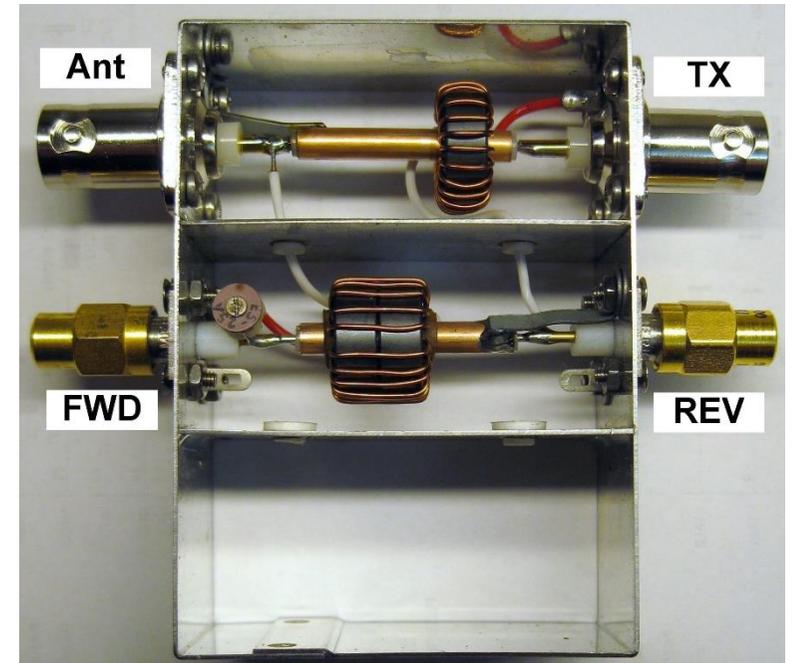


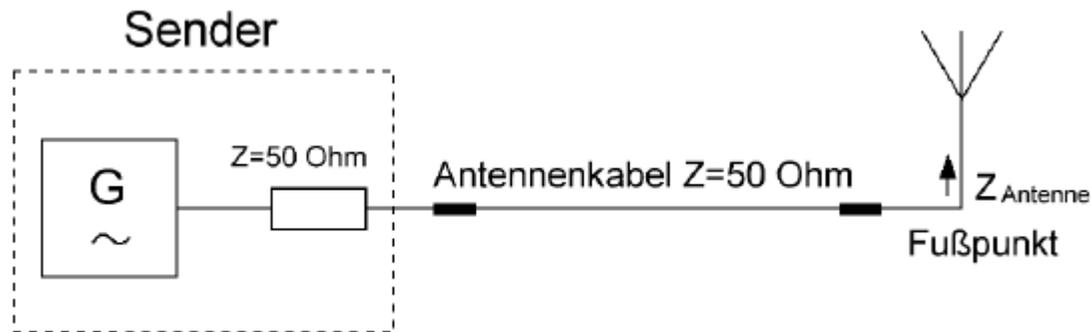
Stehende Wellen / Funktion von Stehwellenmessgeräten etc.

Vortrag DL6OAA basierend auf den Artikeln im FA 12/2023 (DC7GB) „Wie funktionieren Richtkoppler und SWR-Brücken?“ und FA 2/2022 und 3/2022

Stehwellen-Messgeräte



Ausgangssituation:



Ist der Generator (Quelle) direkt mit der Last (Senke) verbunden, stellt sich sofort ein Gleichgewichtszustand ein und der Generator liefert nur die Energie, die die Last benötigt.

Leistungsanpassung bei $R_i=R_L$

$$\rightarrow U_L=U_Q/2$$

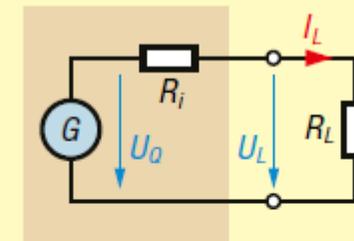
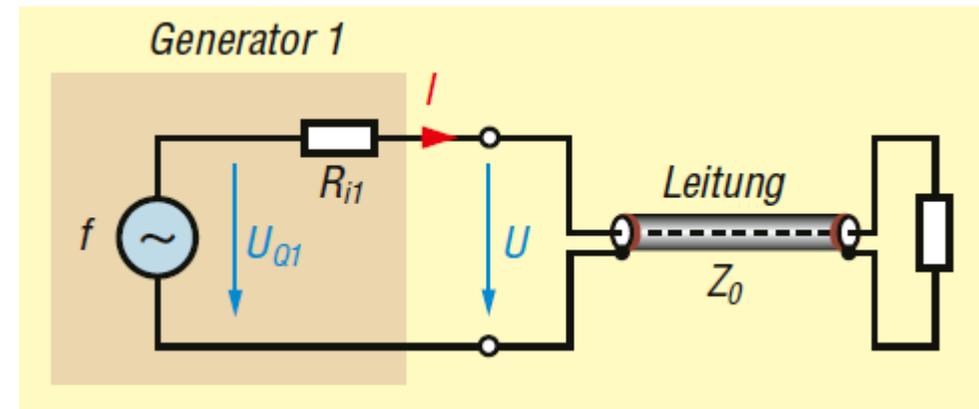
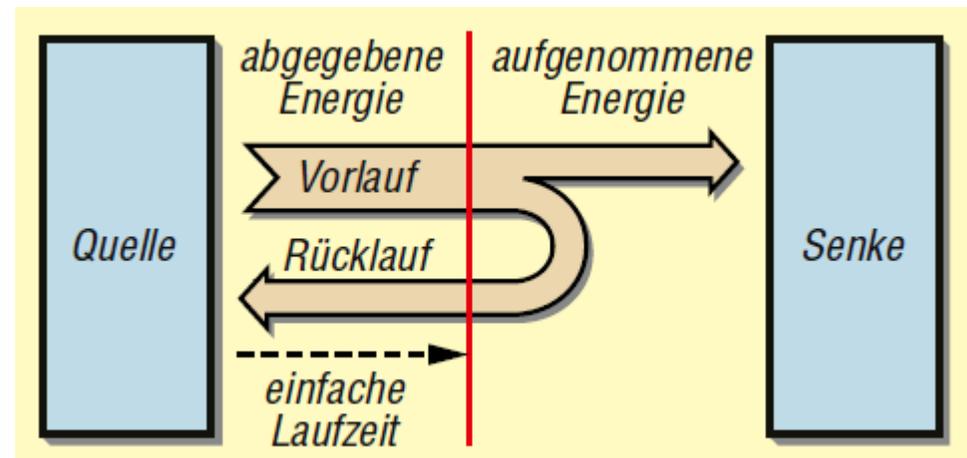


Bild 2: Ersatzschaltung eines elektrischen Generators oder einer Batterie mit Belastung durch den externen Widerstand R_L

Liegt dazwischen eine Leitung, so erfolgt die Belastung des Generators zunächst mit dem Wellenwiderstand Z_0 . Dies bedeutet in der Regel Leistungsanpassung und die maximal entnehmbare Energiemenge fließt zum Leitungsende.



Liegt eine Fehlanpassung vor, wird der nicht benötigte Energieanteil als Rücklauf reflektiert. Erst zwei Laufzeiten nach dem Einspeisen der maximal möglichen Energie erreicht der Rücklauf den Leitungseingang und reduziert die von Generator abgegebene Energie auf genau den Anteil, der am Leitungsende aufgenommen wird.



