

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ  
FAKULTÄT FÜR ELEKTRO- UND INFORMATIONSTECHNIK  
PROFESSUR FÜR HOCHFREQUENZTECHNIK UND PHOTONIK



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ

# ENTWURF EINES MIKROWELLENVERSTÄRKERS

ARBEIT FÜR DIE VORLESUNG  
„MICRO- AND MILLIMETER WAVES“

9. Dezember 2004

Autor: Robert Lange  
Studienrichtung: Informations- und  
Kommunikationstechnik  
Matrikel: 22243

---

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Übersicht Entwurfsmethoden</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Verstärkerbeschreibung</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Verstärkung</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Stabilität</b>	<b>6</b>
<b>6</b>	<b>Verstärkerentwurf für maximale Verstärkung</b>	<b>9</b>
<b>7</b>	<b>Verstärkerentwurf für bestimmte Verstärkung</b>	<b>10</b>
<b>8</b>	<b>Verstärkerentwurf unter Berücksichtigung der Rauschzahl</b>	<b>13</b>
<b>9</b>	<b>Breitbandverstärker</b>	<b>14</b>
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>16</b>
	<b>Literatur</b>	<b>17</b>

## 1 Einleitung

Mikrowellenverstärker sind Grundbausteine der Mikrowellentechnik, die nahezu in jeder Schaltung benötigt werden.

Das wichtigste Merkmal eines Verstärkers ist dessen Verstärkungsfaktor. Jedoch spielen auch Bandbreite, Rauschzahl, Stabilität und Komplexität der resultierenden Schaltung eine wichtige Rolle. Je nach Entwurfsziel sind auch weitere Faktoren zu berücksichtigen, wobei generell die Verbesserung eines Faktors andere Eigenschaften verschlechtert.

Der Verstärkerentwurf stellt sich somit als Optimierungsaufgabe dar, wobei je nach Ziel unterschiedliche Methoden zum Einsatz kommen können.

In dieser Arbeit werden drei Konzepte des einstufigen Verstärkerentwurfes mit den dazugehörigen Grundlagen dargelegt. Diese Methoden sind anschaulich und liefern im manuellen Entwurf gute Ergebnisse. Das Hauptaugenmerk liegt auf der praktischen Anwendbarkeit, auf Herleitungen wurde verzichtet. Abschliessend wird ein Ausblick auf weiterführende Methoden gegeben, die der Bandbreitenerhöhung dienen.

Die Anordnung der Kapitel und deren Inhalt folgt dem Buch „Microwave Engineering“ von David M. Pozar [4, Kapitel 11], in dem der interessierte Leser auch die hier ausgelassenen Herleitungen nachlesen kann.

## 2 Übersicht Entwurfsmethoden

Je nach Ziel des Entwurfes werden verschiedene Lösungsansätze gewählt. In dieser Arbeit werden folgende Methoden beschrieben:

Entwurfsziel	Kapitel	Vorteil	Nachteil
maximale Verstärkung	6	maximale Verstärkung wird erreicht	nur geringe Bandbreite
festgelegte Verstärkung	7	grössere Bandbreite als bei maximaler Verstärkung erreichbar, Verstärkung ist vorgebar	nicht maximale Verstärkung, grösseres Rauschen
Berücksichtigung der Rauschzahl	8	Abgleich zwischen Verstärkung und Systemrauschen möglich	nicht maximale Verstärkung erreichbar

Im Kapitel 9 werden kurz Methoden für den Entwurf breitbandiger Verstärker aufgezählt. Diese ermöglichen eine gute Verstärkung über eine grössere Bandbreite, was jedoch mit einer höheren Komplexität bezahlt wird. Manueller Entwurf ist nur eingeschränkt möglich oder geht mit computergestützter Optimierung einher.

## 3 Verstärkerbeschreibung

### 3.1 Blockschaltbild

Eine Verstärkerschaltung kann zerlegt werden in den Verstärkerbaustein, Anpassnetzwerk am Eingang und Anpassnetzwerk am Ausgang. Die Anpassnetzwerke transformieren die Eingangs- und Ausgangsimpedanz des Transistors auf die Leitungsimpedanz  $Z_0$ . Der Aufbau ist in Bild 1 dargestellt.

