



Gunthard Kraus, DG 8 GB und Andreas Zimmermann, DG 3 SAZ

PUFF-Einsteiger-Projekt: Rauscharmer Vorverstärker für den NOAA-Wettersatellitenbereich 137 MHz, bzw. für das 2-m-Amateurfunkband 145 MHz, Teil 2

Im vorangegangenen Teil 1 wurde entsprechend der Anforderungsliste eine Schaltung mit Hilfe der Mikrowellen-CAD-Software PUFF erarbeitet und simuliert. Im nun folgenden 2. Teil wird zusätzlich die Software "ARRL-RADIO-DESIGNER" als weiteres Hilfsmittel herangezogen.

8. Korrektur zum 1. Teil

Leider haben sich im 1. Teil dieses Artikels zwei kleine Fehler eingeschlichen, die hiermit korrigiert werden sollen:

- In Bild 6 hat der Koppelkondensator beim Ausgangsbandfilter 1 pF; im Text und in der PUFF-Simulation nach Bild 7 wurde jedoch der korrekte Wert von 0,5 pF verwendet.
- Der Verlustwiderstand beim Ausgangskreis

wurde nicht mit 4,33 k Ω in die PUFF-Liste eingesetzt (wie es der Kreisgüte $Q = 50$ entspricht), sondern der zuvor theoretisch abgeschätzte Wert von 2,2 k Ω . In **Bild 14** ist daher die korrekte Simulation dargestellt. Im Stromlaufplan ergeben sich dadurch Änderungen bei den beiden letzten Kondensatoren: statt (10 + 5,6) pF ist (12 + 3,3) pF bzw. statt (33 + 27 + 1) pF sind (33 + 27 + 12) pF erforderlich.

9. Der ARRL RADIO DESIGNER

Wie bereits im ersten Teil dieses Artikels [1] als redaktionelle Anmerkung angekündigt, wurde der zusätzlich Einsatz des "RADIO DESIGNERS" für dieses Projekt vorgesehen.

Das Programm ruhte bei uns bereits längere Zeit im Schrank, da für die Einarbeitung von

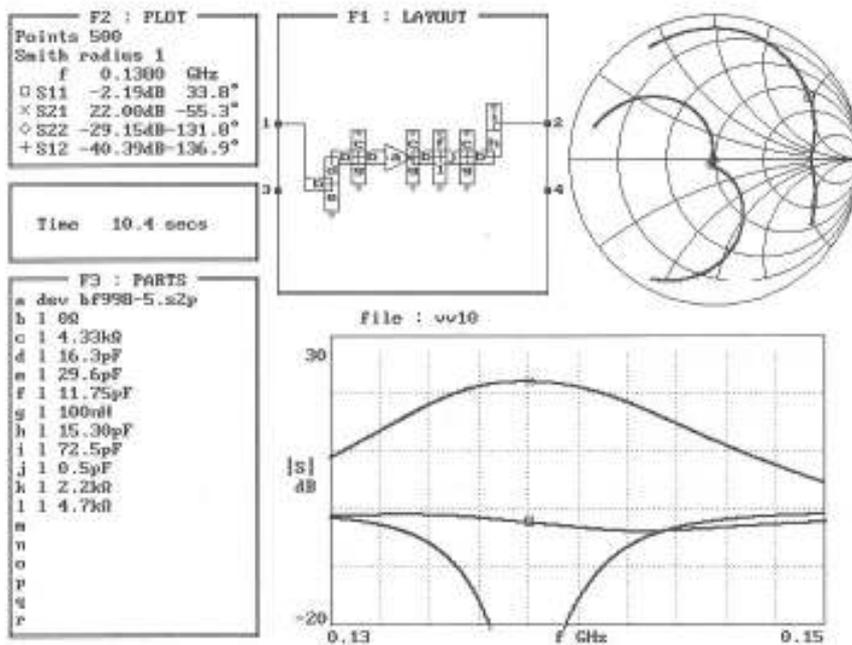


Bild 14:
Wiederholung der
Simulation mit dem
korrekten Verlust-
widerstand von
4,33 k Ω

anderen Anwendern erst mal eine "Frustphase" prophezeit wurde, die aber schließlich erfolgreich überwunden wurde. Es zeigt sich nämlich jetzt, daß die Kombination von ARD und PUFF ein sehr mächtiges Designwerkzeug ergibt, mit dem man neue Wege beschreiten kann und zusätzlich die Erfolgsaussichten beträchtlich erhöht werden.

Die einzelnen Einarbeitungsschritte:

Erster Schritt:

Literaturstudium und Einarbeitung

Die wichtigste Unterlage ist der Artikel von Dr.-Ing. Jochen Jirmann [2], gefolgt von den Zeitschriftenartikeln zum Thema "ARD" [3], die in der Homepage der ARRL abgelegt sind.

Erst nach gründlicher Vorbereitung kommt man mit dem Original-Handbuch des Programmes weiter, da es - wie heute üblich - für Leute gedacht ist, die sich bereits mit dieser Software auskennen.

Zweiter Schritt:

Stromlaufplan mit Knoten-Nummerierung

Auf einem Blatt Papier skizziert man die Wechselstromschaltung der vorliegenden Verstärkerstufe, so wie sie auch für die Eingabe bei PUFF erforderlich ist. Allerdings sind gegenüber der PUFF-Version mehrere Änderungen erforderlich:

Erstens braucht man die Verlustwiderstände der Spulen nicht extra auszurechnen und als getrenntes Bauteil einzutragen - ARD akzeptiert direkt die Eingabe des Gütefaktors Q bei der vom Spulenhersteller angegebenen Meßfrequenz in der Netzliste.

Zweitens muß man ganz exakt alle Schaltungsknoten durchnummerieren. Die Masse ist vom Programm her bereits automatisch als Knoten "Null" vorgegeben. Die Knotennummern beginnen also bei "1".

Drittens stellt z.B. der BF 998 ein "Zweitor" (=Twoport = "TWO") dar, dessen S-Parameter man leider nicht direkt als *.S2P-File übergeben kann, denn das ist beim Radio

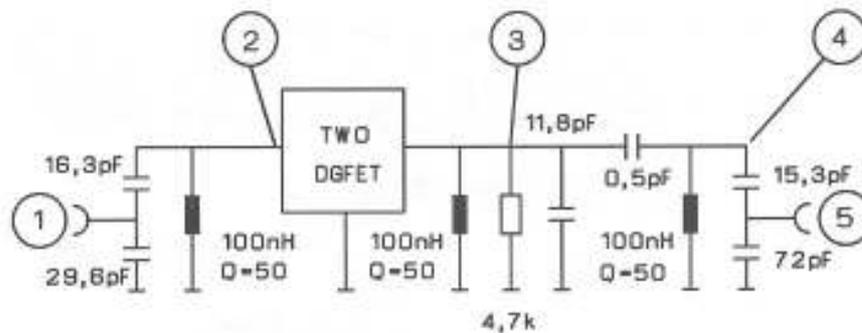


Bild 15:
Wechselstrom-
Schaltbild mit
Knoten-Nummerie-
rung für den "Radio-
Designer (ARD)"

Designer gesperrt. Man behandelt deshalb den Dual-Gate-FET als "TWO DGFET" und zeigt im nächsten Schritt die korrekte Einbindung. **Bild 15** zeigt die nach diesen Gesichtspunkten vorbereitete Schaltung.

Dritter Schritt:

Erstellung des Circuit-Files

In diesem File konzentrieren sich fast alle Informationen, die bei PUFF über die Funktionstasten F1 / F2 / F3 / F4 getrennt erreichbar sind oder eingestellt werden können - und dort wesentlich zur Übersichtlichkeit des PUFF-Bildschirmes beitragen.

Das Circuit-File ist aus einzelnen "Blöcken" aufgebaut, wobei der erste als "Netzlistenblock" die Schaltung beschreibt. Er beginnt mit dem Kommando "BLK" und muß mit dem Wort "END" aufhören.

Danach folgt der "Frequenzbereichsblock für die Simulation", eventuell ein weiterer Block zur Optimierung usw. und schließlich der "DATA-Block", in dem die S-Parameter des eingesetzten FETs stehen.

Der Ablauf:

Man startet das Programm und lädt (nach dem Öffnen des "File"-Menüs und dem Anklicken von "NEW") ein neues Blatt. Hier werden nach der Eröffnung mit "BLK" (= für den "Netzlistenblock") alle Bauteile samt ihren Anschlußknoten aufgelistet.

Die Schaltung soll ein Zweitor darstellen, das über die Knoten 1, 5 und 0 angeschlossen ist

und unter dem Arbeitsnamen "hfw1" archiviert wird. Dazu dient die Anweisung
HFV1:2POR 1 5 0
vor der END-Anweisung.

Im "Frequenzblock" gibt man den Bereich 130 bis 150 MHz ein und sieht eine linear geteilte Frequenzachse mit Schritten von 0,1 MHz vor. Eine logarithmische Teilung mit z.B. 200 Simulationspunkten wäre auch möglich; diese würde man durch das Kommando
ESTP 130MHZ 150MHZ 200
erhalten. Man könnte diese Anweisung sogar zusätzlich aufnehmen und hätte hinterher die Auswahl zwischen linearer und logarithmischer Frequenzachse.

