =$ 71,98 – j10,01	$Z_{L,-40\text{ dB}} =$ 1305 – j1532	$Z_{L,-80\text{ dB}} =$ 1793 – j2191

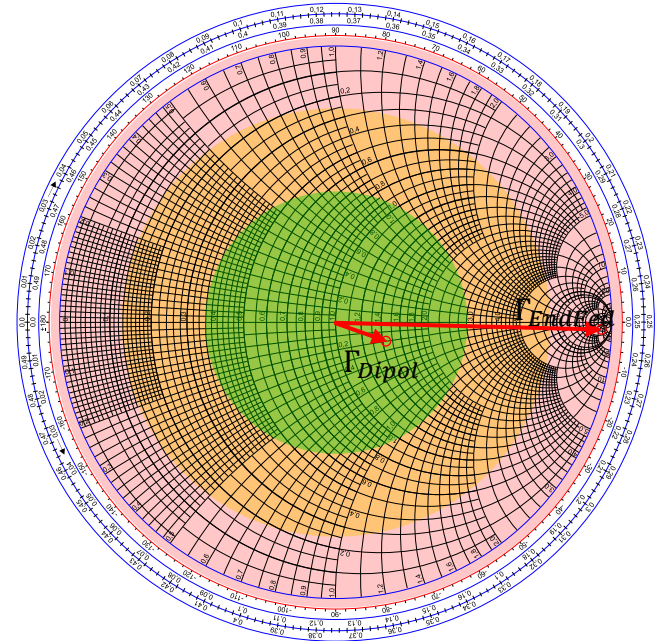
- Ein Analysator mit 80 dB Dynamikumfang hat bei anspruchsvollen Messsituationen deutliche Vorteile.

$$\Gamma = \frac{U_r}{U_h}$$

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}$$

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$



Praktische Messung der Antennenimpedanz.

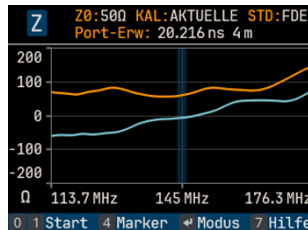
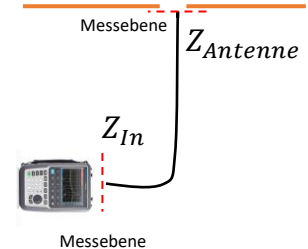
• Messung am **Fußpunkt** der Antenne:

- Analysator direkt am Fußpunkt.
- Mantelströme vermeiden.
(Strombalun, keine Berührung des Operators, kein USB-Anschluss).
- Messwerte nach Durchlauf oder ‚Wireless‘.

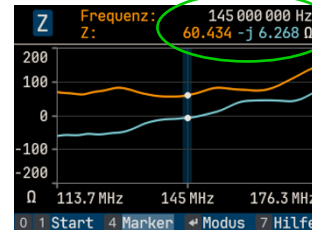


• Messung **über Antennenzuleitung**:

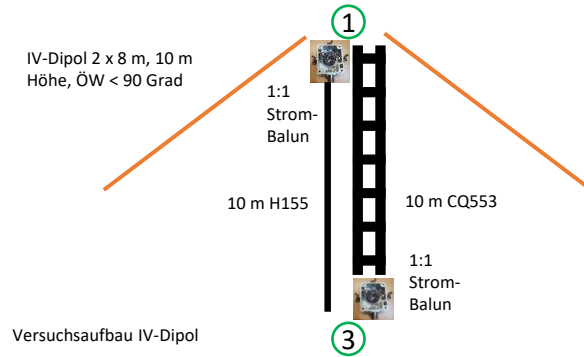
- Genaueste Methode: Antennenzuleitung oder separate Zuleitung (RG 178) per **SOL-Kalibrierung** herauskalibrieren.
- Bei Leitungen mit sehr wenig Verlust: **Port-Erweiterung** des Analysators (falls vorhanden) nutzen.
- **Rückrechnen der Eingangsimpedanz** auf die Fußpunktimpedanz per Smith Chart / Rechner.



FA-VA 6 Impedanz Messung



Beispiel: Inverted-Vee-Dipol Messung von Komponenten, Impedanz und Bewertung Verluste.



- Die Komponenten stammen aus der Bastelkiste.
- Der IV-Dipol sollte mit 16 m einem $\lambda/2$ -Dipol für das 30 m Band nahekomen.
- Exemplarisch soll ein möglicher Betrieb auf den 20 m, 30 m und 40 m Bändern bei 14 MHz, 10,1 MHz und 7 MHz untersucht werden.



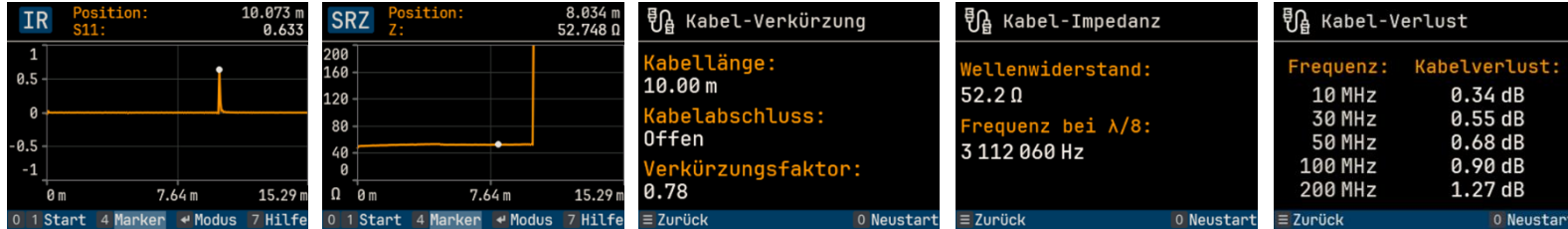
Versuchsaufbau IV-Dipol H155



Versuchsaufbau IV-Dipol CQ553

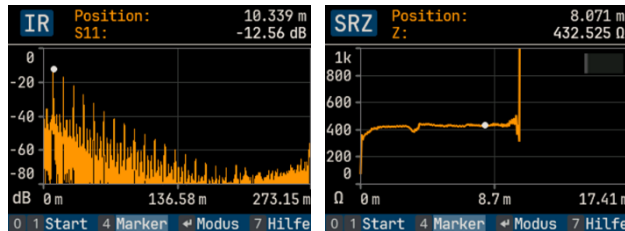
Beispiel: Inverted-Vee-Dipol Messung - Komponenten.

