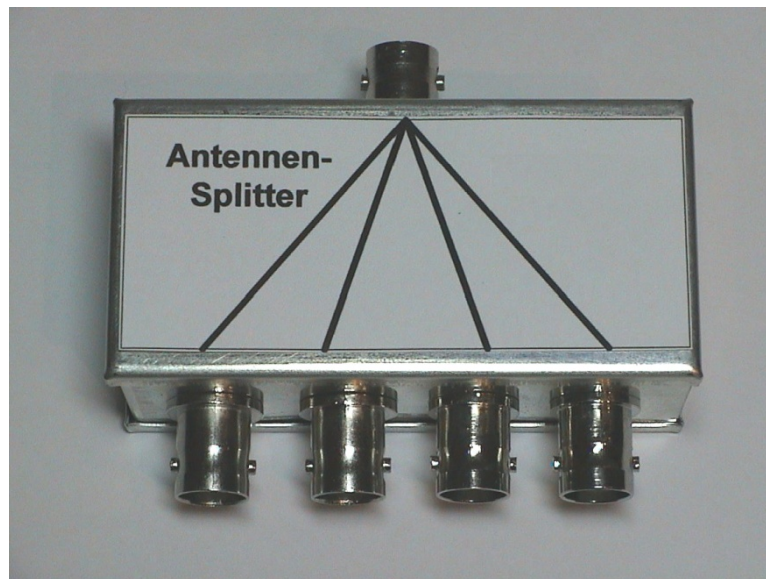


Anschluß mehrerer Empfänger an einer Antenne



Bei mir zuhause sind für Kurzwellen zwei endgespeiste Langdraht-Antennen installiert. Die eine Antenne nutze ich für QSOs, die andere nur als Empfangsantenne für verschiedene SDR-Receiver, die sich im Laufe der Zeit so bei mir angesammelt haben.

Was mich dabei jedoch störte war, dass ich immer nur mit dem SDR arbeiten konnte, der gerade an der Empfangsantenne angeschlossen war. Die anderen SDRs waren nicht erreichbar. Die Empfänger einfach alle parallel an der Antenne anzuschließen funktioniert zwar, ist aber nicht so gut, weil die Impedanzen dann nicht mehr stimmen. Als Lösung bieten sich hier sog. "RF Power-Splitter & Combiner" mit mehreren Ein- bzw. Ausgängen (Ports) an. Die Frage die sich mir dann stellt war, welcher Power-Splitter für das Zusammenschalten mehrerer Empfänger an einer Antenne gut geeignet und gleichzeitig einfach aufzubauen wäre.

Nachfolgend beschreibe ich die Wirkungsweise einiger Power Splitter & Combiner mit ihren Vor- und Nachteilen, sowie den Aufbau eines geeigneten 5-Port Splitters, zum Anschluß von bis zu vier Empfängern (SDR's) an einer einzigen Antenne.

Power Splitter & Combiner

Power-Splitter & Combiner haben die Aufgabe, entweder ein HF-Signal auf zwei oder mehrere Ausgänge zu aufzuteilen oder zwei bzw. mehrere HF-Signale auf einen gemeinsamen Ausgang zusammen zu führen. Applikationen finden sich beispielsweise bei der Zusammenschaltung von Antennen, beim Aufteilen von Oszillatorsignalen auf Sende-/Empfangsmischer, bei der Zusammenfassung von zwei HF-Leistungsendstufen oder beim Splitten eines ZF-Signals auf zwei Ausgänge. Sämtliche Anschlüsse solcher RF Splitter & Combiner müssen den Impedanzen der vor- und nachgeschalteten Schaltungen entsprechen, im Regelfall $Z = 50 \text{ Ohm}$. Weiterhin besteht naturgemäß die Forderung einer möglichst verlustarmen Addition bzw. Teilung der HF-Signale, bei gleichzeitig möglichst hoher Entkopplung der Ein- bzw. Ausgänge.

Wilkinson-Teiler

Eine sehr nützliche Schaltung für die Leistungsteilung und Leistungssummierung mit gleichen Phasenbedingungen an jedem Ausgangstor, sowie mit guter Entkopplung der Ausgänge, ist der Wilkinson-Teiler. Die Nachteile einer Durchgangsdämpfung umgeht der Wilkinson-Teiler, indem er das Prinzip der verlustfrei transformierenden Wirkung von Viertelwellenleitungen ausnützt. Bekanntlich sind Eingangs- und Ausgangswiderstand einer Paralleldrahtleitung schon bei einer elektrischen Länge von $\lambda/4$ reell. Eine Viertelwellenleitung lässt sich deshalb ebenfalls als abgestimmte Leitung einsetzen, deren Strom- und Spannungsverteilung in **Bild 1** dargestellt ist.

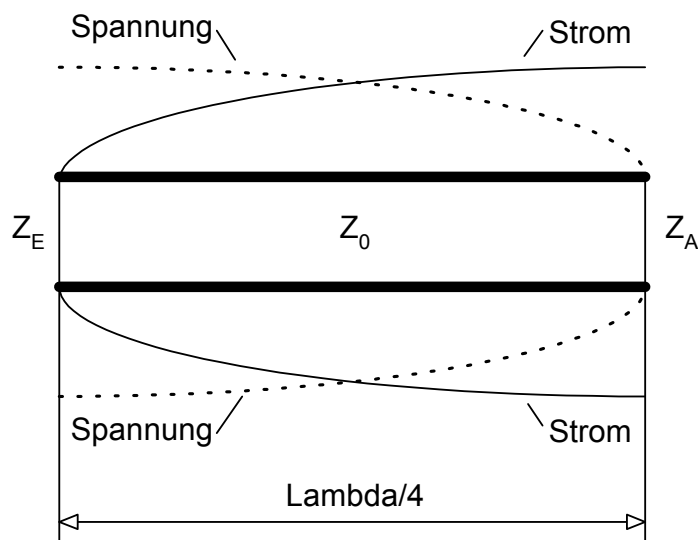


Bild 1: Strom- und Spannungsverteilung auf einer elektrisch $\lambda/4$ langen Zweidrahtleitung

Die Strom/Spannungsverhältnisse sind am Anfang und am Ende der Leitung umgekehrt. Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass ein hochohmiger Widerstand am Leitungsanfang als niederohmig am Leitungsende erscheint und umgekehrt. Eine Viertelwellenleitung bezeichnet man daher auch als Viertelwellentransformator. Bei der $\lambda/4$ -Leitung spielt der Wellenwiderstand Z_0 eine wichtige Rolle, denn er bestimmt das Transformationsverhältnis zwischen Ein- und Ausgang nach der Beziehung

$$Z_0 = \sqrt{Z_E \times Z_A} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} Z_E = \text{Eingangswiderstand der Leitung} \\ Z_A = \text{Ausgangswiderstand der Leitung} \end{array}$$

