



OSZI WISSEN

Passive Splitter und Combiner

Resistive Splitter, Wilkinson-Splitter und ihre Ausführungen

Wirkungsweise, Formeln, Auswahl und messtechnische Prüfung. Acht Kapitel und zwei Anhänge.

Copyright 2026 by OsziWissen

Alle Rechte vorbehalten. Weitergabe und Vervielfältigung dieses Dokuments, auch auszugsweise, nur mit Zustimmung des Urhebers.

Stand: Oktober 2026

Inhalt

1 Grundlagen und Kenngrößen	3
Ideale Teilungsdämpfung, Durchgang, Isolation, Anpassung, Balance, Rauschzahl eines passiven Splitters	
2 Resistive Splitter	6
Dreieck und Stern, Widerstandswert, Dämpfung, Dissipation, die geringe Isolation, Bandbreite von Gleichstrom an	
3 Wilkinson-Splitter	10
Prinzip der Auslöschung, Leitungsimpedanz, Isolationswiderstände, Bandbreite, Wiederkehr bei ungeraden Vielfachen	
4 Ausführung mit konzentrierten Bauelementen	15
Pi-Glied statt Leitung, Bauteilwerte, Rechenbeispiel, Grenzen der Bauform	
5 Mehrstufige Wilkinson-Splitter	17
Warum mehrere Stufen breitbandiger sind, Stufung der Widerstände und Impedanzen, was es kostet	
6 Design-Frequenz aus der Leiterbahnlänge	19
Herleitung, Faustformel mit der 75, effektive Permittivität, Beispiel und Gegenprobe an einem gekauften Splitter	
7 Der Splitter als Combiner	22
Reziprok und symmetrisch, kohärente gegen unkorrelierte Signale, Verlustleistung im Widerstand, Terminierung	
8 Auswahl und Prüfung in der Praxis	25
Empfehlung nach Messaufgabe, Zwei- und Drei-Widerstands-Bauform, Messanleitung am Netzwerkanalysator	
Anhang A Das Stehwellenverhältnis	27
Entstehung der stehenden Welle, drei Schreibweisen, Umrechnungstabelle, Bedeutung für die Messunsicherheit	
Anhang B Formelzeichen und Abkürzungen	30
Alle Zeichen mit Bedeutung, Einheit und Kapitel; Begriffe und häufige Verwechslungen	

1 Grundlagen und Kenngrößen

Was ein passiver Splitter leistet, welche Größen ihn beschreiben, und welche Grenze keine Bauform unterschreiten kann.

1.1 Aufgabe und Grenzen

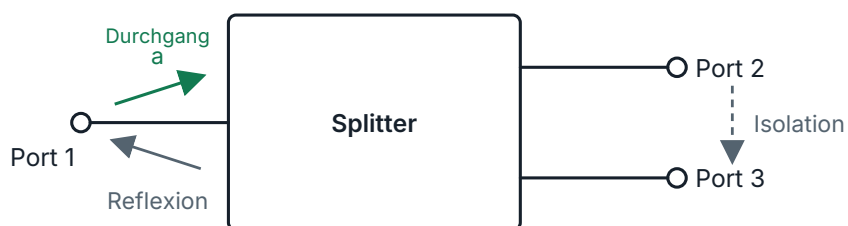
Ein passiver Splitter verteilt die Leistung eines Eingangs auf mehrere Ausgänge. Er enthält keine Verstärkung, keine Stromversorgung und keine nichtlinearen Bauelemente. Daraus folgt unmittelbar die erste und wichtigste Eigenschaft: Die Summe aller Ausgangsleistungen kann die Eingangsleistung nicht überschreiten. Verteilt ein Splitter gleichmäßig auf $N - 1$ Ausgänge, so erhält jeder Ausgang bestenfalls den entsprechenden Bruchteil:

$$a_{\text{ideal}}/\text{dB} = 10 \lg (N - 1)$$

Bei zwei Ausgängen sind das 3,01 dB, bei vier Ausgängen 6,02 dB. Diese Zahl ist keine Eigenschaft eines Bauteils, sondern eine Rechengröße: Sie sagt, wie viel von der Leistung rechnerisch auf einen Ausgang entfällt, wenn nichts verloren geht. Jede reale Bauform liegt darüber – der Wilkinson-Splitter nur wenig, der resistive Splitter deutlich.

Ein wiederkehrendes Missverständnis: Die 3 dB beim Zweifachsplitter sind kein Verlust. Es geht keine Energie verloren, sie wird nur auf zwei Wege verteilt. Verlust im eigentlichen Sinn ist nur das, was als Wärme im Bauteil bleibt.

1.2 Die Kenngrößen



Jedes Tor ist mit der Systemimpedanz abzuschließen – auch ein nicht benutztes

Bild 1.1 Am Dreitor werden drei Dinge getrennt betrachtet: der Weg vom Eingang zu einem Ausgang, der Weg zwischen zwei Ausgängen und die Reflexion an jedem einzelnen Tor.

Durchgangsdämpfung

Das Verhältnis der Eingangsleistung zur Leistung an einem bestimmten Ausgang, bei angepasstem Abschluss aller übrigen Tore:

$$a_{1k}/\text{dB} = 10 \lg \frac{P_1}{P_k} = -20 \lg |S_{k1}|$$

Isolation

Speist man ein Signal in einen Ausgang ein, so erscheint ein Teil davon an den anderen Ausgängen. Die Isolation gibt an, wie stark dieser unerwünschte Weg gedämpft wird:

$$a_{\text{iso}}/\text{dB} = 10 \lg \frac{P_j}{P_k} = -20 \lg |S_{kj}| \quad j, k \neq 1$$

Die Isolation ist der Punkt, an dem sich die beiden Bauformen am deutlichsten unterscheiden, und sie ist der Grund, weshalb die Wahl des Splitters bei manchen Messaufgaben über Erfolg oder Misserfolg entscheidet.

Anpassung

An jedem Tor wird gemessen, welcher Anteil der Welle zurückläuft. Angegeben wird das als Reflexionsdämpfung oder als Stehwellenverhältnis; Anhang A behandelt beides ausführlich. Wichtig ist: Die Anpassung eines Tores gilt nur dann, wenn alle übrigen Tore angepasst abgeschlossen sind. Ein offengelassener Ausgang verdirbt die Anpassung an allen anderen.

Amplituden- und Phasenbalance

Bei Messaufgaben ist oft nicht der Absolutwert der Dämpfung wichtig, sondern die Gleichheit der Wege. Beide Größen sind als Spanne über alle Ausgänge definiert:

$$\Delta A = \max_k a_{1k} - \min_k a_{1k} \quad \Delta \varphi = \max_k \varphi_{1k} - \min_k \varphi_{1k}$$

Ein guter Splitter hält die Amplitudenbalance im Nutzband unter 0,3 dB und die Phasenbalance unter wenigen Grad. Bei einem resistiven Splitter ist die Balance bauartbedingt sehr gut, weil alle Wege denselben Aufbau haben; beim Wilkinson-Splitter hängt sie von der Fertigungsgenauigkeit der Leitungen ab.

1.3 Der Splitter im Empfangszweig

Ein passives Bauteil bei Umgebungstemperatur hat eine Rauschzahl, die genau seiner Dämpfung entspricht:

$$F = a \quad NF/\text{dB} = a/\text{dB}$$

Ein resistiver Dreitorsplitter hat also 6 dB Rauschzahl, ein Wilkinson-Splitter etwa 3,3 dB. Sitzt ein solcher Splitter vor einem Empfänger, so verschlechtert er dessen Systemrauschzahl um genau diesen Betrag – die Dämpfung einer Stufe vor dem Verstärker schlägt eins zu eins durch.

Häufiger Irrtum: Man liest gelegentlich, ein resistiver Splitter „erhöhe das Rauschen“. Das trifft nicht zu. Ein Widerstandsnetzwerk auf Zimmertemperatur gibt an seinem Ausgang genau die thermische Rauschleistung

ab, die jeder angepasste Abschluss abgibt – nicht mehr. Das Rauschen bleibt, wo es ist; das Signal sinkt. Genau darin besteht die Verschlechterung.

1.4 Übersicht

Kenngröße	Zeichen	Aussage	Kapitel
Durchgangsdämpfung	a	Pegelerlust vom Eingang zu einem Ausgang	2, 3
Ideale Teilungsdämpfung	a_{ideal}	unterste erreichbare Grenze, rein rechnerisch	1
Isolation	a_{iso}	Dämpfung zwischen zwei Ausgängen	2, 3
Reflexionsdämpfung	a_R	Anpassung an jedem einzelnen Tor	Anhang A
Stehwellenverhältnis	s	dieselbe Aussage in anderer Schreibweise	Anhang A
Amplitudenbalance	ΔA	Unterschied zwischen den Ausgängen	1, 8
Phasenbalance	$\Delta \varphi$	Laufzeitunterschied zwischen den Ausgängen	1, 8
Dissipation	D	Anteil der Leistung, der in Wärme übergeht	2
Bandbreite	FBW	Bereich, in dem alle Werte eingehalten werden	3, 5
Belastbarkeit	-	zulässige Leistung, oft durch einen Widerstand begrenzt	7

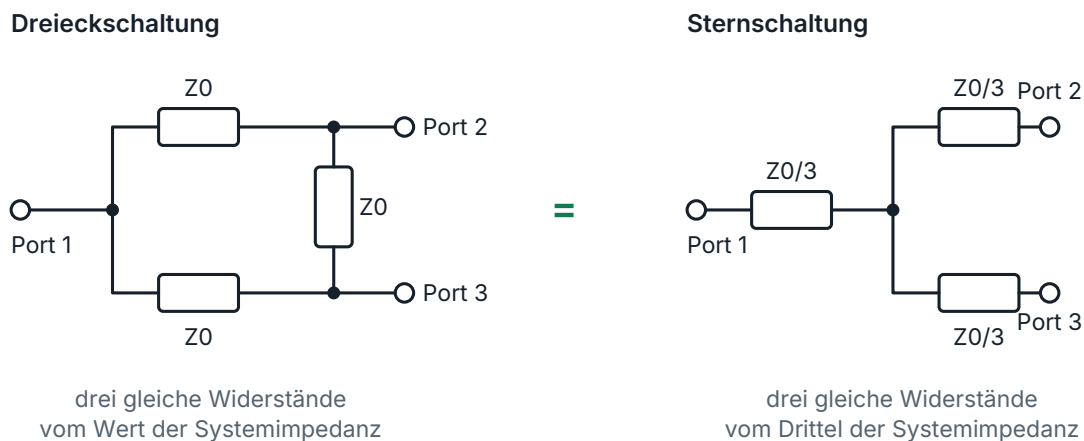
Tabelle 1.1 Kenngrößen eines passiven Splitters und wo sie behandelt werden

2 Resistive Splitter

Die einfachste Bauform: einige Widerstände, kein Abgleich, keine Frequenzgrenze nach unten. Der Preis ist eine Dämpfung, die weit über der rechnerischen Teilung liegt, und eine Isolation, die praktisch keine ist.

