

Aufgabenstellung

Für die im Bild 1 dargestellte Schaltung soll ein Netzwerk aus Blindelementen entworfen werden, das die mit einer Parallelkapazität behaftete Spannungsquelle (z.B. schmalbandiges Ersatzschaltbild eines FET-Ausgangs) an einen ebenfalls kapazitiv belasteten Widerstand (z.B. Eingangsimpedanz der folgenden Stufe) bei 480 +/-25MHz mit möglichst geringer Einfügungsdämpfung anpaßt. Die Aufgabe soll durch Synthese gelöst werden, wobei sich leicht realisierbare Elementewerte ergeben sollen.

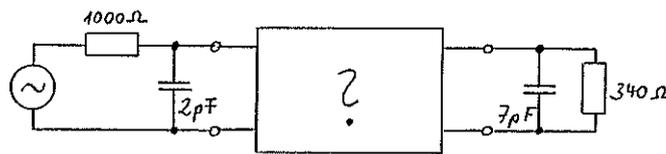


Bild 1

Lösungsvorschlag

Da die Anpassung nur im Bereich von 455 bis 505MHz (480 +/-25MHz) gefordert wird, ist es naheliegend, als Reaktanzschaltung einen transformierenden Bandpaß zu verwenden. Dessen Dämpfungsverlauf paßt auch günstig in das Systemkonzept eines Empfängers oder ZF-Teils.

Das Problem läßt sich demnach auf den Entwurf eines Bandpaßfilters zurückführen, das zwischen reellen Quell- und Lastwiderständen von 1000 bzw. 340 Ohm arbeitet.

Als Filterstrukturen sind nur solche brauchbar, die am Eingang und Ausgang je eine Parallelkapazität aufweisen, wobei die synthetisierten Eingangs- bzw. Ausgangskapazitätswerte jeweils größer oder gleich den bereits in Form sog. "Parasitär"-Kapazitäten vorhandenen 2pF bzw. 7pF sein müssen.

Eine geeignete Struktur besteht z.B. aus zwei obengekoppelten Parallelkreisen (Bild 2).

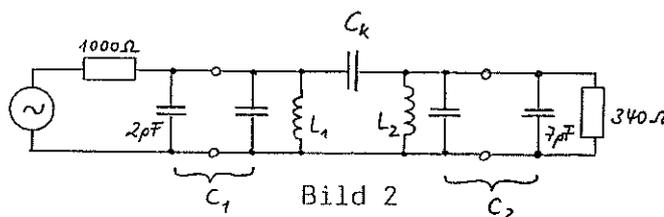


Bild 2

Diese Schaltung ist im Layout leicht zu realisieren, wobei die Kreisinduktivitäten als am Ende kurzgeschlossene Mikrostreifenleitungen hergestellt werden.

### Anwendung von S/FILSYN

Das Rechnerprogramm S/FILSYN eignet sich gut für die gestellte Aufgabe.

Da die Bandpaßstruktur bereits vollständig festliegt, muß dies bei der Dateneingabe für S/FILSYN berücksichtigt werden.

Das Filternetzwerk hat folgende Eigenschaften:

Vielfachheit des Dämpfungspols (=Sperrstelle) bei  $f=0$ :

$$n_0 = 3 \quad (\text{erzeugt durch } L_1, C_k \text{ und } L_2)$$

Vielfachheit des Dämpfungspols bei  $f \rightarrow \infty$ :

$$n_{\infty} = 1 \quad (\text{erzeugt durch } C_1 \parallel (C_k \text{ in Reihe mit } C_2))$$

Dämpfungspole bei endlichen Frequenzen:

$$n_f = 0 \quad (\text{keine})$$

Der Netzwerkgrad ergibt sich daraus zu:

$$n = n_0 + 2n_f + n_{\infty} = 4$$

Die angestrebte Struktur besitzt fünf Blindelemente und ist also nicht kanonisch, d.h. der Grad ist nicht mit der minimalen Elementanzahl realisiert. Das aus  $C_1$ ,  $C_k$  und  $C_2$  bestehende Kapazitäts-PI-Glied bewirkt nur eine Graderhöhung um  $k=2$ , erlaubt aber eine flexible Wahl des Transformationsverhältnisses zwischen reellem Quell- und Lastwiderstand.