Das Prinzipschaltbild eines Wilkinson-Teilers zeigt **Bild 2**. Es herrschen eindeutige Impedanz-Verhältnisse. Der 50 Ohm Verbraucher an Tor 2 wird durch die $\lambda/4$ -Leitung auf 100 Ohm an Tor 1 transformiert. Das gleiche gilt für Tor 3. Durch die Parallelschaltung von zweimal 100 Ohm ergibt sich eine Eingangsimpedanz von $R=50$ Ohm an Tor 1. Damit die Transformation von Tor 2 und Tor 3 (50 Ohm) auf Tor 1 (100 Ohm) stattfindet, müssen die Impedanzen der $\lambda/4$ -Transformationsleitungen

$$Z_0 = \sqrt{Z_E \times Z_A} = R \times \sqrt{2} = 70,7 \text{ Ohm betragen.}$$

Bei richtiger Dimensionierung, arbeitet der Wilkinson-Teiler verlustfrei, d.h. die eingespeiste HF-Leistung teilt sich zu je 50% (-3dB) auf Tor 2 und 3 auf. Werden alle Tore mit gleicher Impedanz von 50 Ohm abgeschlossen, wird in $2R$ keine Leistung verbraucht. Erst bei unsymmetrisch terminierten Toren fließt ein Verluststrom durch $2R$. Speist man ein Signal bei Tor 2 oder 3 ein, so

geht die Hälfte zum Tor 1 und die andere Hälfte wird im internen Abschluss von Tor 4 vernichtet. Tor 4 wird fast nie als Eingang oder Ausgang genutzt und ist deshalb mit einem Widerstand, dessen Wert zweimal der Tor-Impedanz R entspricht, abgeschlossen.

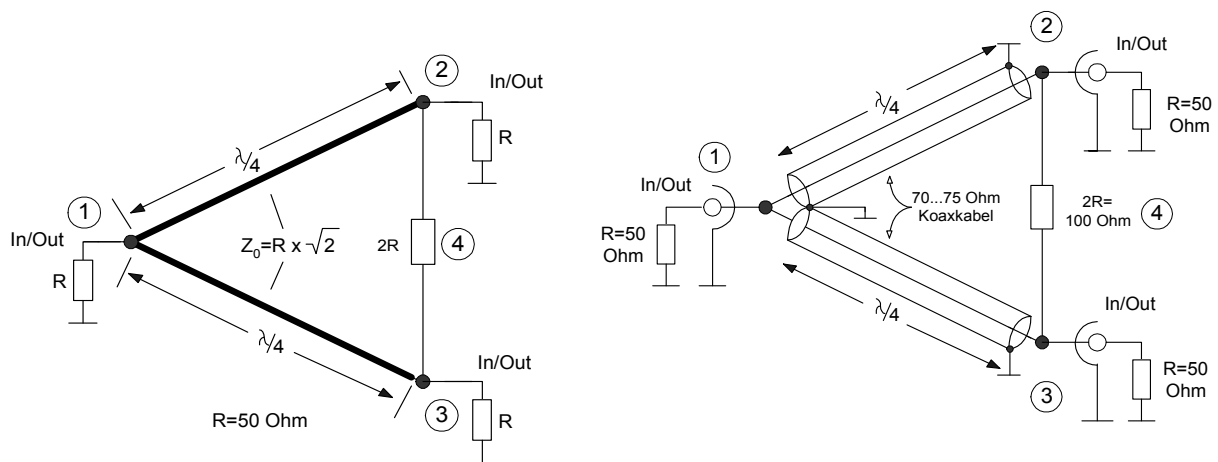


Bild 2: 3-dB-Wilkinson-Teiler, Prinzipschaltbild (links) und aufgebaut mit 75-Ohm-Koax-Leitungsstücken (rechts)

Gleichzeitig sind die Tore 2 und 3 sowie die Tore 1 und 4 voneinander entkoppelt. Ein an Tor 2 eingespeistes Signal erfährt über die beiden $\lambda/4$ -Leitungen nach Tor 3 eine Phasendrehung von 180° . Über den $2R$ -Widerstand ist die Phasendrehung von Tor 2 nach Tor 3 jedoch 0° , so dass sich die Signale aufheben. Der Wilkinson-Teiler wird daher auch als „0- 180° -Hybrid“ bezeichnet. Derartige Teiler bzw. Addierer sind relativ schmalbandig (ca. 30% Bandbreite) und für das 2m-Band oder das 70cm-Band gut brauchbar. Kaskadiert man mehrere $\lambda/4$ -Segmente, so lassen sich größere Bandbreiten erzielen. Der praktische Aufbau von Wilkinson-Teilern erfolgt entweder in Streifenleiter-Schaltung, mit konzentriert mit L/C-Gliedern oder mit Hilfe von Koaxkabel (**Bild 3, rechts**).

Am einfachsten lassen sich Wilkinson-Teiler mit zwei 70,7-Ohm-Koaxleitungen aufbauen (75-Ohm-TV-Koaxkabel tut's auch), deren elektrische Länge $\lambda/4$ entspricht (**Bild 4**).

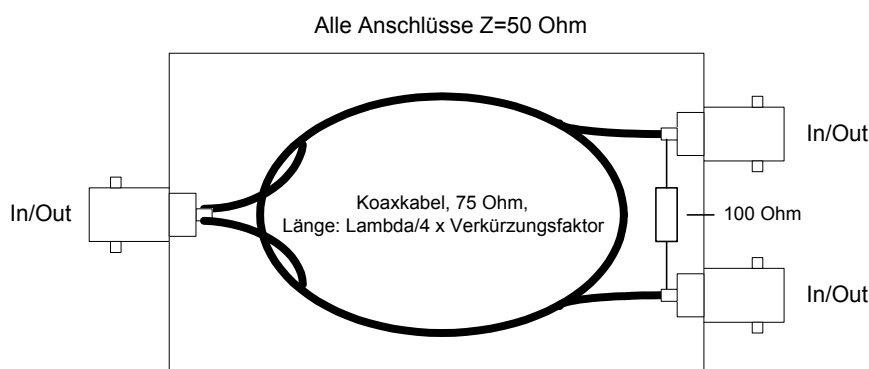


Bild 3: Praktischer Aufbau eines Koax-Wilkinson-Teilers in einem Blech-Gehäuse, $f=145\text{MHz}$

Selbst aufgebaute Leistungsteiler mit Koaxkabel, lassen sich gut in kleine Alu- oder Weißblech-Gehäuse unterbringen, wie in **Bild 3** dargestellt. Bei der Berechnung der $\lambda/4$ -Leitungslänge, geht der Verkürzungsfaktor (z.B. $v=0,66$) des Kabels mit ein, es gilt:

Länge Koaxkabel (cm) = Wellenlänge/4 x Verkürzungsfaktor

Bei 145 MHz ($\lambda=2,07\text{m}$) beträgt die Leitungslänge $L=33,0\text{ cm}$ und bei 433 MHz $L=11,55\text{ cm}$.

