# Zirkulatoren und Isolatoren

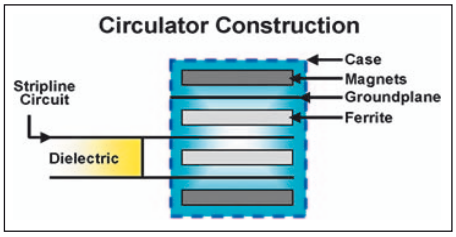


***Bild 1: Aufbau eines Zirkulators***

Ein passiver HF-Ferrit-Zirkulator ist eine Mikrowellenkomponente mit drei Anschlüssen, die den Fluss der Mikrowellenenergie nur in einer Richtung erlaubt, z.B. von Port 1 zu Port 2, 2 zu 3 und 3 zu 1. Jeder Anschluss ist an einem Arm einer symmetrischen Y-Verbindung angeschlossen, die mit vormagnetisiertem Ferritmaterial gekoppelt ist. Wenn einer der Anschlüsse abgeschlossen wird (angepasster Zustand), sind die anderen beiden Ports isoliert in der entgegengesetzten Richtung. Daher ist ein Isolator im wesentlichen ein Zirkulator mit einem abgeschlossenen, angepassten Port, üblicherweise wird Anschluss 3 dafür verwendet.

Bild 1 zeigt den schematischen Aufbau eines typischen Zirkulators. Nur einer der drei Stripline-Ports ist zu sehen. In der Praxis gibt es keine Luftspalte im Gehäuse. Die Richtung des Feldes, das für die magnetische Vormagnetisierung sorgt, ist axial (im Diagramm senkrecht) aufgrund der Ferritscheiben. Der Pfad schließt sich über das Stahlgehäuse. Es ist auch möglich ein Aluminiumgehäuse für Kern und Stahlummantelung zu verwenden, um den magnetischen Rückkehrpfad abzuschließen.

## Auswahl eines Zirkulators

Zirkulatoren bewirken keine Isolation, solange nicht einer der Ports angepasst abgeschlossen ist. Dann ist die Isolation zwischen den beiden anderen Anschlüssen (in der Richtung, die zur Richtung der Zirkulation entgegengesetzt ist) ungefähr gleich der Rückflussdämpfung, die von einer Fehlanpassung am abgeschlossenen Port verursacht wird. Diesen Zusammenhang verdeutlicht Bild 2.

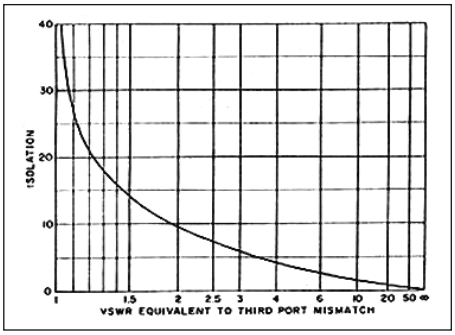


***Bild 2: Isolation in dB in Abhängigkeit von der Fehlanpassung an Port 3***

Ein Isolator, der auch als Richtungsleitung bezeichnet wird, kann zum Reduzieren des VSWR verwendet werden, wie die Grafik in Bild 3 zeigt. Hier wird das Eingangs-VSWR in Abhängigkeit vom Last-VSWR dargestellt. Kurvenparameter ist der Fehlanpassungswinkel.