2.1 Zwei Topologien, eine Schaltung

Ein resistiver Dreitorsplitter lässt sich als Dreieck oder als Stern aufbauen. Beide Formen sind von außen nicht unterscheidbar, denn sie lassen sich ineinander umrechnen:



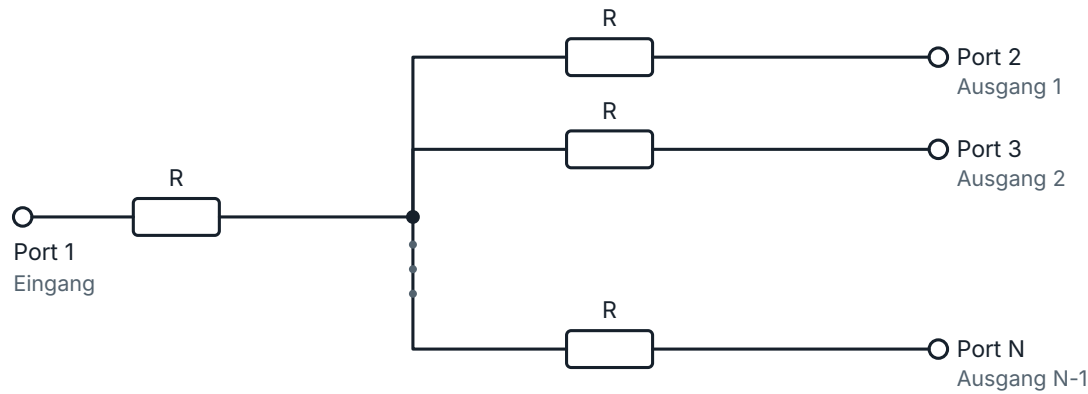
Beide Schaltungen sind von außen nicht unterscheidbar

Bild 2.1 Dreieck und Stern beschreiben dasselbe Bauteil. Die Umrechnung erklärt, warum in der einen Darstellung 50 Ohm und in der anderen 16,7 Ohm stehen.

Für die symmetrische Dreiecksschaltung lautet die Umrechnung in den Stern:

$$R_{\text{Stern}} = \frac{R_{\text{Dreieck}}}{3}$$

Ein Dreieck aus drei Widerständen von je 50 Ohm entspricht also einem Stern aus drei Widerständen von je 16,7 Ohm. Beide sind derselbe Splitter. Der wesentliche Unterschied ist praktischer Natur: Die Sternschaltung lässt sich auf beliebig viele Tore erweitern, die Dreiecksschaltung nicht.



Alle N Arme tragen denselben Widerstand; alle Tore sind gleichwertig

Bild 2.2 Sternsplitter mit N Toren. Alle Arme sind gleich, alle Tore gleichwertig – jedes kann als Eingang dienen.

2.2 Widerstandswert

Damit alle Tore angepasst sind, erhält jeder Arm denselben Wert:

$$R = Z_0 \cdot \frac{N-2}{N}$$

Für drei Tore ergibt das 16,7 Ohm, für fünf Tore 30 Ohm. Bei zwei Toren liefert die Formel null – richtig, denn ein Zweitor ohne Teilung ist einfach eine Durchverbindung.

2.3 Dämpfung

Die Widerstände bilden einen Spannungsteiler. Die Ausgangsspannung beträgt den Bruchteil $1/(N-1)$ der Eingangsspannung, und da die Impedanz an allen Toren gleich ist, gilt derselbe Wert in Dezibel auch für die Leistung:

$$a/\text{dB} = 20 \lg(N-1)$$

Beim Dreitorsplitter sind das 6,02 dB, also doppelt so viel wie die rechnerische Teilung von 3,01 dB. Die zusätzlichen 3 dB bleiben als Wärme in den Widerständen.

Formulierung mit Bedacht: Man liest oft, die Dämpfung steige „quadratisch“ mit der Zahl der Ausgänge. Das vermischt zwei Größen. Die Leistung pro Ausgang fällt mit dem Quadrat der Ausgangszahl; die Dämpfung in Dezibel wächst dagegen logarithmisch. Beides beschreibt denselben Sachverhalt in verschiedenen Maßen.

2.4 Leistungsbilanz

Die Leistung an einem Ausgang und die Summe über alle Ausgänge:

$$P_k = \frac{P_1}{(N-1)^2} \quad P_{\text{aus}} = (N-1)P_k = \frac{P_1}{N-1}$$

Der Rest wird in den Widerständen in Wärme umgesetzt. Der Anteil heißt Dissipation:

$$D = 1 - \frac{1}{N-1} = \frac{N-2}{N-1}$$

Beim Dreitorsplitter verlässt also die Hälfte der Eingangsleistung das Bauteil nie. Bei sechs Toren sind es vier Fünftel. Genau deshalb sind resistive Splitter mit vielen Toren unüblich: Der Aufwand bleibt gleich, der Nutzen schrumpft.

2.5 Isolation

Dies ist die Kenngröße, die bei resistiven Splittern am häufigsten übersehen wird. Der Sternsplitter ist in allen seinen Toren vollkommen symmetrisch aufgebaut. Es gibt keinen baulichen Unterschied zwischen dem Tor, das man Eingang nennt, und den übrigen. Daraus folgt zwingend:

$$a_{\text{iso}} = a \quad \text{denn alle } N \text{ Tore sind gleichwertig}$$

Die Isolation zwischen zwei Ausgängen ist genauso groß wie die Durchgangsdämpfung – beim Dreitorsplitter also 6 dB. Das ist praktisch keine Isolation. Ein Signal, das aus einem Ausgang zurückläuft, erscheint um lediglich 6 dB gedämpft am anderen Ausgang.

Folge für die Praxis: Wer zwei Signalquellen über einen resistiven Splitter zusammenführt, koppelt sie mit nur 6 dB Trennung aneinander. Jede Quelle sieht die andere. Bei Verstärkern mit einer Endstufe am Ausgang entstehen so Intermodulationsprodukte, die nicht vom Prüfling stammen. Für Zweitonmessungen gehören deshalb zusätzliche Dämpfungsglieder in beide Quellzweige.

2.6 Bandbreite

Ein Widerstand hat keine Vorzugsfrequenz. Der resistive Splitter arbeitet daher von Gleichstrom an aufwärts, und die obere Grenze wird nicht vom Prinzip gesetzt, sondern von der Bauform: von der parasitären Induktivität der Widerstände, von der Kapazität gegen Masse, von der Güte der Übergänge auf die Steckverbinder. Handelsübliche Bauteile erreichen einige Gigahertz, Ausführungen in Dünnschichttechnik deutlich mehr.

Diese Eigenschaft ist der eigentliche Grund, resistive Splitter zu verwenden. Wo ein Signal von wenigen Kilohertz bis zu mehreren Gigahertz reicht – ein Rechtecksignal, ein Impuls, ein Datensignal – gibt es keine Alternative. Jeder schmalbandige Splitter würde die Signalform verzerren.

2.7 Zahlenwerte

Tore	Ausgänge	R je Arm	Dämpfung	Isolation	Dissipation	Leistung	Amplitude
3	2	16,7 Ohm	6,0 dB	6,0 dB	50 %	25,0 %	50,0 %
4	3	25,0 Ohm	9,5 dB	9,5 dB	67 %	11,1 %	33,3 %
5	4	30,0 Ohm	12,0 dB	12,0 dB	75 %	6,2 %	25,0 %
6	5	33,3 Ohm	14,0 dB	14,0 dB	80 %	4,0 %	20,0 %

Tabelle 2.1 Resistiver Sternsplitter, Werte für 50 Ohm Systemimpedanz

2.8 Ausgeführte Bauteile

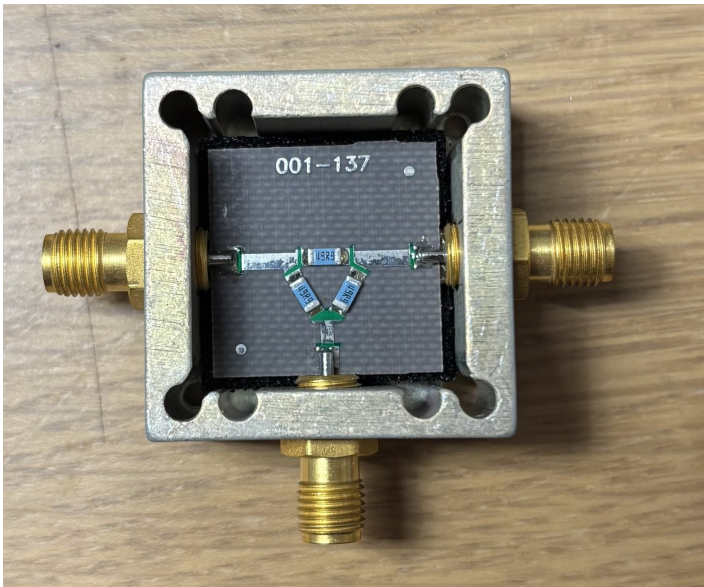


Bild 2.3 Resistiver Dreitorsplitter in Dreieckschaltung. Die drei Widerstände sind auf dem Substrat als Dreieck angeordnet, die kurzen Wege halten die parasitären Induktivitäten klein.