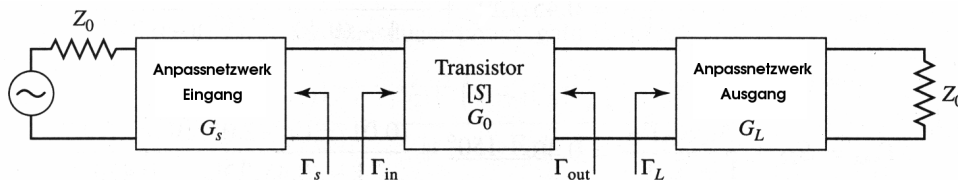


Bild 1 Aufbau Verstärker [4, S. 610]

Heutzutage werden als Verstärker hauptsächlich Bipolar- oder FET-Transistoren verwendet, die bis zu Frequenzen von 100 GHz einsetzbar sind. Sie sind stabil, preiswert und zuverlässig und haben deshalb in fast allen Einsatzgebieten die früher gebräuchlichen Röhrenverstärker verdrängt.

Um Verwirrungen auszuschliessen, wird deshalb im Folgenden der Begriff „Transistor“ bzw. „Verstärkungstransistor“ verwendet, wenn nur von dem Verstärkerbaustein die Rede ist. „Verstärker“ schliesst die Anpassnetzwerke mit ein.

Ein Beispiel für einen vollständig dimensionierten Verstärker ist in Bild 2 abgebildet. Als Anpassnetzwerke wurden Stichleitungen verwendet, welche in der industriellen Fertigung bevorzugt eingesetzt werden.

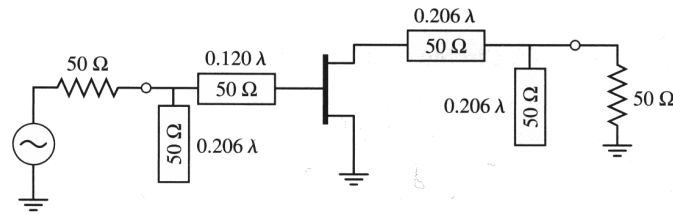


Bild 2 Beispiel für einen Verstärker [4, S. 623]

### 3.2 Parametrisierung

In dieser Arbeit werden die S-Parameter zur Beschreibung des Verstärkungstransistors verwendet, andere Beschreibungsarten können in S-Parameter umgerechnet werden. Gegenüber der Beschreibung mit einem Transistor-Ersatzschaltbild sind die S-Parameter einfacher zu handhaben und liefern trotzdem ein korrektes Ergebnis. Es ist jedoch zu beachten, dass die S-Parameter frequenzabhängig sind. Die Abhängigkeit ist im Allgemeinen klein, weshalb sich dies erst bei der Betrachtung eines sehr grossen Frequenzbereiches negativ bemerkbar macht.

### 3.3 unilateraler Verstärker

In den meisten praktischen Fällen ist  $|S_{12}|$  des Transistors Null oder so klein, dass es in der Berechnung vernachlässigt werden kann. Man spricht in diesem Fall von einem *unilateralen* oder auch *neutralen Verstärker*.

Der Entwurf wird dadurch stark vereinfacht, auch sind viele Methoden nur für unilaterale Verstärker anwendbar.

Der Fehler der Verstärkung  $G_T/G_{TU}$  kann abgeschätzt werden durch

$$\frac{1}{(1+U)^2} < \frac{G_T}{G_{TU}} < \frac{1}{(1-U)^2} \quad (1)$$

mit der unilateralen Güte

$$U = \frac{|S_{11}||S_{12}||S_{21}||S_{22}|}{(1-|S_{11}|^2)(1-|S_{22}|^2)} \quad (2)$$

Üblicherweise ist eine Behandlung als unilateraler Verstärker möglich, wenn der Fehler  $G_T/G_{TU}$  nicht mehr als 0.5 dB beträgt.

## 4 Verstärkung

Es existieren verschiedene Definitionen der Verstärkung  $G$ , die sich in der Anpassung des Verstärkungstransistors an Quelle und Last unterscheiden.