Sollen der Power-Splitter/Combiner in noch kleinere Gehäuse untergebracht werden, lässt sich die Schaltung auch mit diskreten Bauteilen erstellen. Grundsätzlich lässt sich jede $\lambda/4$ ($3\lambda/4$, $5\lambda/4$, ...) Transformationsleitung mit charakteristischem Wellenwiderstand Z_0 bei einer Frequenz f_0 durch ein gleichwertiges „Pi“-LC-Netzwerk ersetzen (**Bild 4, 5**).

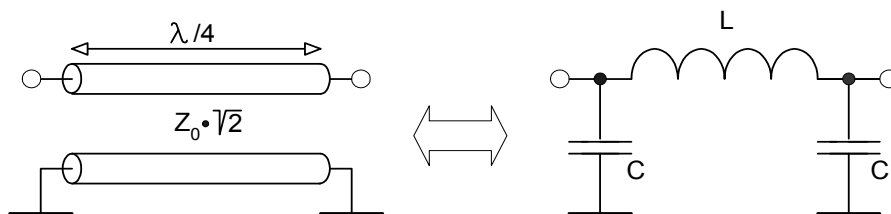


Bild 4: LC-„Pi“-Glied als äquivalente $\lambda/4$ -Transformationsleitung

Die Werte der diskreten Bauteile berechnen sich zu

$$C = 1/2\pi f_0 \times R \quad \text{mit } R=50\text{ Ohm, } f \text{ in MHz, } C \text{ in } \mu\text{F, } L \text{ in } \mu\text{H}$$

$$L = R/2\pi f_0 \quad \text{mit } R=50\text{ Ohm, } f \text{ in MHz, } C \text{ in } \mu\text{F, } L \text{ in } \mu\text{H}$$

Bei $f_0=145\text{ MHz}$ ergeben sich: $C=31\text{pF}$ und $L=77,6\text{nH}$ und bei $f_0=435\text{ MHz}$: $C=5,2\text{pF}$ und $L=26\text{nH}$.
Berechnungen hierzu findet man **unter** https://leleivre.com/rf_wilkinson.html

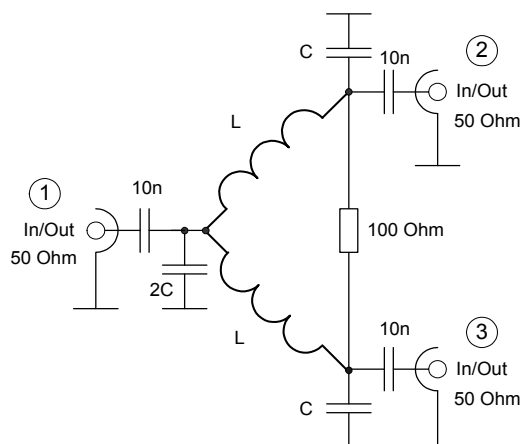


Bild 5: 3-dB-Wilkinson-Teiler mit diskreten Bauelementen

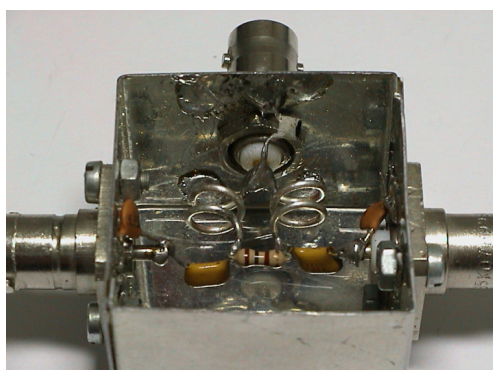


Bild 6: Versuchsaufbau eines 433 MHz-Wilkinson-Teilers 1 auf 2 und 1 auf 3 mit L-C-Kreisen

Den Aufbau eines 433-MHz-Wilkinson-Teilers mit diskreten Bauteilen zeigt **Bild 6**. Die Spulen sind aus versilberten 1mm Kupferdraht, Spulendurchmesser 8mm, 2 Windungen, Spulenlänge 8mm, mit einer Spulengüte von ca. $Q=2,8$. Die spektralen Messwerte des Wilkinson-Teilers verdeutlicht **Bild 7**. Der nutzbare Frequenzbereich liegt bei 400-470 MHz, bei einer Durchgangsdämpfung (Verlust) von $< 0,5\text{dB}$ und Entkopplung der Ein-/Ausgänge (zwischen Tor 2 und 3) von max. 30 dB. Typische Anwendungen von Wilkinson-Teilern finden sich beim Zusammenschalten von HF-Endstufen, im Splitten von HF-Signalen oder im Anschluß von zwei Antennen an einen Transceiver.

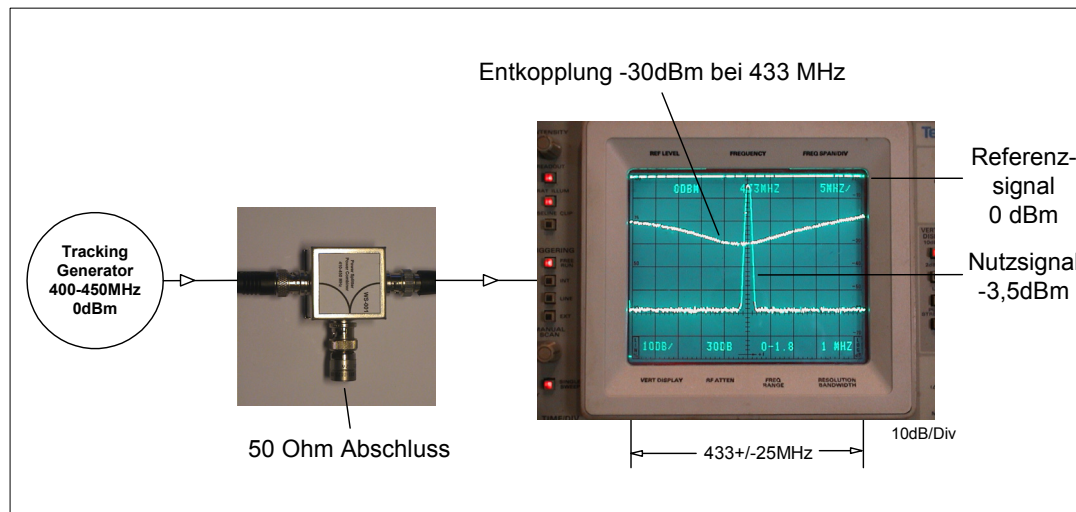


Bild 7: Messung der Entkopplung zwischen Tor 2 und 3 bei $f_e=433\pm 25\text{MHz}$

- Vorteil: Geringer Verlust ($< 1\text{ dB}$)
- Nachteil: Begrenzte Bandbreite, vorwiegender Einsatz im VHF/UHF/SHF-Bereich

