

Optimierung einer Transistor-Leistungsstufe mit der Simulationssoftware RFSim99

Igor Konovalov, DF4AE / UT5UAK

Simulationssoftware, wie zum Beispiel das Freeware Programm RFSim99 [1,2], bietet einem Funkamateurliebhaber die Möglichkeit relativ schnell und fast ohne Lötversuche optimale Transistorschaltungen zu entwerfen und zu bauen. Dazu bedarf er eigentlich nur die Daten vom Transistor in Form von sogenannten S-Parameter, die für die neuere Transistortypen im Internet bzw. im entsprechenden Datenblatt zu finden sind. Während der Optimierung versucht man gleichzeitig sowohl den Eingang, als auch den Ausgang des Transistors mit reaktiven Kreise perfekt an den vorgegebenen Widerstand (meist 50 Ohm) anzupassen. Die Anpassungen am Eingang und am Ausgang sind gekoppelt, so dass eine Änderung der Eingangsanpassung die Ausgangsanpassung beeinflusst, und umgekehrt. In der Software RFSim99 gibt es eine Möglichkeit die Anpassung von beiden Seiten automatisch vorzunehmen (simultaneous conjugate). Wenn das klappt, ist meist somit der perfekte Verstärker entworfen, doch gerade bei Leistungstransistoren ist die perfekte Anpassung gleichzeitig am Ausgang und am Eingang mit reaktiven Bauelementen oft nicht möglich. Wenn man trotzdem versucht den Eingang und den Ausgang nacheinander anzupassen, führt es zur Selbsterregung des Verstärkers. In diesem Beitrag wird die Entwurfsstrategie beschrieben, mit der man folgende Ziele erreichen kann: 1) Entwurf einer stabilen Schaltung ohne Selbsterregung im praktischen Betrieb 2) Dabei eine perfekte Anpassung am Ein- und Ausgang 3) Die Verstärkung ist maximal für den gegebenen Transistortyp.

Eine Selbsterregung des Verstärkers entsteht immer wegen einer Rückkopplung, die nicht nur im Außenkreis, sondern auch im Inneren des Transistors existiert. Bei Leistungstransistoren ist die innere Rückkopplung besonders groß. RFSim99 zeigt sowohl die Verstärkung der Schaltung als S_{21} an, als auch die Rückkopplung S_{12} an. Wenn die Summe in dB der Verstärkung und der Rückkopplung (im weiteren „Schleifenverstärkung“ genannt) größer 0dB ist, wird ein beliebig kleines Eingangssignal so stark verstärkt, dass das Ausgangssignal durch die Rückkopplung zum Eingang zur Selbsterregung führen kann. Experimente haben gezeigt, dass ein guter Verstärker eine Schleifenverstärkung von etwa $S_{21}+S_{12}=-3\text{dB}$ haben muss. Die -3dB Stabilitätsreserve ist notwendig um eine gewisse Fehlanpassung sowie eine schwache externe Rückkopplung trotz Abschirmung zu tolerieren. Wenn die Schleifenverstärkung kleiner als -3dB ist, sinkt die nützliche Verstärkung und der Transistor wird nicht optimal genutzt. Die Schleifenverstärkung kann nicht durch eine reaktive Anpassung, sondern ausschließlich durch eine aktive (Widerstands-) Abschwächung reduziert werden. Dabei ist für die Stabilität der Schaltung gleichgültig, ob der Abschwächer vor dem Transistor oder nach dem Transistor eingebaut wird und wie sein Aufbau ist. Er wirkt dämpfend sowohl auf die Verstärkung der Stufe, als auch auf die Rückkopplung und reduziert somit zweimal die Schleifenverstärkung.