In dieser Arbeit wird das *transducer power gain*  $G_T$  verwendet, welches das Verhältnis zwischen der verfügbaren Energie an der Last und der von der Quelle zur Verfügung gestellten Energie beschreibt. Da  $G_T$  die Anpasszustände am Eingang wie auch am Ausgang des Transistors einbezieht, handelt es sich um eine allgemeingültige Beschreibung der Verstärkung.

Die Verstärkung der gesamten Schaltung ergibt sich nach Bild 1 auf Seite 4 zu

$$G_T = G_S G_0 G_L \quad (3)$$

mit den Teilverstärkungen

$$G_S = \frac{1 - |\Gamma_S|^2}{|1 - \Gamma_{in} \Gamma_S|^2} \quad (4)$$

$$G_0 = |S_{21}|^2 \quad (5)$$

$$G_L = \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22} \Gamma_L|^2} \quad (6)$$

Für den unilateralen Verstärker vereinfacht sich die Verstärkung des Eingangsnetzwerkes zu

$$G_S = \frac{1 - |\Gamma_S|^2}{|1 - S_{11} \Gamma_S|^2} \quad (7)$$

In unilateralem Fall wird die Gesamtverstärkung mit  $G_{TU}$  bezeichnet.

## 5 Stabilität

### 5.1 Definition

Die in Bild 1 dargestellte Schaltung kann anfangen zu schwingen, wenn  $|\Gamma_{in}| \geq 1$  oder  $|\Gamma_{out}| \geq 1$  ist.

Somit sind zwei Arten von Stabilität zu unterscheiden:

**bedingungslose Stabilität** Es gelten  $|\Gamma_{in}| < 1$  und  $|\Gamma_{out}| < 1$  für jede mögliche passive Last- sowie Quellenimpedanz

**bedingte Stabilität**  $|\Gamma_{in}| < 1$  und  $|\Gamma_{out}| < 1$  ist nur für einen bestimmten Bereich von passiven Last- und Quellenimpedanzen gegeben

Dabei ist zu beachten, dass die Stabilitätsbedingungen abhängig von der Frequenz sind, weshalb die Stabilitätsuntersuchung für den gesamten Einsatzbereich durchzuführen ist. Wenn bei einem Entwurf nicht die maximale Verstärkung benötigt wird, kann ein nur bedingt stabiler Verstärker üblicherweise mit Hilfe ohmscher Last bedingungslos stabil gemacht werden [3].

Die folgenden klassischen Methoden der Stabilitätsanalyse sind nur für rückkopplungsfreie Anpassnetzwerke aus passiven Bauelementen anwendbar.

## 5.2 mathematischer Test

Ein Bauelement ist bedingungslos stabil, wenn gilt

$$\mu = \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{22} - S_{11}^* \Delta| + |S_{12} S_{21}|} > 1 \quad (8)$$

mit

$$\Delta = S_{11} S_{22} - S_{12} S_{21} \quad (9)$$

Auch ist ein Bauelement desto stabiler, je grösser  $\mu$  ist.

## 5.3 Test im Smith-Diagramm

Die Stabilitätsuntersuchung im Smith-Diagramm wird für den Eingang und Ausgang getrennt durchgeführt. Die graphische Lösung ermöglicht eine Aussage bei bedingt stabilen Systemen, welche Eingangs- und Ausgangsbelastung des Vierpoles zulässig ist.

Dafür werden in den Smith-Diagrammen für  $\Gamma_S$  (Eingang) und  $\Gamma_L$  (Ausgang) die Stabilitätskreise mit den Mittelpunkten  $C$  und Radien  $R$

$$C_S = \frac{(S_{11} - S_{22}^* \Delta)^*}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2} \quad (10)$$

$$R_S = \left| \frac{S_{12} S_{21}}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2} \right| \quad (11)$$

$$C_L = \frac{(S_{22} - S_{11}^* \Delta)^*}{|S_{22}|^2 - |\Delta|^2} \quad (12)$$

$$R_L = \left| \frac{S_{12} S_{21}}{|S_{22}|^2 - |\Delta|^2} \right| \quad (13)$$

gezeichnet. Die Hilfsvariable  $\Delta$  ist in Formel 9 definiert.

Die Stabilitätskreise repräsentieren  $|\Gamma_{in}| = 1$  bzw.  $|\Gamma_{out}| = 1$ .