Wheatstone-Brücke

Den Nachteil einer zu geringen Entkopplung der Tore, beseitigt die Wheatstone-Brücke. Die Wheatstone-Brücke ist ein idealer Leistungsaddierer, bei gleichzeitig hoher Entkopplung der Quellensignale bzw. Ausgangssignale. Im Aufbau ähnelt die Wheatstone-Brücke einer DMS-Vollbrückenschaltung (DMS=Dehnungsmessstreifen), welche als Sensor zur Messung von Kräften, Drücken und Drehmomenten im Maschinenbau häufig eingesetzt wird. Befindet sich die

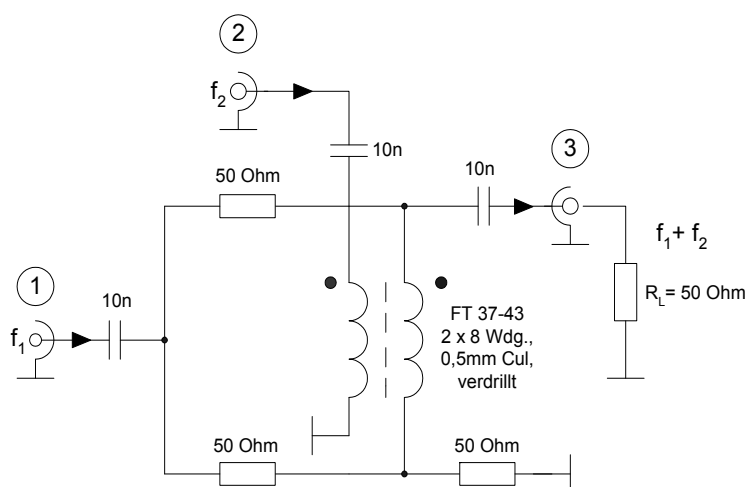


Bild 8: Schaltbild der Wheatstone-Messbrücke als RF-Power-Combiner

Messbrücke im Gleichgewicht, sind die Tore 1 und 2 vollständig voneinander entkoppelt (**Bild 8**). Am gemeinsamen Ausgang, Tor 3 werden die Eingangssignale f_1 und f_2 mit einer Dämpfung von 6dB abgegriffen.

Ein typisches Einsatzgebiet der Wheatstone-Brücke liegt z.B. in der verzerrungsarmen Verknüpfung von zwei (oder mehr) HF-Signalen, beispielsweise zur Messung der Großsignalfestigkeit von HF-Verstärkern oder HF-Empfängern. Bei solchen Messungen dürfen sich die HF-Generatoren gegenseitig nicht „sehen“, da sie ansonsten selbst IM-Verzerrungen erzeugen und daraus resultierend, schlechte Intermodulations-Abstände der Prüflinge vortäuschen würden. Das Schaltbild einer Wheatstone-Brücke mit Ringkerntransformator FT 37-43 zeigt **Bild 8** und die praktischen Aufbauten **Bild 9**.

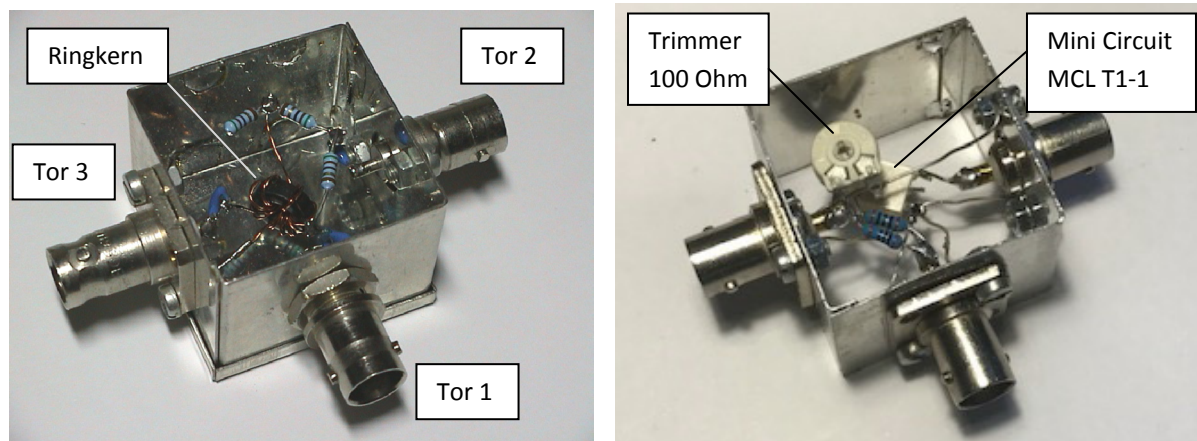


Bild 9: Versuchsaufbau einer Wheatstone-Messbrücke im Weißblechgehäuse 37x37x30mm mit Ringkernübertrager FT 37-43 (links) und T1-1 Übertrager plus 100 Ohm Trimmer (rechts)

Der nutzbare Frequenzbereich dieser Messbrücken liegt bei etwa 1-100 MHz. Anstelle des selbst bewickelten Ringkerns, kann auch ein fertiger Transformator, z.B. ein **T1-1** von MCL, verwendet werden (**Bild 9, rechts**). Werden die beiden 50 Ohm-Brückenwiderstände durch einen 100 Ohm Trimmer ersetzt, kann die Entkopplung (Isolation) der Eingänge/Ausgänge zwischen Tor 2 und 3 auf über 60dB abgeglichen werden (**Bild 10**).

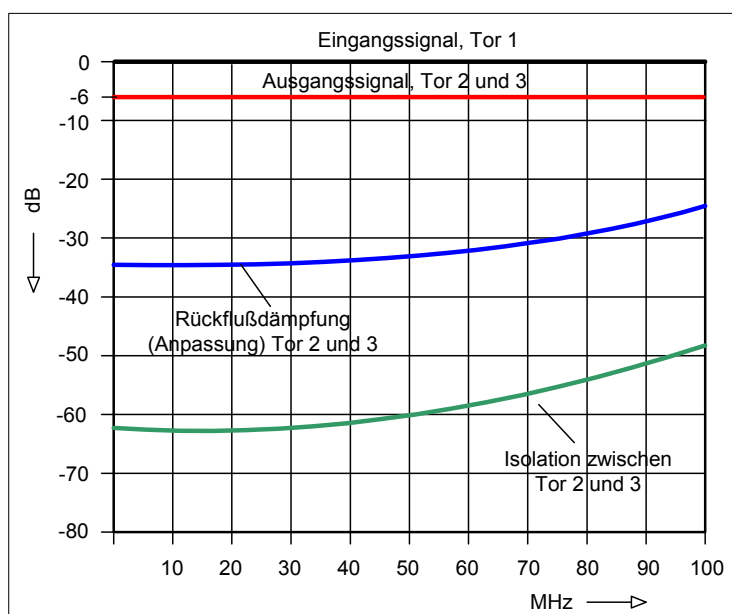


Bild 10: Isolation und Rückflußdämpfung (Anpassung) der Wheatstone-Brücke

3dB Hybrid-Transformator

Für Frequenzen bis etwa 500MHz, lassen sich Leistungsteiler auch mit Hilfe von Transformatoren, bestehend aus Ring- oder Doppellochkernen (Material 43 oder 77) herstellen. Über Trafo TR 1 (**Bild 11, links**) wird die Eingangsimpedanz von 50 Ohm auf 25 Ohm gesenkt und der Balun TR 2 führt die Leistungsteilung auf die beiden 50-Ohm-Ausgänge durch, mit einer Phasendrehung von 180°. Der Abgriff des trifilar gewickelten TR 1 liegt beim 0,7-fachen der Gesamtwindungszahl ($n=7$) und der bifilar gewickelte TR 2 besitzt identische Windungszahlen ($n=5+5$). Ein 100-Ohm-Widerstand zwischen Port 2 und 3 dient der Isolation. Zwischen den Spulen befindet sich noch ein 27pF Kondensator (C), der die Streuinduktivität der Kerne kompensiert, so dass sich die Werte von Rückflußdämpfung und Anpassung bei höheren Frequenzen verbessern. Der Splitter funktioniert natürlich in beiden Richtungen, als Teiler oder Summierer.