Definition/Eigenschaften einer elektromagnetischen Welle?

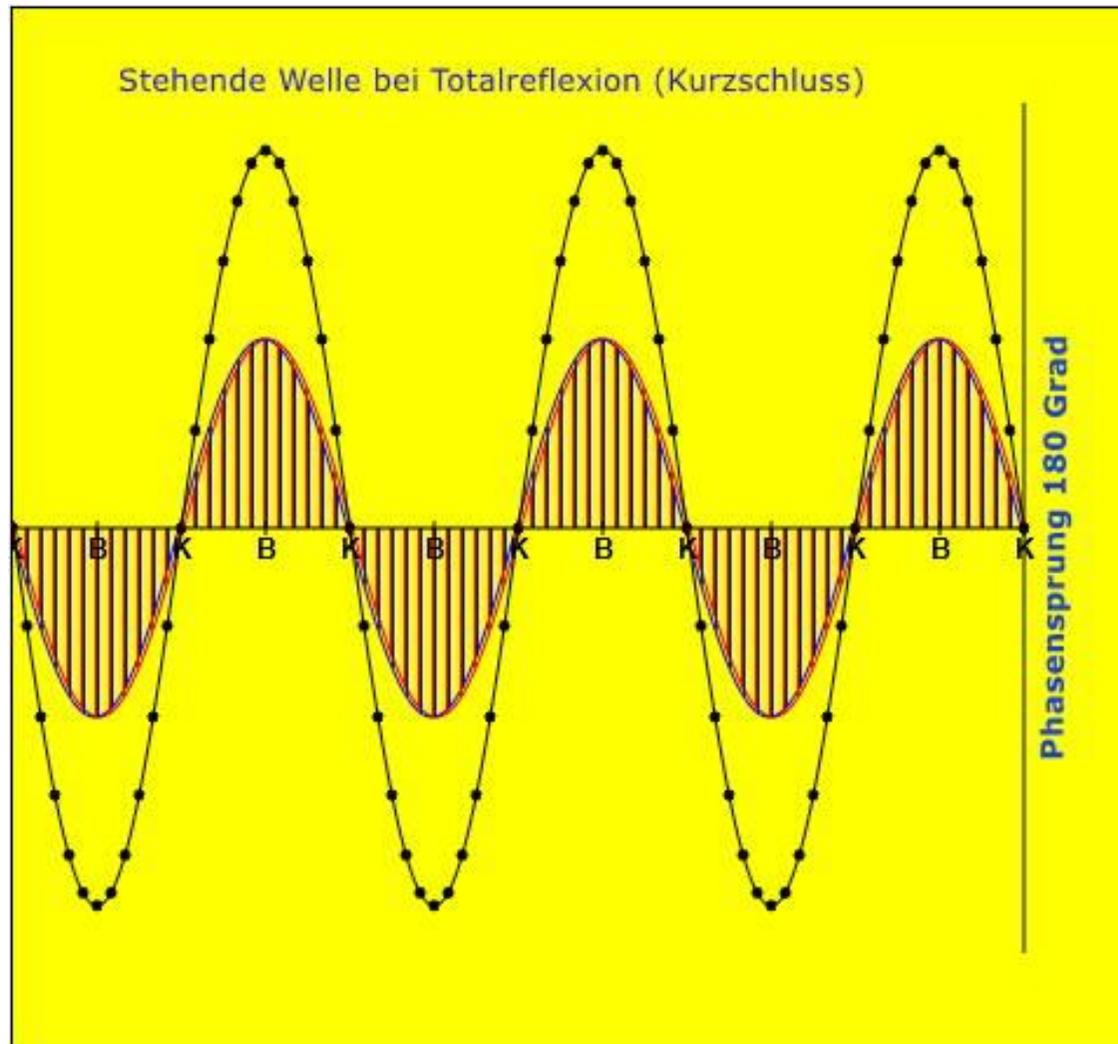
1. Periodische Änderung elektrischer und magnetischer Felder
2. Örtliche Ausbreitung dieser physikalischen Größen in einem Medium (Vakuum, Luft etc.)
3. Energieübertragung (ggf. Zusätzlich Information, wenn moduliert)

Fehlt eine dieser Eigenschaften, kann man nicht mehr von einer Welle sprechen.

Der Begriff „stehende Welle“ widerspricht dieser Definition, deshalb werden häufig die Begriffe „Fortschreitende Welle“ und „Stationäre Welle“ verwendet.

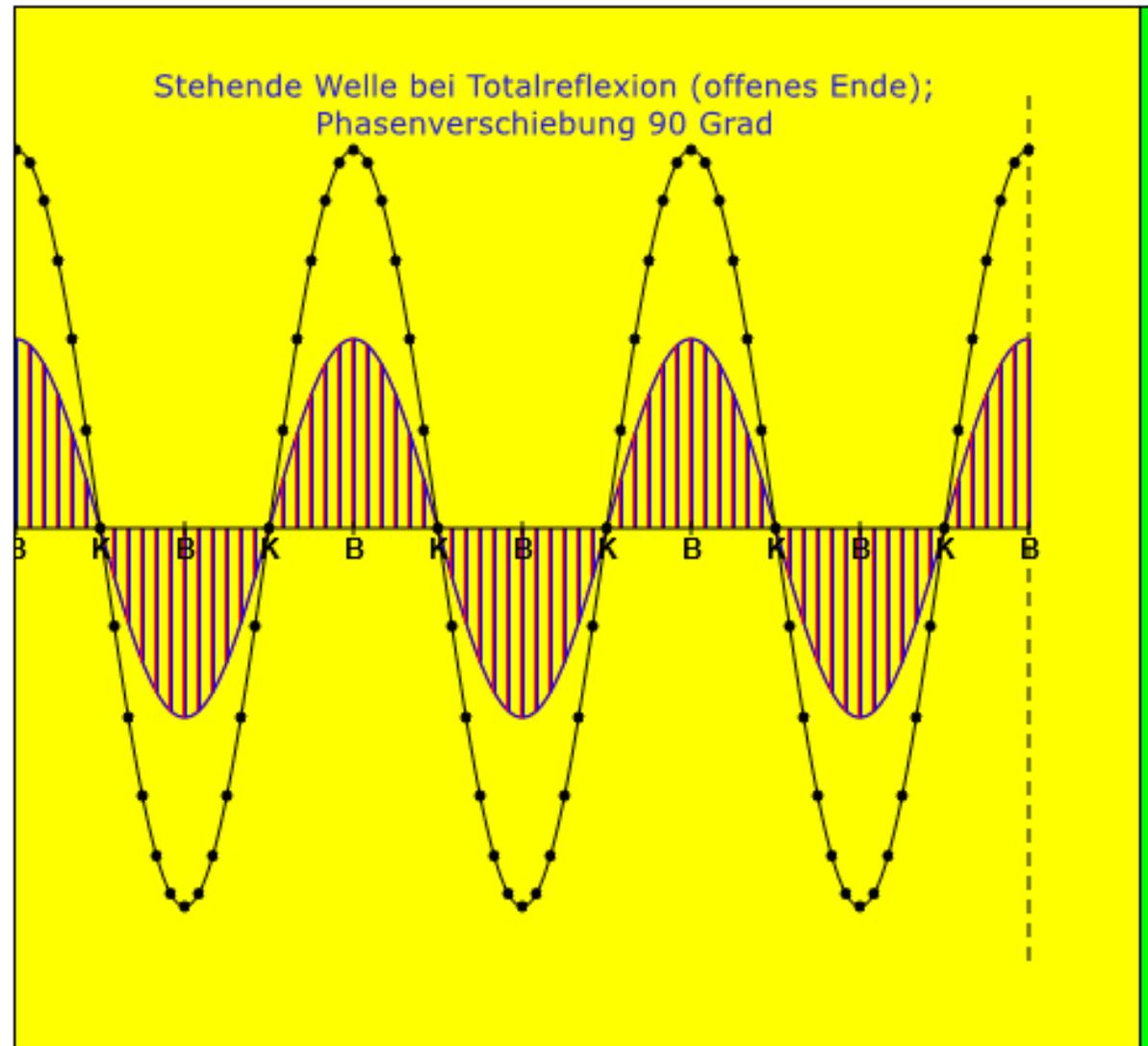
Eine „stehende Welle“ beschreibt in der Elektrodynamik die **Amplitudenverteilung** von Spannungen und Strömen längs einer Leitung, die sich bei Selbstüberlagerung von hin- und rücklaufender Welle ergibt (Interferenz zweier Signale mit gleicher Frequenz aber entgegengesetzter Ausbreitungsrichtung).