Zunächst wird als Betriebsdämpfungswert im Durchlaßbereich (455-505MHz) 1dB gefordert. Aus den sich damit ergebenden Elementewerten sind Rückschlüsse auf erforderliche Änderungen des Dämpfungswerts möglich, der als freier Entwurfsparameter zur Verfügung steht.

Die Aufgabenstellung enthält keine Forderungen bezüglich des Dämpfungsverlaufs im unteren bzw. oberen Sperrbereich. Sie wären auch nicht mehr zu befriedigen, da durch die Wahl der Durchlaßdämpfung und Struktur der Gesamtdämpfungsverlauf bereits vollständig bestimmt ist.

Als Verlauf im Durchlaßbereich wird konstante Welligkeit (=equal ripple passband) gefordert.

Der Dialog mit S/FILSYN ist auf der folgenden Seite dargestellt.

## S/FILSYN-Protokoll

RUN SFILSYN

\*\*\*\*\* S/FILSYN \*\*\*\*\*

RELEASE 1.0 VERSION 05 01/01/84

PLACER: P, FILSYN: F, LADDER: L, DIGITAL: D, ACTIVE: A OR END: E

&gt; F

ENTER TITLE

&gt; Transformierender Bandpass 455 - 505 MHz

FILTER KIND - LUMPED: 0, DIGITAL: 1 OR MICROWAVE: 2

&gt; 0

FILTER TYPE - LOWPASS: 1, HIGHPASS: 2, LIN.-PHASE LOWPASS: 3, BANDPASS: 4

&gt; 4

LOWER EDGE OF THE PASSBAND IN HZ

&gt; 455E6

UPPER EDGE OF THE PASSBAND IN HZ

&gt; 505E6

PASSBAND - MAX.-FLAT: 0, EQUAL-RIPPLE: 1, FUNCTIONAL INPUT: 2

&gt; 1

WHAT IS THE BAND EDGE LOSS IN DB

&gt; 1

BANDPASS - CONVENTIONAL: 1, PARAMETRIC: 2 OR MATCHING: 3

&gt; 1

STOPBAND - MONOTONIC: 0, EQUAL-MINIMA: 1 OR SPECIFIED: 2

&gt; 2

ENTER MULTIPLICITY OF TRANSMISSION ZERO AT ZERO

&gt; 3

ENTER MULTIPLICITY OF TRANSMISSION ZERO AT INFINITY

&gt; 1

ENTER NUMBER OF FINITE TRANSMISSION ZEROS

&gt; 0

ENTER INPUT TERMINATION IN OHMS

&gt; 1000

ENTER OUTPUT TERMINATION (0. INDICATES OPEN OR SHORT)

&gt; 340

ENTER VALUE OF AVERAGE Q. IF NO PREDISTORTION, ENTER 0.

&gt; 0

GENERAL FILTER SYNTHESIS PROGRAM

Transformierender Bandpass 455 - 505 MHz

BAND-PASS FILTER

EQUAL RIPPLE PASS BAND

BANDEDGE LOSS

= 1.0000 DB.

LOWER PASSBAND EDGE FREQUENCY

= 4.5500000D+08 HZ.

UPPER PASSBAND EDGE FREQUENCY

= 5.0500000D+08 HZ.

SPECIFIED STOP BAND

MULTIPLICITY OF ZERO AT ZERO

= 3

MULTIPLICITY OF ZERO AT INFINITY

= 1

OVERALL FILTER DEGREE

= 4

INPUT TERMINATION

= 1.0000000D+03 OHMS

OUTPUT TERMINATION

= 3.4000000D+02 OHMS

REQUESTED TERMINATION RATIO

= 2.9411765D+00

WISH TO SEE TRANSFER FUNCTION: Y/N

&gt; N

FREQ:

&gt;

REALIZATION - ACTIVE: A, PASSIVE: P, DIGITAL: D, NO SYNTHESIS: E  
> P

EXISTING POLYNOMIALS ARE: ES OS ED

ENTER SUBTITLE. NO MORE SYNTHESSES: END

>

LATTICE: L, COMPUTER CONFIG.: C, INPUT SIDE: IN, OUTPUT SIDE: OUT

> C

WISH TO SEE INTERMEDIATE RESULTS: Y/N

> N

\*\* EVEN NUMBERED BRANCHES ARE SERIES, ODD ONES SHUNT \*\*

1	....R....	3.4000000D+02
	.....	
3	....L....	6.4605773D-09
	.....	
4	.....C....	1.7160987D-11
	.....	
5	....C....	1.9670246D-09
	.....	
7	....L....	5.5876771D-11
	.....	
9	....R....	2.9406199D+00
	.....	