- Die H155 Steigleitung wurde mit den Kabeltools und dem TDR-Modus des FA-VA6 vermessen.
- Verkürzungsfaktor, Dämpfung und Wellenwiderstand liegen im Toleranzbereich des Datenblatts.

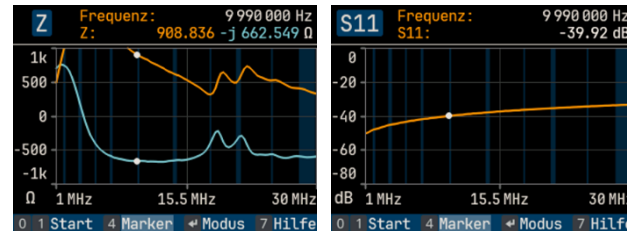


FA-VA6: Messung der Parameter H155

- Messung der CQ553 Leitung innerhalb des Hauses mit relevanten Umgebungseinflüssen.
- DX-Wire Strombalun: Durchgangsdämpfung gering und relevante Dämpfung der Mantelwellen, aber bei höheren Antennen-Impedanzen ausreichend?



FA-VA6: Messung der Parameter CQ553

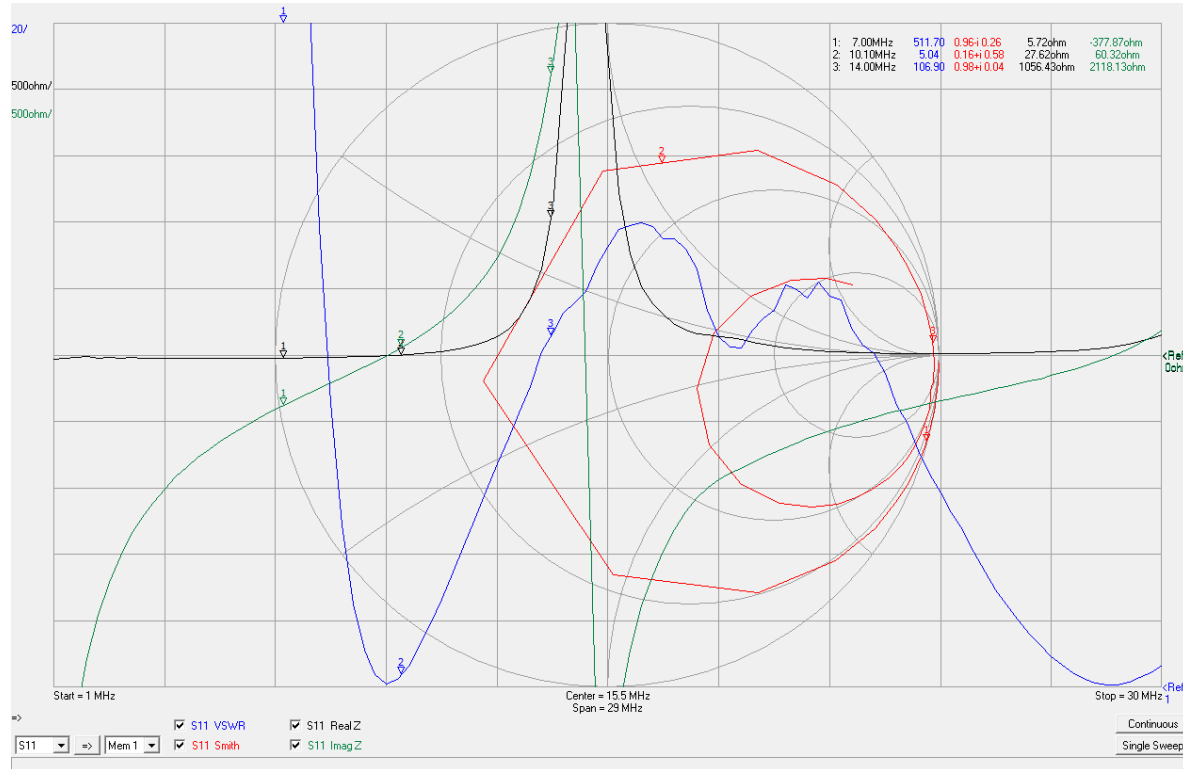


FA-VA6: Messung der Parameter Strombalun DX-Wire

Weitere Informationen unter: „Messungen an symmetrischen Leitungen mit dem FA-VA6“, M. Knitter, Funkamateure 02/26 und 03/26.

Beispiel: Inverted-Vee-Dipol Messung – Messung Antennenimpedanz.

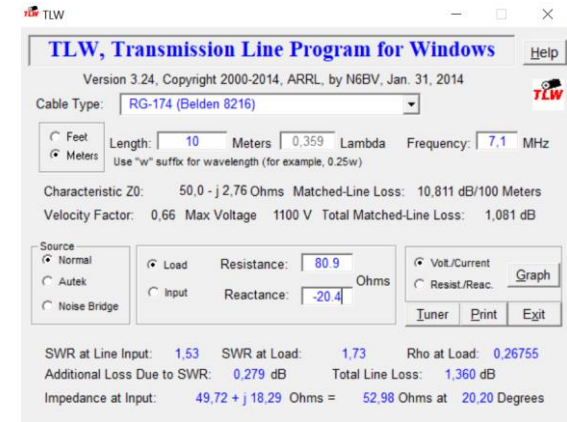
- Messung der Fußpunkt-Impedanz drahtlos mit dem FA-VA6 / VNWA.