Animation: https://www.walter-fendt.de/html5/phde/standingwavereflection_de.htm



Nur bei Totalreflexion (Ende kurzgeschlossen oder offen) ändert sich die Lage der Nulldurchgänge (K) der sich ausbildenden Interferenz nicht.

Bei einer Teilreflexion gibt es keine örtlich stabilen Nulldurchgang mehr.



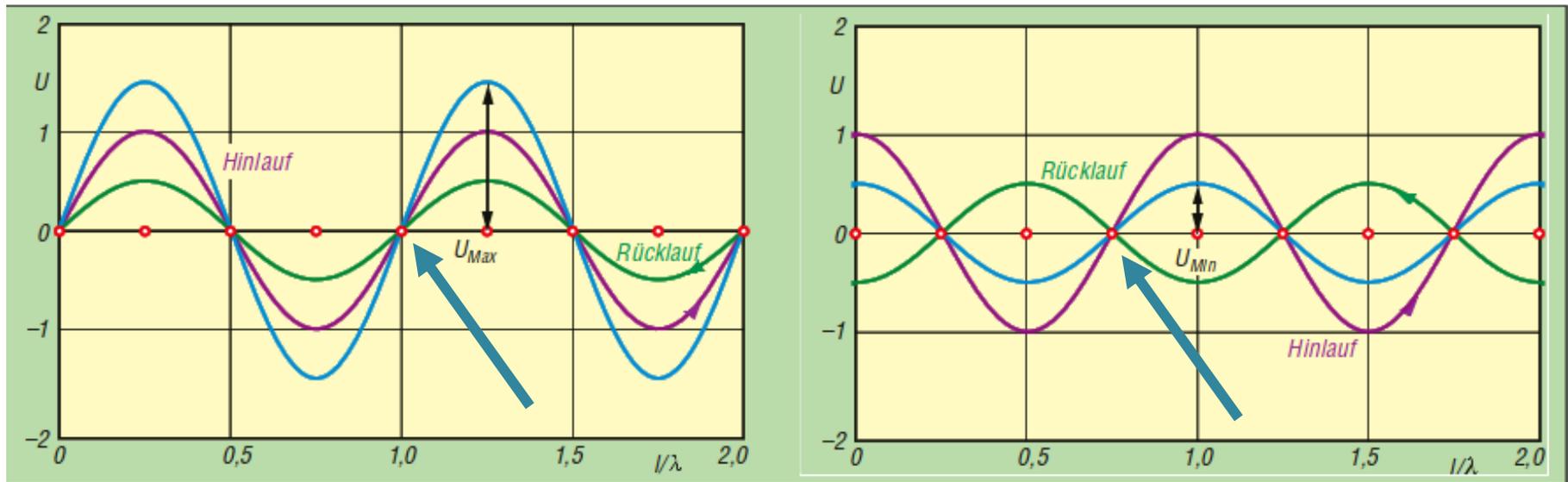


Bild 1: Ausbildung einer einzelnen Interferenz (blaue Kurve) durch Addition von hinlaufender (violette Kurve) und rücklaufender Welle (grüne Kurve) bei $SWV = 3$ mit niederohmigem Abschluss; links ist die maximal mögliche Summe $|U_{Max}|$ und rechts die maximal mögliche Differenz $|U_{Min}|$ der Interferenz bei $SWV = 3$ dargestellt.

Die Nulldurchgänge der Interferenz (blau) haben sich verschoben.
 Beide Extremwerte sind gegeneinander um $\lambda/4$ verschoben und wiederholen sich im Abstand um $\lambda/2$

Misst man die lokalen Amplituden auf der Leitung für alle Einspeisungsphasen bei konstanter Leitungslänge und unverändertem Abschluss so erhält man ein Summenbild der Interferenzen wie z.B. für SWV=3:

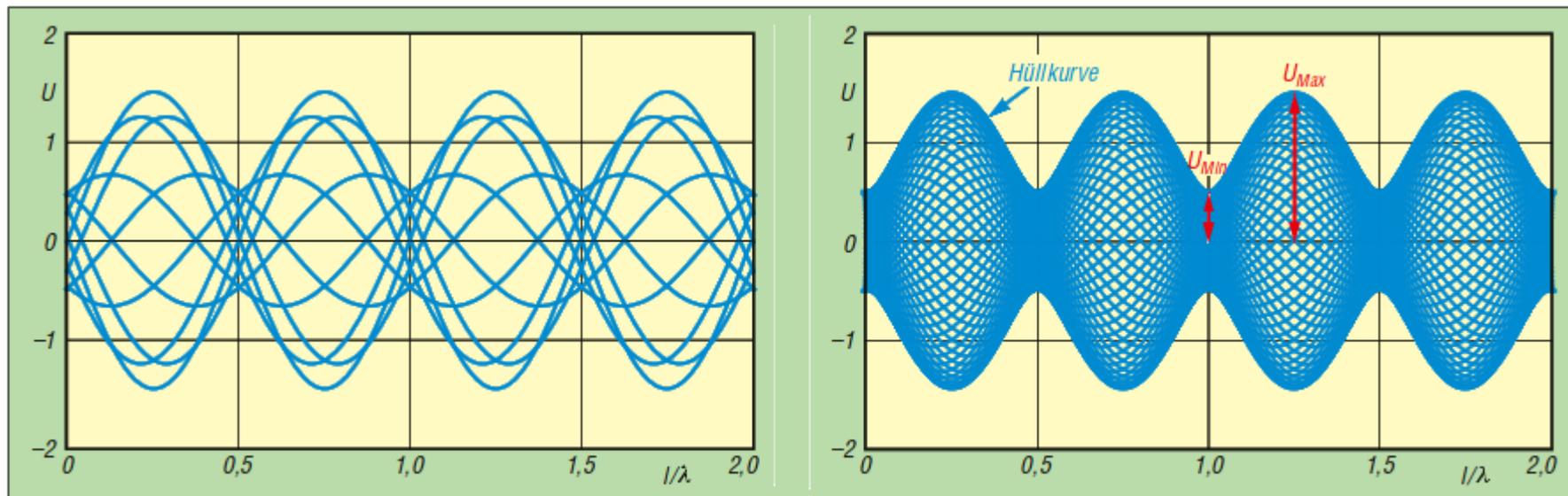


Bild 2: Darstellung mehrerer Interferenzen mit Ausbildung der Hüllkurve als „stehende Welle“; links sind zehn und rechts sind 60 Interferenzen zu sehen. Die entstandene Hüllkurve hat die doppelte Frequenz des eingespeisten Signals und keinen sinusförmigen Verlauf.