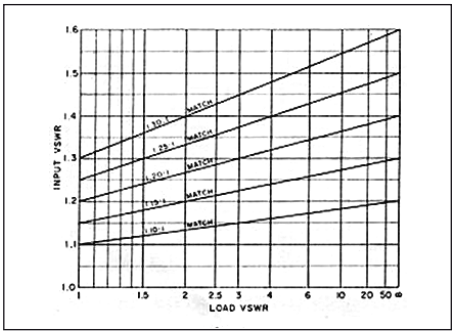


***Bild 3: Eingangs-VSWR in Abhängigkeit vom Last-VSWR.***

Unter der Annahme, dass Port 3 perfekt mit 50 Ohm abgeschlossen ist, ist die Isolation einfach eine Funktion des Zirkulator-VSWR´s. Um eine Isolation in geforderter Höhe zu erreichen, ist es notwendig, einen Zirkulator auszuwählen, der ausreichend gut angepasst ist. Praktische Einschränkungen wie der Bandbreiten- und der Temperaturbereich begrenzen die Isolation eines einzelnen Knotenpunkts auf zwischen 20 und 25 dB ein. Höhere Isolationswerte werden durch Kaskadenschaltung mehrerer Knotenpunkte erreicht. Zum Beispiel würde eine Richtungsleitung mit zwei Knotenpunkten normalerweise 50 dB Isolation erreichen. Eine derartige Komponente wird als 4-Port-Isolator bezeichnet, bei dem zwei der sechs Ports intern verbunden sind. Wenn ein Isolator eingesetzt wird, muss die Belastbarkeit der internen Abschlüsse berücksichtigt werden.

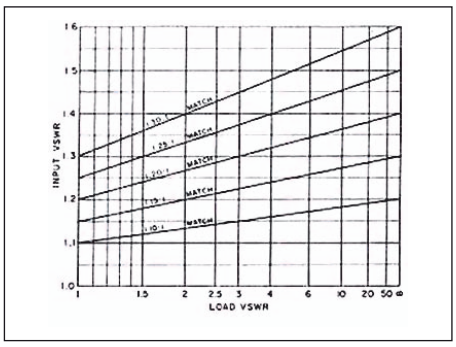


***Bild 4: Eingangsnennleistung (als Multiplikator der Abschlussbelastbarkeit) in Abhängigkeit vom Last-SWR.***

Typische Isolatorabschlüsse haben Belastbarkeiten von 5, 10, 30, 50, 70 und 100 Watt, je nach Hersteller und Typ.

## Koaxiale und Drop-in-Zirkulatoren und Isolatoren

Eine kurze Diskussion der folgenden Themen ist notwendig, um den Betrieb von Zirkulatoren zu verstehen:

- Ferritbereich
- Magnetischer Kreis
- Impedanztransformation
- Transmission-Line-Geometrie
- Steckverbinder

## Ferritbereich

Zirkulation und Isolation werden vom Ferritmaterial verursacht, bei dem es sich um ein Dielektrikum mit magnetischen Merkmalen handelt. Die Ferritregion besteht aus zwei Ferritplatten, die zu beiden Seiten der Stripline-Y-Verbindung angeordnet sind. Diese Platten bilden einen dielektrischen Resonator. Wenn Leistung von einer der drei Übertragungsleitungen zugeführt wird, entsteht ein Stehwellenmuster. Dieses elektromagnetische Feldmuster ist auf ein Paar mathematisch identischer, gegenläufig sich drehender Wellen zurückzuführen. Am Eingangsport liegt ein Maximum, Nullstellen finden sich in 90° Distanz vom Eingang. Das Stehwellenmuster ist symmetrisch in Bezug auf den Eingangsport, wenn kein magnetisches Feld angelegt ist. Die Energie wird in gleicher Weise zu den anderen beiden Ports übertragen, wie Bild 5A zeigt.

Der Grad der Kopplung oder Isolation zum Resonator wird durch die relative Position eines Ports und das Stehwellenmuster bestimmt. Liegt zum Beispiel ein Port in einem Nullpunkt der stehenden

*Unter Verwendung des Applikationsberichts: "Basic Facts about Circulators & Isolators"*
*Tony Edridge*
*M2 Global Technology, Ltd.*
*www.m2global.com*

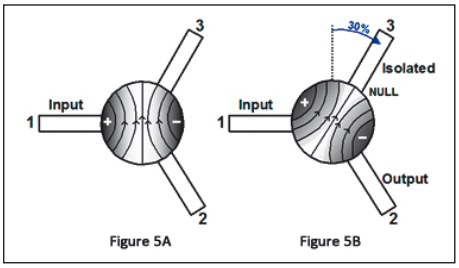


***Bild 5: links die Intensität des elektrischen Feldes, rechts das magnetische Feld nach Richtung dargestellt***

Welle, erfolgt kein Leistungstransfer zu diesem Port.