Es muss nun untersucht werden, ob das Innere oder Äussere des Stabilitätskreises das stabile Gebiet repräsentiert. Dies ist mit Hilfe der Tabellen 1 und 2 möglich.

Zuerst wird bestimmt, ob der Mittelpunkt des Smith-Diagrammes stabil ist oder nicht. Davon ausgehend kann aus der Lage des Stabilitätskreises geschlussfolgert werden, welches Gebiet stabil ist. Das komplementäre Gebiet ist demnach instabil.

*Tabelle 1 Stabilität des Mittelpunktes im Smith-Diagramm*

für $\Gamma_S$		für $\Gamma_L$	
$ S_{22}  < 1$	stabil	$ S_{11}  < 1$	stabil
$ S_{22}  \geq 1$	nicht stabil	$ S_{11}  \geq 1$	nicht stabil

*Tabelle 2 Stabilität der Fläche des Stabilitätskreises*

Zentrum des Smith-Diagramms	Stabilitätskreis umschliesst Zentrum	Stabilitätskreis umschliesst Zentrum nicht
stabil	stabil	nicht stabil
nicht stabil	nicht stabil	stabil

Für bedingungslose Stabilität müssen die Smith-Diagramme für Ein- und Ausgang vollständig in dem stabilen Bereich liegen.

Für bedingte Stabilität ist der Verstärkerentwurf so durchzuführen, dass  $\Gamma_S$  und  $\Gamma_L$  in stabilen Regionen liegen.

## 6 Verstärkerentwurf für maximale Verstärkung

Die grundlegende Funktion eines Verstärkers ist – wie der Name schon sagt – die Signalverstärkung. Am Anfang steht der Wunsch nach maximaler Verstärkung, der in diesem Kapitel erfüllt werden soll. Weitere Anforderungen werden nicht gestellt. Im Ergebnis ist der nach dieser Methode entworfene Verstärker sehr schmalbandig bei niedrigem Systemrauschen.

Vorbereitend ist die in Kapitel 5 beschriebene Stabilitätsanalyse durchzuführen. Wenn nur bedingte Stabilität vorliegt, kann unter Umständen der Entwurf auf maximale Verstärkung nicht durchgeführt werden.

Das Entwurfsziel wird erreicht, wenn der Transistor am Ein- und Ausgang konjugiert komplex angepasst ist. Es gilt

$$\Gamma_{in} = \Gamma_S^* \quad \text{und} \quad \Gamma_{out} = \Gamma_L^*$$

Dies kann erreicht werden durch die Wahl von

$$\Gamma_S = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4|C_1|^2}}{2C_1} \quad (14)$$

und

$$\Gamma_L = \frac{B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2C_2} \quad (15)$$

mit den Hilfsvariablen

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} \quad (16)$$

$$B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2 \quad (16)$$

$$B_2 = 1 + |S_{22}|^2 - |S_{11}|^2 - |\Delta|^2 \quad (17)$$

$$C_1 = S_{11} - S_{22}^* \Delta \quad (18)$$

$$C_2 = S_{22} - S_{11}^* \Delta \quad (19)$$

$$(20)$$

Die Gleichungen 14 und 15 besitzen jeweils zwei gültige Lösungen. Beide sind gleichwertig, weshalb man die praktisch besser realisierbare Lösung auswählen kann. Bei Anpassnetzwerken aus Sticheleitungen werden im Allgemeinen kürzere Leitungslängen bevorzugt.

Nach Kapitel 4 ergibt sich die maximale Verstärkung als

$$G_{T_{max}} = \frac{1}{1 - |\Gamma_S|^2} |S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_L|^2} \quad (21)$$

Die Berechnung vereinfacht sich im unilateralen Fall zu

$$\Gamma_S = S_{11}^* \quad (22)$$

$$\Gamma_L = S_{22}^* \quad (23)$$

$$G_{TU_{max}} = \frac{1}{1 - |S_{11}|^2} |S_{21}|^2 \frac{1}{1 - |S_{22}|^2} \quad (24)$$

Ausgehend von  $\Gamma_S$  und  $\Gamma_L$  können nun die Anpassnetzwerke nach bekannten Methoden entworfen werden.