Man erkennt: Es bildet sich eine örtlich feststehende, **periodische Hüllkurve** mit der doppelten Frequenz des eingespeisten Signals heraus aus der man wieder $|U_{\max}|$ und $|U_{\min}|$ ablesen kann.

Diese Hüllkurve ist die eigentliche „stehende Welle“. **Sie ist kein Träger einer physikalischen Größe, sondern nur eine Amplitudenverteilung, zusammengesetzt aus vielen zeitlich versetzten Interferenzen.** Sie überträgt weder Energie noch Information und ist daher auch keine Welle.. Die Hüllkurve ist auch nicht sinusförmig.

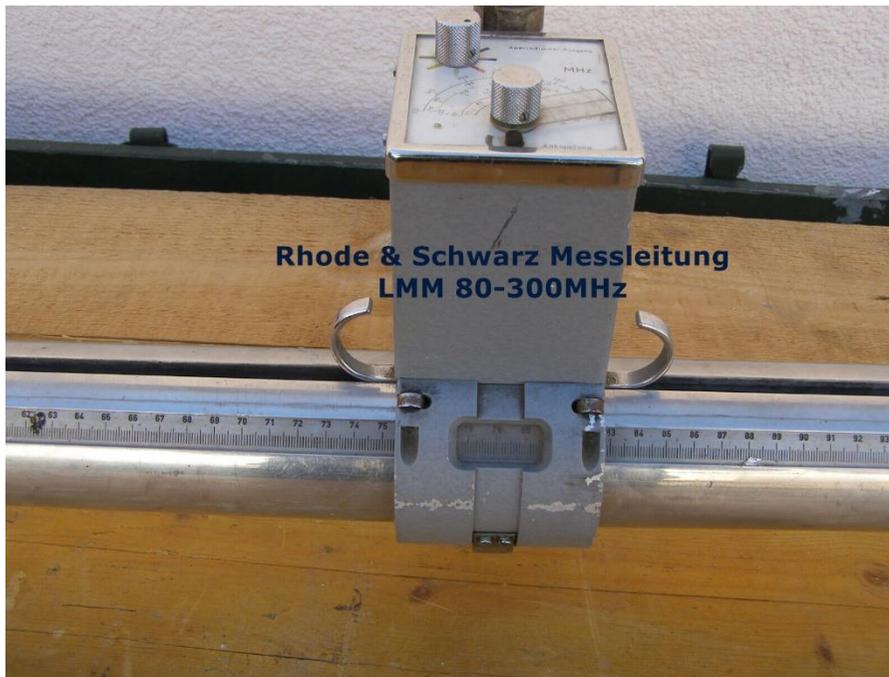
Das Stehwellenverhältnis SWV ist das Verhältnis von $|U_{\max}|$ zu $|U_{\min}|$ bzw. $|I_{\max}|$ zu $|I_{\min}|$

$$SWV = \frac{|U_{\max}|}{|U_{\min}|} = \frac{|I_{\max}|}{|I_{\min}|}$$

Der Begriff des SWV ist eindeutig und nur durch Messung der minimalen und maximalen Amplitude der Interferenz auf einer Leitung aus $|U_{\max}|$ und $|U_{\min}|$ bzw. aus $|I_{\max}|$ und $|I_{\min}|$ zu ermitteln.

Dazu ist eine **Messtrecke von mindestens $\lambda/2$ erforderlich**, um wenigstens eindeutig ein Minimum und ein Maximum bestimmen zu können. Für 7 Mhz z.B. würde das eine Messleitung von mindestens 22m erfordern.....

Diese Messleitungen bedingen konstruktiv eine hohe mechanische Präzision und sind modernen Messverfahren mit Richtkopplern und Netzwerkanalysatoren unterlegen und daher vom Markt verschwunden.



(Quelle: eBay)



Der Anpassungsgrad

Anstelle der Messung von $|U_{\max}|$ und $|U_{\min}|$ kann auch der **Grad der Anpassung** über eine **Strom- und Spannungsmessung** an nur einem **einzigem Ort** bestimmt werden. Die Ausdehnung des Messkopfes spielt dann keine Rolle mehr.

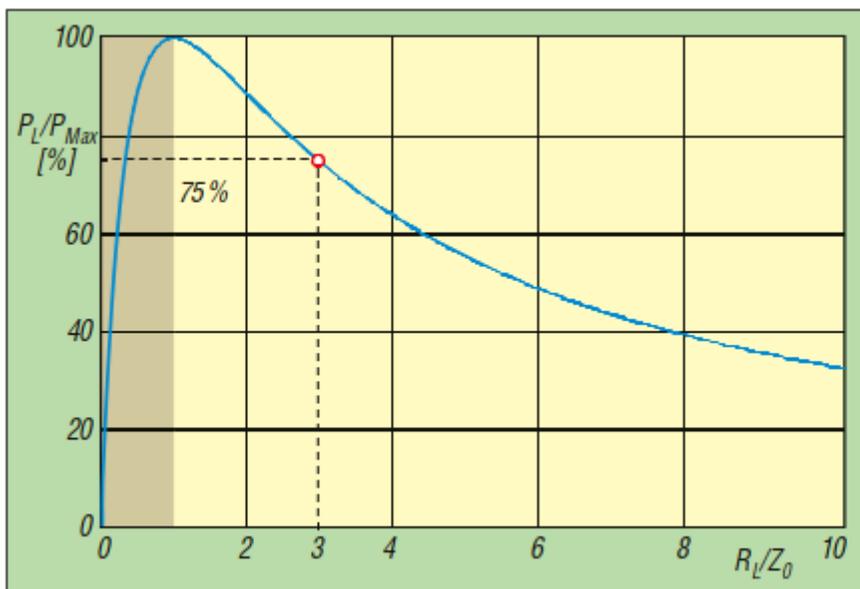


Bild 4: Verlauf des Anpassungsgrades in Prozent; im grau hinterlegten Bereich ist $R_L < Z_0$, rechts davon ist der hochohmige Lastfall mit $R_L > Z_0$ dargestellt. Markiert ist eine Last bei $SWV = 3$, bei der immer noch 75% (entspricht -1,5 dB) der maximal möglichen Energie von der Quelle abgegeben wird.