Ein ähnlicher Splitter läßt sich auch mit nur einem einzigen Transformator (TR 3) herstellen (**Bild 11, rechts**), wobei die Primärwicklung 1,414-mal (Wurzel 2) so viele Windungen besitzt, wie die Sekundärwicklungen.

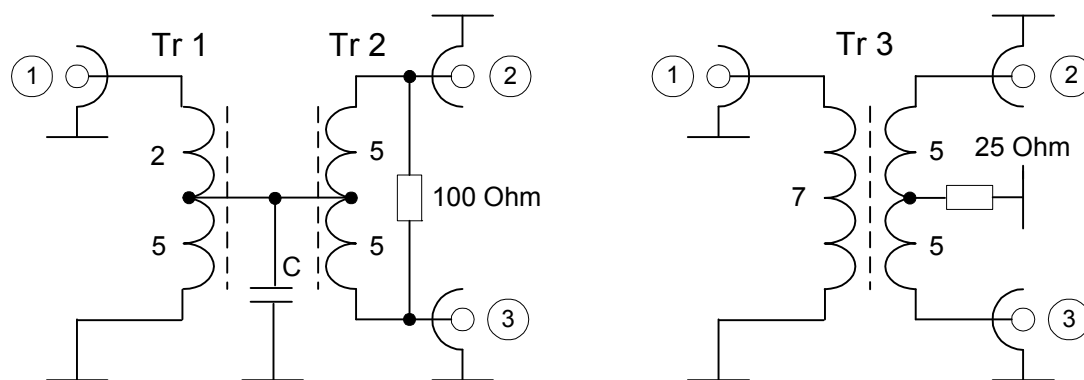


Bild 11: 3dB Splitter/Combiner mit Transformator

Den praktischen Aufbau eines Hybrid- Kopplers mit zwei Doppellochkernen zeigt **Bild 12**. Durch Zusammenschaltung mehrerer solcher Teiler, lassen sich 4, 8, 16-Kanal-Power-Splitter (2 hoch n) realisieren. Von Mini Circuits gibt es Fertigbauteile, wie z.B. der 5-Port Splitter/Combiner AD4PS-1, welcher sich als Antennen-Splitter verwenden läßt, s. Beispiel zum Schluss.

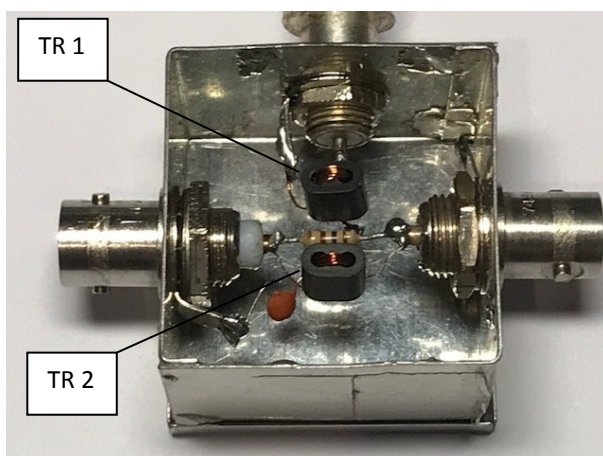


Bild 12: Aufbau eines 3dB-Splitters/Combiners mit zwei Doppellochkernen BN 43-2402

Die Durchgangsdämpfung beträgt ca. 3,5 dB, verursacht durch die Leistungsverteilung auf Port 2 und 3 und dem Verlust von ca. 0,5 dB der Transformatoren. Die Isolation zwischen Port 2/3 liegt im Mittel bei 35 dB, bei einer Rückflußdämpfung (Anpassung) aller der Ports von 25 dB.

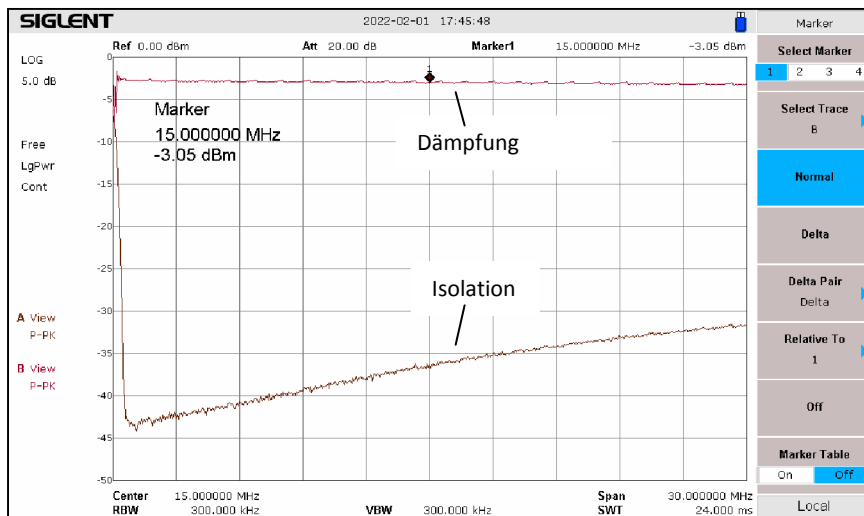


Bild 13: 3dB Hybrid-Splitter, Frequenz 0 bis 30 MHz

- Vorteil: sehr geringer Verlust (0,5 dB), Leistung verteilt vollständig auf Port 1/2
- Nachteil: Frequenzgrenze durch Transformatoren

Resistive Splitter/Combiner

Am wohl einfachsten lässt sich ein „3-Tor“ Power-Splitter durch Anpasswiderstände in den Signalwegen realisieren. **Bild 14, 15** zeigt die Schaltung breitbandiger RF-Splitter/Combiner, zum Anschluss von Quellen und Verbrauchern mit $Z=50\text{-Ohm}$ -Impedanz. Die Splitter lassen sich