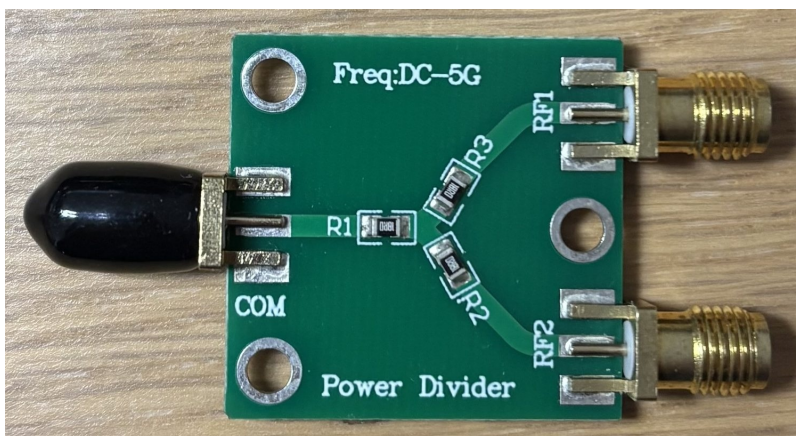
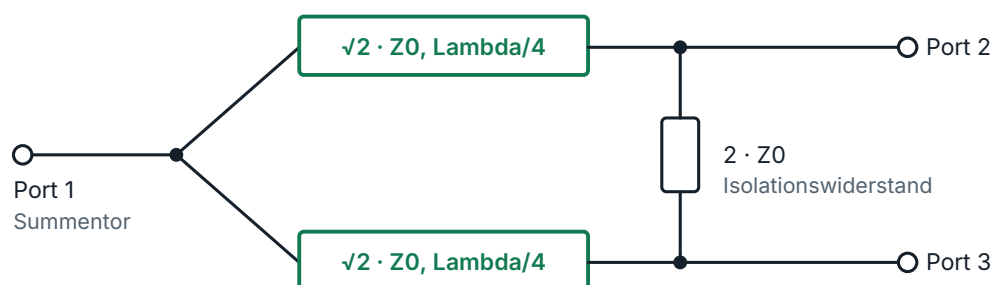


Bild 2.4 Dieselbe Funktion in Sternschaltung, hier als offene Baugruppe mit der Angabe DC bis 5 GHz. Die drei Widerstände liegen sternförmig um den gemeinsamen Punkt in der Mitte.

3 Wilkinson-Splitter

Statt Energie zu vernichten, nutzt der Wilkinson-Splitter die Laufzeit auf Viertelwellenleitungen. Das kostet Bandbreite und Bauraum, bringt aber eine Isolation, die der resistive Splitter nicht erreichen kann.

3.1 Prinzip



Bei symmetrischer Aufteilung liegt an beiden Enden des Widerstands dieselbe Spannung – es fließt kein Strom

Bild 3.1 Klassischer Dreier-Wilkinson. Zwei Viertelwellenleitungen führen vom Summentor zu den Ausgängen, dazwischen liegt der Isolationswiderstand.

Die Schaltung leistet zweierlei zugleich. Die beiden Leitungen transformieren die Impedanz so, dass am Eingang wieder die Systemimpedanz erscheint, obwohl dort zwei Abschlüsse parallel liegen. Und der Widerstand zwischen den Ausgängen sorgt für die Isolation.

Der entscheidende Gedanke steckt in diesem Widerstand. Speist man das Summentor, so kommen beide Wege mit gleicher Amplitude und gleicher Phase an den Ausgängen an. An beiden Enden des Widerstands liegt dann dieselbe Spannung, es fließt kein Strom, und der Widerstand nimmt keine Leistung auf – er ist elektrisch nicht vorhanden. Deshalb arbeitet der Splitter in dieser Betriebsart nahezu verlustfrei.

Speist man dagegen einen Ausgang, so erreicht das Signal den anderen Ausgang auf zwei Wegen: direkt über den Widerstand und über die beiden Leitungen mit zusammen einer halben Wellenlänge Laufweg, also 180 Grad Phasendrehung. Beide Beiträge löschen sich aus. Das ist die Isolation.

Daraus folgt alles Weitere: Die Auslöschung ist nur dann vollständig, wenn die Leitung genau eine Viertelwellenlänge lang ist. Bei jeder anderen Frequenz bleibt ein Rest. Die Bandbreite des Wilkinson-Splitters ist also keine Eigenschaft der Bauteile, sondern eine Folge des Prinzips.

3.2 Leitungsimpedanz

$$Z_L = Z_0 \cdot \sqrt{N - 1}$$

Für drei Tore ergibt das 70,7 Ohm, für fünf Tore 100 Ohm. Auf einer Leiterplatte wird dieser Wert über die Breite der Leiterbahn eingestellt: je höher die gewünschte Impedanz, desto schmaler die Bahn.

3.3 Isolationswiderstände

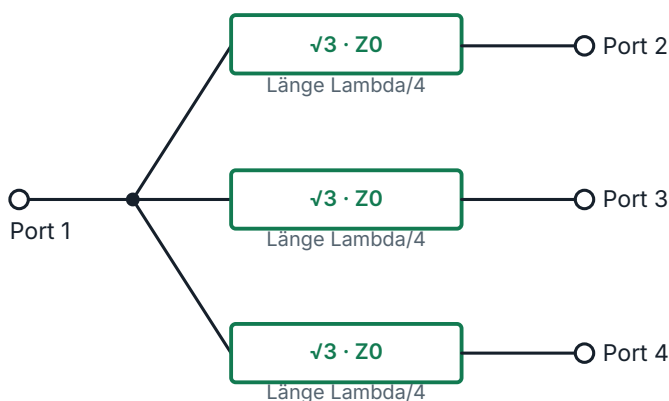
Hier lohnt sich Sorgfalt, denn die Angaben im Schrifttum werden leicht verwechselt. Es gibt zwei gleichwertige Anordnungen:

$$R_{\text{Stern}} = Z_0 \quad R_{\text{Masche}} = (N - 1) \cdot Z_0$$

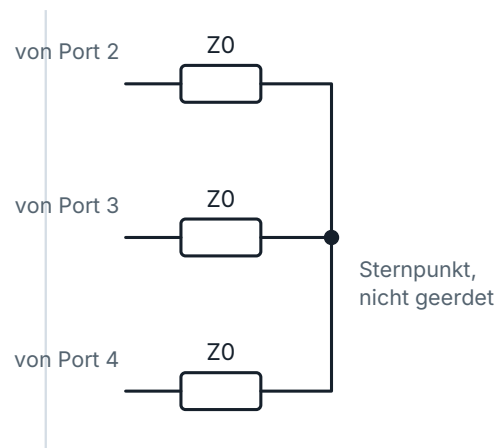
In der Sternschaltung führt von jedem Ausgang ein Widerstand vom Wert der Systemimpedanz auf einen gemeinsamen, nicht geerdeten Punkt. In der Maschenschaltung liegt zwischen je zwei Ausgängen ein Widerstand vom $(N - 1)$ -fachen Wert. Beim Dreitorsplitter sind das entweder zwei Widerstände zu 50 Ohm oder ein einzelner zu 100 Ohm – dasselbe Netzwerk.

Wichtig: Der Wert je Sternarm ist immer die Systemimpedanz, unabhängig von der Zahl der Ausgänge. Eine Formel, die den Widerstand mit wachsender Torzahl kleiner werden lässt, ist falsch. Die Maschenwerte dagegen wachsen: bei drei Ausgängen liegen zwischen je zwei Ausgängen 150 Ohm.

Splitter



Isolationsnetzwerk



Jeder Arm trägt Z_0 , unabhängig von der Zahl der Ausgänge

Bild 3.2 Viertor-Wilkinson mit drei Ausgängen. Rechts die Sternschaltung der Isolationswiderstände, die bei mehr als zwei Ausgängen der Maschenschaltung baulich vorzuziehen ist.

3.4 Dämpfung

$$a/\text{dB} = 10 \lg(N - 1) + a_{\text{real}}$$

Der erste Summand ist die rechnerische Teilung, der zweite der tatsächliche Verlust in Leitern und Substrat. Auf FR4 sind das je nach Frequenz 0,2 bis 0,5 dB, auf Hochfrequenzsubstraten weniger. Ein Dreitor-Wilkinson zeigt in der Messung also typisch 3,2 bis 3,5 dB, nicht die idealen 3,01 dB.

3.5 Bandbreite

Die relative Bandbreite ist als Spanne bezogen auf die Mittenfrequenz definiert:

$$FBW = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \cdot 100 \%$$

Als Grenze gilt üblicherweise der Bereich, in dem die Reflexionsdämpfung mindestens 20 dB beträgt und die Isolation nicht unter 20 dB fällt. Für den einstufigen Wilkinson-Splitter ergibt das etwa 20 bis 25 Prozent, also rund plus/minus 10 bis 12 Prozent um die Design-Frequenz.