Etwas aufwendiger gestaltet sich schließlich die Bereitstellung der S-Parameter-Datei. Wie bereits erwähnt, wurde der FET als Zweitor mit dem Namen "DGFET" in die Netzliste aufgenommen. Im "DATA-Block" wird mit dem Hinweis "DGFET:S" die *.S2P-Datei des BF998 für den Arbeitspunkt "10 V / 5 mA" abgelegt. Dazu sind vorher folgende Änderungen an der *.S2P-Datei notwendig:

- Alle Kommentare und Hinweise müssen durch ein Sternchen eingeleitet werden;
- Bei allen Frequenzwerten muß die Einheit (hier: Gigahertz = GHz) von Hand nachgetragen werden.
- In die Tabelle werden auch die Rauschparameter aufgenommen (Achtung: hier muß man ggf. in der Hersteller-Homepage in mehreren benachbarten Arbeitspunkt-Datei-

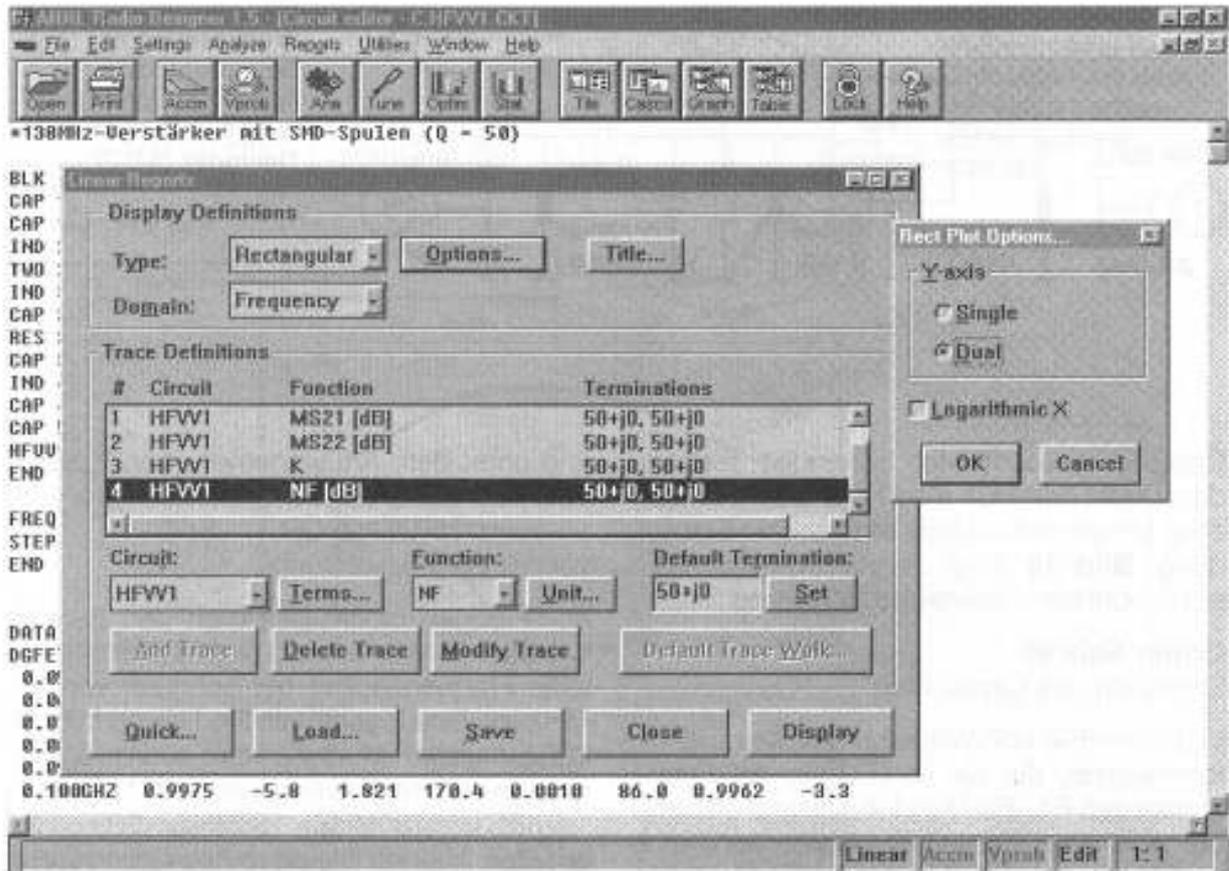


Bild 16: So sollte der ARD-Bildschirm eingestellt sein, bevor man mit "Display" fortfährt

en suchen, da nicht jedes *.S2P-File so komfortabel ausgestattet ist).

Gespeichert wird die Datei, indem man das Menü "File" und "SAVE AS" anklickt und z.B. den Namen: "hfv1.ckt" eingibt.

Und so sieht das Ergebnis aus:

```
*138 MHz-Verstärker mit SMD-Spulen (Q = 50)
BLK
CAP 1 0 C=29.6PF
CAP 1 2 C=16.3PF
IND 2 0 L=100NH Q1=50 F=150MHZ
TWO 2 3 0 DGFET
IND 3 0 L=100NH Q1=50 F=150MHZ
CAP 3 0 C=11.8PF
RES 3 0 R=4.7KOH
CAP 3 4 C=0.5PF
IND 4 0 L=100NH Q1=50 F=150MHZ
CAP 4 5 C=15.3PF
CAP 5 0 C=72PF
HFV1:2POR 1 5 0
END

FREQ
STEP 130MHZ 150MHZ 0.1MHZ
END
```

DATA
DGFET:S

```
* BF998: S-parameters from datasheet Uds=8V, Ug2=4V,
* Id=5mA extrapolated for 50 MHz
*f s11 s21 s12 s22
0.050GHZ 0.9992 -2.9 1.818 175.3 0.0006 89.2 0.9962 -1.7
0.060GHZ 0.9991 -3.5 1.820 174.4 0.0006 94.0 0.9960 -2.0
0.070GHZ 0.9984 -4.1 1.819 173.4 0.0006 92.8 0.9965 -2.3
0.080GHZ 0.9983 -4.7 1.819 172.4 0.0009 83.6 0.9962 -2.6
0.090GHZ 0.9981 -5.3 1.820 171.4 0.0009 85.1 0.9960 -3.0
0.100GHZ 0.9975 -5.8 1.821 170.4 0.0010 86.0 0.9962 -3.3
0.150GHZ 0.9942 -8.8 1.818 165.4 0.0015 84.7 0.9951 -5.0
0.200GHZ 0.9901 -11.7 1.812 160.4 0.0019 82.2 0.9950 -6.7
0.250GHZ 0.9854 -14.6 1.804 155.4 0.0025 79.8 0.9937 -8.3
0.300GHZ 0.9793 -17.4 1.789 150.5 0.0028 78.0 0.9921 -10.0
0.400GHZ 0.9643 -23.1 1.753 140.8 0.0035 70.3 0.9891 -13.2
0.500GHZ 0.9471 -28.5 1.710 131.3 0.0043 68.8 0.9865 -16.5
0.600GHZ 0.9280 -33.9 1.668 122.1 0.0046 64.9 0.9828 -19.7
0.700GHZ 0.9083 -39.3 1.622 113.0 0.0050 65.6 0.9798 -23.0
0.800GHZ 0.8854 -44.5 1.569 104.2 0.0056 61.5 0.9749 -26.2
0.900GHZ 0.8616 -49.6 1.519 95.6 0.0054 57.2 0.9712 -29.3
1.000GHZ 0.8384 -54.5 1.474 87.2 0.0051 57.8 0.9691 -32.4
1.200GHZ 0.7866 -64.7 1.386 70.2 0.0048 65.6 0.9606 -39.1
1.400GHZ 0.7312 -74.4 1.280 53.7 0.0040 68.6 0.9504 -46.0
1.500GHZ 0.7076 -78.7 1.234 46.1 0.0038 84.6 0.9482 -49.3
1.600GHZ 0.6833 -82.8 1.191 38.4 0.0039 93.0 0.9469 -52.6
1.800GHZ 0.6411 -91.4 1.128 23.2 0.0044 116.6 0.9458 -59.3
2.000GHZ 0.5980 -100.7 1.074 7.2 0.0053 133.5 0.9423 -66.8
```