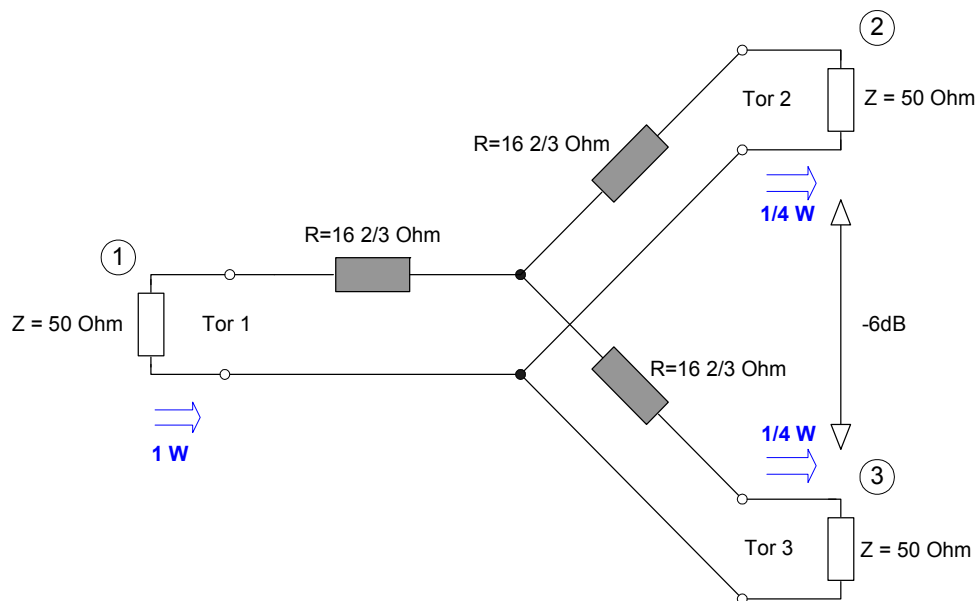


Bild 14: Resistiver Power-Splitter/Combiner in Stern-Konfiguration

in Stern- oder Delta-Konfiguration herstellen. Damit jedes Tor mit $Z=50\text{ Ohm}$ impedanzrichtig abgeschlossen ist, müssen beim Splitter in Stern-Konfiguration drei Leitungswiderstände von

$R = 16 \frac{2}{3}$ Ohm eingefügt werden (oder 25 Ohm Widerstände für $Z = 75$ Ohm) und beim Splitter in Delta-Konfiguration Leitungswiderstände von $R = 50$ Ohm. Auf diese Weise lassen sich recht einfach RF-Splitter/Combiner mit sehr guter Anpassung bis in den GHz-Bereich selbst herstellen.

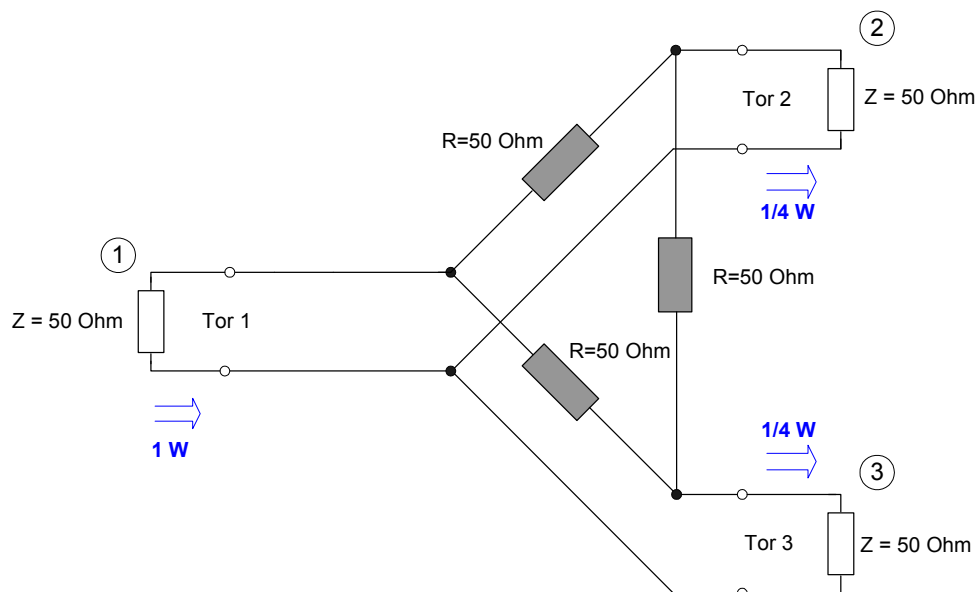


Bild 15: Resistiver Power-Splitter/Combiner in Delta-Konfiguration

Dem Vorteil des einfachen Aufbaus bei großer Übertragungsbandbreite stehen aber auch Nachteile entgegen, nämlich einer Dämpfung zwischen den Toren von 6 dB. Ein Signal, eingespeist in Tor 1, erscheint 6 dB gedämpft (ein Viertel der Leistung bzw. die Hälfte der Spannung) an den Toren 2 und 3. Hierbei gehen 3dB in den Widerständen verloren und 3 dB durch die Leistungsteilung.

Den praktischen Aufbau eines 3-Port Power-Splitters mit drei 50-Ohm-Widerständen in Delta-Konfiguration zeigt **Bild 16** (links) und mit drei 16,66-Ohm-Widerständen in Stern-Konfiguration mit Streifenleitertechnik von 0 bis 5 GHz (rechts).

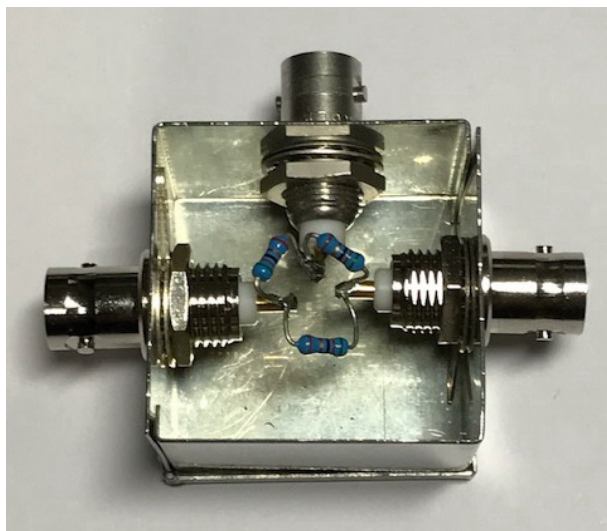


Bild 16: Resistive 3-Port Power-Splitter, Eigenbau (links) und eBay (rechts)

- Vorteil: Einfacher Aufbau, keine Frequenzgrenzen
- Nachteil: 3 dB Verlust durch die Widerstände und nur 6 dB Entkopplung der Ports

Aufbau eines 5-Port Antennen-Splitters

Durch Zusammenschaltung mehrerer Teiler, lassen sich 4, 8, 16-Kanal-Power-Splitter ($2^{\text{hoch } n}$) realisieren (**Bild 17**). Schaltet man drei Stück 3-Port-Splitter zusammen, entsteht ein 5-Port Splitter, der sich z.B. mit resistiven Teilern oder Hybrid-Kopplern aufbauen lässt.