Der Grund liegt in der Phasenempfindlichkeit. Bei der Design-Frequenz dreht die Leitung genau 90 Grad, und die Auslöschung am Isolationswiderstand ist vollständig. Weicht die Frequenz um 12 Prozent ab, so beträgt die Drehung noch etwa 79 oder 101 Grad; der Rest, der sich nicht mehr auslöscht, verschlechtert die Isolation von etwa 30 dB auf die noch brauchbaren 20 dB.

Ein Beispiel

Ein Splitter für 880 MHz mit 25 Prozent relativer Bandbreite deckt 220 MHz ab. Das sind plus/minus 110 MHz um die Mittenfrequenz, also ein Arbeitsbereich von 770 bis 990 MHz.

3.6 Wiederkehr bei ungeraden Vielfachen

Eine Leitung, die bei der Frequenz f eine Viertelwellenlänge lang ist, ist bei der dreifachen Frequenz drei Viertelwellenlängen lang. Für die Phasendrehung bedeutet das 270 statt 90 Grad – elektrisch gleichwertig, denn auch hier löscht sich das Signal am Widerstand aus. Der Wilkinson-Splitter arbeitet deshalb nicht nur bei seiner Design-Frequenz, sondern auch bei deren drei-, fünf- und siebenfachen Wert.

Das erklärt Datenblattangaben, die auf den ersten Blick unmöglich erscheinen. Ein Bauteil, das rechnerisch für 880 MHz ausgelegt ist, kann durchaus bis 2,6 GHz beworben werden – das ist der dritte Durchlassbereich. Dazwischen liegt ein Bereich, in dem die Isolation einbricht. Wer einem solchen Bauteil vertraut, sollte die Isolation bei seiner Arbeitsfrequenz nachmessen.

3.7 Mehr als zwei Ausgänge

Ein Wilkinson-Splitter mit vielen Ausgängen ist baulich unangenehm: In der Maschenschaltung muss jeder Ausgang mit jedem anderen durch einen Widerstand verbunden werden, was sich in einer Ebene nicht kreuzungsfrei verlegen lässt. Zwei Auswege sind gebräuchlich.

- **Sternschaltung der Widerstände.** Alle Ausgänge werden über je einen Widerstand auf einen gemeinsamen Punkt geführt. Das ist platzsparend und in der Praxis verbreitet, die Isolation ist etwas geringer als bei der Maschenschaltung.
- **Kaskadierung.** Ein Vierfachsplitter entsteht aus drei Zweifachsplitttern in zwei Ebenen, ein Achtfachsplitter aus sieben in drei Ebenen. Jede Stufe ist ein gewöhnlicher Dreitor-Wilkinson mit bekannten Eigenschaften. Das ist der übliche Weg bei vier und mehr Ausgängen.

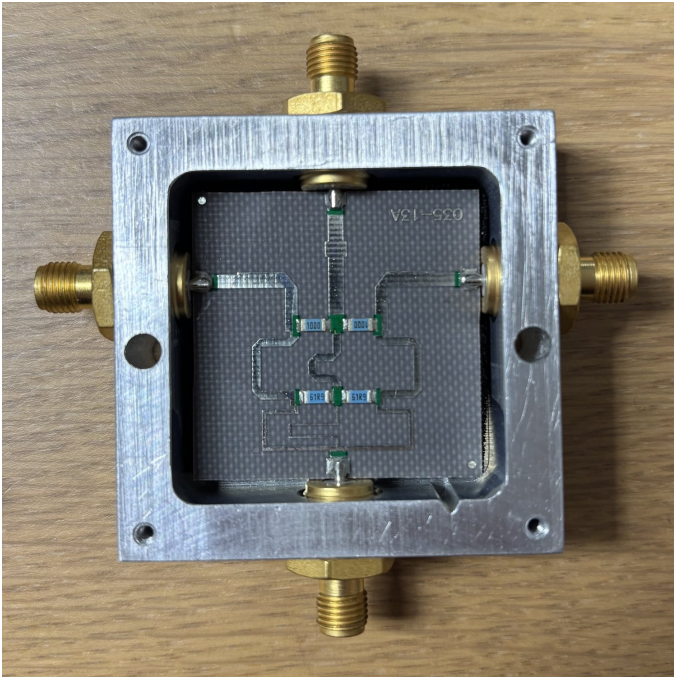


Bild 3.3 Ausführung mit drei Ausgängen in einem Frästeil. Gut zu erkennen sind die drei Leitungszüge und die Widerstände im Innenbereich.

3.8 Gegenüberstellung

Merkmal	Resistiver Teiler	Wilkinson-Teiler
Bauelemente	Widerstände	Leitungen und Widerstände
Dämpfung, 3 Tore	6,0 dB	3,0 dB zuzüglich Leitungsverlust
Dämpfung, 5 Tore	12,0 dB	6,0 dB zuzüglich Leitungsverlust
Gesamte Ausgangsleistung	25 % bei 5 Toren	nahezu 100 %
Isolation	so groß wie die Dämpfung, also gering	20 bis 30 dB nahe der Design-Frequenz
Bandbreite	Gleichstrom bis zur Bauformgrenze	etwa 20 bis 25 % um die Design-Frequenz
Anpassung	gut über den ganzen Bereich	gut nahe der Design-Frequenz
Baugröße	klein, frequenzunabhängig	von der Wellenlänge bestimmt
Alle Tore gleichwertig	ja	nein, das Summentor ist besonders

Tabelle 3.2 Resistiver Splitter und Wilkinson-Splitter im Vergleich

Tore	Ausgänge	Leitung	R Stern	R Masche	Dämpfung	Leistung	Amplitude
3	2	70,7 Ohm	50 Ohm	100 Ohm	3,01 dB	50,0 %	70,7 %
4	3	86,6 Ohm	50 Ohm	150 Ohm	4,77 dB	33,3 %	57,7 %
5	4	100,0 Ohm	50 Ohm	200 Ohm	6,02 dB	25,0 %	50,0 %

Tabelle 3.1 Wilkinson-Splitter, Werte für 50 Ohm Systemimpedanz ohne Leitungsverluste

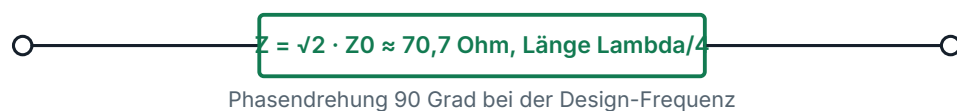
4 Ausführung mit konzentrierten Bauelementen

Unterhalb einiger hundert Megahertz wird eine Viertelwellenleitung unhandlich lang. Sie lässt sich durch ein Filterglied ersetzen, das bei einer Frequenz dasselbe leistet.

4.1 Der Gedanke

Eine Viertelwellenleitung tut für die Schaltung genau zwei Dinge: Sie dreht die Phase um 90 Grad und sie hat eine bestimmte Wellenimpedanz. Beides lässt sich mit einem Tiefpassglied aus einer Längsinduktivität und zwei Querkapazitäten nachbilden – allerdings nur bei einer Frequenz.

Leitung



Pi-Glied aus konzentrierten Bauelementen

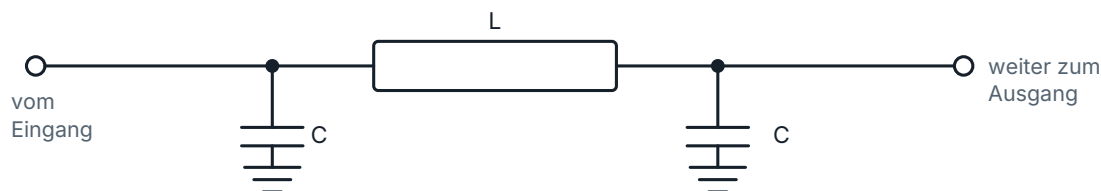


Bild 4.1 Das Pi-Glied ersetzt die Leitung. Bei der Design-Frequenz stimmen Phasendrehung und Impedanz überein, darüber und darunter nicht mehr.

Bei 100 MHz ist eine Viertelwellenleitung auf FR4 etwa 40 Zentimeter lang; das Pi-Glied kommt mit zwei Kondensatoren und einer Spule aus. Deshalb haben Lumped-Elements-Splitter etwa die Baugröße resistiver Splitter, obwohl sie nach dem Wilkinson-Prinzip arbeiten.

4.2 Bauteilwerte

$$L = \frac{Z_L}{\omega} \quad C = \frac{1}{\omega Z_L} \quad \omega = 2\pi f_0$$

Dabei ist Z_L die Impedanz, welche die ersetzte Leitung hätte – beim Dreitorsplitter also 70,7 Ohm. Die Isolationswiderstände bleiben unverändert, ebenso Dämpfung, Leistungsaufteilung und Amplitudenverhältnis.

Rechenbeispiel für 100 MHz

1. Kreisfrequenz bestimmen: 2π mal 100 MHz ergibt 6,283 mal 10 hoch 8 je Sekunde.
2. Induktivität: 70,7 Ohm geteilt durch diesen Wert ergibt 112,5 nH.
3. Kapazität: der Kehrwert des Produkts aus Kreisfrequenz und 70,7 Ohm ergibt 22,5 pF.

4. Auf die nächsten Normwerte runden und die Abweichung prüfen; bei 5 Prozent Toleranz verschiebt sich die wirksame Design-Frequenz um denselben Betrag.