FA-VA6: Messung der Fußpunktimpedanz IV-Dipol

Frequenz	Impedanz ①	SWV
7 MHz	5,7 – j379,9	511,7
10,1 MHz	27,6 +j60,3	5,0
14 MHz	1056,4 +j2118,1	106,9

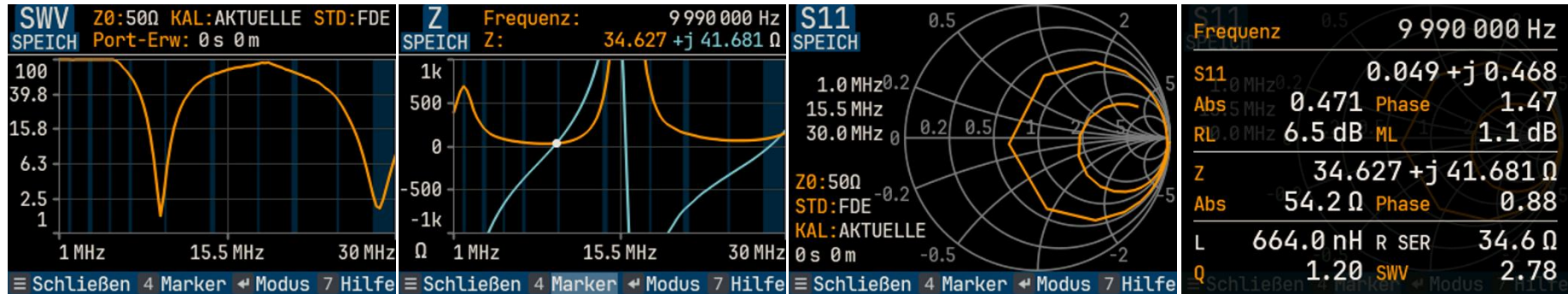
Impedanz und SWV bei Zielfrequenzen



ARRL TLW: Berechnung Verlust und Impedanztransformation

Beispiel: Inverted-Vee-Dipol Messung – Messung Antennenimpedanz.

- Alle anderen Impedanzmessungen mit dem FA-VA6 vom Boden aus, als Datensatz gespeichert, mit späterer Detailauswertung (VNWA erlaubt Import der Datensätze).
- Variante mit Aktueller-Kalibrierung am Anfang der H155 Leitung:



FA-VA6: Messung IV-Dipol SWR und Impedanz mit Aktueller Kalibrierung inkl. H155 und Balun

Beispiel: Inverted-Vee-Dipol Messung – Vergleich der Messungen Antennenimpedanz **H155**.

	7 MHz		10,1 MHz		14 MHz	
Messung	Impedanz	SWV	Impedanz	SWV	Impedanz	SWV
FA-VA6 -> Fußpunkt IV ①	5,7 – j379,9	511,7 ↓	27,6 +j60,3	5,0 ↓	1056,4 +j2118,1	106,9 ↓
IV -> Balun -> H155 -> FA-VA6 Fabrik Kalibrierung BNC-Buchse ③	4,6 +j34,5	16,2 ↓	28,5+j41,6	3,4 ↓	5,1 –j43,6	17,4 ↓
Rückrechnung TLW von auf ① ③	2,8 +j28,5	23,8	17,9 +j30,6	4,0	7,0 –j59,6	17,5
Verlust / Zusatzverlust SWV	0,4 dB / 12,8 dB		0,4 dB / 0,5 dB		0,4 dB / 7,3 dB	
IV -> Balun -> H155 -> FA-VA6 Aktuelle Kal. inkl. H155/Balun ②	46,1 –j388,1	67,3 ↓	36,0 +j59,5	4,0 ↓	548,9 +j1215,1	65,0 ↓
IV -> Balun -> H155 -> FA-VA6 Fabrik Kalibrierung BNC-Buchse ③	4,6 +j34,5	16,2 ↓	28,5+j41,6	3,4 ↓	5,1 –j43,6	17,4 ↓
Rückrechnung TLW von auf ② ③	3,7 +j28,1	18,1	22,3 + j31.3	3,3	8,1 –j61,4	15,8
Verlust / Zusatzverlust SWV	0,4 dB / 5,2 dB		0,4 dB / 0,3 dB		0,4 dB / 5,6 dB	

Impedanzen / SWV / Verluste bei verschiedenen Messmethoden, Nutzung H155 und Rückrechnung mittels TLW

- Bei hohem SWV kommt es zu **erheblichen Zusatzverlusten** auf der H155 Leitung.

Beispiel: Inverted-Vee-Dipol Messung – Vergleich der Messungen Antennenimpedanz CQ553.

	7 MHz		10,1 MHz		14 MHz	
Messung	Impedanz	SWV	Impedanz	SWV	Impedanz	SWV
FA-VA6 -> Fußpunkt IV ①	5,7 – j379,9	511,7 136,8 (400 Ω)	27,6 +j60,3	5,0 14,8 (400 Ω)	1056,4 +j2118,1	106,9 13,6 (400 Ω)
IV -> CQ553 -> Balun -> FA-VA6 Fabrik Kalibrierung BNC-Buchse ③	38,0 +j537,3	154,6	39,3 –j210,1	25,0	1382,0 –j1870,9	93,0
Rückrechnung TLW von auf ① ③	25,1 +j828,0	548,8 (50 Ω) 83,5 (400 Ω)	43,6 –j279,0	37,7 (50 Ω) 13,7 (400 Ω)	4967 –j265,6	99,6 (50 Ω) 12,5 (400 Ω)
Verlust / Zusatzverlust SWV	0,04 dB / 2,0 dB		0,04 dB / 0,3 dB		0,06 dB / 0,3 dB	

Impedanzen / SWV / Verluste bei verschiedenen Messmethoden, Nutzung CQ553 und Rückrechnung mittels TLW

- Geringere Verluste bei der symmetrischen Leitung, aber teilweise Erhöhung des SWV.
- Relativ hohe Impedanzen am Eingang der symmetrischen Leitung. Anpassung zum Transceiver?
- Das hohe SWV kann weiterhin zu Problemen mit zu hohen Spannungen führen.

Beispiel: Inverted-Vee-Dipol Messung – Verluste Varianten Autotuner vs. Tuner nahe TRX.

	7 MHz		10,1 MHz		14 MHz	
Messung	Impedanz	SWV	Impedanz	SWV	Impedanz	SWV
IV -> Balun -> H155 -> FA-VA6 Fabrik Kalibrierung BNC-Buchse	4,6 +j34,5	16,2	28,5+j41,6	3,4	5,1 -j43,6	17,4
-> Autotuner -> 50 m H155	50 +j0	1	50 +j0	1	50 +j0	1
Verlust / Zusatzverlust SWV	1,4 dB / 0 dB		1,7 dB / 0 dB		2,0 dB / 0 dB	
-> 50 m H155 -> Tuner nahe TRX	10,6 -j0,8	4,7	50,9 +j38,4	2,1	83,1 +j78,2	3,5
Verlust / Zusatzverlust SWV	1,4 dB / 4,2 dB		1,7 dB / 0,8 dB		2,0 dB / 5,4 dB	
IV -> CQ553 -> Balun -> FA-VA6 Fabrik Kalibrierung BNC-Buchse	38,0 +j537,3	154,6	39,3 -j210,1	25,0	1382,0 -j1870,9	93,0
-> Autotuner -> 50 m H155	50 +j0	1	50 +j0	1	50 +j0	1
Verlust / Zusatzverlust SWV	1,4 dB / 0 dB		1,7 dB / 0 dB		2,0 dB / 0 dB	
-> 50 m H155 -> Tuner nahe TRX	21,1 +j57,5	6,1	55,6 -j84,9	4,3	14,3 +j20,3	4,2
Verlust / Zusatzverlust SWV	1,4 dB / 13,0 dB		1,7 dB / 6,0 dB		2,0 dB / 11,0 dB	

Impedanzen / SWV / Verluste bei Variante Autotuner vs. Tuner nahe Transceiver

- **Erhebliche Zusatzverluste** bei 50 m Leitung zum Transceiver und hohem SWV.