Die Präsenz eines axialen magnetischen Feldes über dem Ferritmaterial ändert die von den rotierenden Wellen gesehene effektive Permeabilität in einer Richtung, die von der Drehrichtung abhängt. Das hat zur Folge, dass die beiden Wellen nicht mehr identisch sind und in zwei mathematische Lösungen mit unterschiedlichen radialen Geschwindigkeiten aufgeteilt werden. Dies bewirkt, dass das Stehwellenmuster aus seiner ursprünglichen, symmetrischen Position gedreht wird. Die gewünschte Leistungsübertragung und die Isolatormerkmale erhält man durch das Design des Zirkulators in der Weise, dass das Stehwellenmuster um 30° rotiert wird. Wird Leistung an Port 1 angelegt, ist der nächste Anschluss in Richtung der Rotation (Port 3) vom Resonator isoliert, Port 2 dagegen ist mit dem Resonator vollständig gekoppelt ist, (wie Bild 5 B zeigt). In der Praxis kann Schaltungsabstimmung verwendet werden, um kleinere Justierungsfehler des Stehwellenmusters zu korrigieren.

Wenn ein Ferritmaterial magnetisiert wird, präzessieren die magnetischen Momente der Elektronen mit einer Frequenz, die proportional zum magnetisierenden Feld ist. Ferromagnetische Resonanz erfolgt, wenn ein rotierendes magnetisches HF-Feld die gleiche Richtung und Frequenz hat, wie die präzessierenden Elektronen im Ferritmaterial. Maximale Kopplung der Energie des RF-Signals zum Ferritmaterial tritt bei einer bestimmten Frequenz auf, die als ferrimagnetische Resonanz bezeichnet wird. Wenn die Drehrichtung oder die Frequenz des RF-Signals geändert wird, verringert sich die Kopplung.

Es ist jedoch nicht sinnvoll, den Zirkulator magnetisch so auszurichten, dass ferromagnetische Resonanz bei der Betriebsfrequenz auftritt, weil das Bauelement dann äußerst verlustbehaftet wäre. Hohe Einfügungsdämpfung kann auch bei Verwendung sehr schwacher Felder zur Vormagnetisierung erfolgen. Der Verlustbereich bei schwachen Feldern ergibt sich, wenn das angelegte magnetische Feld nicht ausreicht, um die indivduellen magnetischen Bereiche des Ferritmaterials vollständig zu sättigen oder auszurichten. Trotzdem ist Betrieb mit niedrigen Verlusten in den Regionen über oder unter dem Resonanzbereich möglich (siehe Bild 6).

## Vergleich von Zirkulator-Designs über- und unterhalb der Resonanz

Der folgende Vergleich bezieht sich vor allem auf Strip-Line-Zirkulatoren und ist nur als Richtschnur gedacht ist. Die Bezeichnung „über“ oder „unter“ der Resonanz gilt nur in Bezug auf das magnetische Feld, nicht auf die Frequenz.

## Betriebsfrequenz

Über der Resonanz (AR = above resonance) arbeitende Zirkulatoren können für den Betrieb von 50 MHz bis zu etwa 2,5 GHz gebaut werden. Obwohl Betrieb über dieser Frequenz erreicht werden kann, sind aufwändige magnetische Kreise erforderlich, um das Ferritmaterial ausreichend vorzumagnetisieren.

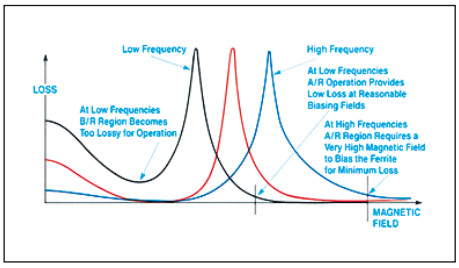


***Bild 7: Die Betriebsfrequenzbereiche variieren mit der Frequenz***

Zirkulatoren, die unterhalb der Resonanz (BR = below resonance) arbeiten sind generell auf den Betrieb über 500 MHz beschränkt. Betrieb unterhalb dieser Frequenz ist möglich, aber im in Allgemeinen in der Leistungsfähigkeit reduziert. Da die Frequenz verringert ist, nimmt der B/R-Betriebsbereich ab (Bild 7). Das für den Betrieb des B/R-Knotenpunkts benötigte niedrigere magnetische Feld genügt nicht, um das Ferritmaterial vollständig zu sättigen, was in einem Bereich niedriger Feldverluste resultiert.