Design-Frequenz	L je Arm	C je Knoten
100 MHz	112,5 nH	22,51 pF
433,92 MHz	25,9 nH	5,19 pF
868 MHz	13,0 nH	2,59 pF
2400 MHz	4,7 nH	0,94 pF

Tabelle 4.1 Bauteilwerte des Pi-Glieds für einen Dreitorsplitter an 50 Ohm

4.3 Grenzen

- **Toleranzen schlagen unmittelbar durch.** Bei der Leitungsausführung bestimmt die Geometrie die Eigenschaften, und die lässt sich genau fertigen. Hier bestimmen Bauteilwerte mit typisch 5 Prozent Toleranz das Ergebnis.
- **Die Güte der Bauelemente begrenzt die Isolation.** Eine Spule mit mäßiger Güte bringt Verluste ein, die als zusätzliche Dämpfung und als verschlechterte Auslöschung erscheinen.
- **Eigenresonanzen setzen die obere Grenze.** Oberhalb ihrer Eigenresonanz ist eine Spule kapazitiv und das Glied wirkungslos.
- **Keine Wiederkehr bei Vielfachen.** Anders als die Leitung ist das Pi-Glied ein Tiefpass. Die in Abschnitt 3.6 beschriebenen weiteren Durchlassbereiche bei der drei- und fünffachen Frequenz gibt es hier nicht – oberhalb der Design-Frequenz sperrt das Glied zunehmend.

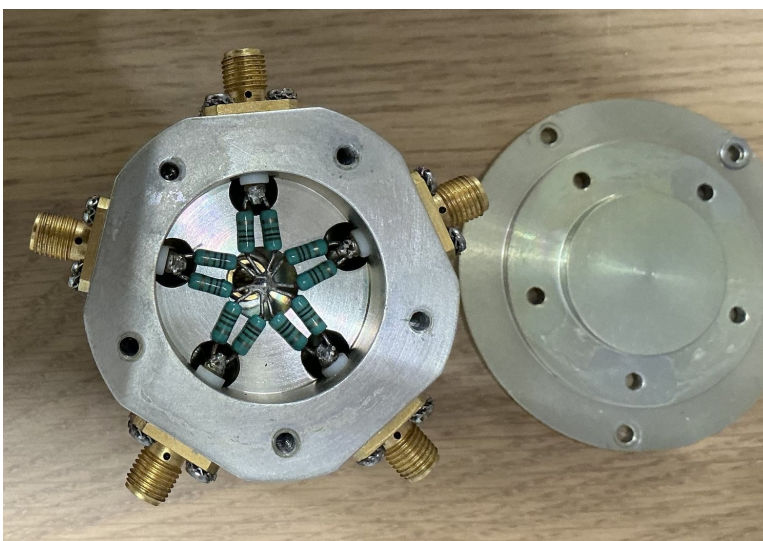


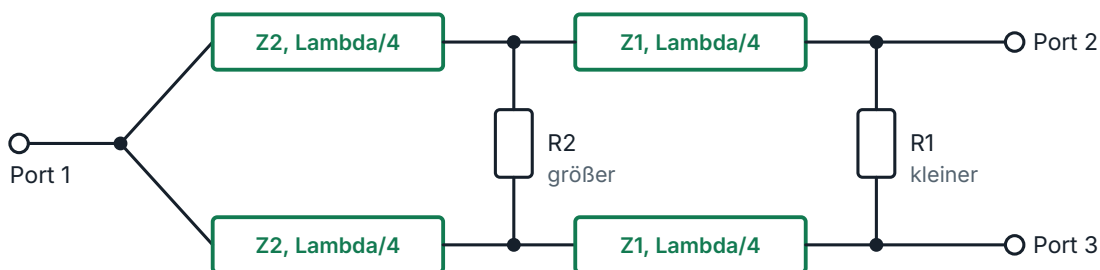
Bild 4.2 Sechstorsplitter in Lumped-Elements-Technik mit fünf Ausgängen. Die Isolationswiderstände sind sternförmig auf einen gemeinsamen Punkt in der Mitte geführt – die bauliche Umsetzung der Sternschaltung aus Abschnitt 3.3.

5 Mehrstufige Wilkinson-Splitter

Wenn 25 Prozent Bandbreite nicht genügen, hilft es, den Übergang auf mehrere Stufen zu verteilen – nach demselben Gedanken, nach dem ein mehrstufiger Impedanzwandler breitbandiger ist als ein einstufiger.

5.1 Warum mehrere Stufen helfen

Die Bandbreite des einstufigen Splitters wird davon begrenzt, dass eine einzige Leitung den gesamten Impedanzsprung von 50 auf 100 Ohm leisten muss und dabei genau 90 Grad drehen soll. Verteilt man den Sprung auf mehrere kürzere Schritte, so sind die Fehler der einzelnen Stufen kleiner und heben sich über einen größeren Frequenzbereich teilweise auf. Zwei Stufen bringen etwa 45 Prozent relative Bandbreite, drei Stufen deutlich mehr als eine Oktave.



Von den Ausgängen nach innen gezählt verdoppelt sich der Widerstandswert je Stufe
Die Leitungsimpedanzen werden gestuft, damit die Anpassung über ein breiteres Band erhalten bleibt

Bild 5.1 Zweistufige Ausführung. Jede Stufe ist eine Viertelwellenleitung mit eigenem Isolationswiderstand; beide zusammen bilden den Übergang.

5.2 Widerstände und Impedanzen

Für den Entwurf gelten zwei Regeln, die sich am Bauteil ablesen lassen. Von den Ausgängen nach innen gezählt wächst der Wert der Isolationswiderstände, näherungsweise mit einer Verdopplung je Stufe:

$$R_n = 2 R_{n-1} \quad n = 2, 3, \dots$$

Bei einem Dreitorsplitter ergibt das die Reihe 100, 200, 400, 800 Ohm von außen nach innen. Zugleich werden die Leitungsimpedanzen gestuft: außen nahe der Systemimpedanz, innen näher am transformierten Wert. Auf der Leiterplatte sieht man das an der Breite der Bahnen, die von Abschnitt zu Abschnitt wechselt.

Zur Genauigkeit: Die Verdopplungsregel ist eine brauchbare Näherung, kein Entwurfsverfahren. Die genauen Werte folgen aus einer Tschebyscheff-Auslegung, für die es Tabellenwerke und Entwurfsprogramme gibt. Wer einen mehrstufigen Splitter selbst aufbauen will, sollte diese verwenden, statt die Reihe fortzuschreiben.

5.3 Was man dafür bezahlt

- Die Baulänge wächst mit jeder Stufe um eine weitere Viertelwellenlänge.
- Jede Stufe bringt eigene Leitungsverluste ein; die Einfügedämpfung steigt gegenüber der einstufigen Ausführung.
- Die Fertigungstoleranzen wirken sich stärker aus, weil mehrere Abschnitte zusammenpassen müssen.
- Die Wiederkehr bei ungeraden Vielfachen der Design-Frequenz bleibt bestehen, wird aber unübersichtlicher, weil die Stufen unterschiedlich reagieren.

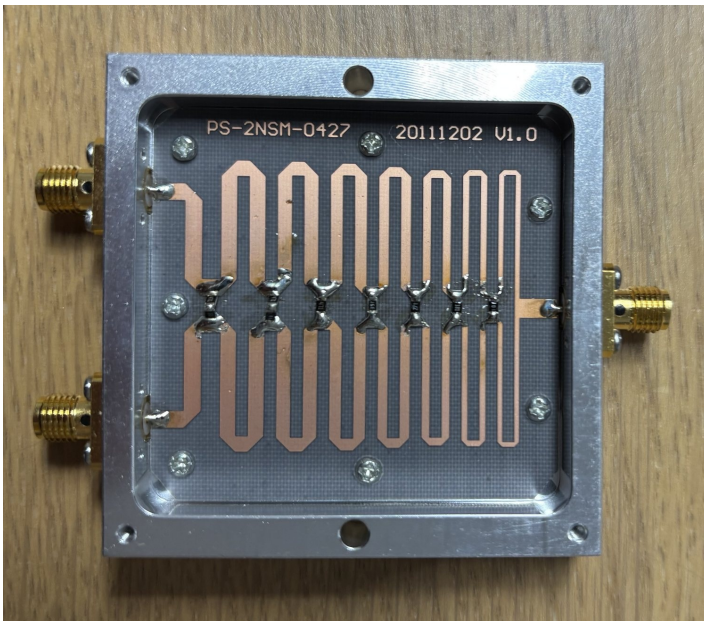


Bild 5.2 Mehrstufige Ausführung. Die Leitungen sind mäanderförmig gefaltet, um die erhebliche Gesamtlänge unterzubringen; zwischen den Abschnitten sitzen die gestuften Isolationswiderstände.

6 Design-Frequenz aus der Leiterbahnlänge

Ein gekaufter Splitter trägt oft keine brauchbare Angabe. Die Leiterbahn verrät, wofür er gebaut wurde – man muss nur messen und umrechnen.

6.1 Herleitung

Drei Zusammenhänge genügen. Auf einer Leiterplatte breitet sich die Welle langsamer aus als im Vakuum, weil ein Teil des Feldes im Substrat verläuft. Die Wellenlänge folgt aus dieser Geschwindigkeit und der Frequenz, und die Leitung soll ein Viertel davon lang sein:

$$v_p = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad \lambda = \frac{v_p}{f} \quad \lambda = 4l$$

Zusammengefasst ergibt das die gesuchte Beziehung:

$$f_0 = \frac{c_0}{4l\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}$$

6.2 Eine handliche Form

Rechnet man in Millimetern und Nanosekunden, so wird aus der Lichtgeschwindigkeit der bequeme Wert 300 mm je Nanosekunde. Geteilt durch die Vier aus der Viertelwellenlänge bleibt 75 übrig, und das Ergebnis fällt unmittelbar in Gigahertz an:

$$f_0/\text{GHz} = \frac{75}{(l/\text{mm}) \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}$$

Der Verkürzungsfaktor, den man in Datenblättern findet, ist derselbe Sachverhalt in anderer Schreibweise:

$$VK = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}$$

6.3 Die effektive Permittivität

Hier lauert der häufigste Fehler. Die Permittivität des Substrats ist nicht die Größe, mit der gerechnet wird. Eine Microstrip-Leitung liegt auf dem Substrat, ihr Feld verläuft teils im Material und teils in der Luft darüber. Die Welle „sieht“ deshalb einen Mischwert, der stets unter dem des Substrats liegt.