In der Praxis der PA Entwicklung ist es zweckmäßig den Abschwächer am Eingang einzubauen, da er am Ausgang den Wirkungsgrad des Leistungsverstärkers reduzieren würde. Ein Widerstand wird meist entweder parallel zum Eingang, oder in die Reihe geschaltet. Für meinen Leistungsverstärker mit Bipolartransistoren habe ich die parallele Schaltung bevorzugt, obwohl in einem GaAs Feldeffekttransistor-PA eine Reihenschaltung praktischer werden kann. Die Reihenfolge der Schaltungsentwicklung wird am Beispiel des 23cm Leistungsverstärker mit BFG591 dargestellt. Dieser Transistor ist für wenig Geld bei [3] erhältlich und somit bestens für Versuche geeignet. Der Arbeitspunkt 12V 150mA entspricht einer Speiseleistung von 1,8W und erfordert eine entsprechende Kühlung des Kollektoranschlusses. Da der Wirkungsgrad im Klasse A Betrieb etwa 20% beträgt, ist die zu erwartende Ausgangsleistung maximal 0,3 W. Die Entsprechende .s2p Datei mit S-Parameter ist im Internet zu finden [4]. Der Transistor wird zunächst mit 50 Ohm Widerstand beidseitig abgeschlossen. Ein Simulationsversuch bei 1,296 GHz zeigt ohne Anpassung 9,25 dB

Verstärkung und große Fehlanpassungen. Gleichzeitig zeigt er auch -15.28 dB Rückkopplung, also die Schleifenverstärkung ohne Anpassung beträgt bereits beträchtliche -6.03 dB. Es ist sogar möglich bei diesem kleinen Leistungsverstärker die Ein- und Ausgangswiderstände $1,296$ GHz gleichzeitig mit Tiefpassglieder anzupassen, die Verstärkung bei einer perfekten Anpassung beträgt $11,7$ dB (Abb. 1). Ich habe diesen Verstärker tatsächlich nachgebaut und festgestellt, dass er sehr instabil funktioniert und stark zur Selbsterregung bei einer kleinsten Fehlanpassung neigt. Selbst bei einer guten Anpassung kommt es oft je nach Antennenrichtung zur Selbsterregung durch eine externe Rückkopplung. Die Ursache ist dass nach Anpassung nicht nur die Verstärkung, sondern auch die interne Rückkopplung sich vergrößert, die nun $-12,83$ dB beträgt und eine unakzeptable Schleifenverstärkung von -1.13 dB ergibt. Bei dem Aufbau der simulierten Schaltungen ist es oft notwendig Bauteile zu ersetzen. Zum Beispiel findet man eine Spule mit $-96,27$ pH bei keinem Hersteller, denn negative Induktivitätswerte einer Kapazität entsprechen! Mit dem Taschenrechner von RFSim99 kann man berechnen, dass bei 1296 MHz einer solchen Spule entspricht ein Kondensator von rund 157 pF. Das Ersetzen dieser negativen Induktivität mit einem solchen Kondensator ändert tatsächlich nichts im Simulationsergebnis. In einem anderen Fall (hier nicht gezeigt) ersetzt man eine zu kleine Induktivität mit einer passenden Streifenleitung. Da die Streifenleitung im Gegenteil zur perfekten Spule auch eine zusätzliche Kapazität hat, muss auch der Kondensator des entsprechenden Anpassungsnetzwerk etwas getrimmt werden bis die Anpassung