Eine Vorgehensweise mit Hilfe des Smith-Diagramms ist in [4, S. 621] aufgeführt.

## 7 Verstärkerentwurf für bestimmte Verstärkung

Die Bandbreite eines Maximalverstärkers ist sehr klein. Durch ein gezieltes Abweichen vom angepassten Zustand kann die Bandbreite auf Kosten der erreichbaren Verstärkung erhöht werden. Dabei steigt jedoch auch die Rauschzahl des Verstärkers.

Das Ziel der hier vorgestellte grafischen Entwurfsmethode ist es, einen vorgegebenen Verstärkungsfaktor zu realisieren. Diese ist nur für unilaterale Verstärker anwendbar, eine allgemeine Methode wird in [1], [3] und [5] vorgestellt.

Dem Entwurf geht wieder eine Stabilitätsanalyse voraus, dessen Ergebnis bei bedingter Stabilität zu berücksichtigen ist.

Zuerst ist die mögliche Maximalverstärkung aller Teile des Verstärkers zu bestimmen

$$G_{S_{max}} = \frac{1}{1 - |S_{11}|^2} \quad (25)$$

$$G_0 = |S_{21}|^2 \quad (26)$$

$$G_{L_{max}} = \frac{1}{1 - |S_{22}|^2} \quad (27)$$

Die gewünschte Verstärkung muss kleiner als die maximale Gesamtverstärkung

$$G_{TU_{max}} = G_{S_{max}} G_0 G_{L_{max}} \quad (28)$$

sein.  $G_0$  des unangepassten Transistors ist konstant, weshalb die zusätzlich geforderte Verstärkung durch die Anpassnetzwerke am Eingang ( $G_S$ ) und Ausgang ( $G_L$ ) erbracht

werden muss. Diese werden in zwei voneinander unabhängigen Smith-Diagrammen für  $\Gamma_S$  und  $\Gamma_L$  bestimmt.

Für das Eingangs- und Ausgangsnetzwerk wird der normierte Verstärkungsfaktor bestimmt

$$g_S = \frac{G_S}{G_{S_{max}}} \quad (29)$$

$$g_L = \frac{G_L}{G_{L_{max}}} \quad (30)$$

mit

$$0 \leq g_S \leq 1 \quad \text{und} \quad 0 \leq g_L \leq 1$$

Für festen Werte von  $g_S$  können Kreise im Smith-Diagramm für  $\Gamma_S$  mit den Mittelpunkten  $C_S$  und Radien  $R_S$

$$C_S = \frac{g_S S_{11}^*}{1 - (1 - g_S) |S_{11}|^2} \quad (31)$$

$$R_S = \frac{\sqrt{1 - g_S} (1 - |S_{11}|^2)}{1 - (1 - g_S) |S_{11}|^2} \quad (32)$$

gezeichnet werden. Für  $g_L$  können nach gleichem Vorgehen Kreise mit

$$C_L = \frac{g_L S_{22}^*}{1 - (1 - g_L) |S_{22}|^2} \quad (33)$$

$$R_L = \frac{\sqrt{1 - g_L} (1 - |S_{22}|^2)}{1 - (1 - g_L) |S_{22}|^2} \quad (34)$$

im Smith-Diagramm für  $\Gamma_L$  eingetragen werden. Jeder Kreis repräsentiert eine konstante Verstärkung. Die Kreiszentren liegen auf einer Geraden, die durch den Punkt der maximalen Verstärkung und den Mittelpunkt des Smith-Diagrammes geht. Durch Variation der normierten Verstärkungen entstehen zwei Kreisschaaren, was beispielhaft in Bild 3 auf Seite 12 dargestellt ist.

Aus den Smith-Diagrammen sind nun  $\Gamma_S$  und  $\Gamma_L$  so auf den Verstärkungskreisen liegend zu wählen, dass die gewünschte Gesamtverstärkung  $G_{TU}$  erreicht wird. Die Lösung ist nicht eindeutig. Um die Fehlanpassung zu minimieren und die Bandbreite des Verstärkers zu maximieren, sollten  $\Gamma_S$  und  $\Gamma_L$  möglichst nahe am Mittelpunkt der Smith-Diagramme gewählt werden.