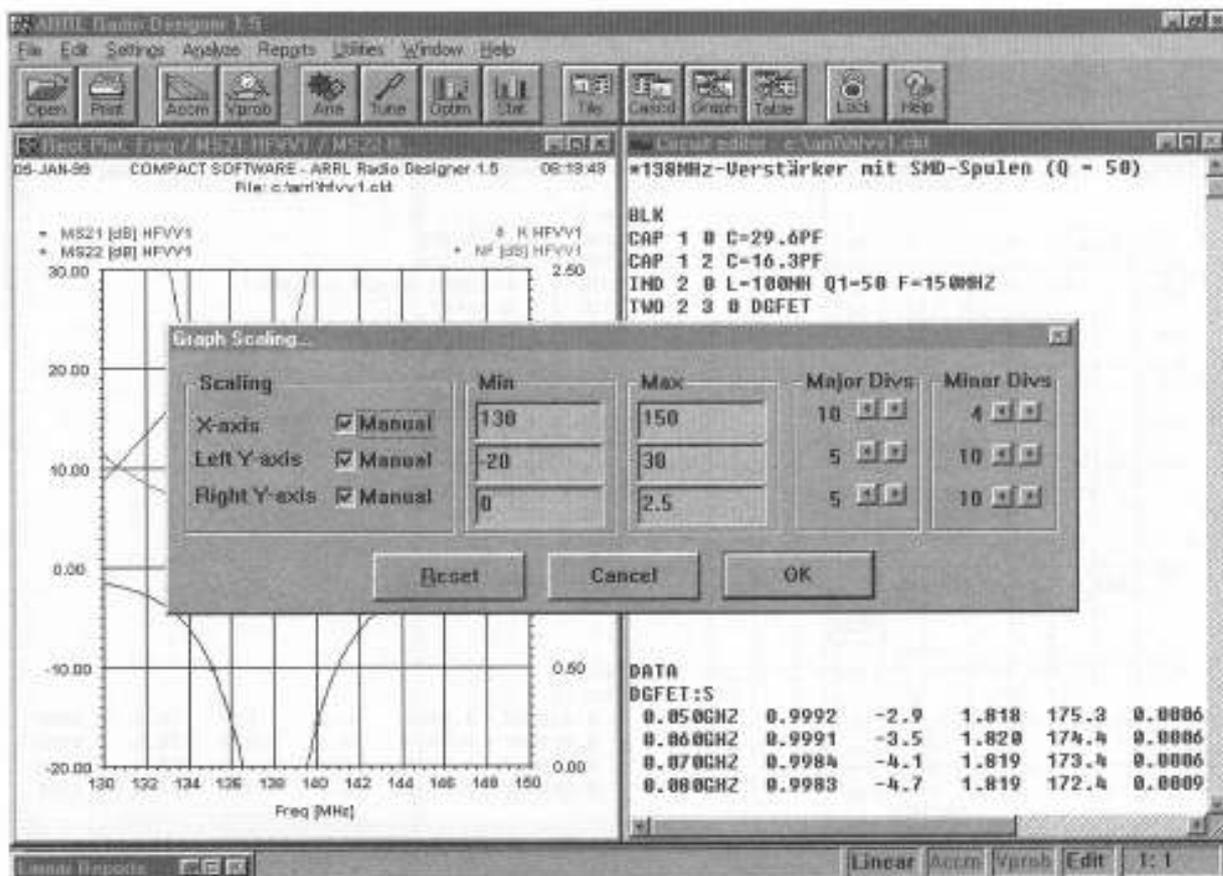


Bild 17: Optimale Achsentteilung für die Diagramme

NOI RN				
0.010GHZ	3.00	0.80	1	3.40
0.050GHZ	1.30	0.80	3	2.00
0.100GHZ	0.80	0.80	6	1.40
0.200GHZ	0.70	0.80	12	1.10
0.450GHZ	1.00	0.78	27	1.00
0.800GHZ	1.75	0.73	48	0.96
0.900GHZ	2.00	0.71	53	0.94
1.100GHZ	2.35	0.63	65	0.84
END				

Vierter Schritt:

Schaltungssimulation

Dazu drückt man den Button "ANA" (= analyse) der zu allererst eine Syntax-Überprüfung startet. Man erfährt sehr schnell, ob sich Syntaxfehler bei der Eingabe eingeschlichen haben.

Nach erfolgreicher Simulation öffnet sich der "REPORT EDITOR" und man kann angeben,

welche Ergebnisse man dargestellt haben möchte:

- MS21 (= magnitude of S21)
- MS22 (= magnitude of S22)
- K (= stability factor)
- NF (= noise figure in dB)

In der Mitte des geöffneten "REPORT EDITORS" findet man das Wort "function" und darunter ein Pulldown - Menü, in dem zunächst das Wort "Freq" zu lesen ist. Dieses Menü öffnet man mit der Maus, sucht darin "MS21" und markiert es mit der linken Maustaste. Sobald es blau leuchtet, klickt man links daneben auf "ADD TRACE" und man wird sehen, wie der eingegebene Wunsch in die Liste übernommen wird.

Anschließend wiederholt man diese Prozedur in gleicher Weise für die drei anderen dar-

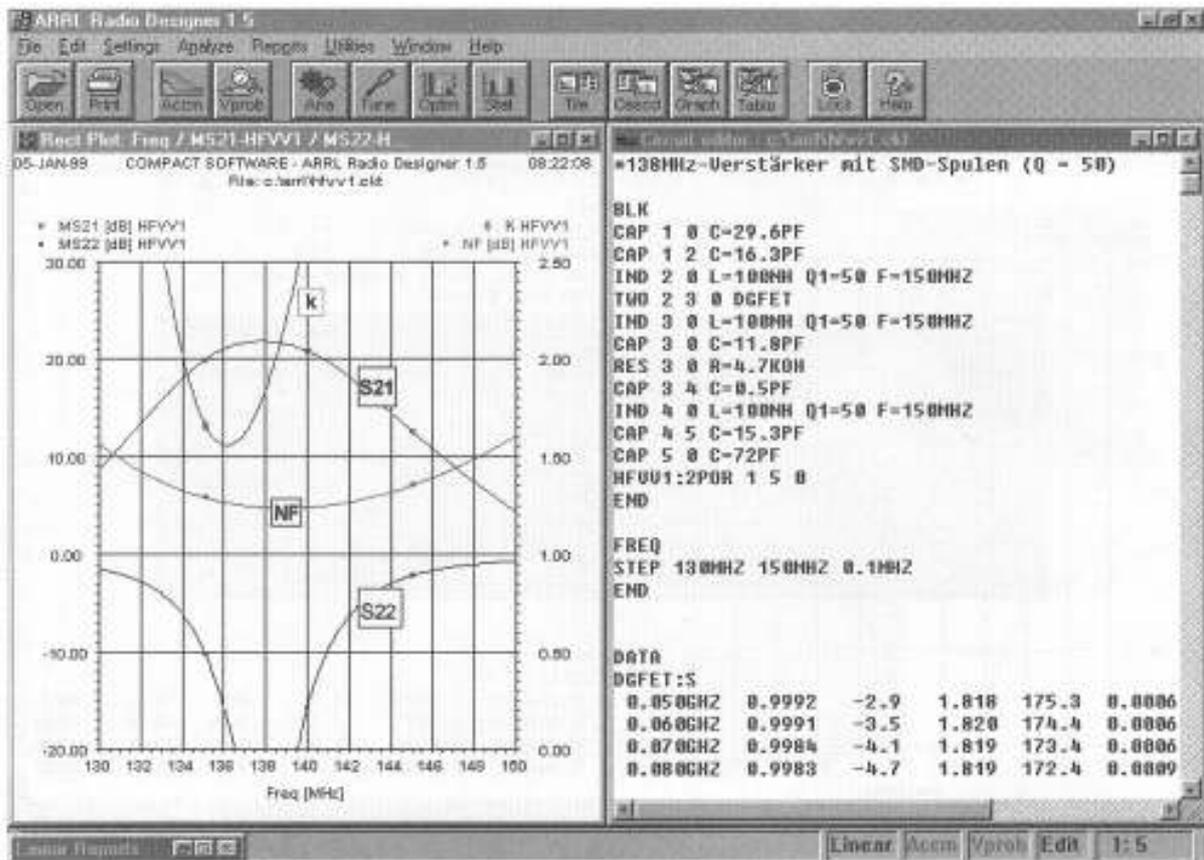


Bild 18: Erstes Simulationsergebnis; dargestellt wurden $|S_{21}|$, $|S_{22}|$, der Stabilitätsfaktor k und die Rauschzahl NF

zustellenden Größen. Schließlich öffnet man noch das Menü "OPTIONS", schaltet auf "DUAL" bei der Y-Achsendarstellung und kontrolliert, ob der Bildschirm mit der Mustervorgabe nach **Bild 16** übereinstimmt.

Die Innen- und Abschlußwiderstände kann man hier auf exakt 50Ω belassen; ändern kann man diese Werte über das Menü "DEFAULT TERMINATION".

Stimmen die Vorgaben, drückt man "DISPLAY" und erhält die Ergebnisse. Sehr empfehlenswert ist an dieser Stelle ein Knopfdruck auf "TILE"; damit werden die Eingabedatei und das Simulationsergebnis nebeneinander dargestellt.

Klickt man mit der linken Maustaste einmal auf das Diagramm, wird seine Anzeige aktiv und man kann darin ändern.

Mit der Tastenkombination $\langle \text{Control} \rangle + \langle R \rangle$ öffnet man das Menü zur Einstellung der Achsenwerte. Für die Rauschzahl "NF" bzw. den Stabilitätsfaktor "k" wird beispielsweise ein Wertebereich von 0 bis 2,5 gewählt, während für S_{21} und S_{22} - wie bei der Simulation mit PUFF in Bild 14 - eine Achsenteilung von -20 dB bis -30 dB sinnvoller ist. Die vernünftigste Einstellung zur Unterteilung (= major and minor divisions) der drei Achsen zeigt **Bild 17**. In **Bild 18** ist das Simulationsergebnis dargestellt das man nun mit dem von PUFF (Bild 14) vergleichen kann.