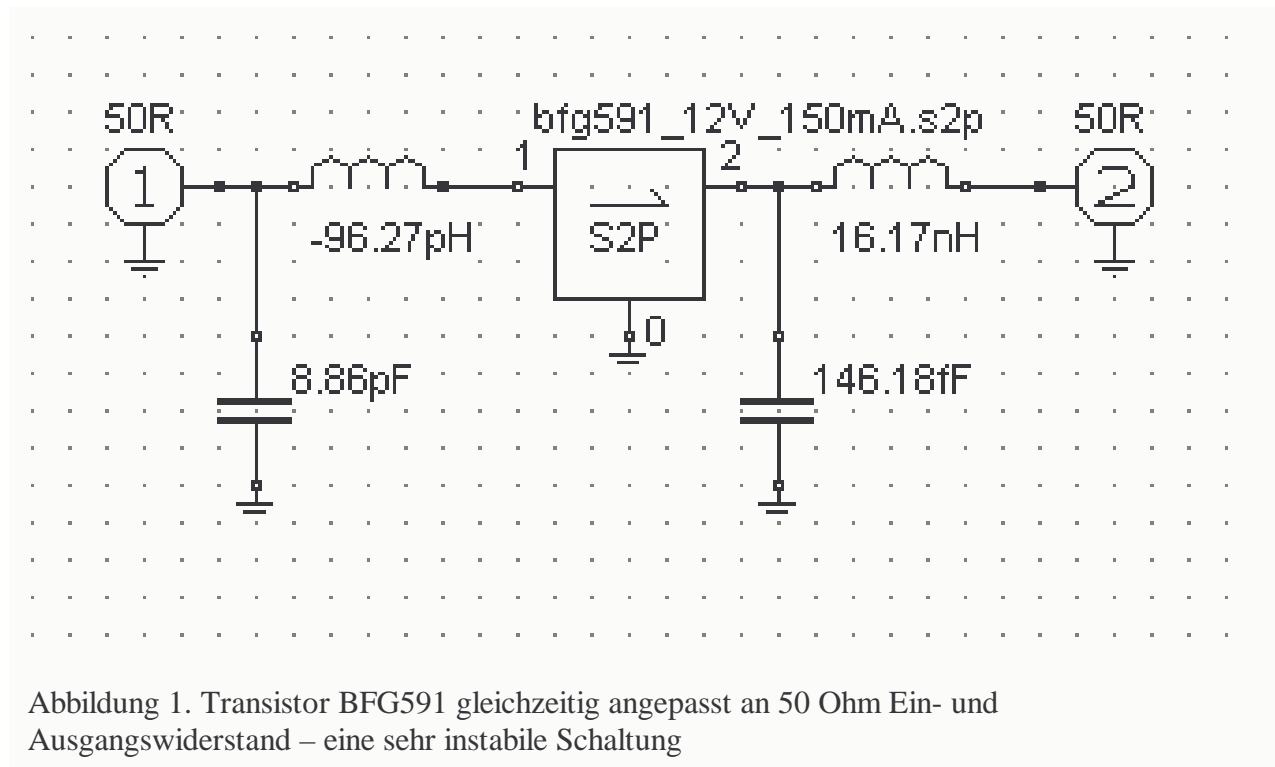


Abbildung 1. Transistor BFG591 gleichzeitig angepasst an 50 Ohm Ein- und Ausgangswiderstand – eine sehr instabile Schaltung

wieder stimmt. Falls ein bedrahteter Kondensator zum Einsatz kommt, führt die Reihen-Induktivität der Anschlüsse nicht etwa zur Verringerung, sondern zur Erhöhung der effektiven Kapazität!

Nun aber zurück zu unserem Verstärker. Die Anpassungsnetzwerke wurden entfernt, ein 100 Ohm Widerstand wurde parallel zum Eingang des Transistors als Abschwächer angeschlossen und die Schaltung automatisch neu angepasst (Abb. 2). Nun sinkt die Verstärkung auf $10,53$ dB, aber auch die Rückkopplung auf $-14,0$ dB, so dass die Schleifenverstärkung $-3,47$ dB beträgt. Ferner noch einige Tipps zur Konstruktion. Man darf bei der Simulation nicht immer die parasitären Eigenschaften von Bauelemente vernachlässigen. Zum Beispiel, wird bei Autor die Kühlung des Kollektoranschlusses mit einem 2×2 cm Kupferblech $1,5$ mm über der Kupferbeschichtung der Leiterplatte realisiert. Das Kühlblech muss sorgfältig abgeschirmt werden um die Strahlungsverluste zu vermeiden, es hat laut RFSim99 $2,4$ pF Kapazität, die bei der

Berechnung der Ausgangsanpassung berücksichtigt werden müssen. Wieder werden die Anpassungsnetzwerke entfernt, die Kapazität des Kühlkörpers gegen Masse am Kollektoranschluss addiert und die Schaltung neu angepasst (Abb. 3). Durch Addieren von perfekten reaktiven Komponenten ändern sich die Parameter des Verstärkers nach erfolgreicher Anpassung an der Nutzfrequenz nicht, nur wird die Anpassung am Ausgang schmalbandiger, so dass die Schaltung sorgfältig abgestimmt werden muss. Durch den entstandenen Pi-Kreis werden die Oberwellen in dieser Schaltung zusätzlich gedämpft. Wegen eines großen Blindstromanteils sollte zur Erhöhung der Güte die Kapazität am Ausgang des Verstärkers aus zwei getrennten Kondensatoren bestehen. Zur Abstimmung des Pi-Kreises besteht die Spule aus einem bedrahteten Abblockungskondensator, bei dem eine Variation der Induktivität durch Veränderung der Länge und der Form von Anschlüsse erreicht werden können.