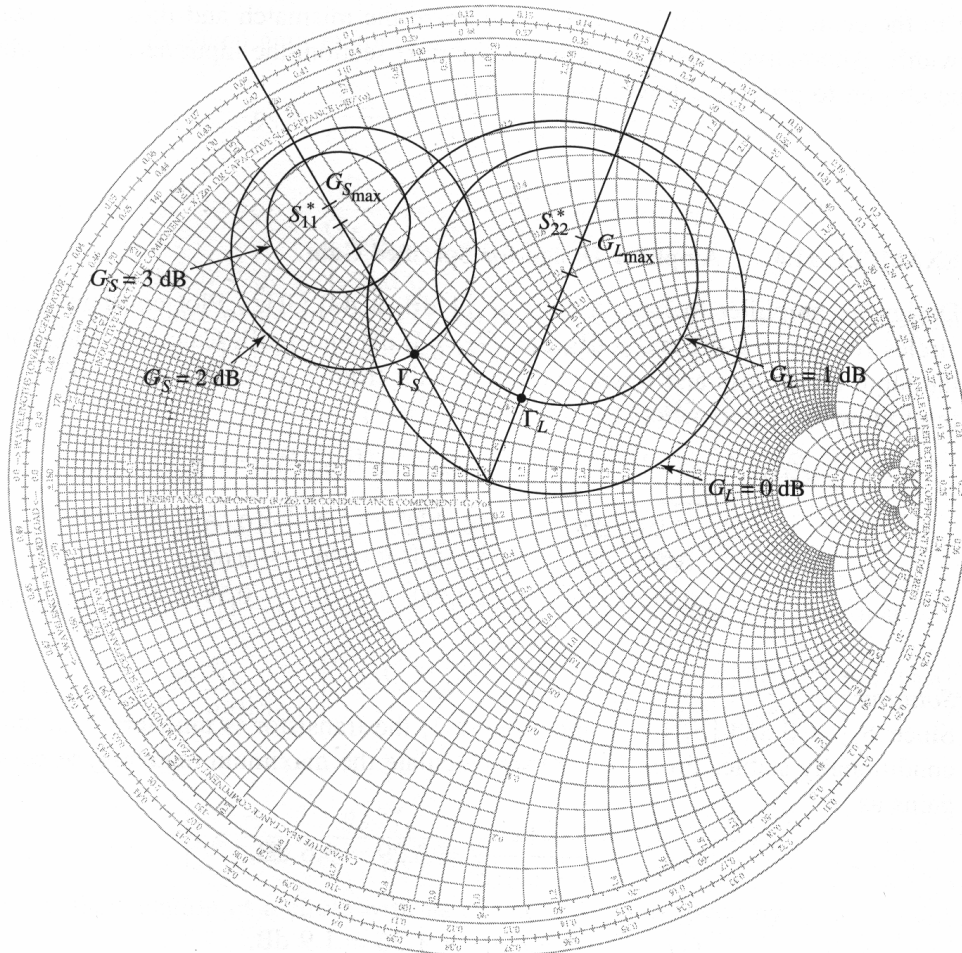


Bild 3 Beispiel für Verstärkerkreise in einem kombinierten Smith-Diagramm für Ein- und Ausgangsnetzwerk [4, S. 626]

## 8 Verstärkerentwurf unter Berücksichtigung der Rauschzahl

Im vorherigem Kapitel wurde der Verstärker auf eine bestimmte Verstärkung hin entworfen. Nun soll neben der Verstärkung auch die Rauschzahl des Systemes mit in den Entwurf einbezogen werden.

Dazu werden im Smith-Diagramm für  $\Gamma_S$  die Verstärkungskreise  $g_S$  mit Kreisen konstanter Rauschzahl überlagert.  $\Gamma_L$  kann davon unabhängig festgelegt werden, z. B. wie in Kapitel 6 beschrieben, um die maximale Verstärkung zu erreichen.

Dem Entwurf geht wie gewohnt eine Stabilitätsanalyse voraus, dessen Ergebnis bei bedingter Stabilität berücksichtigt werden muss.