Beispiel: Inverted-Vee-Dipol Messung – Gesamtverluste je Variante.

	7 MHz	10,1 MHz	14 MHz
Messung	Verlust / Zusatzverlust	Verlust / Zusatzverlust	Verlust / Zusatzverlust
IV -> Balun -> H155 -> Autotuner -> 50 m H155	1,8 dB / 12,8 dB	2,1 dB / 0,5 dB	2,4 dB / 7,3 dB
Gesamtverlust / Abstrahlung bei 100 W	14,6 dB / 3,5 W	2,6 dB / 54,9 W	9,7 dB / 10,7 W
IV -> Balun -> H155 -> 50 m H155 -> Tuner nahe TRX	1,8 dB / 17,0 dB	2,1 dB / 1,3 dB	2,4 dB / 12,7 dB
Gesamtverlust / Abstrahlung bei 100 W	18,8 dB / 1,3 W	3,3 dB / 46,8 W	15,1 dB / 3,1 W
IV -> Balun -> CQ553 -> Autotuner -> 50 m H155	1,4 dB / 2,0 dB	1,7 dB / 0,3 dB	2,1 dB / 0,3 dB
Gesamtverlust / Abstrahlung bei 100 W	3,4 dB / 45,7 W	2,0 dB / 63,1 W	2,4 dB / 57,5 W
IV -> Balun -> CQ553 -> 50 m H155 -> Tuner nahe TRX	1,4 dB / 15,0 dB	1,7 dB / 6,0 dB	2,1 dB / 11,3 dB
Gesamtverlust / Abstrahlung bei 100 W	16,4 dB / 2,3 W	7,7 dB / 17,0 W	13,4 dB / 4,6 W

Gesamtverluste bei Variante Autotuner vs. Tuner nahe Transceiver, jeweils für H155 vs. CQ553 Steigleitung

- Befriedigende Ergebnisse lediglich bei Kombination symmetrische Steigleitung und Autotuner.
- Bei den anderen Varianten wird der größte Teil der Sendeleistung durch Verluste auf den Leitungen in Wärme umgesetzt.

Fazit bei Auslegung von Antennensystemen.

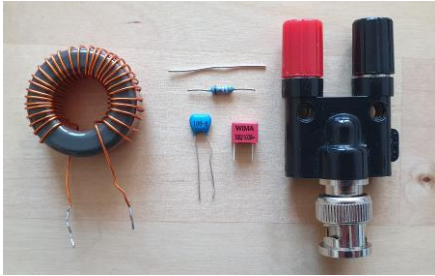
- **Impedanz-Übergang** an allen Schnittstellen **so gering wie möglich** halten (= Leistungsanpassung):
 - Antennen mit Fußpunktimpedanz wählen, die bei allen Zielfrequenzen möglichst der Impedanz der Steigleitung entspricht.
- Ein vorhandener Impedanz-Übergang benötigt ein Anpassglied (Autotuner, LC-Glied, Balun), um **Mehrfachreflexionen** auf Leitungen (= hohes SWV) zu reduzieren oder zu **vermeiden**.
- Alle **Leitungen** mit ‚höherem SWV‘ möglichst **verlustarm** auslegen.
 - Die symmetrische Leitung ist in der Regel erheblich verlustärmer.
- Antennentypen und Leitungen lassen sich heutzutage gut per Software simulieren (4NEC2, TLW etc.), allerdings zeigt die **Praxis oft Überraschungen** aufgrund von Umwelteinflüssen, Materialschäden, Nebeneffekten (Mantelströmen) und nicht idealen Bauelementen (BALUN, UNUN, Anpassglieder).
- Nahezu alle **Systemkomponenten** können mit einem Antennenanalysator **vermessen** werden.
- Fertiges System mit Antennenanalysator an allen Stellen auf **Anpassung verifizieren**, auf **Schäden prüfen** (TDR) und regelmäßig überprüfen.

Agenda

- Fortgeschrittene Antennenanalysatoren
- Messung an Antennensystemen
- **Messung an Bauelementen**
- Zeitbereichsmessungen (TDR)
- Zusammenfassung

Messung von Bauteilen ist relativ unkritisch, aber nicht frei von so mancher Überraschung.

- Messung Ringkern-Spule T106-2 bei geplanter Einsatzfrequenz.



LCR Z0:50Ω KAL:FABRIK STD:FDE
Port-Erw: 0 s 0 m

Frequenz	7 000 000 Hz	
	9.2 Ω	18.5 μH
Güte		88.38
Impedanz-Modell		Seriell

1 Stopp 2 Frequenz ← Modus 7 Hilfe

Messung Ringkern-Spule mit Fabrik Kalibrierung

LCR Z0:50Ω KAL:AKTUELLE STD:IDE
Port-Erw: 0 s 0 m

Frequenz	7 000 000 Hz	
	4.4 Ω	16.4 μH
Güte		165.06
Impedanz-Modell		Seriell

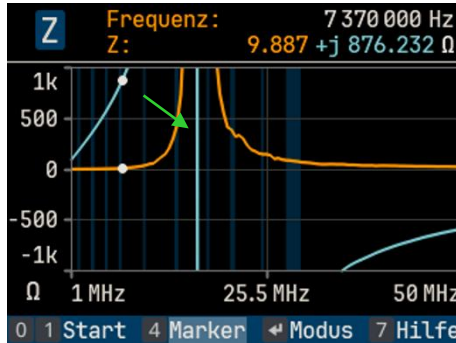
1 Stopp 2 Frequenz ← Modus 7 Hilfe

Messung Ringkern-Spule mit Aktueller Kalibrierung

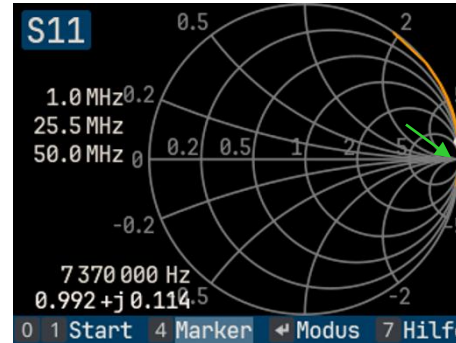
- Der Adapter hat **erheblichen Einfluss** auf die Messung.
- Bei niedrigen Frequenzen helfen **simple SOL-Standards** in Form von Silberdraht, offen und 50 Ohm Widerstand, um den Adapter mittels aktueller Kalibrierung ‚heraus‘ zu kalibrieren.