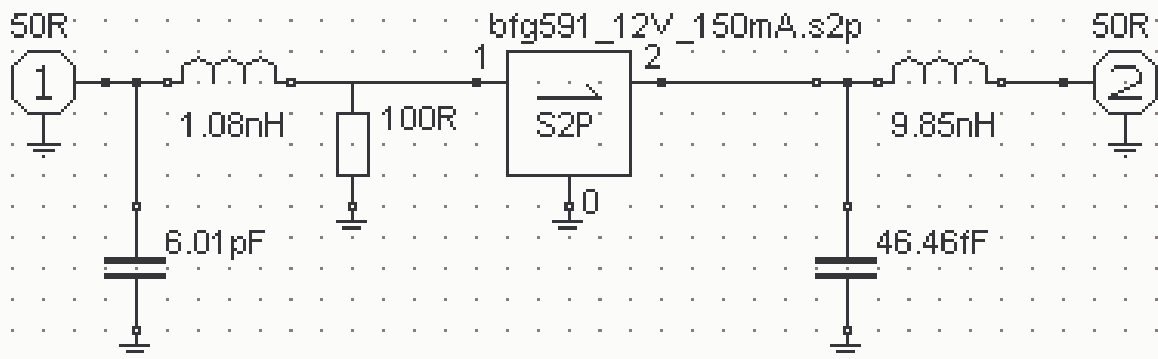


Abbildung 2. Transistor BFG591 mit Abschwächer gleichzeitig angepasst an 50 Ohm Ein- und Ausgangswiderstand – eine wesentlich stabilere, optimale Schaltung

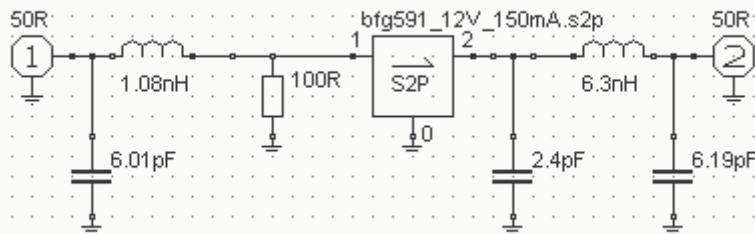


Abbildung 3. Verstärker in Abb. 2 mit Berücksichtigung der Kapazität vom Kühlblech.

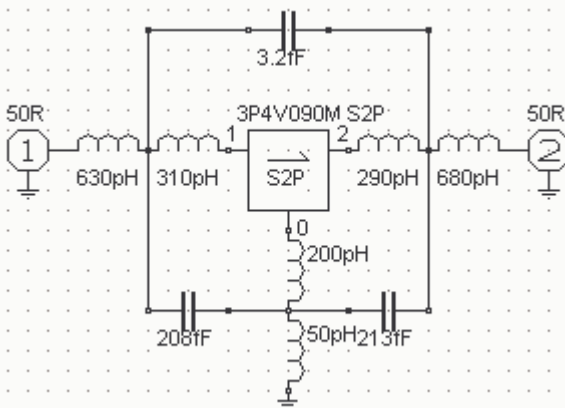


Abbildung 4. Simulation vom Gehäuse des Transistors BFP450.

Die S-Parameter von Bauelementen sind manchmal mit und manchmal ohne Wirkung des Gehäuses angegeben. Falls die Parameter für das Chip ohne Gehäuse verwendet werden müssen (wie es bei BFP420 der Fall ist), dürfen noch Komponenten der Schaltung zur Simulation der Wirkung vom Gehäuse nicht vergessen werden (Abb. 4). Es kommt außerdem nicht selten vor, dass der Leistungsverstärker auf der Arbeitsfrequenz eine ausreichende Stabilität hat, bei wesentlich niedrigeren Frequenz jedoch steigt die Verstärkung und verschlechtert sich die Anpassung, so dass es zur Selbsterregung der Stufe kommt. Daher ist es wichtig die Stabilität in einem breiten Frequenzbereich zu prüfen.