Im Smith-Diagramm werden Gebiete konstanter Rauschzahl  $F$  durch Kreise repräsentiert. Bei vorgegebenen  $F$  bestimmen sich Mittelpunkt  $C_F$  und Radius  $R_F$  zu

$$C_F = \frac{\Gamma_{opt}}{N+1} \quad (35)$$

$$R_F = \frac{\sqrt{N(N+1-|\Gamma_{opt}|^2)}}{N+1} \quad (36)$$

mit dem Rauschzahlparameter  $N$

$$N = \frac{|\Gamma_S - \Gamma_{opt}|^2}{1 - |\Gamma_S|^2} = \frac{F - F_{min}}{4R_N/Z_0} |1 + \Gamma_{opt}|^2 \quad (37)$$

Die in der Berechnung auftretenden und in Tabelle 3 beschriebenen Rauschparameter sind charakteristisch für jeden Verstärkungstransistor und sind üblicherweise vom Hersteller gegeben. Minimale Rauschzahl wird durch die Wahl von  $\Gamma_S = \Gamma_{opt}$  erreicht.

*Tabelle 3 charakteristische Rauschparameter*

$F_{min}$ :	minimale Rauschzahl
$\Gamma_{opt}$ :	optimaler Reflektionskoeffizient
$R_N$ :	equivalenter Rauschwiderstand

In das Smith-Diagramm können nun Kreise für Rauschzahlen und Verstärkungen des Eingangnetzwerkes eingezeichnet werden. Wenn es sich um einen unilateralen Verstärker handelt, kann für die Verstärkung das in Kapitel 7 beschriebene Verfahren verwendet werden.

Um mit dem Eingangsnetzwerk die Forderungen an Rauschzahl und Verstärkung zu erfüllen, muss ein  $\Gamma_S$  aus den Schnittpunkten zwischen Rausch- und Verstärkerkreis gewählt werden. Üblicherweise wird dabei die grösste Verstärkung gewählt, dessen Kreis gerade noch den Rauschzahlkreis berührt.

Eine graphische Optimierung zwischen Gesamtverstärkung und Rauschzahl ist durch Variation der beiden Parameter möglich.

## 9 Breitbandverstärker

### 9.1 Übersicht

Breitbandverstärker erzielen eine festgelegte Verstärkung über einen grösseren Frequenzbereich hinweg. Diese hohe Bandbreite kann jedoch nur auf Kosten der Verstärkung, Rauschzahl, Komplexität oder ähnlicher Faktoren erreicht werden.

Kapitel 9.2 listet geläufige Realisierungsvarianten von Breitbandverstärkern auf, ohne auf die Entwurfsmethoden einzugehen. Zur Vertiefung beschreibt Kapitel 9.3 exemplarisch den symmetrischen Verstärker.

### 9.2 Methoden zur Bandbreitensteigerung

**Kompensation über die Anpassnetzwerke**  $|S_{21}|$  ist frequenzabhängig, was über die Anpassnetzwerke am Ein- und Ausgang des Transistors kompensiert werden kann. Gewöhnlich führt dieses Vorgehen jedoch zu einem unangepassten Zustand.

**Anpassung mit ohmschen Widerständen** Mit Anpassnetzwerken aus ohmschen Widerständen kann eine hohe Anpassung erreicht werden, was mit höherem Rauschen und geringerer Verstärkung bezahlt werden muss.

**Gegenkopplung** Mit Gegenkopplung kann der Verlauf der Verstärkung über mehr als eine Dekade geglättet und die Stabilität erhöht werden. Der Nachteil ist die geringere Verstärkung und das höhere Rauschen.

**symmetrische Verstärker** Zwei Verstärker werden mit  $90^\circ$ -Richkopplern am Ein- und Ausgang betrieben, um gute Anpassung über eine Oktave zu erreichen. Die Verstärkung unterscheidet sich jedoch nicht von einem einzelnen Verstärker.

**verteilte Verstärker** Mehrere Transistoren werden kaskadiert an einer Übertragungsleitung betrieben. Es wird über eine grössere Bandbreite eine gute Verstärkung mit kleinem Rauschen erreicht. Nachteilig ist die Grösse der Schaltung.

### 9.3 Symmetrischer Verstärker

Symmetrische Verstärker bestehen aus zwei gleichen Verstärkerstufen, die am Ein- und Ausgang mit  $90^\circ$ -Richkopplern verbunden sind. Der prinzipielle Aufbau ist in Bild 4 zu sehen.