Der Bereich niedriger Feldverluste und der ferrimagnetische Resonanzbereich vermischen sich miteinander, und machen daher Betrieb mit niedrigen Verlusten im B/R-Bereich praktisch unmöglich. Die B/R-Verbindung kann für Frequenzen bis zu etwa 30 GHz eingesetzt werden. Betrieb oberhalb dieser Frequenz wird hauptsächlich von der

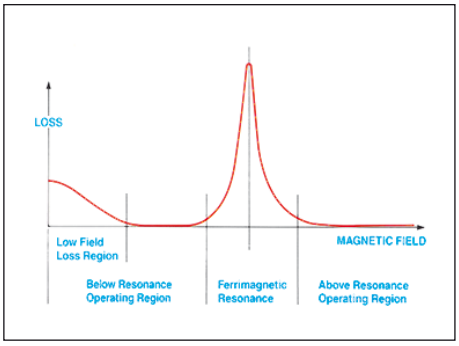


***Bild 6: Die Resonanzkurve zeigt die grundlegenden Bereiche des zirkularen Betriebs***

Strip-line-Geometrie beschränkt. Hohlleiterzirkulatoren können für den Einsatz bei über 100 GHz entworfen werden.

## Bandbreite

Die B/R-Verbindungseigenschaften ermöglichen Breitbandbetrieb bis zu 100%, A/R-Betrieb ist im allgemeinen auf 40% der Maximalbandbreite beschränkt.

## Temperatur

Der A/R-Zirkulator kann mit Hilfe von speziellen magnetischen Materialien temperaturkompensiert werden. Die magnetischen Merkmale dieser Materialien ändern sich mit der Temperatur. Über 1 GHz ist Betrieb über einem Temperaturbereich von -54 bis +95 ° C möglich. Der B/R-Zirkulator ist unterhalb 1 GHz praktisch auf den Zimmertemperaturbetrieb beschränkt. Die magnetischen Merkmale der verfügbaren Ferritmaterialien sind extrem temperaturempfindlich. Im Allgemeinen haben die für höhere Frequenzen verwendeten Ferritmaterialien eine größere Temperaturstabilität. Betrieb über 4 GHz und von -54 bis +85 °C ist - je nach Bandbreite und gewünschten Leistung - möglich.

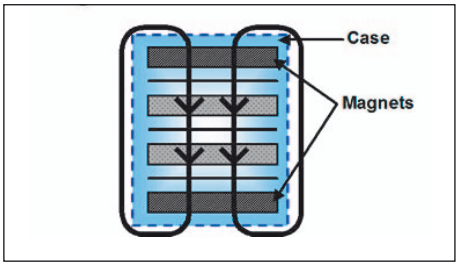


***Bild 8: Das Metallgehäuse um den Zirkulator schließt den magnetischen Pfad***

## Magnetisches Feld im Zirkulator

Leistungsfähige Magneten werden verwendet, um die Ferritscheiben vorzumagnetisieren. Wie schon erwähnt, schließt der magnetische Kreis auch Materialien ein, um die reversiblen Änderungen mit

der Temperatur zu kompensieren. Jedoch kann der magnetische Kreis durch eine zusätzliche magnetische Abschirmung für kritische Anwendungen optimiert werden, wenn sich mehrere Zirkulatoren in großer Nähe befinden. Ein Stahlgehäuse bildet dann den Rückkehrpfad für das magnetische Feld (Bild 8).