COMMAND:

> TR

ENTER REQUIRED OUTPUT TERMINATION

> 1000

ENTER SERIAL #'S OF BRANCHES TO BE USED

ENTER TWO ZEROS FOR COMPUTER SELECTION

> 0 0

LARGEST TRANSFORMATION RATIO: 1.3368419D+04

TRANSFORMATION RATIO USED: 3.4006435D+02

5	....C....	1.6230390D-11
	.....	
6	.....C....	9.3059712D-13
	.....	
7	....C....	4.9041384D-12
	.....	
9	....L....	1.9001698D-08
	.....	
11	....R....	1.0000000D+03
	.....	

COMMAND:

> FLIP

1	....R....	1.0000000D+03
	.....	
3	....L....	1.9001698D-08
	.....	
5	....C....	4.9041384D-12
	.....	
6	.....C....	9.3059712D-13
	.....	
7	....C....	1.6230390D-11
	.....	
9	....L....	6.4605773D-09
	.....	
11	....R....	3.4000000D+02
	.....	

COMMAND:

&gt; FREQ

FREQ:

&gt; 50E6 400E6 50E6

FREQ:

&gt; 400E6 450E6 10E6

FREQ:

&gt; 455E6 505E6 5E6

FREQ:

&gt; 510E6 550E6 10E6

FREQ:

&gt; 550E6 1000E6 50E6

ENTER QL AND QC AT (UPPER) CUTOFF (LOSSLESS: ENTER ZEROS)

&gt; 0 0

TABULATE: Y/N

&gt; Y

\*\*\*\*\* COMPUTED PERFORMANCE \*\*\*\*\*

FREQUENCY IN HZ	TRANSD. LOSS IN DB	PHASE IN DEG	DELAY IN SEC	OUTPUT REAL	IMPEDANCE IMAGINARY
5.0000E+07	98.1179	90.6916	3.9419E-11	1.2004E-08	2.0521E+00
1.0000E+08	79.4706	91.4307	4.3233E-11	9.5982E-07	4.2452E+00
1.5000E+08	67.8829	92.2763	5.1286E-11	1.3864E-05	6.7548E+00
2.0000E+08	58.8455	93.3173	6.5592E-11	1.1097E-04	9.8455E+00
2.5000E+08	50.8225	94.7114	9.1807E-11	7.0453E-04	1.3987E+01
3.0000E+08	42.9194	96.7889	1.4538E-10	4.3553E-03	2.0167E+01
3.5000E+08	34.2285	100.4148	2.7938E-10	3.2378E-02	3.0987E+01
4.0000E+08	23.0199	108.9663	8.0956E-10	4.3699E-01	5.6794E+01
4.1000E+08	20.1126	112.4069	1.1127E-09	8.6495E-01	6.7343E+01
4.2000E+08	16.8003	117.3071	1.6366E-09	1.9005E+00	8.2589E+01
4.3000E+08	12.9246	124.9019	2.6586E-09	4.8884E+00	1.0686E+02
4.4000E+08	8.2885	138.2281	4.9728E-09	1.6364E+01	1.5190E+02
4.5000E+08	3.0860	165.1490	1.0348E-08	8.9136E+01	2.5011E+02
4.5500E+08	1.0000	186.9505	1.3329E-08	2.4644E+02	2.7933E+02
4.6000E+08	0.0530	211.5715	1.3365E-08	3.7454E+02	7.1178E+01
4.6500E+08	0.1437	233.2103	1.0711E-08	2.4890E+02	-5.5600E+01
4.7000E+08	0.5870	249.8581	8.1665E-09	1.6555E+02	-4.6408E+01
4.7500E+08	0.9213	262.9991	6.7408E-09	1.3356E+02	-1.7599E+01
4.8000E+08	0.9903	274.6128	6.3419E-09	1.2864E+02	1.1736E+01
4.8500E+08	0.7864	286.3864	6.8198E-09	1.4574E+02	4.0109E+01
4.9000E+08	0.3969	299.8435	8.1188E-09	1.9393E+02	6.2504E+01
4.9500E+08	0.0450	316.2864	9.9891E-09	2.9242E+02	4.3389E+01
5.0000E+08	0.1266	335.8795	1.1409E-08	3.7096E+02	-1.1815E+02
5.0500E+08	1.0000	356.3231	1.0966E-08	2.3536E+02	-2.6819E+02
5.1000E+08	2.5976	14.1517	8.8863E-09	1.0513E+02	-2.4878E+02
5.2000E+08	6.4938	37.8598	4.8148E-09	2.6680E+01	-1.6552E+02
5.3000E+08	10.0331	50.7821	2.7265E-09	1.0008E+01	-1.2104E+02
5.4000E+08	12.9742	58.4853	1.7153E-09	4.7470E+00	-9.5920E+01
5.5000E+08	15.4275	63.5456	1.1738E-09	2.6080E+00	-7.9912E+01
6.0000E+08	23.5460	74.8596	3.4353E-10	3.8317E-01	-4.5186E+01
6.5000E+08	28.3518	79.1180	1.6468E-10	1.2545E-01	-3.2385E+01
7.0000E+08	31.6717	81.3896	9.7426E-11	5.8190E-02	-2.5596E+01
7.5000E+08	34.1609	82.8155	6.4765E-11	3.2743E-02	-2.1345E+01
8.0000E+08	36.1269	83.8003	4.6412E-11	2.0800E-02	-1.8413E+01
8.5000E+08	37.7369	84.5251	3.5030E-11	1.4347E-02	-1.6257E+01
9.0000E+08	39.0915	85.0831	2.7480E-11	1.0498E-02	-1.4598E+01
9.5000E+08	40.2553	85.5275	2.2241E-11	8.0273E-03	-1.3277E+01
1.0000E+09	41.2722	85.8908	1.8374E-11	6.3501E-03	-1.2198E+01