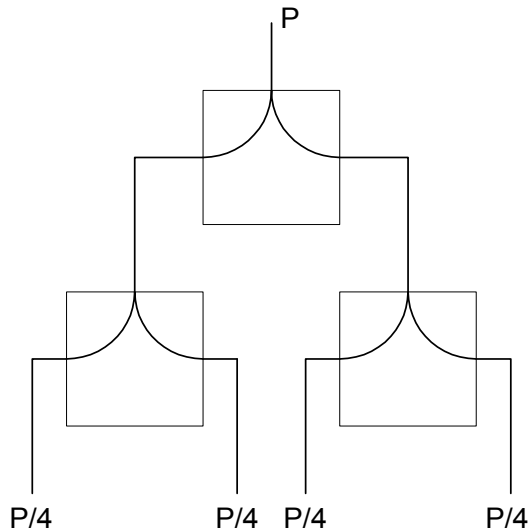


Bild 17: Zusammenschaltung von Splittern in Sternkonfiguration

Den geringsten Aufwand, macht ein resistiver Splitter, aufgebaut mit nur 5 Widerständen (**Bild 18**). Sein Vorteil liegt in der nicht begrenzten Bandbreite und dass die Anpassung der Antenne durch reaktive Komponenten eines Hybrid-Kopplers (**Bild 23**), nicht beeinflusst werden kann. Ein 5-Port Hybrid-Koppler hätte den Vorteil einer sehr geringen Verlustdämpfung von nur ca. 1dB mit dem Nachteil, dass beim Aufbau insgesamt sechs Übertrager gewickelt werden müssen.

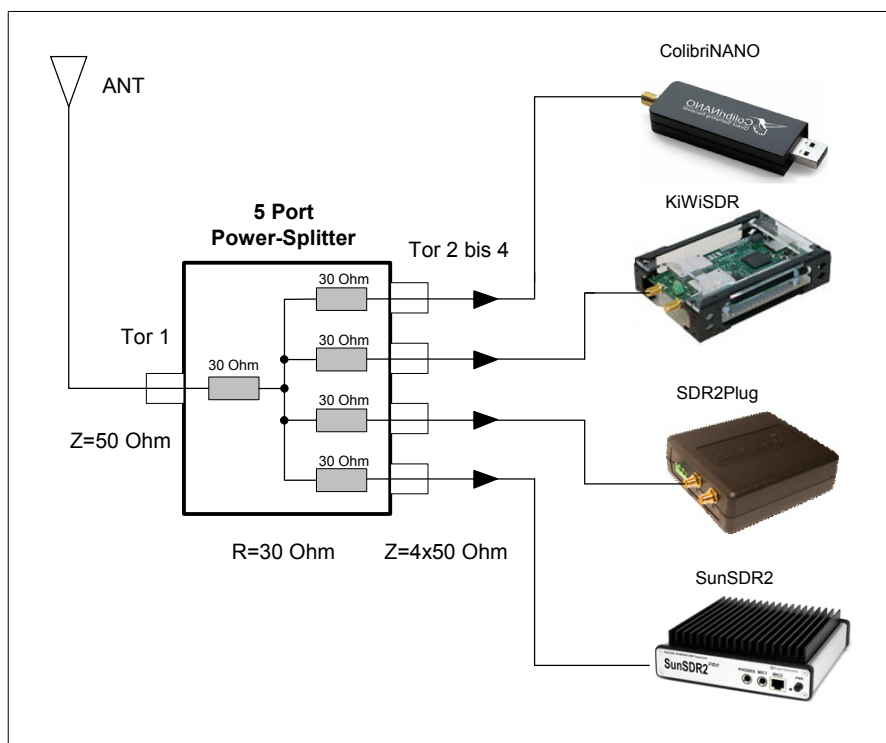


Bild 18: 5-Port Splitter zum Anschluß von vier Empfängern an eine gemeinsame Antenne

Die Größe der Reihenwiderstände (R) im Splitter mit Stern-Konfiguration berechnen sich zu

$$R = Z_0 \cdot (N-1)/(N+1)$$

Bei einem 3-Port Splitter: $R = 50 \text{ Ohm} (2-1)/(2+1) = 16,66 \text{ Ohm}$ und bei einem 5-Port Splitter:
 $R = 50 \text{ Ohm} (4-1)/(4+1) = 30 \text{ Ohm}$.

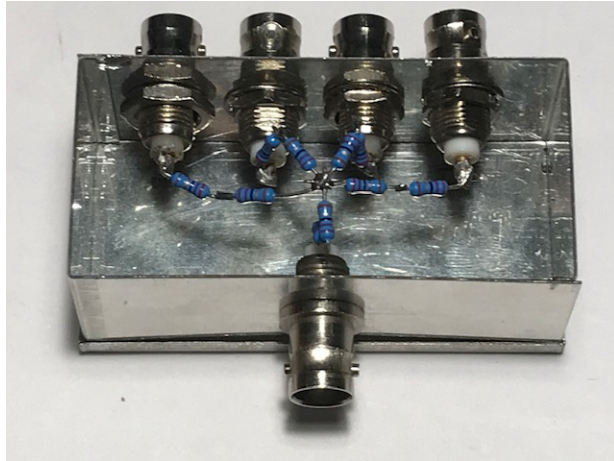


Bild 19: Aufbau des 5-Port Antennen-Splitters in einem Weißblechgehäuse 75x30x35mm. Die sternförmige Struktur ist gut zu erkennen, Leitungswiderstände $27 + 2.9 \text{ Ohm} \approx 30 \text{ Ohm}$

Aufgrund der Splitting des Antennensignals auf 4 Ports, verkleinert sich das Empfangssignal um insgesamt 12dB; 6dB durch die Leistungsverteilung auf 4 Ausgänge und 6dB Einfügedämpfung aufgrund der Anpasswiderstände. In der zusätzlichen Dämpfung von 6 dB sehe ich aber kein Problem, weil das Grundrauschen der Antenne, zumindest im 160-, 80- und 40m-Band, weit über der Grenzempfindlichkeit des Empfängers liegt. Die Messergebnisse des Splitters zeigt **Bild 20**, die Rückflußdämpfung beträgt im Frequenzbereich bis 100MHz an allen Ports $\geq 40\text{dB}$ und die Isolation zwischen den Ports 12 dB.