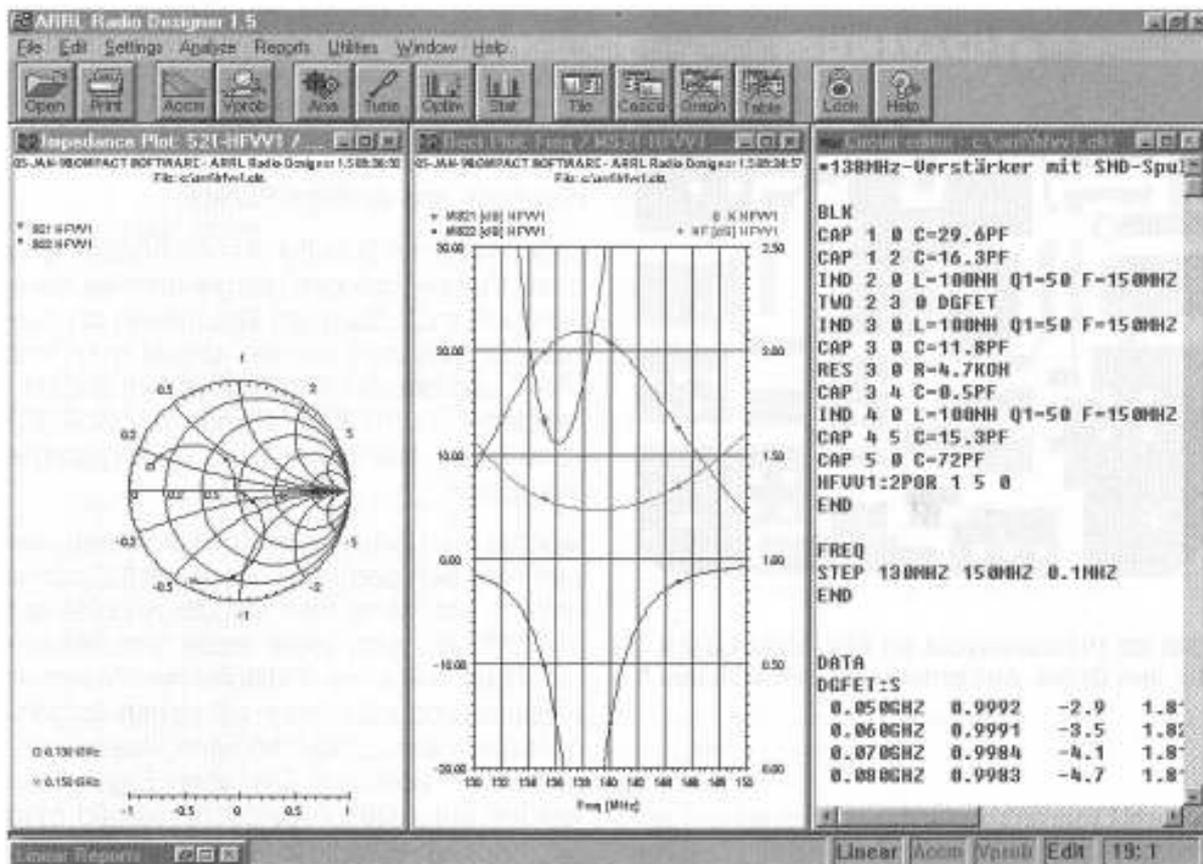


Bild 19: ARD-Bildschirm mit zusätzlich eingeblendetem Smith-Chart

Das Resultat ist höchst erfreulich; es stimmen nicht nur die Verläufe von S21 und S22 exakt mit PUFF überein, sondern man sieht auch den Verlauf der Rauschzahl NF, die im interessierenden Bereich bei ca. 1,25 dB liegt, und den Stabilitätsfaktor k. Nur wenn dieser größer als 1 ist, zeigt die Schaltung auch bei exotischen Innen- und Abschlußwiderständen keine Schwingneigung. Also liegt dieser Schaltungsentwurf mit dem Wert $k_{min} = 1,6$ bei $f = 136$ MHz auf der sicheren Seite.

Wo bleibt aber die Smith-Chart-Darstellung, wie man sie vom PUFF-Bildschirm gewohnt ist?

Auch das läßt sich realisieren:

- 1) Mit F2 öffnet man den REPORT EDITOR;
- 2) Dort findet man im linken oberen Eck unter "Display definitions" das Pulldown-Menu "TYPE". Dieses wird mit der Maus geöffnet und "POLAR" aktiviert.
- 3) Jetzt wechselt man wieder zu "Function" in der unteren Hälfte des Pulldown-Menüs, klickt darin "S21" an und übernimmt die Änderung in die Liste der darzustellenden Kurvenverläufe durch einen Druck auf "ADD TRACE".
- 4) Diesen Vorgang wiederholt man für S22 und erhält dann durch einen Druck auf "DISPLAY" das gewünschte Smith-Chart. Allerdings sollte man gleich den Maßstab



Bild 20: Platinenlayout für FR4-Material mit 1,5 mm Dicke, Außenmaße 30 mm x 30 mm

dieses Diagrammes auf den Radius $r = 1$ ändern:

Dazu bitte <CONTROL> + <R> eingeben, den neuen Radius "1" unter "X-Axis / MAX" eintippen und mit <ENTER> bestätigen.

5) Mit einem Druck auf "TILE" sorgt man schließlich dafür, daß man eine annähernd gleiche Darstellung wie auf dem PUFF-Bildschirm erhält. Allerdings ist die Smith-Chart-Darstellung etwas klein ausgefallen und es fehlt gegenüber PUFF die feine Möglichkeit, per Tastenkommando jeden Punkt der Kurve "anzufahren" bzw. die Mittenfrequenz zu markieren. Auch die gleichzeitige Anzeige des genauen Zahlenwertes beim angefahrenen Kurvenpunkt kann man nur durch die Anzeige der berechneten Wertetabellen ersetzen.

Das geht so: "F2" drücken, bei "Type" auf "TABLE" schalten, dann wieder unter "Function" die Größe "S21" auswählen, mit "ADD TRACE" übernehmen....usw, siehe oben!

Den so zusammengestellten Bildschirm zeigt **Bild 19**. Sollten die Einzelbildchen darin zu klein sein, kann man jederzeit die WINDOWS-Funktionen zur Vollbild- bzw. Teilbild-darstellung anwählen.

Hier noch drei wichtige Punkte:

a) Sollen an der Schaltung noch Änderungen oder Verbesserungen vorgenommen werden und muß dazu ein Bauteilwert im Circuit-File geändert werden, drückt man erst "ANA" und braucht anschließend im erscheinenden REPORT EDITOR nur auf "CLOSE" zu drücken. Sofort werden alle Diagramme aktualisiert.

Möchte man jedoch genau kontrollieren, wie weit man sich dadurch vom vorigen Zustand entfernt hat, klickt man vor der Analyse auf "ACCM". So wird jeder neue Simulationsdurchlauf mit einer fortlaufenden Nummer versehen und zusammen mit seinen Vorgängern dargestellt; und man kann Veränderungen besser verfolgen. Die "alten" Ergebnisse werden automatisch gelöscht, sobald man den "ACCM"-Button deaktiviert.

b) Simulationsergebnisse werden gespeichert, indem man im Menü "Reports" die Option "Save Reports" anklickt.

c) Die Schaltungsdatei wird dagegen im Menü "File" durch Anklicken von "Save" bzw. (falls vorher noch nicht geschehen) mit "Save as..." gesichert.

Noch ein wichtiger Tip:

Nach Beendigung der Arbeit im Radio Designer speichert man alles, verläßt das Programm und schaltet den Rechner aus. Beim nächsten Neustart und Programmaufruf erlebt man dann eine kleine Überraschung:

Es wird nämlich stets nur das Circuit-File mit den geschriebenen Blöcken geladen! Auch ein Druck auf "TILE" hilft nicht weiter, um den in der letzten Sitzung eingestellten Bildschirm Aufbau und somit die Diagramme wieder zu bekommen.

Man muß folglich erst "ANA" drücken, um den REPORT EDITOR zu öffnen. Dort klickt

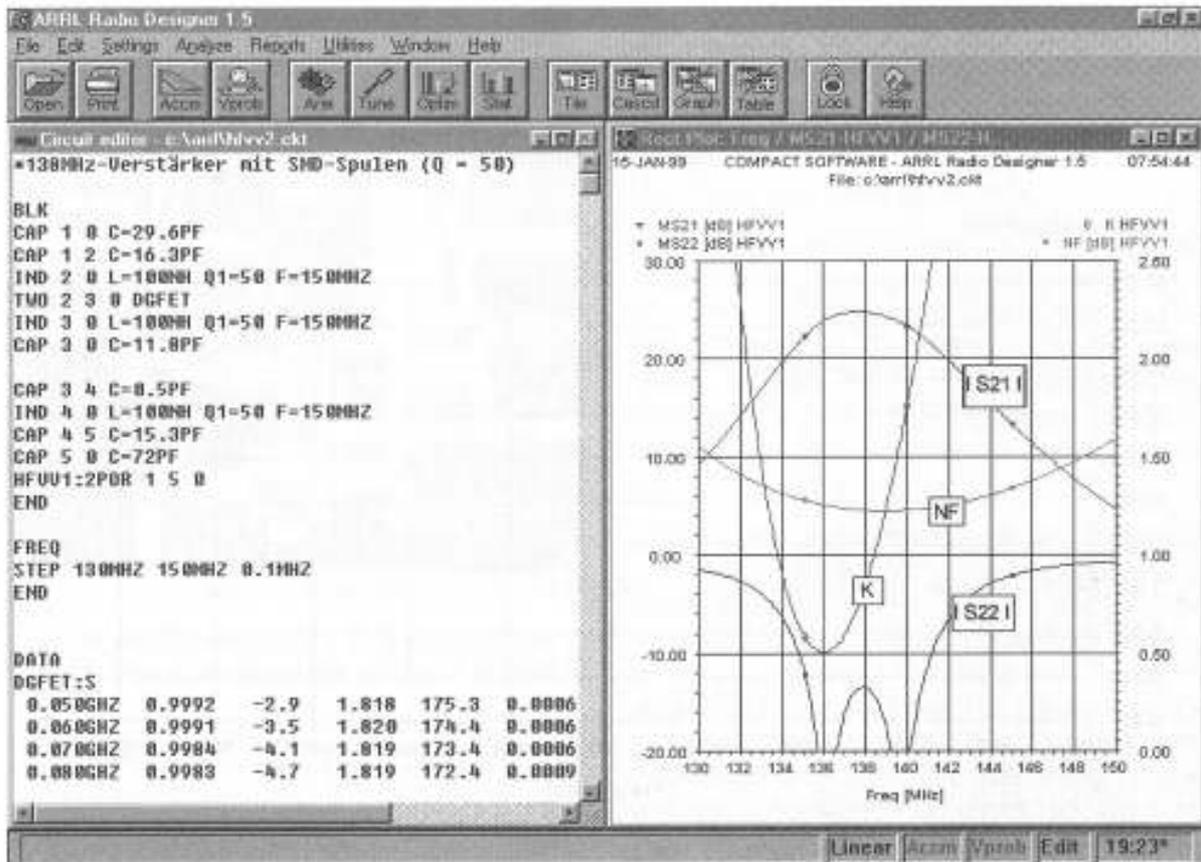


Bild 22: Eigenschaften der Schaltung bei entferntem, ausgangsseitigem Bedämpfungswiderstand (4,7 k Ω)

10. Neue Version der Schaltung mit induktiver Gegenkopplung

Nachdem nun die grundlegende Bedienung bekannt ist und die benötigten Kontrollwerkzeuge zur Verfügung stehen, kann mit ersten Optimierungen begonnen werden.