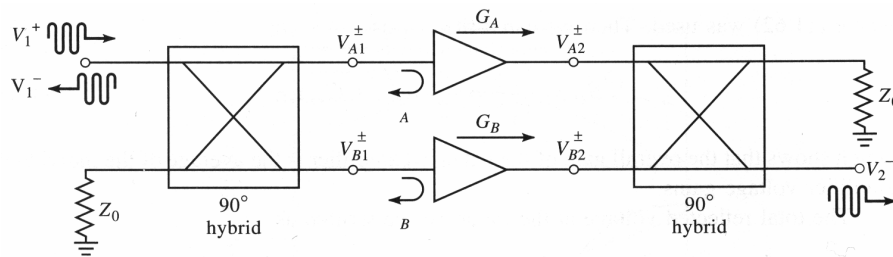


Bild 4 Aufbau eines symmetrischen Verstärkers [4, S. 633]

Durch die Phasenverschiebung der Richkoppler werden Reflektionen der Verstärkungs-transistoren ausgelöscht. Damit verbessert sich die Anpassung am Ein- und Ausgang.

Die Bandbreite des symmetrischen Verstärkers ist identisch mit der Bandbreite der einzelnen Verstärkerstufen, jedoch hat diese Anordnung eine Reihe von Vorteilen:

- Die einzelnen Verstärkerstufen können auf Bandbreite oder Rauschzahl hin optimiert werden, ohne die Anpassung am Ein- und Ausgang zu berücksichtigen
- Durch die Auslöschung von Reflektionen wird die Anpassung und Stabilität verbessert
- Die Bandbreite kann mehr als eine Oktave betragen und wird hauptsächlich durch die Bandbreite der Richkoppler begrenzt

Eine weitere Verbesserung der Eigenschaften ist durch computergestützte Optimierung möglich.

## 10 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine Einführung in den Verstärkerentwurf für hochfrequente Signale gegeben. Nach der Definition der Verstärkung und Stabilität wurden Algorithmen für den Entwurf nach maximaler Verstärkung, spezifischer Verstärkung und unter Berücksichtigung der Rauschzahl dargelegt. Abschliessend erfolgte eine Übersicht von Entwurfsmethoden zur Steigerung der verfügbaren Bandbreite.

Die vorgestellten Algorithmen sind in sich abgeschlossen und können sofort genutzt werden. Für den vollständigen Verstärkerentwurf bis zum tatsächlichen Aufbau der Schaltung sind jedoch weitere Aspekte zu berücksichtigen, auf die in dieser Arbeit nicht eingegangen wurde. Eine Auswahl davon sind:

- Die Wahl eines bestimmten Verstärkungstransistors unter der Vielzahl an verfügbaren Bauelementen geht den hier beschriebenen Entwurfsprozessen voraus.
- Störeinflüsse wie Temperaturabhängigkeit der Bauelemente oder parasitäre Größen wurden als vernachlässigbar angenommen.
- Neben dem HF-Entwurf ist eine Arbeitspunkteinstellung des Verstärkers durchzuführen. Die Wahl des Arbeitspunktes sowie die Art der Beschaltung hat Einfluss auf das Gesamtverhalten der Schaltung.

Auch wurden nur Kleinsignalverstärker betrachtet, bei denen sich der Transistor wie ein lineares Bauelement verhält und dessen S-Parameter eindeutig sind. Für Leistungsverstärker trifft dies nicht mehr zu, was den Entwurfsprozess erschwert und andere Vorgehensweisen erfordert.

## Literatur

- [1] Bahl, I.; Bhartia, P.: *Microwave Solid-State Circuit Design*. New York: Wiley Interscience, 1981
- [2] Golio, Mike u. a.: *The RF and microwave handbook*. CRC Press LLC, 2001
- [3] Gonzalez, G.: *Design of Amplifiers and Oscillators by the S-Parameter Method*. New York: Prentice-Hall, 1984
- [4] Pozar, David M.: *Microwave Engineering*. 2. Aufl., John Wiley & Sons Inc., 1998
- [5] Vendelin, G. D.; Pavio, A. M.; Rohde, U. L.: *Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques*. New York: Wiley, 1990