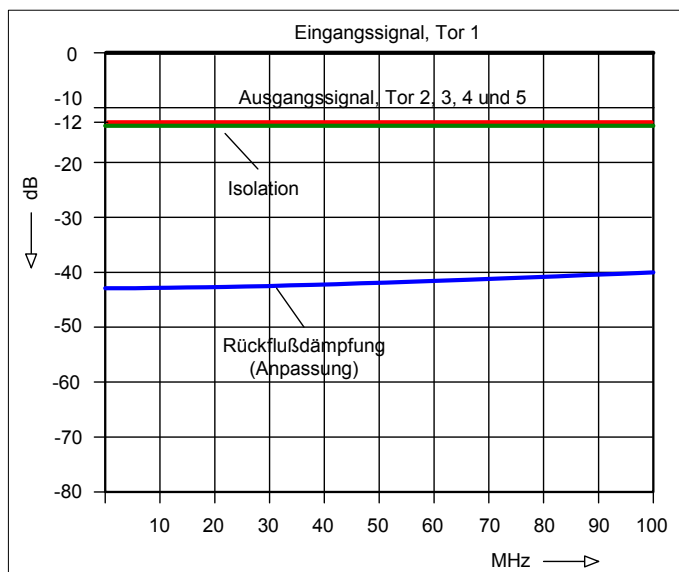


Bild 20: Durchgangsdämpfung, Isolation und Anpassung des 5-Port Antennen-Splitters

Anschließend können alle am 5-Port Splitter angeschlossenen SDRs über einen PC im Heimnetz oder Internet gestartet und bei Bedarf auch gleichzeitig betrieben werden (**Bild 21**).

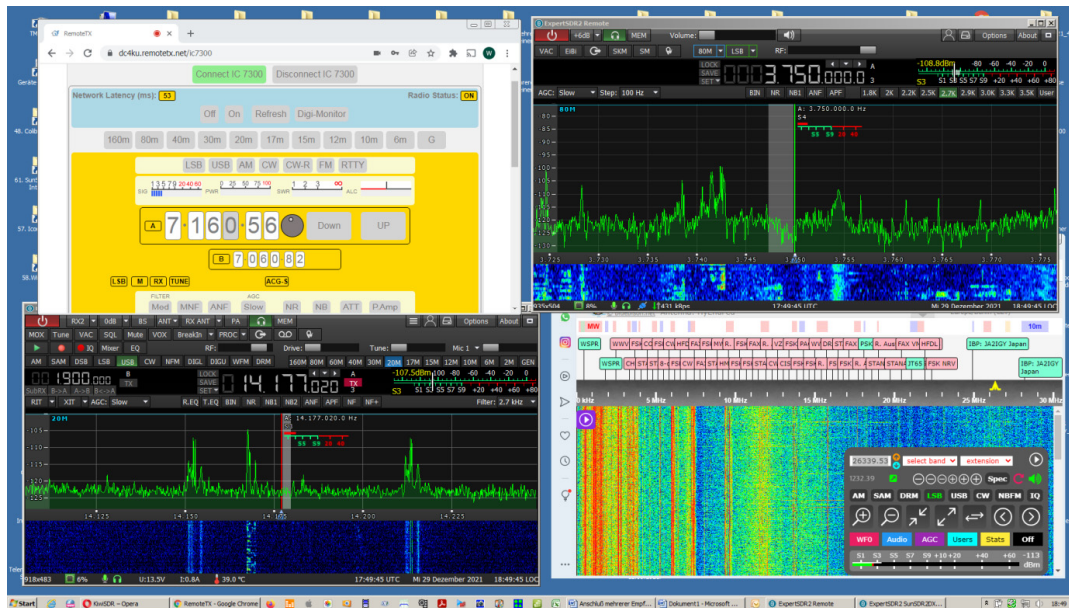


Bild 21: Simultaner Betrieb von vier verschiedenen SDR's an einem Notebook



Bild 22: Fernsteuerung eines SDR über den Browser eines Smartphones (WWW)

Der Vollständigkeit halber zeigt **Bild 23** noch den Aufbau eines **5-Port Hybrid-Kopplers** mit dem **MCL-Baustein AD4PS-1**. Zum Schutz der Anschlüsse vor Gleichspannungen, befinden sich 100nF-Kondensatoren in allen Zuleitungen. Die Eingangsleistung verteilt sich mit 1/4 (-6dB) gleichmäßig



Bild 23: Aufbau eines 5-Port Antennen-Splitter mit dem Hybrid-Baustein AD4PS-1

auf alle vier Ports, mit einem Verlust von nur 0,7dB. Die Isolation zwischen den Ports 2 bis 5 beträgt 45...25 dB bei einer Rückflußdämpfung (Anpassung) von 25dB, entsprechend einem SWR von 1,2.

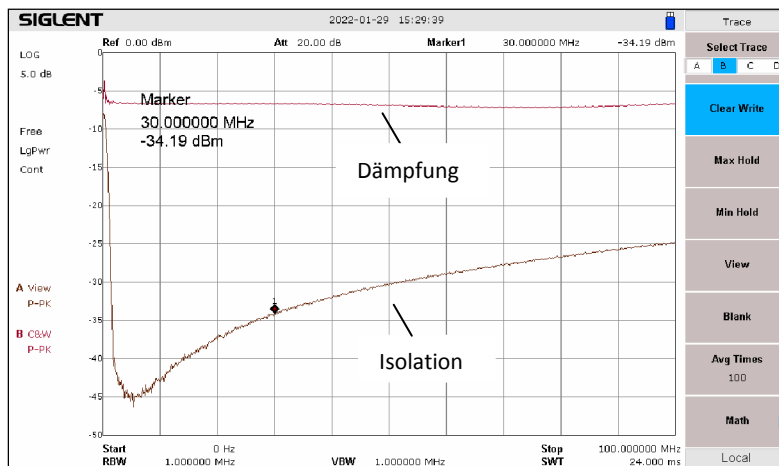


Bild 23: Durchgangsdämpfung und Isolation, f=0-100MHz, Log Scale 5dB/Div

Vergleich 3-Port Power Splitter & Combiner

	Wilkinson-Teiler	Wheatstone-Brücke	Hybrid-Koppler	Resistiver-Splitter
Frequenzbereich	HF bis SHF	HF	HF, VHF	0 Hz bis SHF
Bandbreite	bandbegrenzt, 60:1	bandbegrenzt	bandbegrenzt	breitbandig
Einfügedämpfung	0dB	3dB	0dB	3dB
Isolation	25dB	40...>60dB	25...45dB	6dB
Rückflußdämpfung	25...30dB	30...40dB	20...25dB	40dB

Tabelle 1: Vergleich von Leistungsteilern

Hinweise:

- Über den Splitter darf nicht gesendet werden!
- Alle Ports müssen mit 50 Ohm abgeschlossen sein. Falls am 5-Port Splitter z.B. nur 2 Empfänger angeschlossen sind, sollten die beiden anderen Ports mit 50 Ohm Widerständen abgeschlossen werden.
- In der Zuleitung der Empfangsantenne habe ich ein Koaxrelais angebracht, welches die Antenne vom Splitter trennt, wenn man über eine zweite, benachbarte Antenne ein QSO fährt. Ohne Trennung, kann im Sendebetrieb die Leistung an der Empfangsantenne so hoch sein, dass die die Eingänge der SDR-Empfänger beschädigt werden.

Werner Schnorrenberg

DC4KU

03.02.2022