Man kann die eben untersuchte Schaltung ohne ausgangsseitigen Bedämpfungswiderstand (4,7 k Ω) etwas genauer betrachten und nach Verbesserungsmöglichkeiten suchen.

Bereits bei der Simulation mit PUFF verriet ein Wert für S11 von > 1 Schwinggefahr. Läßt man nun in der Netzliste des ARD - Circuit - Files diesen Bedämpfungswiderstand weg und wiederholt die Simulation durch Drücken von "ANA", braucht man anschließend im REPORT EDITOR nur "Close" anzuklicken und erhält sofort die neuen Werte. Das Ergebnis war ja schon vorher bekannt: der Stabilitätsfaktor ist jetzt auf $k = 0,5$ gesunken, was eine extrem hohe Schwingneigung bedeutet (hfvv2 in Bild 22).

Also fügt man in die Source-Leitung eine kleine Induktivität von 5 nH ein, wie sie bekanntlich in vielen modernen Schaltungsentwürfen

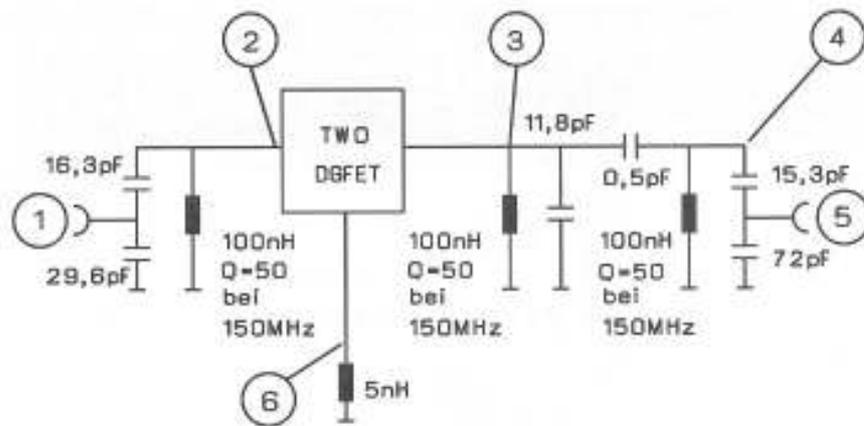


Bild 23:
Simulationsschaltung
mit Stromgegen-
kopplung durch
Source-Induktivität

enthalten ist. Das erfordert allerdings eine neue Simulationsschaltung mit geänderter Knotennumerierung für den TWOPORT DGFET (**Bild 23**).

Diese neue Schaltung wird sofort im Menu "File" mit "Save as..." als "hfv3.ckt" gespeichert.

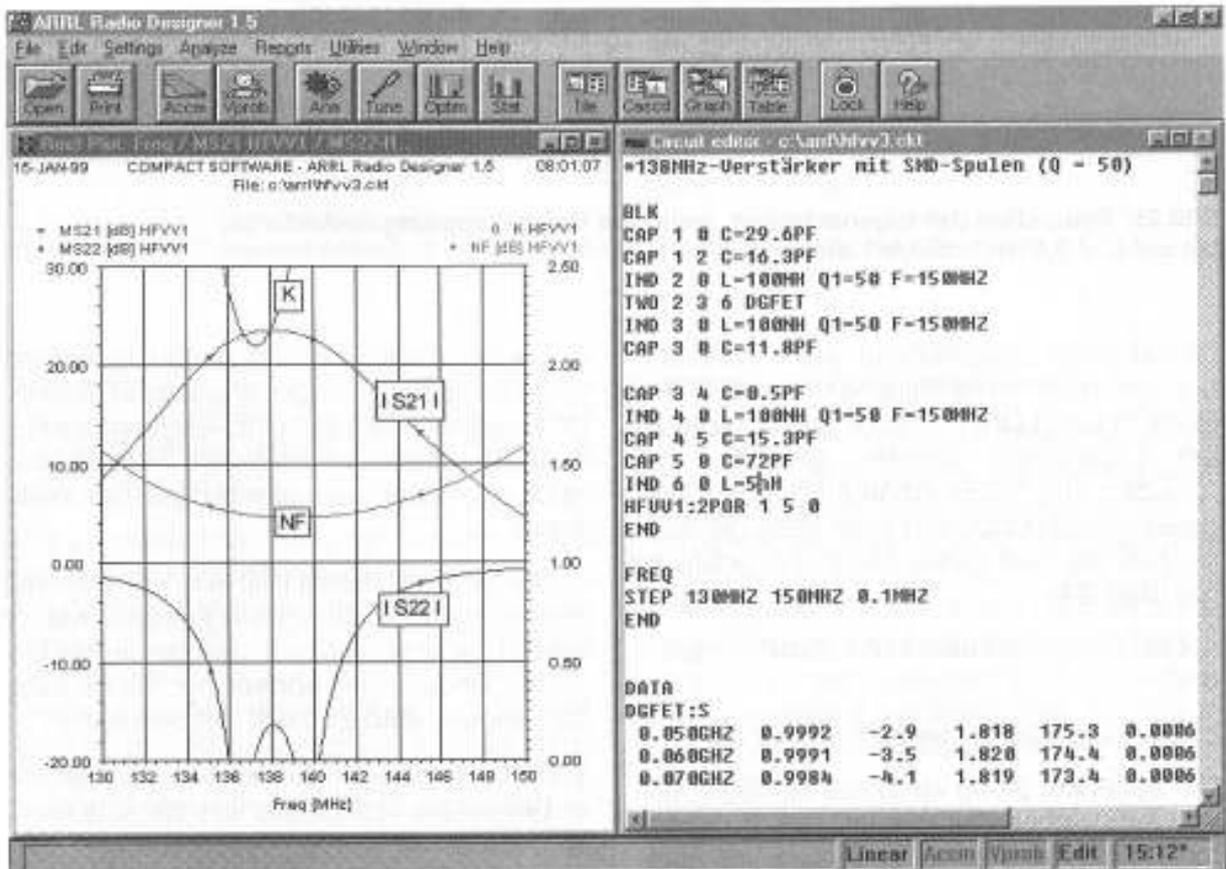


Bild 24: So zeigt sich die Schaltung mit einer Stromgegenkopplung durch $L = 5 \text{ nH}$

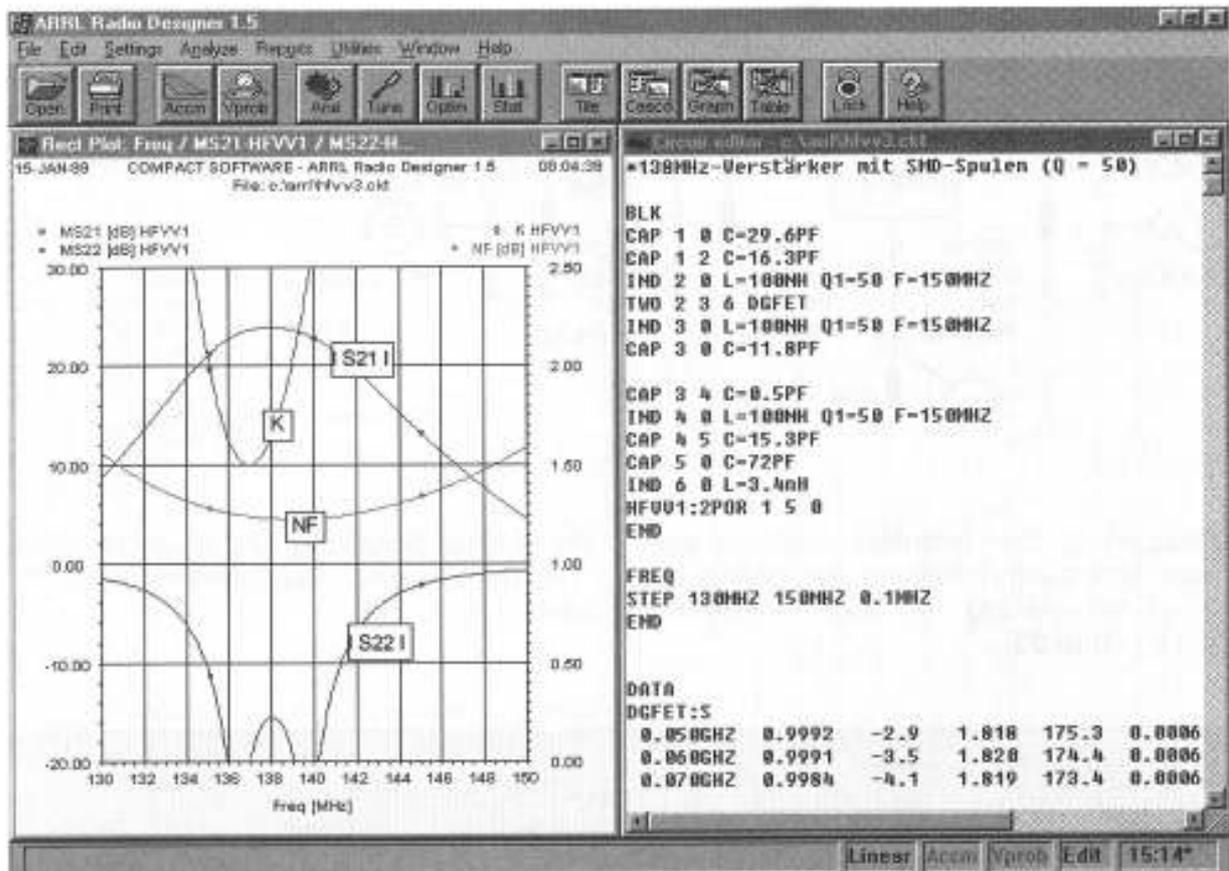


Bild 25: Simulation der Eigenschaften, wenn die Gegenkopplungsinduktivität bis auf $L = 3,4$ nH reduziert wird