## Impedanztransfomation

Mehrere Viertelwellenlängenabschnitte der Übertragungsleitung werden meist verwendet, um die niedrigere Impedanz der Ferritscheibe an die 50 Ohm der Anschlüsse und der angeschlossenen Leitungen anzupassen. Die Rückflussdämpfung und die Bandbreitenspezifikationen bestimmen die Anzahl der erforderlichen Transformationsabschnitte. Eine typische VSWR-Spezifikation für einen Zirkulator ist 1.25:1. Für schmale Bandbreiten (weniger als 5%) kann die Ferritimpedanz für 50 Ohm dimensioniert werden. Anpasstransformatoren werden für diese Art des Designs nicht benötigt, was eine kleine Gehäusegröße ermöglicht. Die Impedanzcharakteristik eines derartigen Zirkulators zeigt Bild 9 A.

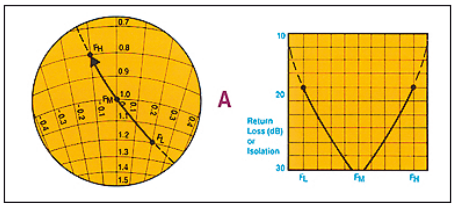


***Bild 9 A: Impedanzcharakteristiken des Zirkulators***

Mittlere Bandbreiten von weniger als 40% kann man erhalten, wenn man nur ein einzelnes Transformator-Leitungsstück verwendet. Die Transformatorenlänge kann durch das Verwenden von Materialien mit hohen dielektrischen Eigenschaften und das Mäandern der Leitung verkürzt werden.

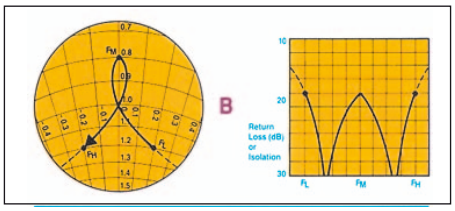


***Bild 9 B: Impedanz-Charakteristik eines Zirkulators mit nur einem Leitungstransformator***

Bandbreiten größer als eine Oktave sind durch die Verwendung von zwei oder drei externen Transformations-Leitungsstücken möglich. Die Verwendung von mehr als drei Transformatoren liefert allerdings nur eine geringe Leistungsverbesserung. Die typische Impedanz bei zwei Transformationsgliedern zeigt Bild 9 C.

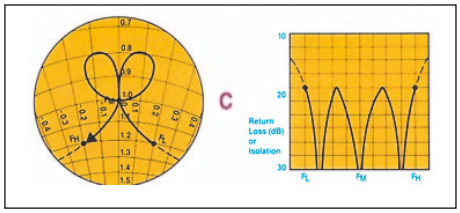


***Bild 9 C: Zirkulator-Impedanzcharakteristik bei zwei Leitungstransformatoren***

Zirkulatoren mit diskreten Elementen ersetzen Viertelwellen-Transformationsleitungen durch Kapazitäten und Induktivitäten, um kleinere Gehäuseabmessungen im Frequenzbereich von 50 MHz bis 1.0 GHz zu erreichen. Diese Zirkulatoren sind jedoch temperaturempfindlich und arbeiten nur über schmale Bereiche bei niedrigen Leistungspegeln.

Symmetrische Stripline ist die am meisten verwendete Leitungsgeometrie. Sie wird sowohl bei Koaxial- als auch Durchsteckausführungen von Zirkulatoren eingesetzt.

## Verbindungselemente

Zirkulatoren können mit den unterschiedlichsten Anschlüssen versehen werden. SMA m oder f sind die Beliebtesten und im Allgemeinen am leichtesten zu installieren. Steckverbinder vom Typ N, TNC und rechtwinklige Anschlüsse können ebenfalls verwendet werden. Einige Anschlusstypen verursachen jedoch Einschränkungen der elektrischen Leistung bei Hf- und Breitband-Zirkulatoren. In vielen Fällen reicht die Gehäusehöhe des Zirkulators nicht. Bei einer Höhe von zum Beispiel 0,50-Zoll ist kein N-Typ-Anschluss ohne eine Gehäusevergrößerug möglich (0,63 Zoll). Zirkulatoren, die Anschlüsse für hohe Spannungen erfordern, verwenden meist einen Zwischenadapter.