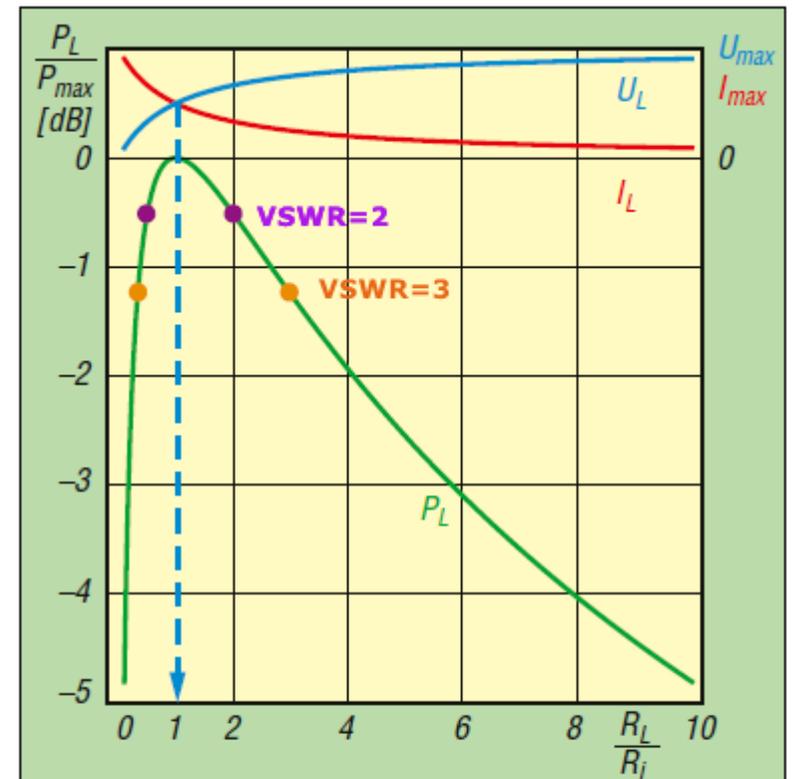


Bild 4: Auf die Leistungsanpassung normierter Verlauf der Verluste bei Abweichung vom Idealfall $R_L = R_i$, grün, sowie der Spannung U_L und des Stroms I_L ; die kleinen farbigen Kreise markieren einige Punkte, die bei Senderendstufen von Bedeutung sind, Näheres dazu siehe Text.

Bei Leistungsanpassung ist die im Lastwiderstand R_L umgesetzte Leistung maximal, der Reflexionsfaktor $r=0$ und $SWV=1$. In diesem Fall ist die Spannung U_L am Lastwiderstand halb so groß im Vergleich zum Leerlauf und der Strom halb so groß wie bei einem Kurzschluss.

Bei Leistungsanpassung $R_L=Z_0$ ist der Anpassungsgrad 100% ($SWV=1=R_L/Z_0$). Im Leerlauf, also $R_L=\infty$, oder bei Kurzschluss, also $R_L=0$, beträgt der Anpassungsgrad 0% ($SWV=\infty$)

Richtkoppler (Zwei populäre Typen):

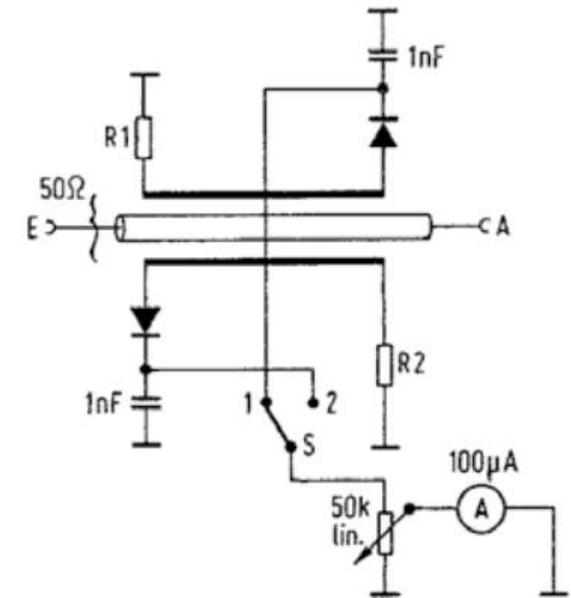
Richtkoppler können sich verschiedene Tatsachen zunutze machen, um ihre Aufgabe zu erfüllen. Die verbreitetsten Richtkopplertypen arbeiten nach zwei ganz verschiedenen Prinzipien:

Einmal wird tatsächlich die Tatsache genutzt, dass die zu trennenden Wellen aus entgegengesetzten Richtungen kommen.

Zum anderen gibt es den **Transformatorkoppler**, der es sich zunutze macht, dass bei der rücklaufenden Welle Strom und Spannung extrem außer Phase liegen.

Der Koaxialkoppler

Dieser Koppler vom Typ „Wellenfänger“ benötigt eine Raumdimension. Für HF-Anwendungen beruht er in der Regel auf einem Stück Koaxkabel mit dem Wellenwiderstand des Leitungssystems, in welchem gemessen wird. In dieses Kabel sind zwei gegenüberliegende Koppeldrähte eingebracht. Sie werden an entgegengesetzten Seiten mit einem mittelohmigen Widerstand (gegen Masse bzw. Schirmgeflecht) abgeschlossen. An den anderen Seiten kann man zu den Spannungen bzw. Strömen der beiden Wellen proportionale Spannungen abgreifen. Diese Größen sind ja über den Wellenwiderstand verknüpft.



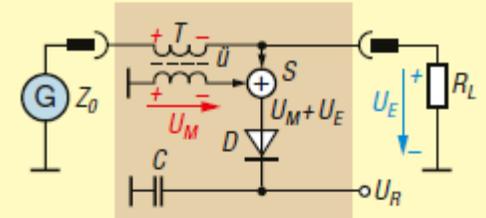
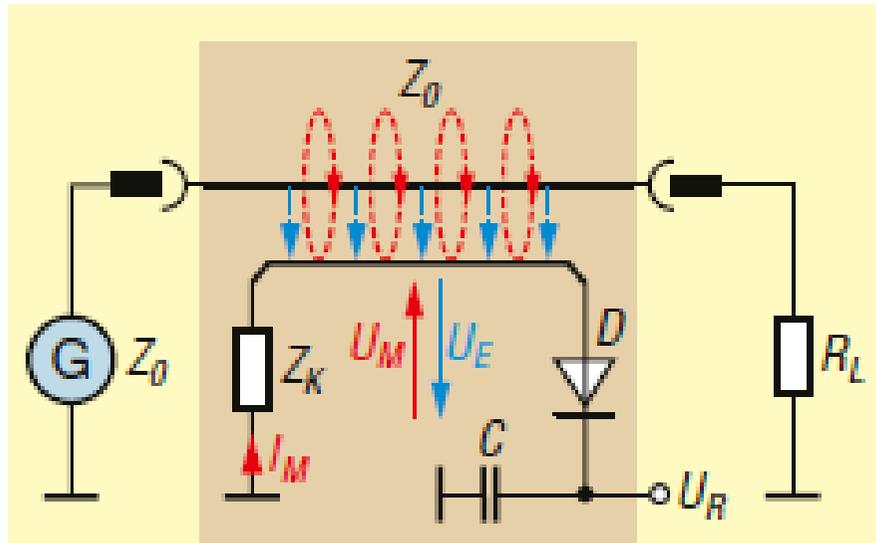
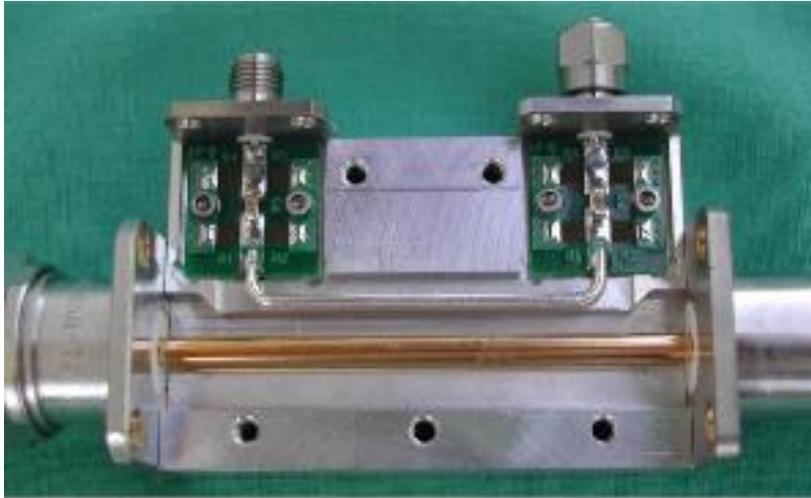