Drückt man anschließend auf "ANA", so braucht man im auftauchenden REPORT EDITOR nur "LOAD" anzuklicken und die alten Diagramme werden geladen. Mit "CLOSE" und "TILE" erhält man erneut den gewohnten Anblick und man kann genauer nachsehen, was diese Änderung gebracht hat (Bild 24):

a) Die Rauschzahl blieb mit 1,25 dB unverändert;

b) Die Verstärkung stieg um 1 bis 2 dB;

Die Gegenkopplung wirkt zwar verstärkungsmindernd, aber der Wegfall des Bedämpfungswiderstandes hat das mehr als kompensiert!

c) Die Bandfilterkopplung ist nun zu fest, da ja die Verluste zurückgegangen sind. Das ergibt zwar eine verbesserte Ausgangsanpassung in einem vergrößerten Frequenzbereich, aber eben auch eine breitere Durchlaufkurve.

d) Der Stabilitätsfaktor k ist nun > 2 . Deshalb könnte man die Source-Induktivität wieder bis auf 3,4 nH verkleinern, um genau bei $k = 1,5$ zu landen; dies kommt der Verstärkung S21 zugute. Bild 25 zeigt die Simulation.

Wer den Verlauf der Rauschzahl (NF) genauer betrachtet, stellt eine minimale Erhöhung an der unteren Bandgrenze fest, die NF-Kurve liegt nicht mehr ganz exakt symmetrisch zum Verstärkungsverlauf S21.

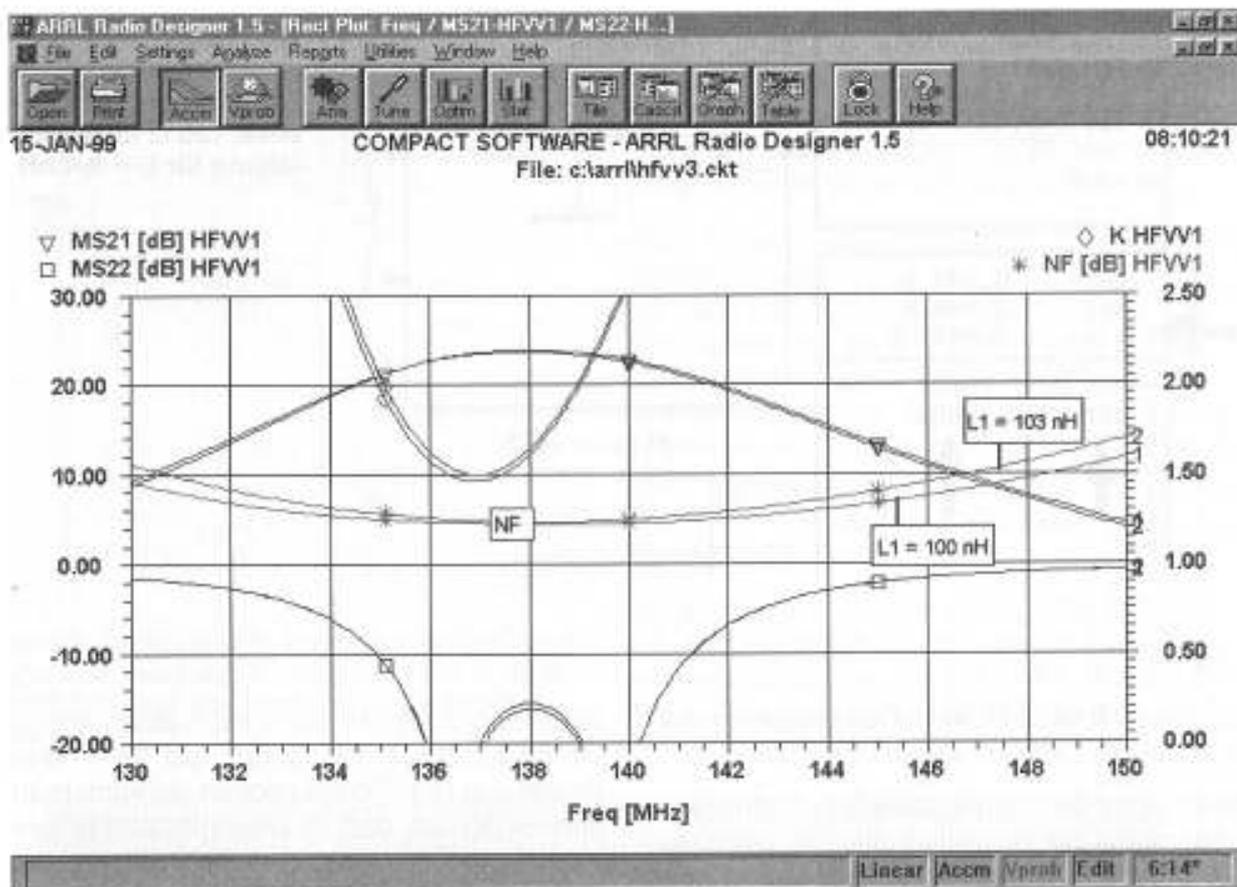


Bild 26: Einfluß der Induktivität im Eingangskreis auf die Rauschzahl NF

Man kann sich jedoch sehr schnell Klarheit darüber verschaffen, ob sich das durch einen Abgleich der 100 nH-Spule im Eingangskreis korrigieren läßt.

Dazu ändert man den Spulenwert in der Netzliste auf 103 nH, drückt erst den Button "ACCM" und anschließend "ANA". Nach Klicken auf "CLOSE" im REPORT EDITOR vergrößert man noch (mit Hilfe der WINDOWS-Taste für "formatfüllend") das Diagramm und kann nun erkennen, wie diese kleine Verstimmung die gewünschte Änderung bewirkt: der RADIO DESIGNER numeriert nämlich, wie schon vorher erwähnt, die Änderungen durch, damit die Auswirkungen direkt verglichen werden können (**Bild 26**).

Eine weitere Verbesserung

Die kleine Source-Induktivität muß nicht unbedingt als SMD-Bauteil eingelötet werden. Wie auch bei anderen Mikrowellenschaltungen kann man eine kurze, hochohmige Streifenleitung verwenden, die am Ende kurzgeschlossen wird. Da die Option zur Streifenleitungs-Berechnung beim RADIO DESIGNER gesperrt ist, wechselt man zu PUFF und untersucht, welche mechanischen Abmessungen für eine Induktivität von 3,4 nH erforderlich sind.

Man geht von einem Wellenwiderstand von 125 Ω aus (das ergibt bei FR4-Material eine Breite von etwa 0,3 mm), und gibt dieses Bauteil in bekannter Weise im Feld F3 ein, be-

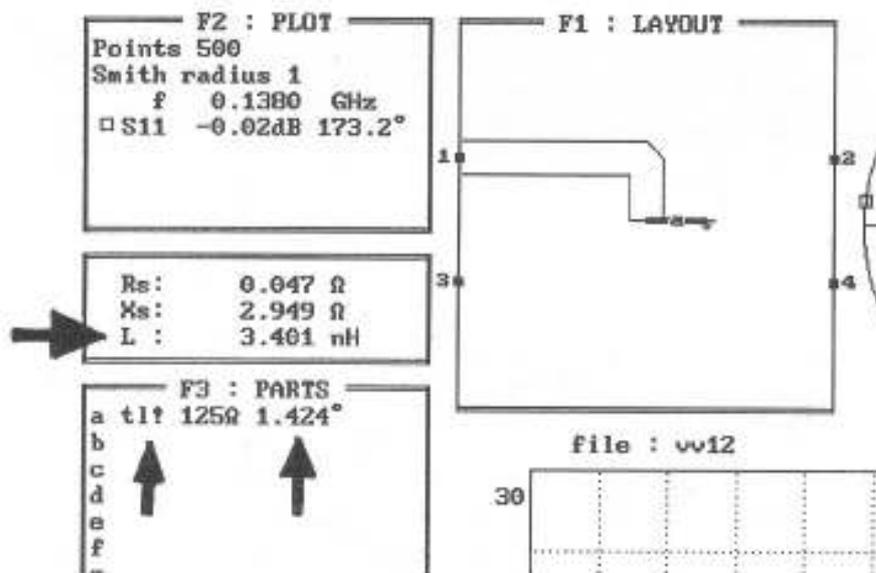


Bild 27:
Bestimmung der
erforderlichen
elektrischen Länge
einer 125 Ω -Streifen-
leitung für L = 3,4 nH

ginnend mit einer elektrischen Länge von ca. 1,5° bei der Designfrequenz von 138 MHz.