- FR4 hat je nach Charge eine Permittivität um 4,4.
- Für eine Microstrip-Leitung darauf ergibt sich eine effektive Permittivität von etwa 3,0 bis 3,7, abhängig von Bahnbreite und Substratdicke.
- Die Wurzel daraus – die eigentlich gebrauchte Größe – liegt damit zwischen 1,75 und 1,92. Als Faustformel eignet sich 1,85.
- Der Verkürzungsfaktor beträgt entsprechend etwa 0,52 bis 0,58.

- Bei einer Stripline zwischen zwei Lagen verläuft das ganze Feld im Material; dort ist die effektive gleich der Permittivität des Substrats.

Zwei Angaben, die man häufig liest und die nicht stimmen können: Eine effektive Permittivität von 4,5 für FR4-Microstrip liegt über der des Substrats selbst – das ist physikalisch ausgeschlossen, denn die Luft kann den Wert nur senken. Und ein Verkürzungsfaktor von 0,7 entspräche einer effektiven Permittivität von etwa 2, was FR4 nicht hergibt.

6.4 Beispiel

An dem in Bild 6.1 gezeigten Splitter wird die Länge eines Leitungszweigs zu 46 mm gemessen. Mit der Faustformel:

1. Nenner bilden: 46 mal 1,85 ergibt 85,1.
2. 75 geteilt durch 85,1 ergibt 0,88.
3. Das Ergebnis steht unmittelbar in Gigahertz: die Design-Frequenz liegt bei etwa 880 MHz.

Das ist kein beliebiger Wert. Der Bereich von 863 bis 870 MHz ist in Europa als SRD-Band für Geräte kleiner Reichweite freigegeben und wird von Funkthermometern, Torantrieben, Heizungsthermostaten und LoRaWAN genutzt. Der Splitter wurde also für dieses Band entworfen.

Länge der Leitung	Design-Frequenz	dritter Bereich
15 mm	2,70 GHz	8,11 GHz
25 mm	1,62 GHz	4,86 GHz
46 mm	0,88 GHz	2,64 GHz
60 mm	0,68 GHz	2,03 GHz
90 mm	0,45 GHz	1,35 GHz
120 mm	0,34 GHz	1,01 GHz

Tabelle 6.1 Design-Frequenz und dritter Durchlassbereich für FR4-Microstrip, gerechnet mit dem Faustwert 1,85

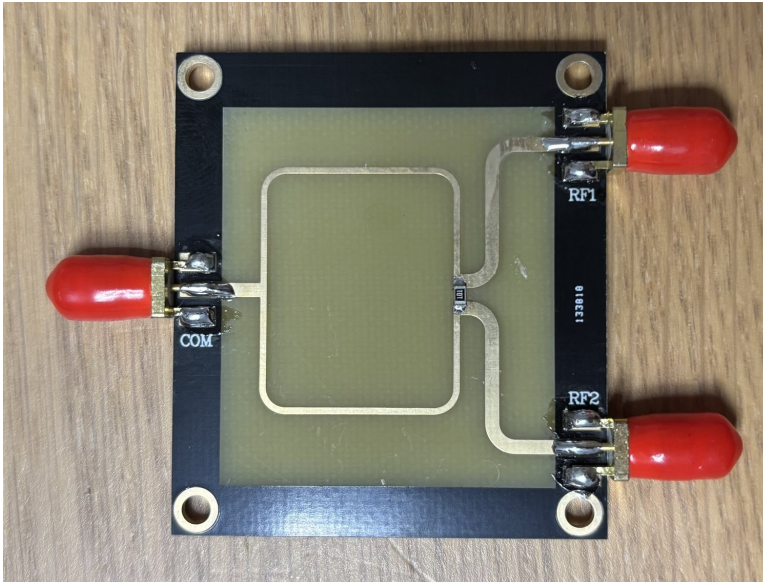


Bild 6.1 Der vermessene Splitter. Der Leitungszug vom Eingang links zu einem der beiden Ausgänge misst 46 mm; die roten Kappen sind Abschlusswiderstände auf den Ausgängen.

6.5 Eine Gegenprobe, die sich lohnt

Dieses Bauteil wird mit einem Arbeitsbereich von 100 MHz bis 2,7 GHz beworben. Aus der Leitungslänge folgt eine Design-Frequenz von 880 MHz und damit eine brauchbare Bandbreite von etwa 770 bis 990 MHz – ein Zehntel der beworbenen Spanne.

Die dritte Wiederkehr aus Abschnitt 3.6 liegt bei dreimal 880 MHz, also bei 2,64 GHz. Die obere Grenze der Werbeangabe liegt auffällig genau dort. Das legt nahe, dass die Angabe den ersten und den dritten Durchlassbereich zusammenfasst und den Einbruch dazwischen unterschlägt. Beweisen lässt sich das nur durch eine Messung von Isolation und Anpassung über den ganzen Bereich – die Rechnung liefert die Vermutung, nicht den Beleg.

Wie man es prüft: Am Netzwerkanalysator alle drei Tore anschließen, das jeweils unbenutzte mit 50 Ohm abschließen, und Reflexionsdämpfung sowie Isolation über den vollen Bereich aufnehmen. Ein einstufiger Wilkinson-Splitter zeigt dann zwei getrennte Berge und dazwischen ein deutliches Tal.

7 Der Splitter als Combiner

Jeder passive Splitter lässt sich umgekehrt betreiben. Was dabei herauskommt, hängt entscheidend davon ab, ob die zusammengeführten Signale miteinander verwandt sind.

7.1 Reziprok und symmetrisch

Zwei Begriffe, die oft gleichgesetzt werden und Verschiedenes bedeuten.

- **Reziprok** heißt: Die Übertragung von Tor A nach Tor B ist dieselbe wie von B nach A. Alle passiven Splitter ohne magnetische Werkstoffe sind reziprok. Deshalb kann jeder von ihnen als Combiner arbeiten.
- **Symmetrisch** heißt: Alle Tore sind baulich gleichwertig, jedes kann die Rolle des Eingangs übernehmen. Der resistive Sternsplitter ist symmetrisch. Der Wilkinson-Splitter ist es nicht – sein Summentor ist anders beschaltet als die Ausgänge, und wer einen Ausgang als Eingang benutzt, erhält nicht die erwartete Aufteilung, sondern wird vom Isolationsnetzwerk ausgebremst.

7.2 Kohärent oder unkorreliert

Dies ist der wichtigste Punkt des ganzen Kapitels, und er wird regelmäßig verwechselt.

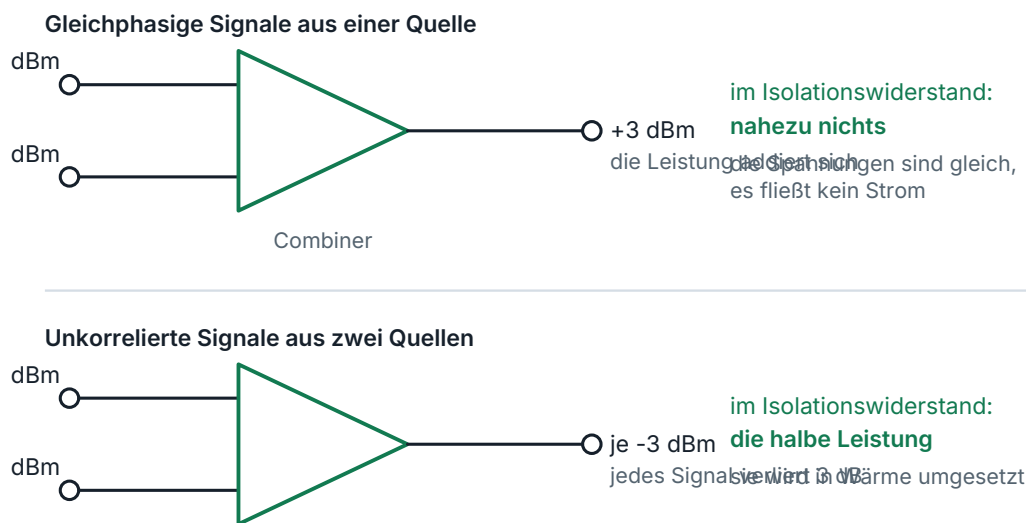


Bild 7.1 Derselbe Combiner, zwei Betriebsfälle. Oben stammen beide Signale aus einer Quelle, unten aus zwei unabhängigen Generatoren.

Gleichphasige Signale aus einer Quelle

Speist man beide Eingänge mit Signalen gleicher Amplitude und gleicher Phase – etwa den beiden Ausgängen eines vorgeschalteten Splitters – so addieren sich die Spannungen am Summentor. Die Leistung dort ist dann die Summe der beiden Eingangsleistungen; es geht nichts verloren:

$$P_{\text{aus}} = \frac{(\sqrt{P_1} + \sqrt{P_2})^2}{2} = P_1 + P_2 \quad \text{für } P_1 = P_2$$

Zwei Signale von je 0 dBm ergeben +3 dBm. Am Isolationswiderstand liegt an beiden Enden dieselbe Spannung, es fließt kein Strom, und es geht nichts verloren. Das ist der Fall, für den ein Combiner gebaut ist.

Unkorrelierte Signale aus zwei Quellen

Stammen die Signale aus zwei unabhängigen Generatoren, so ist ihre Phasenlage zufällig und wechselt fortwährend. Im Mittel erreicht jedes Signal nur die Hälfte seiner Leistung das Summentor; die andere Hälfte fällt am Isolationswiderstand an:

$$P_{\text{aus}} = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad P_{\text{R}} = \frac{P_1 + P_2}{2}$$

Zwei Generatoren mit je 0 dBm ergeben also nicht +3 dBm, sondern zwei Träger von je -3 dBm. Genau das ist der Fall bei der Zweitonmessung: Man verliert je 3 dB, und das ist kein Mangel des Combiners, sondern die notwendige Folge seiner Isolation.