Bild 5: Messung von Wechselspannung U_E und Wechselstrom $I_E \sim U_M$ mit Addition am Punkt S. Bei richtiger Dimensionierung von \bar{u} ergibt sich bei Leistungsanpassung $U_E = -U_M$ und U_R wird null.

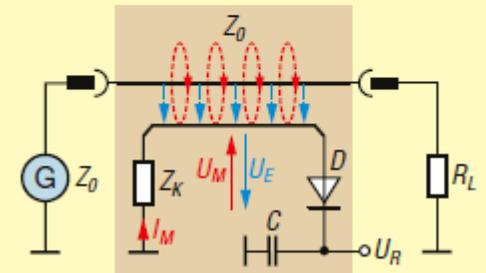


Bild 6: Ersatz des Übertragers durch eine parallelliegende Koppelleitung, an der auch die Summation auftritt. Die Funktion beider Schaltungen ist identisch.

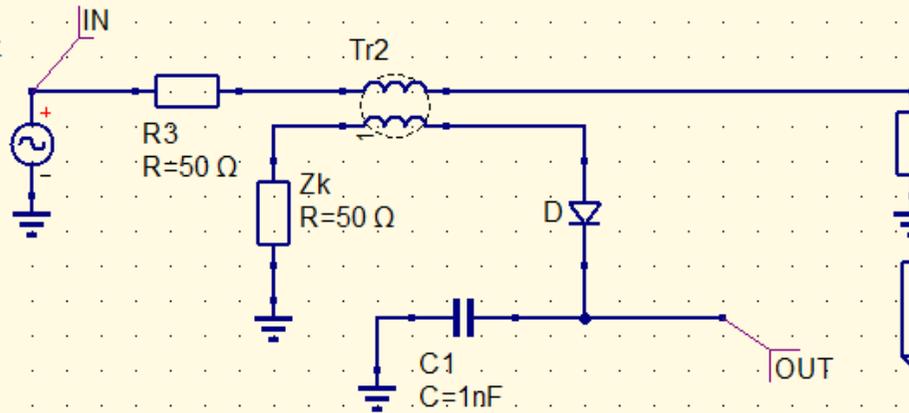
Bei **Richtkopplern** findet in der Koppelleitung sowohl die Stromkopplung mit $I_M \sim U_M$, die Spannungskopplung mit U_E und die phasenabhängige Addition zu U_R statt. Vertauscht man den Gleichrichter D und Z_K , so ändert sich das Vorzeichen der überkoppelten Stromkomponente und man erhält als Summe U_V .

Bei optimalem mechanischem Aufbau sind die Richtkoppler bis in den GHz-Bereich hochgenau.

Simulation mit QucsStudio:

(SWR-Meter01)

V1
U=10 V
freq=10MHz

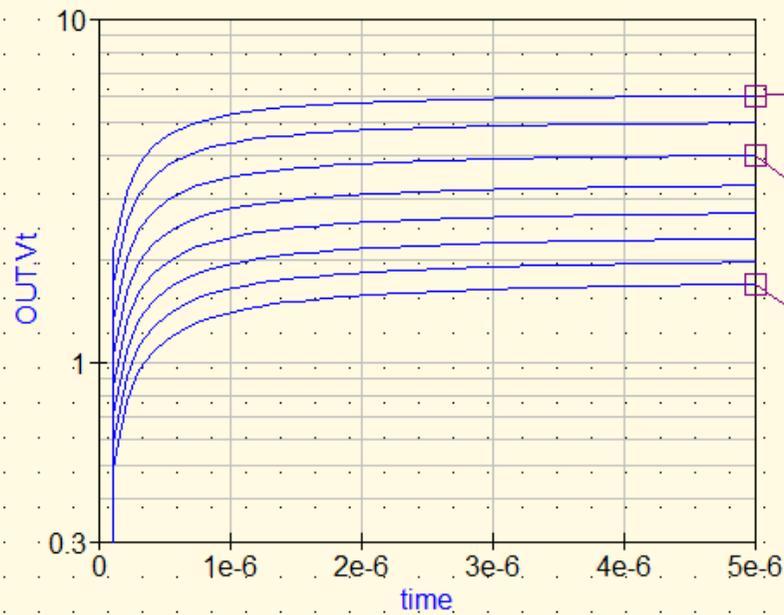


Transient
Simulation

TR1
Stop=5 us
Points=50

Parameter
Sweep

SW1
Sim=TR1
Param=RL
Type=list
Points=5, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175