Nicht vergessen sollte man das Ausrufezeichen hinter der Bauteilangabe "t!", denn dadurch erhält man eine sehr exakte und dem tatsächlichen Verhalten angepaßte Analyse. Es genügt hierbei, sich auf den Frequenzbereich von 130 bis 150 MHz zu beschränken.

Stellt man dann im Feld F2 nach jedem Simulationsdurchlauf den Cursor auf "S11" und drückt das Gleichheitszeichen, so kann man sehr schön an den im Dialogfenster eingeblendeten Ersatzwerten sehen, ob an der Leitungslänge noch etwas geändert werden muß. Den Endzustand mit einer Induktivität von 3,4 nH zeigt **Bild 27**.

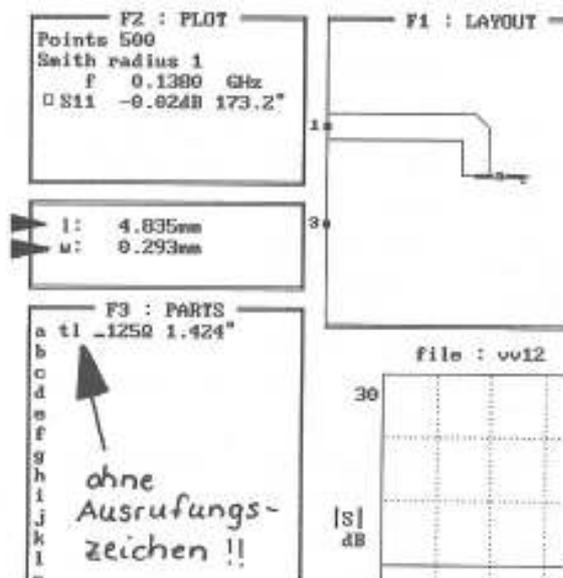


Bild 28:
Mechanische Ab-
messungen der
125 Ω-Streifenleitung
für L = 3,4 nH

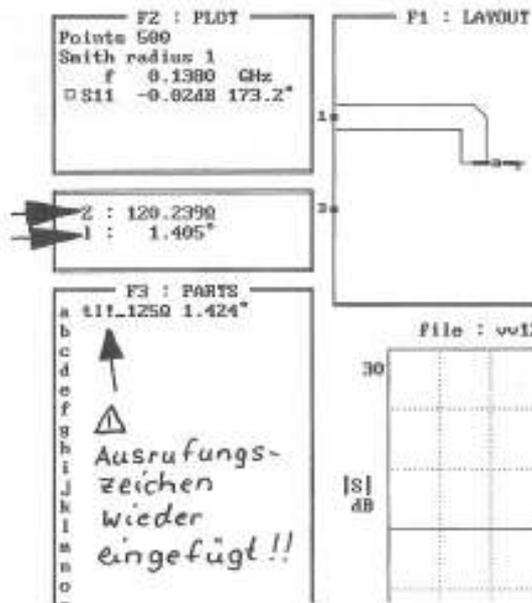


Bild 29: Tatsächlicher Wellenwiderstand und wirksame elektrische Länge der 125 Ω -Streifenleitung (zur Verwendung im Radio Designer)

Löscht man das Ausrufezeichen hinter "tl" (in Feld F3) und gibt anschließend das Gleichheitszeichen ein, erhält man die gewünschten Angaben über die mechanischen Abmessungen: Leiterbreite: 0,293 mm, physikalische Leiterlänge: 4,835 mm (**Bild 28**).

Fügt man nun das Ausrufezeichen hinter "tl" wieder ein und drückt nochmals das Gleichheitszeichen, liefert das Dialogfenster jetzt die exakten und verbesserten Analyse-Ergebnisse der Streifenleitung: in Wirklichkeit hat man es, aufgrund verschiedener physikalischer Effekte wie Dispersion etc. mit einem Wellenwiderstand von nur 120,239 Ω und einer elektrischen Länge von 1,405° zu tun (**Bild 29**).

Schließlich übernimmt man diese Werte in die ARD-Simulation und ersetzt die Source-Induktivität von 3,4 nH durch diese Leitung. Die dazu notwendige Eingabe lautet:

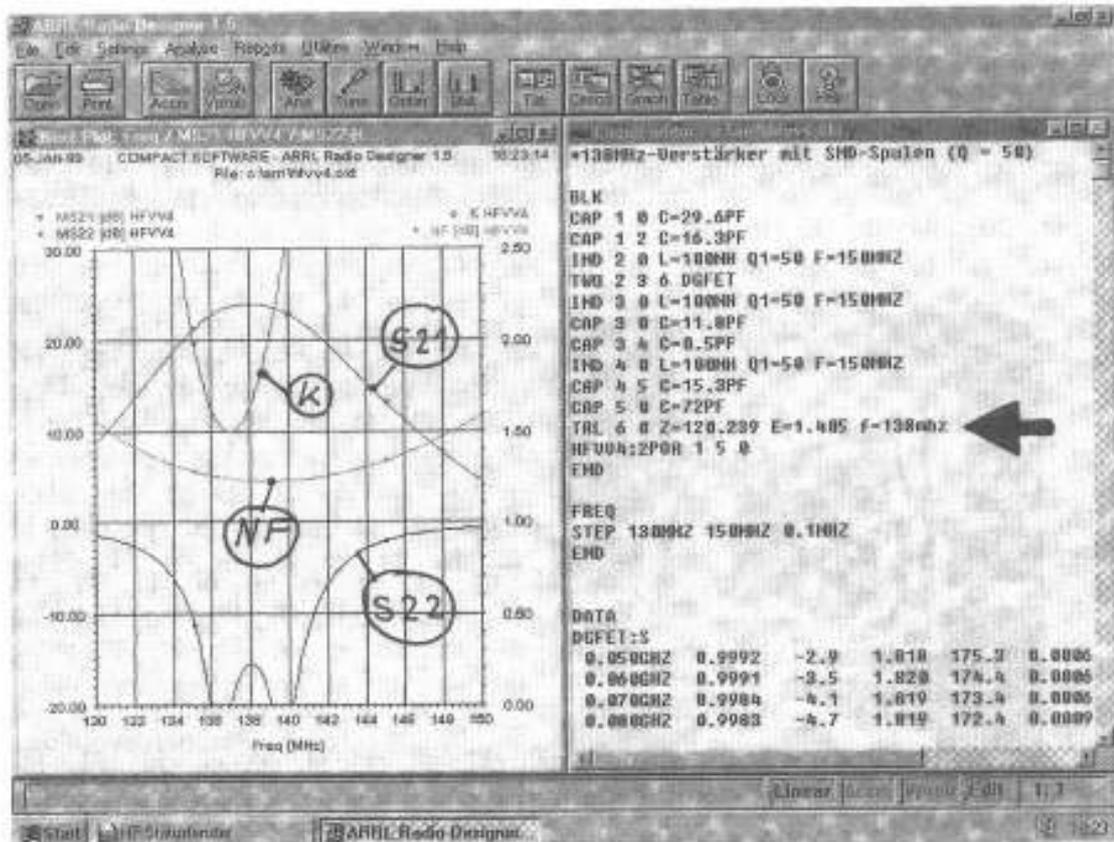


Bild 30: ARD-Simulation mit der Streifenleitung anstelle L = 3,4 nH in der Gegenkopplung



38

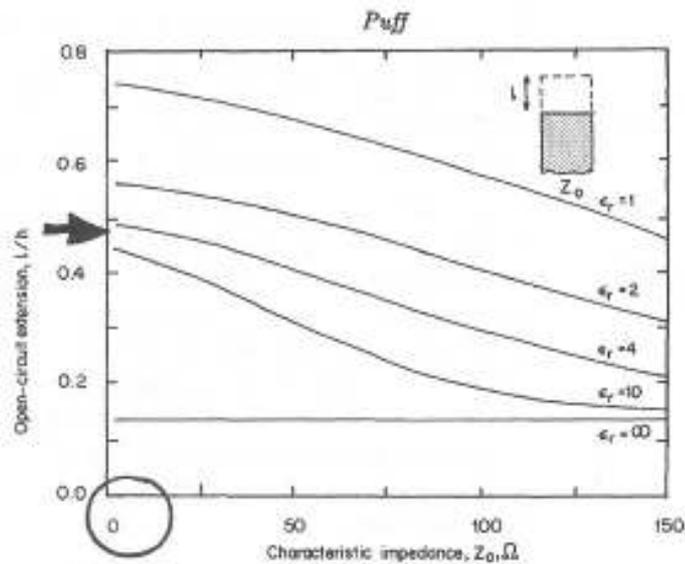


Figure 7.2 The open-circuit end correction in microstrip, plotted from (7.2). The artwork length correction in a parts list should be negative.

Bild 31: Ermittlung der Open-End-Korrektur auf der Masseseite der Streifenleitung

TRL 6 0 Z=120.239 E=1.405 F=138MHZ

Das ist nicht schwer zu entschlüsseln:

"TRL 6 0" bedeutet:

Transmission-Line zwischen Knoten 6 und 0;

"Z=120.239"

gibt den Wellenwiderstand in Ohm an;

"E=1.405"

ist die elektrische Länge in Grad;

"F=138MHZ" heißt natürlich:

diese elektrische Länge gilt bei 138 MHz.