Auch der Einsatzbereich von Bauelementen lässt sich überprüfen.

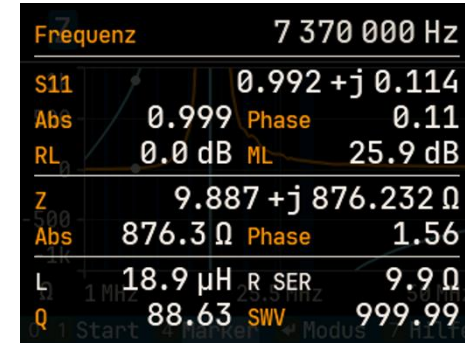
- Messung Ringkern-Spule über die Frequenz.



Messung Ringkern-Spule Impedanz



Messung Ringkern-Spule Smith Diagramm

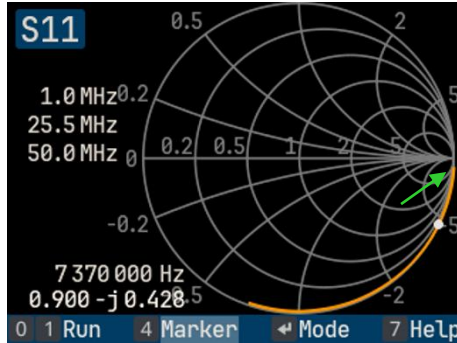


Messung Ringkern-Spule Marker Detailsicht

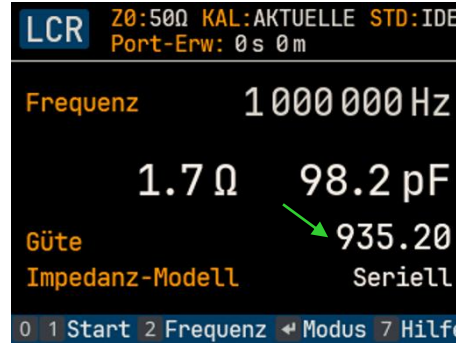
- Die Spule gerät bei ca. 15 MHz in **Resonanz** und verhält sich dann als Kondensator.
- Smith Diagramm: Wechsel vom oberen in den unteren Bereich des Diagramms erkennbar.
- Einsatzbereich** der Spule: Deutlich **unter Resonanzfrequenz**.

Kondensatoren haben zumeist höhere Resonanzfrequenzen und höhere Güten.

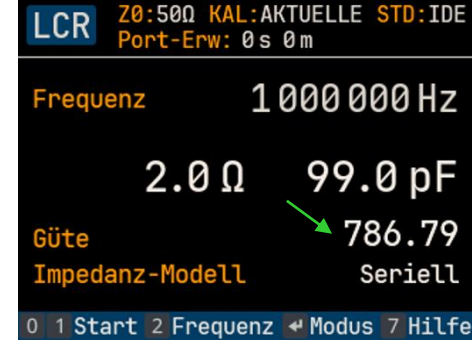
- Messung WIMA FKP 2 100pF (Datenblatt Verlustwinkel 0,001; Q = 1000; 1 MHz) und Glimmer CY22-2 100 pF (Datenblatt Verlustwinkel 0,002; Q = 500; 1 MHz)



Messung WIMA Kondensator mit Aktueller Kalibrierung



Messung WIMA Kondensator mit Aktueller Kalibrierung



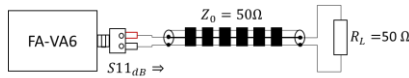
Messung Glimmer Kondensator mit Aktueller Kalibrierung

- Güte schwankt zwischen 400 und > 1000 (1 MHz). $Q_c = \frac{|IM(Z)|}{RE(Z)}$
- Hoher Scheinwiderstand** $IM(Z)$ mit kleinem Wirkwiderstand $RE(Z)$ (Verlustwiderstand) im **ungenauesten Bereich** des Analysators.
- Weiterhin kritisch: Übergangswiderstände, Einstrahlungen / Rauschen und praktische Kalibrierung.
- Alternative Messung sehr hoher Güten: IV-Messung, 3 dB Resonanzmethode

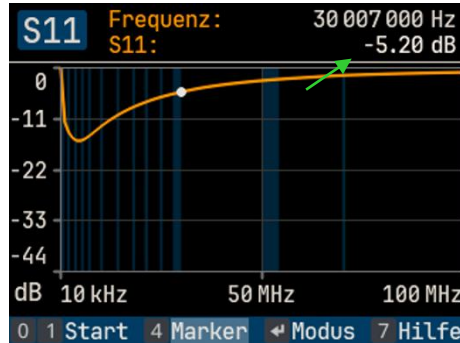
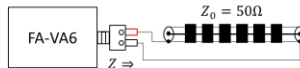
Baluns lassen sich mit einem fortgeschrittenen Antennenanalysator gut vermessen.

- Strombaluns: Direkte Messung **Übertragungsverhalten** und **Mantelwellendämpfung**.
- Spannungsbaluns: Hier **Übertragungsverhalten** (Sekundärseite Abschluss 470 Ohm).