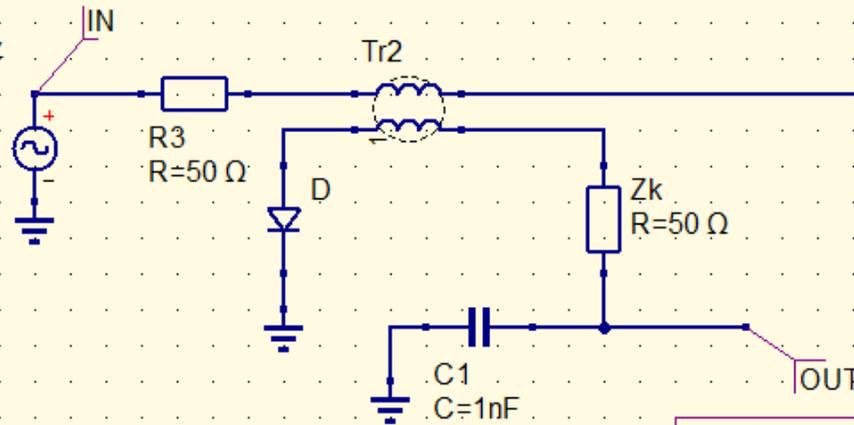


time: 5 μs
RL: 5
OUT.Vt: 5.99

time: 5 μs
RL: 50
OUT.Vt: 4.02

time: 5 μs
RL: 175
OUT.Vt: 1.69

V1
U=10 V
freq=10MHz

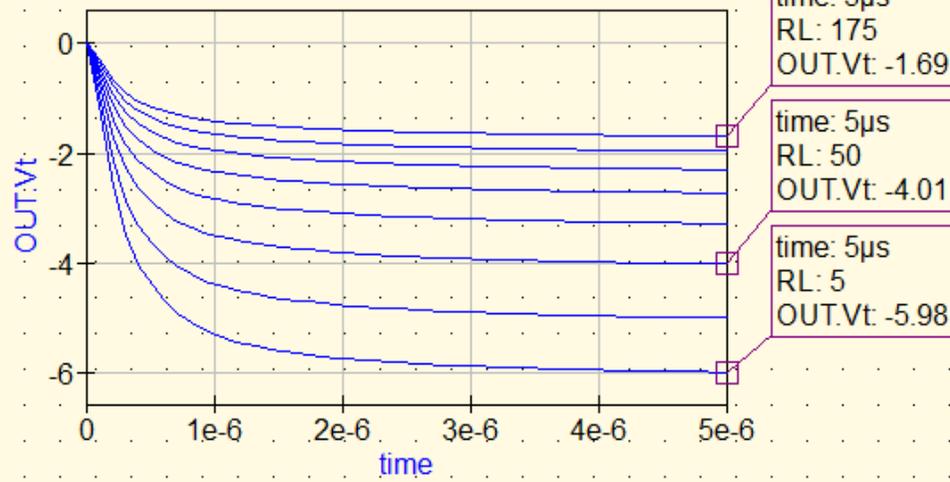


Transient
Simulation

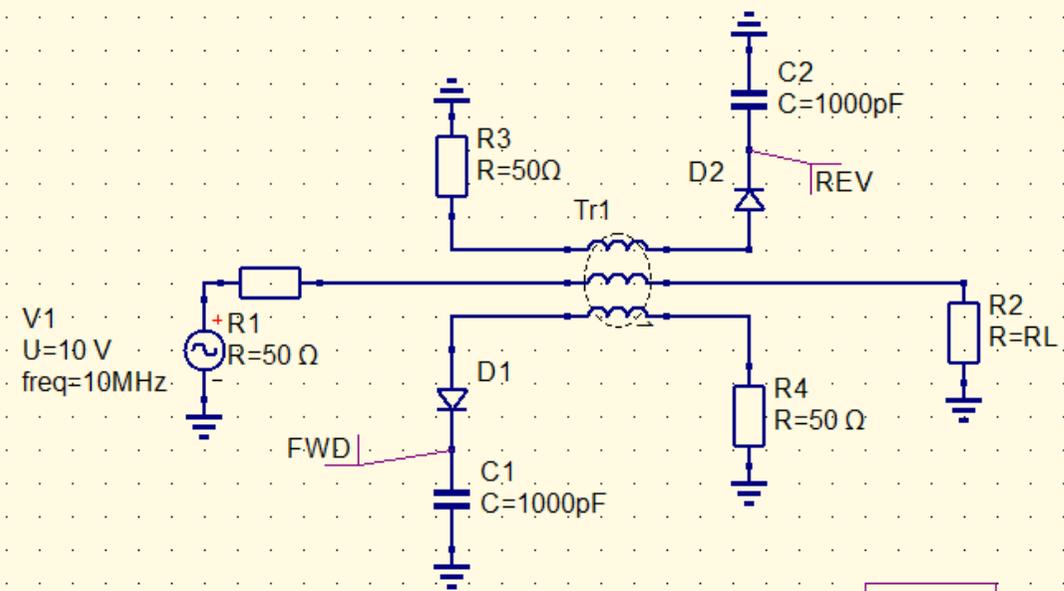
TR1
Stop=5 us
Points=50

Parameter
Sweep

SW1
Sim=TR1
Param=RL
Type=list
Points=5, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175



(SWR-Meter)

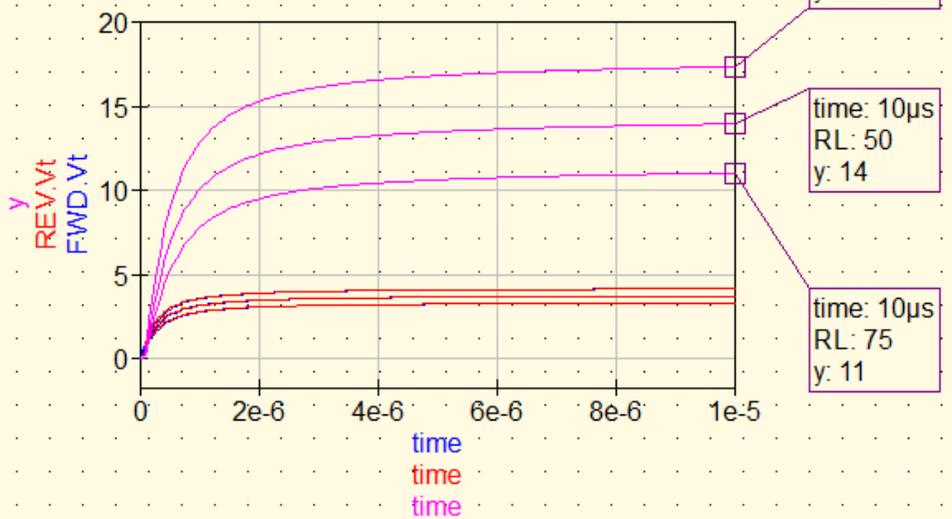


Transienten Simulation

TR1
Stop=10us
Points=200

Parameter Sweep

SW1
Sim=TR1
Param=RL
Type=list
Points=25; 50; 75



Gleichung

Eqn1
y=REV*FWD

Eine unabhängige, direkte Messung von hinlaufender und rücklaufender Welle mithilfe eines Richtkopplers ist nicht möglich, es wird auch hier eine **Anpassungsmessung** vorgenommen.

Man erhält nur die Summe oder Differenz von U_M und U_E und kann darauf erst indirekt auf einen Richtungsfluss schließen. Aus den komplexen Werten lässt sich der Reflexionsfaktor r und aus dessen Beträgen das SWV ableiten:

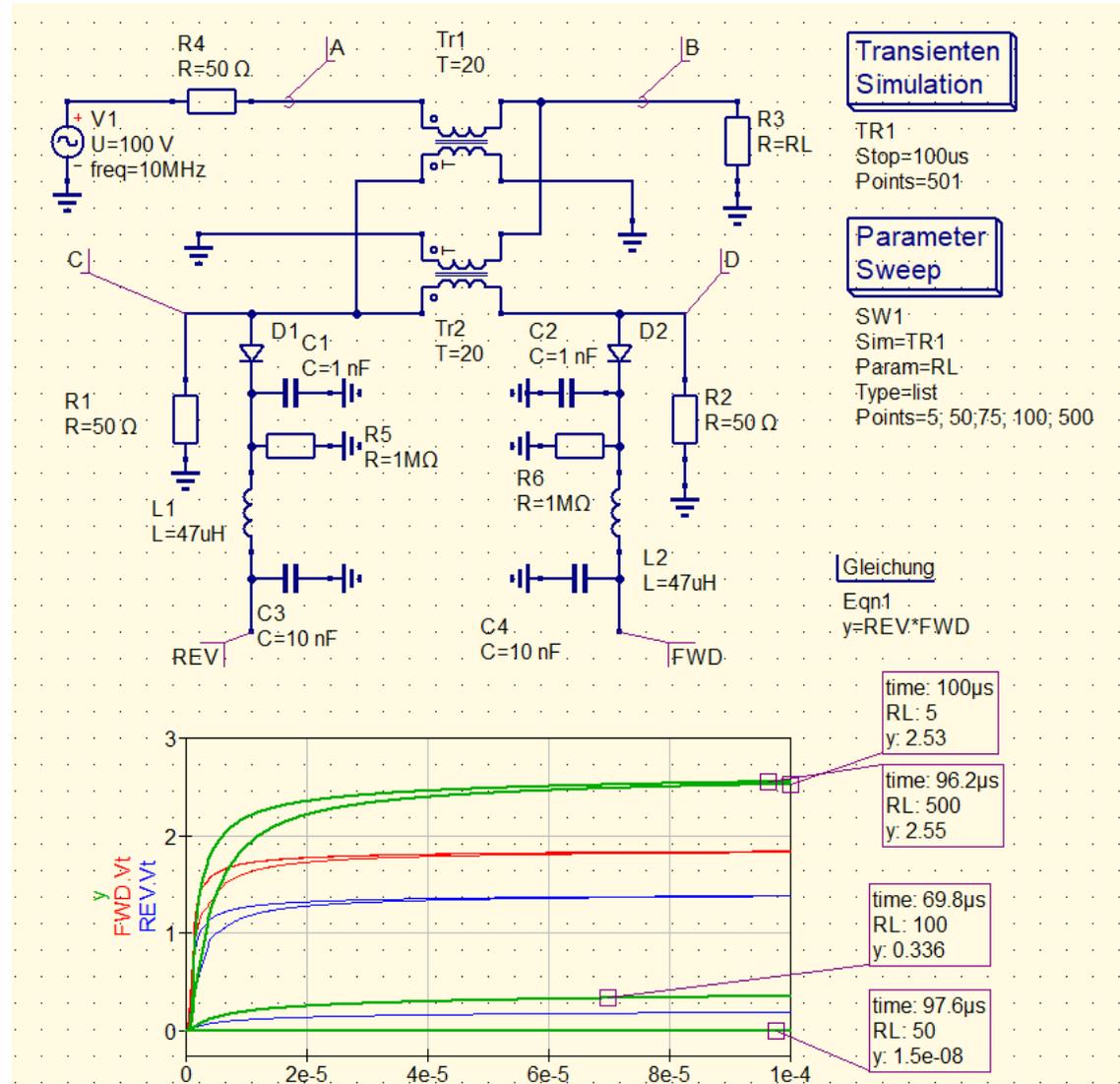
$$SWV = \frac{1 + |r|}{1 - |r|}$$

Die direkte Bestimmung von $|U_{\min}|$ und $|U_{\max}|$ ist mit einem Richtkoppler nicht möglich.

Richtkoppler – Sontheimer-Koppler (Transformator-Koppler)

(Richtkoppler01/Richtkoppler02)

Dieser Koppler benötigt keine räumliche Dimension. Er koppelt an einem einzigen Punkt der Leitung die Gesamtspannung und den Gesamtstrom aus. Der Transformatorkoppler überlagert den ausgekoppelten Strom zweimal mit der ausgekoppelten Spannung, und zwar mit 180° Phasenunterschied.



AS628 X28-HF-Multimeter

Kompakte Anzeigebaugruppe mit 2x20-stelligem LCD-Display sofort als Frequenzzähler bis 50 MHz nutzbar. Verschiedene Sensoren, die automatisch erkannt werden (SWR-Messbrücken einschließlich PTT-Kontrolle, logarithmische Detektoren, HF-Spannungsmesser, Diodentastkopf) können über PS2-Buchse angeschlossen werden. Sollte im Shack nicht fehlen!

Folgende Erweiterungen sind verfügbar.

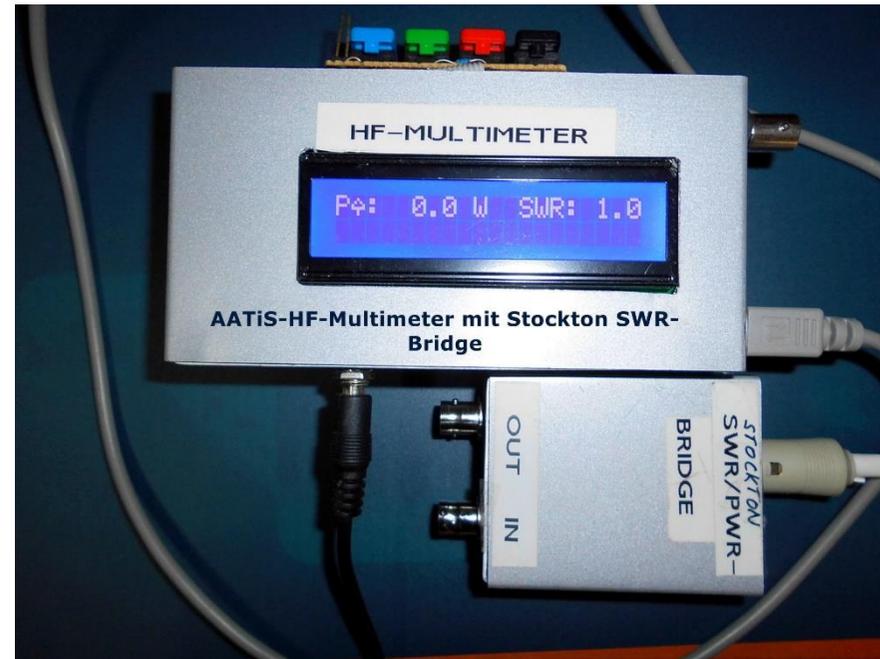
[AS639](#) Logarithmischer Detektor

[AS649](#) SWR-Messkopf

[AS659](#) HF-Durchgangsmesskopf

[AS669](#) Aktiver KW-SWR-Messkopf (CPU AS628_V2 erforderlich)

[AS679](#) Aktiver SWR-Messkopf für 2m (CPU AS628_V2 erforderlich)



Quellen und weiterführende Links:

<https://www.mundo.schule/details/SODIX-LEIFI.7437>

https://www.walter-fendt.de/html5/phde/standingwavereflection_de.htm

<https://www.peter-junglas.de/fh/vorlesungen/physik1/html/kap4-4-2.html>

<https://www.geogebra.org/m/jug9qwvm>

<https://docplayer.org/215705754-Messungen-an-antennen-vom-swr-meter-zum-antennenanalyser.html>

<https://www.geogebra.org/m/ZGAYfSV5#material/etqxwpc>

<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-wellen/grundwissen/groessen-zur-beschreibung-einer-elektromagnetischen-welle>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Leistungsanpassung#Impedanzen>

<https://www.studysmarter.de/schule/physik/mechanik/eigenschaften-von-wellen/>

<https://docplayer.org/105909991-Umbau-eines-narda-richtkopplers-1-ueberarbeitung.html>

<https://www.elektroniktutor.de/signalkunde/reflex.html>

hf-Praxis 8/1012

<https://dl6gl.de/digitales-swr-power-meter/6-messbruecken.html>

<https://dl6gl.de/digitales-swr-powermeter-mit-pep-anzeige/2-tandem-match-koppler.html>

https://www.aatis.de/content/bausatz/AS628_X28-HF-Multimeter