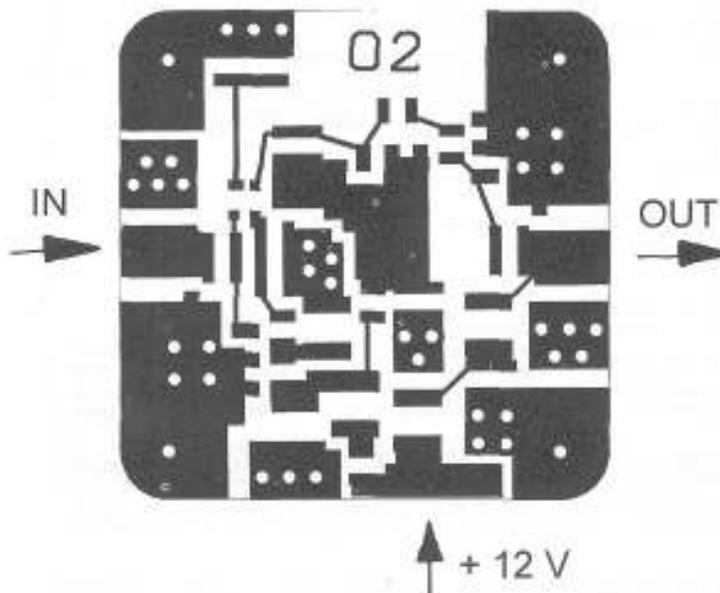


Bild 32:
Platinenlayout des Verstärkers mit Streifenleitung als Stromgegenkopplung (Maße 30 x 30 mm; FR 4; 1,5 mm dick)

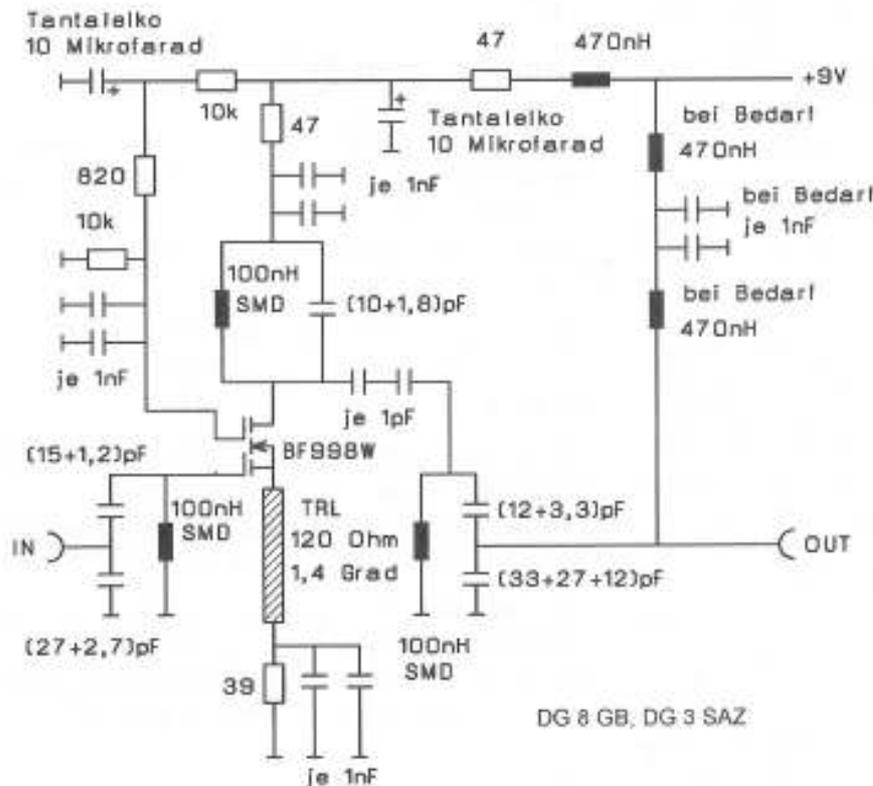


Bild 33:
Vollständiger
Stromlaufplan
des Verstärkers
mit Streifenleitungs-
Gegenkopplung

Das Ergebnis des Simulationsdurchlaufes (hfv4 in **Bild 30**) ist recht erfreulich, da für die Schaltung -wie gefordert- wieder exakt $k = 1,5$ ist und man auf die diskrete Induktivität verzichten kann.

Doch damit ist der Layout-Entwurf noch nicht beendet! Unter [4] wurde bereits ein wichtiger Punkt angesprochen: Sobald diese dünne Streifenleitung auf den breiten Lötflack der Erdung auftrifft, ist eine "OPEN END"-Korrektur zur Erzielung der korrekten Leitungslänge notwendig.

Dazu findet man im PUFF-Handbuch auf Seite 38 ein Diagramm. Durch den "Überstand der elektrischen Feldlinien beim breiten Lötflack" zählt der Anfangsteil der schmalen Leitung (leider) zum Lötflack und fehlt dann an der Leitungslänge. Man sieht sehr schön im Diagramm, daß sich dieser Wert unterhalb eines bestimmten "Wellenwiderstandes des Lötflackes" (= ab einer bestimmten Breite)

nur noch wenig ändert und für $\epsilon = 4,8$ irgendwo bei $0,48 \text{ l/h}$ liegt (**Bild 31**). Für eine Platindicke von $1,5 \text{ mm}$ sind das immerhin $0,68 \text{ mm}$, um die man die Leitung im Layout an dieser Seite verlängern muß. Der SMD-Source-Anschluß am anderen Ende der Leitung ist viel schmaler, deshalb ist sein Einfluß geringer.

Bei genauer Untersuchung kommt man hier auf ein Ergebnis von zusätzlich ca. $0,2$ bis $0,3 \text{ mm}$. Dies ergibt eine gesamte Verlängerung von etwa $1 \text{ mm} + 4,8 \text{ mm} = 5,8 \text{ mm}$ im Layout (**Bild 32**). Dazu gehört der vollständige Stromlaufplan nach **Bild 33**.

Doch nun zur Praxis und zur Inbetriebnahme

Eine Inbetriebnahme ohne Rauschzahlmeßplatz und Networkanalyzer geht folgendermaßen vor sich:



a) Sobald die Schaltung korrekt funktioniert, wird mit Meßsender und Power-Meter (hp 431, 432, 435 oder ähnlichem) zuerst die Durchlaßkurve, symmetrisch zu 138 MHz, nur an den beiden Ausgangskreis-Induktivitäten abgeglichen. Dabei ist darauf zu achten, daß der Verstärker nicht übersteuert wird; ein Eingangspegel von -30 dBm ist also mehr als ausreichend.

b) Dann wird der Vorverstärker zwischen den Meßsender und einen geeigneten Empfänger (hier war es z.B. der Prototyp des Wettersatellitenempfängers) geschaltet. Die Sender-Ausgangsspannung reduziert man langsam soweit, bis im Kontroll-Lautsprecher des Empfängers das Rauschen einsetzt. Durch (leichtes!!) Verdrehen der Spule im Eingangskreis sucht man den Punkt des Rauschminimums bei der Mittenfrequenz von 138 MHz.

c) Jetzt wiederholt man nochmals Messung a) und kontrolliert die Qualität der Durchlaßkurve. Meist sind nur noch minimale Korrekturen an beiden Spulen des Ausgangsbandfilters erforderlich.

Eine Wiedergabe des gemessenen Verstärkungsverlaufes erübrigt sich, da er sich perfekt mit der Simulation deckt.

11.

Literatur zum Teil 2:

[1] Puff-Einsteiger-Projekt: Rauscharmer Vorverstärker für 137 MHz und 145 MHz, Teil 1; Gunthard Kraus, DG 8 GB und Andreas Zimmermann, DG 3 SAZ; UKW-Berichte 4/98, Seiten 233 – 245.

[2] Dr.-Ing. Jochen Jirrmann, DB 1 NV; ARRL Radio Designer und Super-Compact, UKW-Berichte 3/97, Seiten 137 - 152

[3] 8 verschiedene QST-Artikel über die Handhabung des ARD. Abgelegt in der Homepage des RADIO DESIGNERS bei der ARRL. Adresse: <http://www.arrrl.org/ard>

[4] Artikelreihe "Design und Realisierung von Mikrowellenschaltungen mit PUFF"; Gunthard Kraus, DG 8 GB, UKW-Berichte ab Heft 2/95; bisher 9 Fortsetzungen erschienen.

Wird fortgesetzt.

Anzeige

Y I G - Oszillatoren ab 665,- DM			
Frequenzbereich von 1...4,3 2...8,3 8...18 GHz			
Ausgangsleistung:	+ 13 dBm min.	Abstimmspule:	28 OHM
Rauschen bei 10 KHz:	- 90 dBc typ.	Temperaturbereich:	- 30°C ... + 60°C
Breitbandrauschen:	(20 MHz) -165 dBc/Hz	Speisespannung:	+ 15V/ -5V ca. 8 VA
Steilheit der Abstimmspule:	20 MHz/mA typ.	Abmessungen:	45/39/mm Gewicht 350g
RAUSCHGENERATOREN bis 2 GHz / Alle gen. Preise zzgl. MWST und Versandkosten			
COMES Electronic Systeme GmbH - GERMANY			
<i>Fichtenweg 22 - D - 83109 Großkarolinenfeld</i>			
Techn.Info-Service Tel.: 0171 / 5230242		e-mail: COMES-System@t-online.de	
Tel.: 0049(0)8031-25 91 94		Fax: 0049(0)8031-25 91 93	