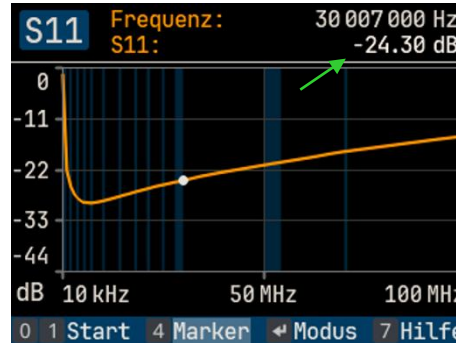
Strombalun - Übertragungsverhalten:
Messung der Rückflussdämpfung über die Frequenz



Strombalun - Mantelwellendämpfung:
Messung der Mantelimpedanz über die Frequenz



Rückflussdämpfung 1:9 No-Name Balun



Rückflussdämpfung 1:9 Eigenbau Minicircuits T9-1

Weitere Informationen unter:

„Vielteore messen mit einem Eintor-Vektor-Netzwerkanalysator“, T. Baier, Funkamateure 07/18.

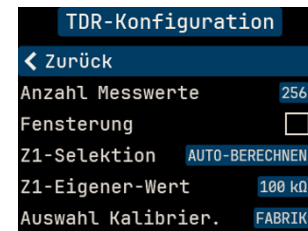
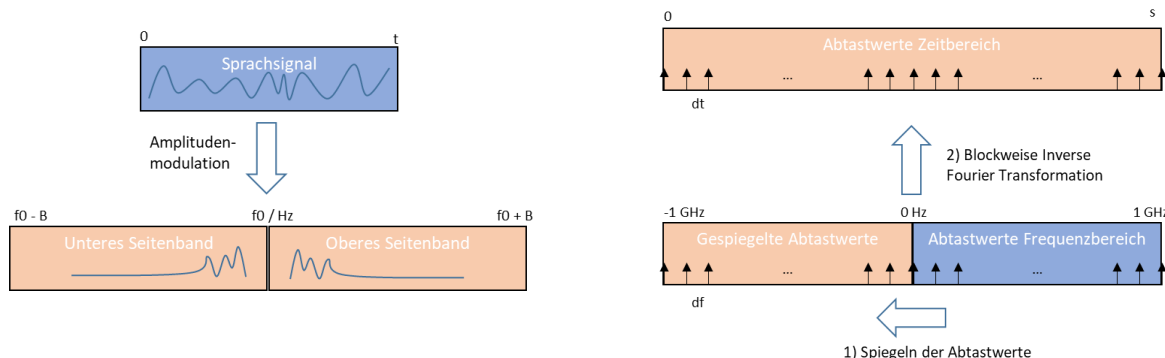
„Ergänzung zum Beitrag 'Messungen an symmetrischen Leitungen mit dem FA-VA6', M. Knitter, Funkamateure 3/26, Downloads zum Heft.

Agenda

- Fortgeschrittene Antennenanalysatoren
- Messung an Antennensystemen
- Messung an Bauelementen
- **Zeitbereichsmessungen (TDR)**
- Zusammenfassung

TDR-Arbeitsweise eines Antennenanalysators.

- Zusammenhänge zwischen **Zeit- und Frequenzbereich** analog z. B. Amplitudenmodulation:
 - Abgetastetes Zeitsignal hat im Frequenzbereich zwei Seitenbänder, mit identischem Inhalt.

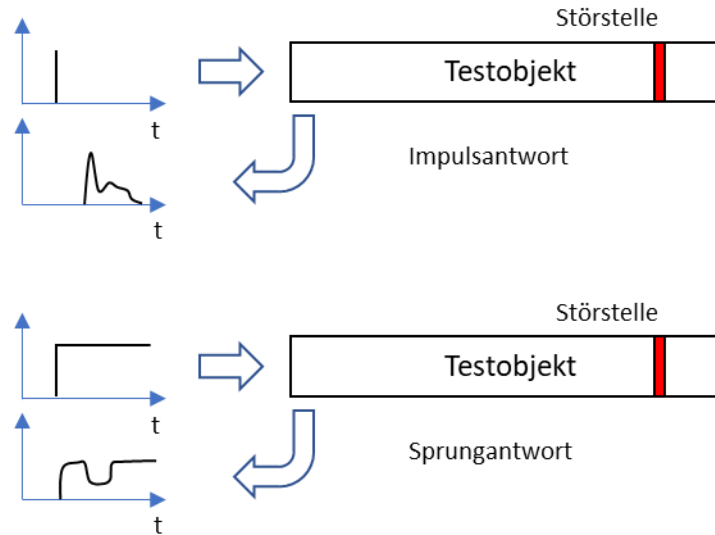


FA-VA 6 TDR-Konfiguration

- TDR: Abtastung im Frequenzbereich = ‚**Übertragungskanal**‘ des Messobjekts, z. B. eines Kabels.
- FA-VA 6: Spiegelung verdoppelt abgetastete Bandbreite. Der Abtastwert bei 0 Hz (Z1) wird durch Messung oder manuell ergänzt.
- Umrechnung der entstehenden **Übertragungsfunktion** mit inverse Fouriertransformation (iFFT) in **Impulsantwort** des Kanals (Reflektionen im Kabel) im Zeitbereich.
- Umrechnung Zeit auf Strecke über Verkürzungsfaktor und Lichtgeschwindigkeit.

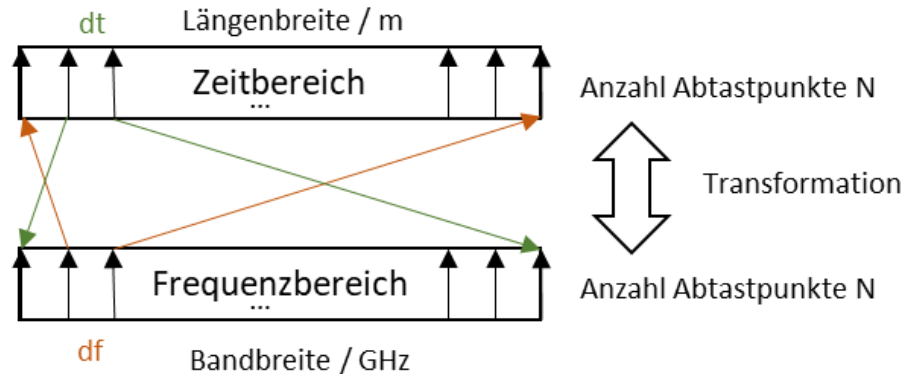
TDR-Arbeitsweise eines Antennenanalysators.

- Die im Frequenzbereich abgetasteten Daten entsprechen nach der Umrechnung in den Zeitbereich dem **historischen Ansatz von TDR**.
- Dort wurde tatsächlich ein Spannungsimpuls oder ein Spannungssprung für die Messung verwendet.