Eine andere Anschlusskonfiguration erhält man bei Montage des Zirkulators auf einen Hohlleiteradapter (Isoadapter). Diese Adapter sind besonders nützlich, wenn sowohl Hohlleiter als auch koaxiale Anschlüsse erforderlich sind. Zum Beispiel kann der Hohlleiteranschluss ein Signal direkt von einer Hohlleiterantenne aufnehmen, während das Ausgangssignal über einen SMA-Anschluss in einen Halbleiterverstärker eingespeist wird.

Für viele Anwendungen gibt es auch Zirkulatoren ohne Buchsen, so dass die Pads der Anschlüsse direkt auf eine Leiterplatte gelötet werden können. Sorgfältige Überlegung erfordern sowohl die Erdung des Zirkulatorgehäuses als auch die Geometrie des zugehörigen Substrats.

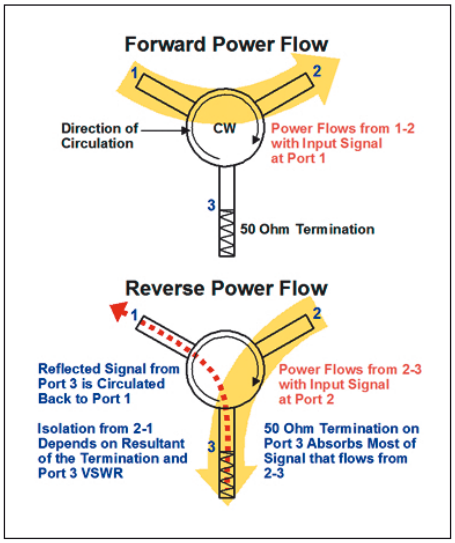


***Bild 10: Durch Hinzufügen eines Abschlusses an Port 3 erhält man eine Richtungsleitung***

## Beschreibung der Betriebsparameter

**VSWR:** Dieser Parameter gibt an, wieviel Prozent des Eingangssignals in Richtung der Quelle reflektiert werden. Für kritische Anwendungen können Größe und Phase des reflektierten Signals als Impedanzverlauf in einem Smith-Diagramm aufgezeichnet werden.

**Einfügungsdämpfung:** Wenn ein Signal in Richtung niedriger Verluste in den Zirkulator eingespeist wird, ist die Einfügungsdämpfung das Verhältnis des Ausgangssignals zum Eingangssignal, ausgedrückt in dB.

**Isolation:** Eine Richtungsleitung ist eine Vierpoleinheit, die durch den internen Abschluss eines Zirkulator-Anschlusses (siehe Bild 10 gezeigt) entsteht. Wenn ein Signal in der Richtung hoher Verluste in die Richtungsleitung eingespeist wird, ist die Isolation (Entkopplung) das Verhältnis des in den Ausgangs-Port 2 eingespeisten Signals zu dem am Eingabeport (1) gemessenen Signal, ausgedrückt in dB. Für einen Zirkulator gibt es diesen Parameter nicht.

Die Parameter **Isolation, VSWR und Einfügungsdämpfung** werden benötigt, um einen Isolator zu spezifizieren, während ein Zirkulator durch sein VSWR an allen Ports und durch seine Einfügungsdämpfung definiert ist.

**Prozentuale Bandbreite:** Sie ergibt sich aus der Differenz zwischen der untersten und obersten Betriebsfrequenz, dividiert

durch die Mittenfrequenz und multipliziert mit 100.

**Betriebstemperaturbereich:** Der Temperaturbereich, in dem ein Zirkulator alle Spezifikationen erfüllen muss.

**Lagerungstemperaturbereich:** Der Temperaturbereich, in dem ein Zirkulator ohne dauerhafte Verschlechterungen aufbewahrt werden kann. Lagerungstemperaturen von -60 bis +125 °C sind meist zulässig.

**Phasenlinearität:** Dieser Parameter ist als Abweichung der Einfügungsphase von einer am besten passenden geraden Linie über der Frequenz definiert. Für A/R- und B/R-Zirkulatoren mit weniger als 20% Bandbreite, liegt die Phasenlinearität meist innerhalb von zwei Grad.