Signale an den Eingängen	am Summentor	im Isolationswiderstand
gleiche Amplitude, gleiche Phase	Summe beider Leistungen, je +3 dB	nahezu nichts
gleiche Amplitude, 180 Grad Phasenunterschied	nichts	die gesamte Leistung
unkorreliert, etwa zwei freilaufende Generatoren	die halbe Leistung, je -3 dB	die andere Hälfte
nur ein Eingang gespeist	die halbe Leistung, -3 dB	die andere Hälfte

Tabelle 7.1 Was am Summentor ankommt und was im Widerstand bleibt

Die Merkregel: Ein Combiner kann Leistung addieren oder Quellen trennen, aber nicht beides zugleich. Wo er isoliert, verliert er; wo er verlustfrei addiert, sind die Quellen nicht getrennt.

7.3 Verlustleistung im Isolationswiderstand

Beim resistiven Splitter ist immer klar, wo die Wärme bleibt: gleichmäßig in allen Armen. Beim Wilkinson-Splitter hängt es vom Betriebsfall ab, und das wird bei der Bauteilwahl gern übersehen.

- Im Splitterbetrieb mit angepassten Ausgängen bleibt der Isolationswiderstand stromlos und kalt.
- Im Combinerbetrieb mit unkorrelierten Quellen nimmt er die halbe Gesamtleistung auf.
- Bei ungleichen Amplituden oder Phasen an den Eingängen steigt sein Anteil weiter.

- Reflektiert ein Ausgang – etwa weil dort ein Abschluss fehlt – landet die zurücklaufende Leistung ebenfalls zu einem erheblichen Teil im Widerstand.

Ein Bauteil, das als Splitter für 10 Watt beworben wird, kann im Combinerbetrieb deutlich früher an seine Grenze kommen. Maßgeblich ist die Belastbarkeit des Isolationswiderstands, die im Datenblatt oft gar nicht steht. Wer Leistung zusammenführt, sollte den Widerstand im Betrieb einmal anfassen oder mit der Wärmebildkamera ansehen.

7.4 Abschluss nicht benutzter Tore

Für alle Bauformen gilt ausnahmslos: Jedes nicht benutzte Tor gehört mit der Systemimpedanz abgeschlossen. Ein offener oder kurzgeschlossener Ausgang reflektiert vollständig, und die zurücklaufende Welle verdirbt die Anpassung an allen übrigen Toren, verfälscht die Aufteilung und erhöht die Belastung des Isolationswiderstands. Ein Dreitor-Splitter, den man nur zur Hälfte nutzt, ist ohne Abschluss am freien Tor kein Splitter mehr, sondern ein unbestimmtes Netzwerk.

7.5 Anwendung: die Zweitonmessung

Der häufigste Combinereinsatz in der Messtechnik führt zwei Generatoren auf einen Prüfling, um dessen Intermodulationsverhalten zu bestimmen. Drei Punkte aus diesem Kapitel wirken dabei zusammen:

1. Die Signale sind unkorreliert, also verliert jeder Ton 3 dB im Wilkinson-Combiner beziehungsweise 6 dB im resistiven. Das ist bei der Pegelbilanz einzurechnen.
2. Die Isolation des Combiners bestimmt, wie stark die Generatoren aneinander koppeln. Ein resistiver Splitter bietet nur 6 dB und ist ohne zusätzliche Dämpfungsglieder unbrauchbar; ein Wilkinson-Splitter bietet 20 bis 30 dB, nahe seiner Design-Frequenz.
3. Die Eigenintermodulation des Aufbaus ist vor der Messung zu bestimmen: Combiner ohne Prüfling direkt auf den Analysator, Pegel wie später, und den Abstand der Störprodukte ablesen. Er muss mindestens 10 dB besser sein als der erwartete Wert des Prüflings.

8 Auswahl und Prüfung in der Praxis

Welche Bauform zu welcher Aufgabe passt, welche Sonderform es außerdem gibt, und wie man einem gekauften Splitter auf den Zahn fühlt.

8.1 Die Wahl der Bauform

Die Entscheidung fällt fast immer zwischen zwei Größen: Bandbreite gegen Isolation. Wer beides braucht, braucht zusätzliche Dämpfungsglieder oder mehrere Bauteile.

Messaufgabe	Empfehlung	Begründung
Breitbandiges Signal aufteilen, etwa Impuls oder Datensignal	resistiv	keine Frequenzgrenze, gleiche Laufzeit auf allen Wegen
Referenzsignal für einen Zähler abzweigen	resistiv	Bandbreite wichtiger als Pegel
Zwei Generatoren für eine Zweitonnmessung zusammenführen	Wilkinson	Isolation der Quellen entscheidet über die Gültigkeit
Ein Signal auf mehrere Empfänger verteilen	Wilkinson, kaskadiert	geringe Dämpfung, Empfänger voneinander getrennt
Verhältnismessung, Reflexionsmessung	Zwei-Widerstands-Splitter	gute wirksame Quellanpassung am Ausgang
Leistung eines Senders auf zwei Antennen	Wilkinson	Dämpfung und Wärme entscheiden
Pegel definiert absenken	Dämpfungsglied	ein Teiler ist dafür das falsche Bauteil

Tabelle 8.1 Empfehlung nach Messaufgabe

8.2 Splitter oder Splitter? Eine Sonderform

Im Handel heißen zwei verschiedene Bauteile beide „6-dB-Splitter“, und sie verhalten sich am Ausgang völlig ungleich.

- **Der Drei-Widerstands-Splitter** ist der in Kapitel 2 behandelte Sternsplitter mit drei Armen zu 16,7 Ohm. Alle drei Tore sind angepasst, die Dämpfung beträgt 6 dB, die Isolation ebenfalls 6 dB.
- **Der Zwei-Widerstands-Splitter** hat nur zwei Widerstände von je 50 Ohm, je einen in Reihe zu jedem Ausgang; der Eingang liegt unmittelbar am gemeinsamen Punkt. Auch er dämpft 6 dB, und auch sein Eingang ist angepasst. Seine Ausgänge sind jedoch nicht im üblichen Sinn angepasst – dafür sieht eine an einem Ausgang angeschlossene Last eine außerordentlich genaue wirksame Quellimpedanz von 50 Ohm.

Genau darin liegt sein Zweck. In der Messtechnik wird er benutzt, wenn ein Verhältnis gemessen werden soll: Ein Ausgang führt auf den Prüfling, der andere auf einen Referenzempfänger. Die Güte der Quellanpassung bestimmt dann die Genauigkeit der Messung. Für das bloße Aufteilen eines Signals ist er dagegen die schlechtere Wahl.

8.3 Einen Splitter nachmessen

Datenblattangaben bei preiswerten Bauteilen sind eine Hypothese. Mit einem Netzwerkanalysator ist die Prüfung in einer Viertelstunde erledigt.

1. Kalibrieren, Bezugsebene an die Kabelenden legen. Ein Dämpfungsglied am Quellport verbessert die Quellanpassung und damit die Aussagekraft der Reflexionsmessungen.
2. Durchgangsdämpfung messen: Tor 1 auf Tor 2, das dritte Tor mit 50 Ohm abgeschlossen. Erwartungswert für einen Dreitorsplitter: 6 dB resistiv, etwa 3,2 bis 3,5 dB beim Wilkinson.
3. Zweiten Ausgang ebenso messen und beide Kurven vergleichen – das ist die Amplitudenbalance.
4. Phasengang beider Wege aufnehmen und die Differenz bilden. Sie sollte im Nutzband wenige Grad betragen.
5. Isolation messen: Tor 2 auf Tor 3, Tor 1 abgeschlossen. Beim resistiven Splitter erscheinen hier dieselben 6 dB wie beim Durchgang. Beim Wilkinson zeigt sich ein ausgeprägtes Minimum bei der Design-Frequenz.
6. Reflexionsdämpfung an allen drei Toren einzeln aufnehmen, die jeweils übrigen abgeschlossen.
7. Beim Wilkinson-Splitter den Bereich bis zur dreifachen Design-Frequenz aufnehmen, um die Wiederkehr nach Abschnitt 3.6 und den Einbruch dazwischen sichtbar zu machen.
8. Ergebnisse notieren: Dämpfung, Balance, Isolation, Anpassung, jeweils mit dem Frequenzbereich, für den sie gelten.

Woran man die Bauform erkennt, ohne das Gehäuse zu öffnen: Dazu wird die Durchgangsdämpfung über einen weiten Bereich gemessen. Bleibt sie von wenigen Megahertz an konstant bei 6 dB, ist es ein resistiver Splitter. Zeigt sie ein Minimum um 3 dB in einem begrenzten Band und steigt daneben an, ist es ein Wilkinson-Splitter. Die Isolationsmessung bestätigt den Befund.

Anhang A Das Stehwellenverhältnis

Die Kennzahl, die bei jedem Splitter mit angegeben wird, und die man ohne die dahinterstehende Vorstellung leicht falsch deutet.

A.1 Woher die stehende Welle kommt

Eine Leitung überträgt Leistung nur dann vollständig, wenn die Last genau die Impedanz hat, für die die Leitung gebaut ist. Weicht die Last ab, so läuft ein Teil der Welle zurück. Hin- und rücklaufende Welle überlagern sich auf der Leitung, und dabei entsteht ein ortsfestes Muster: An manchen Stellen addieren sich die Spannungen, an anderen heben sie sich teilweise auf. Dieses Muster bewegt sich nicht mit der Welle mit – daher der Name.