TDR-Arbeitsweise eines Antennenanalysators.

- Wichtige für **Leistungsfähigkeit** eines Analysators: **Anzahl Abtastpunkte** und **Bandbreite**.

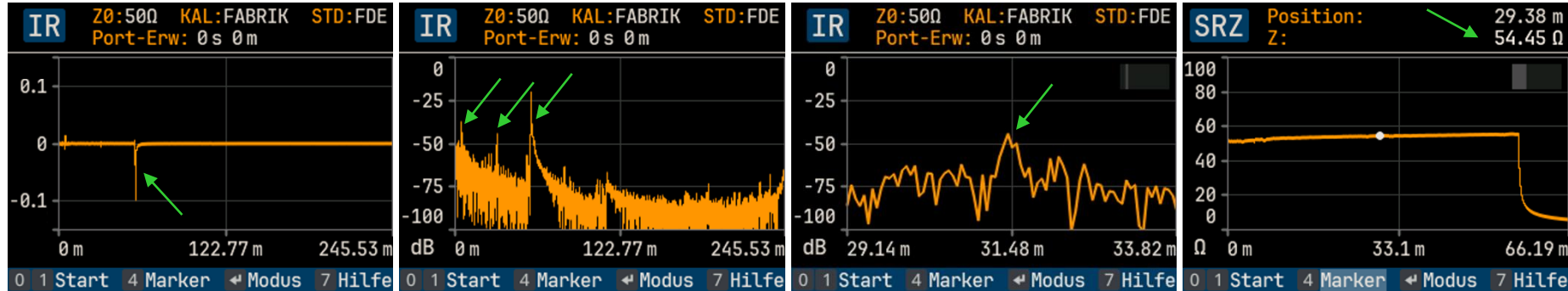


FA-VA 6 Wellengeschwindigkeits-Rechner

- Bandbreite** = Kehrwert der ‚Ortsauflösung‘ dt .
 - FA-VA 6: 2 GHz entsprechen Zeitauflösung von 500 ps, entsprechend 10 cm Ortsauflösung ($VF = 0,66$). Einzelimpulse, bzw. Fehlstellen in Kabeln, lassen sich damit noch bis ca. 1 cm genau lokalisieren.
- Anzahl der Abtastpunkte** -> df im Frequenzbereich und maximal ohne Alias **abbildbare Zeit / Strecke**.
 - FA-VA6: Bis zu 4096 Abtastwerte -> maximale Strecke von ca. 203 m ($VF = 0,66$). Achtung! Mehrfachreflexionen!

Beispiel: Überprüfung einer Antennenzuleitung ohne Demontage.

- 60 m lange Antennenzuleitung (H155) führt über zwei N-N-Type Adapter auf einen Automatiktuner (Ausgeschaltet = 0 Ohm). Sind Leitung und Adapter ok?

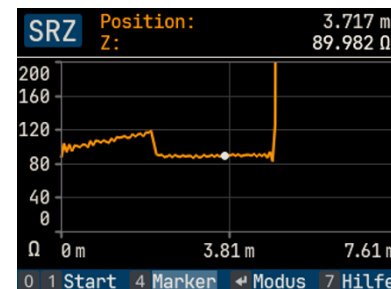
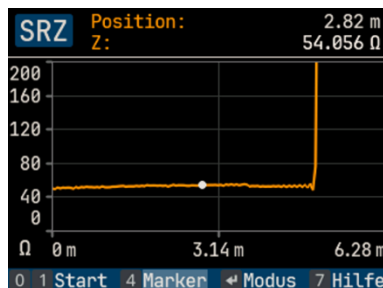
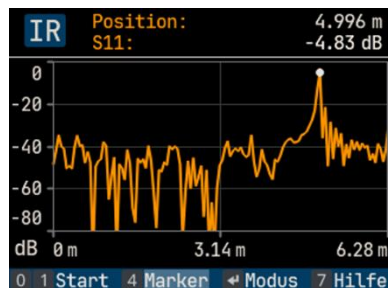


FA-VA 6 Messung der Antennenleitung

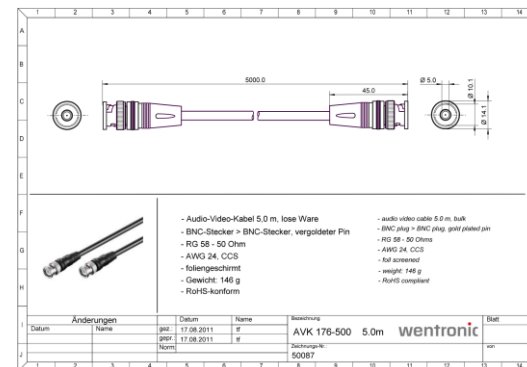
- Bei 57 m Anzeige **Kurzschluss des Tuners**, bei 5 m und 31 m Anzeige der **Adapter**.
- Kabelimpedanz:** ca. 54 Ohm.
- Reflexionen an den Adaptern sind, bezogen auf die Kabeldämpfung, unkritisch:
 - Reflektiertes Signal erster Adapter bei -37 dB (nach 10 m Lauflänge), mehr als 30 dB unter der Kabeldämpfung.

Beispiel: Kontrolle von Kabeln.

- Test von Kabeln auf ihre **Qualität** per TDR.
- 5 m Testec (links) und 5 m Goobay (50087, rechts) RG58 Kabel:



- Goobay Kabel:
 - Verkürzungsfaktor von 0,8 bei 5 m Länge (Kabel-App).
 - Von außen nicht sichtbar: Dielektrikumsstörung nach ca. 2,2 m.
 - Wellenwiderstand des Kabels eher bei 90 Ohm (Datenblatt zeigt 50 Ohm).



Ein außergewöhnlicher Anwendungsfall...