**Impedanzcharakteristik:** Dieser Parameter beschreibt sowohl die Größe auch als die Phase des reflektierten Signals, aufgezeichnet in einem Smith-Diagramm. Die prinzipielle Eingangsimpedanz eines Zirkulators ist eine der drei Verläufe, die Bild 9 zeigt.

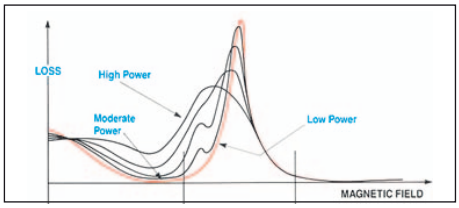


***Bild 11: Spitzenleistungseinflüsse auf die Resonanzkurve***

**Begrenzung:** Ein anderer Effekt, der mit der Höchstnennleistung eines Zirkulators verbunden ist, wird als die Nichtlinearitäts- oder Spitzenleistungsgrenze des Zirkulators bezeichnet. Sobald die Leistung über einen kritischen Wert zunimmt, ergeben sich beträchtliche Änderungen in der Resonanzkurve unterhalb der Hauptresonanz (Bild 11). Die Höchstleistungsgrenze ist von der Zirkulatorgeometrie, der Bandbreite und den Eigenschaften des Ferritwerkstoffs abhängig.

**Verzerrungsprodukte:** Bei hohen Leistungspegeln entstehen im Zirkulator Harmonische und Intermodulationsprodukte. Wegen der von anderen Parametern auferlegten Designbeschränkungen ist es sehr schwierig, diesen Effekt zu beseitigen.

**Durchschnittliche Leistung:** Die im Zirkulator verbrauchte Leistung ist proportional zur Einfügungsdämpfung. Wenn die durchschnittliche Leistung signifikant ist, verursacht die verbrauchte Leistung eine Erwärmung der Ferrite und Verschlechterung der Leistungsdaten. Wärmeleitung, Konvektion oder Kühlung können die durchschnittliche Nennleistung eines Zirkulators verbessern. Der Anschlusstyp ist auch wichtig, wenn die durchschnittliche Leistung sehr hoch ist. SMA-Buchsen z.B. sind wegen ihrer internen Verluste nur beschränkt belastbar. Die durchschnittliche Nennleistung eines Zirkulators hängt auch von der resultierenden Fehlanpassung am Ausgangsport ab. Wenn zum Beispiel ein Signal mit 100 W Durchschnittsleistung an den Eingang eines mit einer Fehlanpassung von 6.00:1 abgeschlossenen Zirkulators angelegt wird, würden 51 Watt reflektiert, so dass der Zirkulator 151 Watt insgesamt vertragen muss.

**Leistungsbemessung des Isolatorabschlusses:** Die Belastung des Port-Abschlusses hängt von der Fehlanpassung am Ausgang ab.

## Literaturangaben

Bosma, H., "A general model for junction circulators: Choice of magnetization and bias field“

IEEE Trans Magazin, vol. MAG-4, Sept 1968, pp.587-596.

Bosma, H. "Junction circulators“

Advances in Microwaves, vol. 6, Leo Young, Ed. New York: Academic, 1971.

Fee, C. E. und R. L. Comstock: "Operation of the ferrite junction circulator“

IEEE Trans. Microwave, Theory Tech. (1964 Symp. Issue), vol. MTT 13, Jan. 1965, pp. 15-27.

Helzajn, J., "Frequency response of quarter wave coupled reciprocal strip line junctions“

IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. MTT 21, Aug. 1973, pp 533-537

Konishi, Y., "New theoretical concept for wide band gyromagnetic devices“

IEEE Trans. Magazine (1972 Intermag Conf), vol. MAG 8, Sept 1972, pp. 505 508

| Fehlanpassung am Ausgang | Reflektierte Leistung in % |
|---|---|
| 1,0 (perfekte Anpassung) | 0 |
| 1,5 | 4 |
| 2,0 | 11 |
| 6,0 | 51 |
| Kurzschluss oder Leeerlauf | 100 |