Das Maß für die Abweichung ist der Reflexionsfaktor:

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

Er ist eine komplexe Größe: Sein Betrag sagt, wie viel zurückläuft, sein Winkel, mit welcher Phase. Für die Beurteilung der Anpassung genügt meist der Betrag.

A.2 Drei Schreibweisen für dieselbe Sache

Das Stehwellenverhältnis ist das Verhältnis der größten zur kleinsten Spannung auf der Leitung:

$$S = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Gebräuchlicher in der Messtechnik ist die Reflexionsdämpfung, weil sie in Dezibel angegeben wird und sich damit in Pegelrechnungen einfügt:

$$a_R/\text{dB} = -20 \lg|\Gamma| \quad |\Gamma| = \frac{s-1}{s+1}$$

Und für die Leistungsbilanz zählt das Quadrat des Betrags:

$$\frac{P_r}{P_h} = |\Gamma|^2$$

Stehwellenverhältnis	Reflexionsfaktor	Reflexionsdämpfung	reflektierte Leistung
1,0 : 1	0,000	unendlich	0,00 %
1,1 : 1	0,048	26,4 dB	0,23 %
1,2 : 1	0,091	20,8 dB	0,83 %
1,5 : 1	0,200	14,0 dB	4,00 %
2,0 : 1	0,333	9,5 dB	11,11 %
3,0 : 1	0,500	6,0 dB	25,00 %
5,0 : 1	0,667	3,5 dB	44,44 %
10,0 : 1	0,818	1,7 dB	66,94 %
unendlich	1,000	0 dB	100,00 %

Tabelle A.1 Dieselbe Anpassung in vier Schreibweisen

Zur Vorzeichenfrage: Man liest sowohl „20 dB Rückflusdämpfung“ als auch „S11 gleich minus 20 dB“. Beides meint dasselbe. Eine Angabe wie „Rückflusdämpfung minus 20 dB“ vermischt die beiden Schreibweisen; sie ist zwar verständlich, aber unsauber.

A.3 Warum es bei Splittern wichtig ist

- **Messunsicherheit.** Fehlanpassung zwischen Quelle und Last erzeugt je nach Phasenlage zu hohe oder zu niedrige Messwerte. Das ist bei Pegelmessungen häufig der größte Einzelbeitrag zur Unsicherheit – größer als Rauschen und Ablesung zusammen.
- **Welligkeit im Frequenzgang.** Zwei fehlangepasste Stellen in einer Kette bilden einen Mehrfachreflexionspfad. Das Ergebnis ist ein welliger Frequenzgang, dessen Periode vom Abstand der beiden Stellen abhängt.
- **Rückwirkung auf die Quelle.** Bei hohen Leistungen belastet die zurücklaufende Welle die Endstufe. Bei Messpegeln ist das unkritisch, in Senderanwendungen nicht.

Der resistive Splitter hat hier seinen größten Vorzug. Weil seine Anpassung von Widerständen bestimmt wird und nicht von Resonanzen, bleibt sie über den gesamten Arbeitsbereich gut. Er nimmt reflektierte Energie in seinen Widerständen auf, statt sie zur Quelle zurückzuschicken.

Was das Stehwellenverhältnis nicht sagt: Es misst allein, wie gut die Leistung von der Leitung in die Last

übergeht. Ob die Last damit etwas Sinnvolles anfängt, steht auf einem anderen Blatt. Ein reflexionsfrei abschließender Widerstand hat ein Stehwellenverhältnis von 1 und strahlt nichts ab.

A.4 Der Preis der guten Anpassung

Beim resistiven Splitter ist der Zusammenhang zwischen Anpassung und Dämpfung kein Zufall, sondern Absicht. Die Widerstände halten alle Tore auf der Systemimpedanz und setzen dafür die Hälfte der Leistung in Wärme um. Man erkauft eine reflexionsfreie, extrem breitbandige Umgebung mit Signalhub – ein Tausch, der in Messaufbauten meist lohnt und in Senderendstufen selten.

Der Vorgang ist nicht umkehrbar. Was einmal in den Widerständen als Wärme angekommen ist, steht dem Signal nicht mehr zur Verfügung. Beim Wilkinson-Splitter dagegen wird nichts umgesetzt, solange er symmetrisch betrieben wird; er erkauft seine Anpassung mit Bandbreite statt mit Leistung.

Anhang B Formelzeichen und Abkürzungen

Alle verwendeten Zeichen mit Bedeutung, Einheit und dem Kapitel, in dem sie eingeführt werden.

B.1 Schreibweisen

- Formelzeichen stehen kursiv, Einheiten aufrecht. In den Tabellen dieses Anhangs ist darauf zugunsten der Lesbarkeit verzichtet.
- N bezeichnet durchgehend die Gesamtzahl der Tore. Ein Splitter mit einem Eingang und zwei Ausgängen ist also ein Dreitorsplitter mit N gleich drei. In englischsprachigen Datenblättern wird oft stattdessen die Zahl der Ausgänge genannt; beim Vergleich von Formeln ist darauf zu achten.
- Dämpfungen werden als positive Werte in Dezibel angegeben. Wo Streuparameter gemeint sind, tragen sie das umgekehrte Vorzeichen.
- Alle Zahlenwerte beziehen sich auf eine Systemimpedanz von 50 Ohm, sofern nichts anderes dabeisteht.

B.2 Lateinische Formelzeichen

Zeichen	Bedeutung	Einheit	Kap.
a	Dämpfung allgemein	dB	1
a _{1k}	Durchgangsdämpfung vom Eingang zu Ausgang k	dB	1
a _{ideal}	rechnerische Teilungsdämpfung	dB	1
a _{iso}	Isolation zwischen zwei Ausgängen	dB	1, 2, 3
a _R	Reflexionsdämpfung	dB	A
a _{real}	tatsächlicher Verlust in Leiter und Substrat	dB	3
C	Kapazität im Pi-Glied	F	4
c ₀	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, 300 mm/ns	m/s	6
D	Dissipation, Anteil der Leistung, der in Wärme übergeht	-	2
F	Rauschfaktor	-	1
FBW	relative Bandbreite	%	3
f ₀	Design-Frequenz	Hz	3, 4, 6
f ₁ , f ₂	untere und obere Grenzfrequenz	Hz	3

Tabelle B.1 Lateinische Formelzeichen, a bis f

Zeichen	Bedeutung	Einheit	Kap.
L	Induktivität im Pi-Glied	H	4
l	Länge der Viertelwellenleitung	mm	6
N	Zahl aller Tore; Ausgänge sind N-1	-	durchgehend
NF	Rauschzahl	dB	1
P1	Leistung am Eingang	W oder dBm	2
Pk	Leistung an einem Ausgang	W oder dBm	2
PR	Leistung im Isolationswiderstand	W	7
R	Widerstand je Arm des resistiven Sternteilers	Ohm	2
Riso	Isolationswiderstand des Wilkinson-Teilers	Ohm	3
s	Stehwellenverhältnis	-	A
VK	Verkürzungsfaktor	-	6
vp	Phasengeschwindigkeit auf der Leiterplatte	m/s	6
Z0	Systemimpedanz, meist 50 Ohm	Ohm	durchgehend
ZL	Impedanz der Viertelwellenleitung	Ohm	3, 4

Tabelle B.2 Lateinische Formelzeichen, L bis Z

B.3 Griechische Formelzeichen

Zeichen	Bedeutung	Einheit	Kap.
Γ	Reflexionsfaktor	-	A
ΔA	Amplitudenbalance zwischen den Ausgängen	dB	1
$\Delta \varphi$	Phasenbalance zwischen den Ausgängen	Grad	1
ϵ_r	Permittivität des Substrats	-	6
ϵ_{eff}	effektive Permittivität der Leitung	-	6
λ	Wellenlänge	mm	3, 6
φ	Phase	Grad	1, 3
ω	Kreisfrequenz	1/s	4

Tabelle B.3 Griechische Formelzeichen

B.4 Begriffe und Abkürzungen

Kürzel	Herkunft	Bedeutung
FBW	fractional bandwidth	relative Bandbreite
FR4	flame retardant 4	verbreitetes Leiterplattenmaterial
Lumped Elements	-	konzentrierte Bauelemente, also Spulen und Kondensatoren statt Leitungen
Microstrip	-	Leiterbahn auf dem Substrat, Feld teils in Luft
SRD	short range devices	europäisches Band 863 bis 870 MHz
Stripline	-	Leiterbahn zwischen zwei Lagen, Feld ganz im Material
SWR, VSWR	voltage standing wave ratio	Stehwellenverhältnis

Tabelle B.4 Begriffe und Abkürzungen

B.5 Häufige Verwechslungen

- **Teilung und Verlust.** Die 3 dB beim Zweifachsplitter sind Aufteilung, nicht Verlust. Verlust ist nur, was als Wärme im Bauteil bleibt.
- **Dämpfung und Isolation.** Beim resistiven Splitter sind beide gleich groß, beim Wilkinson-Splitter nicht. Wer die Werte verwechselt, hält einen resistiven Splitter für isolierend.
- **Reziprok und symmetrisch.** Jeder passive Splitter ist reziprok, aber nur der resistive Sternsplitter ist symmetrisch.
- **Substrat- und effektive Permittivität.** Bei Microstrip ist die effektive stets kleiner. Wer mit dem Substratwert rechnet, erhält eine zu niedrige Design-Frequenz.
- **Kohärent und unkorreliert.** Beim Zusammenführen entscheidet dieser Unterschied darüber, ob sich die Leistungen addieren oder ob jedes Signal 3 dB verliert.
- **Splitter und Splitter.** Der Zwei-Widerstands-Splitter und der Drei-Widerstands-Splitter dämpfen beide 6 dB und werden beide so genannt, verhalten sich an den Ausgängen aber verschieden.