- Achtung! Nachfolgende Messungen nur zu Demonstrationszwecken!
- Vor Messungen an stromführenden Leitungen sind diese **allseits** vom Stromnetz zu trennen.
- **Unter keinen Umständen darf der FA-VA 6 mit stromführenden Leitungen verbunden werden.**



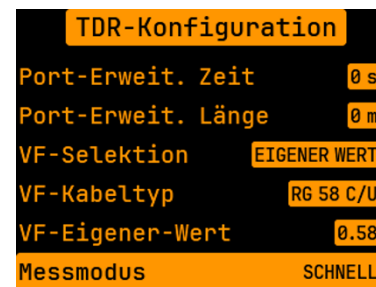
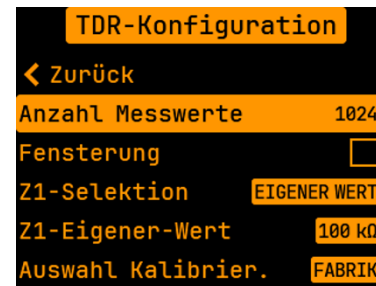
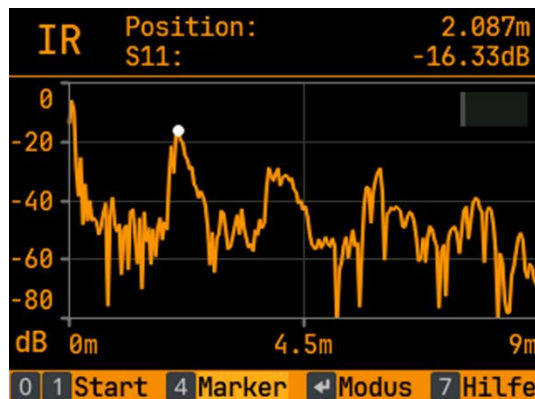
Beispiel: Fehlstellenmessung in Stromsystemen.

- **Flurbeleuchtung im Einfamilienhaus** mit Wechselschaltung.
- Nur noch eine der Schalterstellungen funktioniert.
- Schalter fehlerfrei. Leitungsschaden durch alten Bohrstelle für ein Kinderschutzgitter?
- Messung der Stromleitung per **TDR** mit dem FA-VA 6.



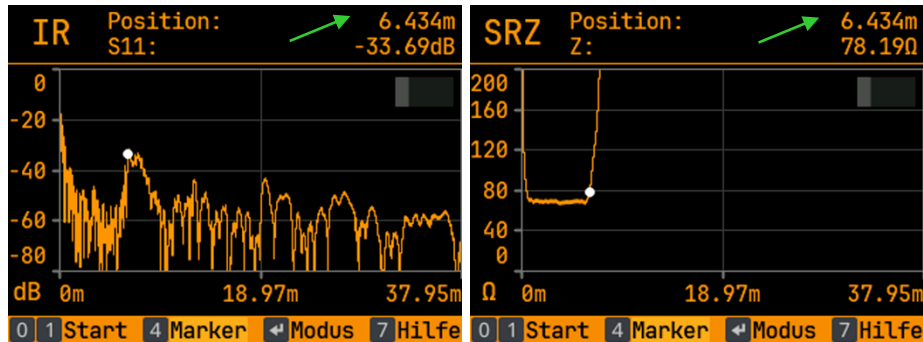
Beispiel: Fehlstellenmessung in Stromsystemen.

- **Verkürzungsfaktor** des verlegten NYM-Kabeltyps: $VF = 0,58$.
- Einstellung des Verkürzungsfaktors auf bekannte Kabellänge (2 Meter).

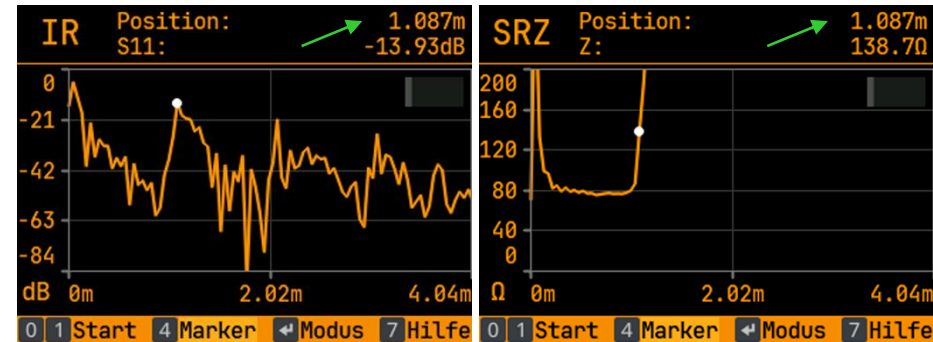


Beispiel: Fehlstellenmessung in Stromsystemen.

- Vermessung der **freigeschalteten** Leitung von beiden Seiten per TDR.
- Unteren Schalterdose: **Fehlstelle nach 6,4 m.**
- Obere Schalterdose: **Fehlstelle nach 1,09 m.**
- Fehlstelle 1,09 m vs. vermutete Bohrstelle in rund 1 m Abstand?



TDR-Messung untere Schalterdose



TDR-Messung obere Schalterdose

Beispiel: Fehlstellenmessung in Stromsystemen.

- **Freilegung** der Leitung:

- Übeltäter ca. 10 cm tiefer, wie schon zuvor mit dem FA-VA6 ausgemessen.
- **Befestigung der Fußleiste** mitten durch das Kabel.



Beispiel: Fehlstellenmessung in Stromsystemen.

- Mit einem Reparatursatz konnte die Leitung erfolgreich wieder in Betrieb genommen werden.
- Und wird hoffentlich die nächsten Jahrzehnte halten...



Zusammenfassung

- **Fortgeschrittene Antennenanalysatoren** bieten über die reine Messung von SWV und Impedanz hinaus zahlreiche **zusätzliche Funktionen und Tools**.
- Neben der Vermessung von Bauelementen bietet die **Kabel- und Leitungsanalyse (TDR)** umfangreiche Möglichkeiten der Beurteilung des eigenen Antennensystems.
- Geräte mit **hohem Dynamikumfang** und **weitem Frequenzbereich** erzielen dabei relevante Vorteile:
 - Hochohmige Antennen
 - Fehlstellenbestimmung im Bereich weniger Millimeter
 - Impedanzmessungen an Bauelementen
- Oft unterschätzt wird die erforderliche **Eignung für mobiles Arbeiten**. Neben einer gut bedienbaren Tastatur, einem sonnenlichttauglichem Display und langer Betriebszeit stehen oftmals unkomplizierte und intuitive Bedienung, kombiniert mit Robustheit, im Vordergrund.
- Nur über die **Speicherung** und spätere Analyse / Dokumentation **von Messwerten** können Veränderungen von Antennenanlagen erfasst werden.
- Fortgeschrittene Antennenanalysatoren entwickeln sich daher immer weiter zu einem **mobilen Messlabor** mit Anwendungen in Bereichen, die auch über die klassische Funktechnik hinausgehen.