Nachbau der modifizierten Schaltung hat gezeigt dass sie weitgehend stabil ist (Abb. 5). Sie wird von mir regelmäßig im DARC Contest vom portablen QTH eingesetzt. Die Eingangsanpassung (links im Bild) wurde mit SMD Drehkos bestückt, die Induktivität am Eingang

wird mit dem in reihe geschalteten Drehko abgestimmt. Der Transistor ist unterhalb eines Abschirmungsblechs zur Massenfläche gelötet. Der Kühlkörper stützt sich am Transistor sowie in zwei entgegengesetzten Ecken an $1 \times 1 \text{ mm}^2$ Stückchen doppelseitig kaschiertes Leiterplattenmaterials. Die gemessene Verstärkung (etwa 6 dB) bei 0,2W Ausgangsleistung ist jedoch wesentlich geringer als die berechnete, was offensichtlich auf unberücksichtigte Leistungsverluste in der Schaltung zurückzuführen ist.

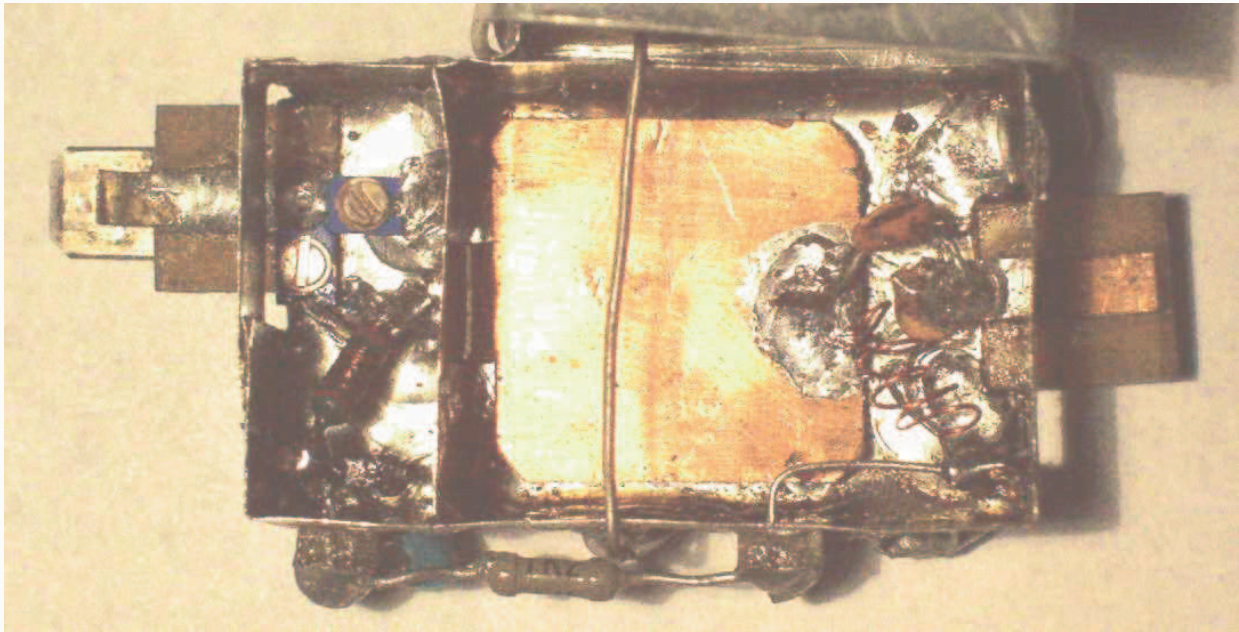


Abbildung 5. Photo des fertigen PA

Es wurde konsequent eine Schaltung entworfen, die eine angemessene Stabilität hat, theoretisch eine perfekte Anpassung dabei ermöglicht und die maximale nutzbare Verstärkung des Transistors realisiert. Eine weitere Vergrößerung der Verstärkung kann mit diesem Transistor im gegebenen Arbeitspunkt *nur* auf Kosten der Stabilität erfolgen, davon ist jedoch abzuraten. Diese Schlussfolgerung gilt unabhängig von der Art der Anpassschaltung (Hoch-, Tiefpass, Pi-Kreis, usw.) und der Art der Abschwächung. Die nutzbare Verstärkung der optimalen Endstufe ist eine Eigenschaft der Transistors, sie liegt um 1,5 dB kleiner als „Maximum stable gain“, spezifiziert für manche Transistoren bei ausgewählten Frequenzen.

[1] z. B. <http://www.janson-soft.de/amateurfunk/rfsim99/rfsim99.htm>

[2] Funkamateure 2001, Nr.1 S.33, Nr. 2 S. 159

[3] RS Components, <http://de.rs-online.com/web/>

[4] z. B. <http://www.mydarc.de/df4ae/s-par.html>