Um den Einfluß der Durchlaßdämpfung zu untersuchen, wurden Rechenläufe mit den Werten 0.1dB, 0.5dB und 3dB durchgeführt. Die resultierenden Elementewerte sind in Tabelle 1 zusammengestellt. In den beiden rechten Spalten sind von S/FILSYN berechnete Dämpfungswerte angegeben, die sich für eine angenommene Spulengüte  $Q_1=60$  und Kondensatorgüte  $Q_C=500$  im Dämpfungsminimum ( $d_1$ ) und an den Bandgrenzen ( $d_2$ ) ergeben.

d(dB)	L1(nH)	C1(pF)	Ck(pF)	C2(pF)	L2(nH)	d1(dB)	d2(dB)
0.1	41.0	2.1	0.67	7.3	14.0	1.2	1.6
0.5	24.7	3.7	0.80	12.4	8.4	1.9	2.8
1.0	19.0	4.9	0.93	16.2	6.5	2.4	3.8
3.0	11.2	8.6	1.40	27.8	3.8	3.8	6.3

Tabelle 1

### Realisierung

Der 0.5dB-Bandpaß ist bezüglich der Elementewerte und der Verlustzusatzdämpfung ein brauchbarer Kompromiß. Die Kapazitätswerte sind groß genug, um die Parasitärkapazitäten zu "absorbieren".

Man erhält also folgende Schaltung:

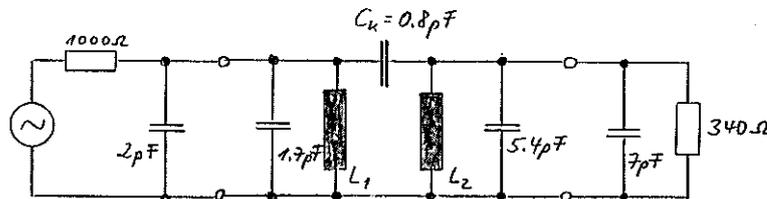


Bild 3

Die Parallelschaltung von Festkondensatoren verringert den Einfluß streuender Transistorkapazitäten.

Die beiden kurzgeschlossenen Mikrostreifenleitungen werden jetzt für Epoxyd-Substrat ( $h=1.5\text{mm}$ ,  $\epsilon_r=4.7$ ,  $35\mu\text{m}$  Cu-Auflage) dimensioniert.

Aus

$$Z_1 = jZ_0 \tan \beta l = j\omega L \quad (1)$$

ergibt sich die Gleichung

$$l = \frac{c_0}{2\pi f \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \arctan \frac{2\pi f L}{Z_0} \quad (2)$$

$$c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}, f = 480\text{MHz}$$

Wir wählen  $Z_0 = 70 \text{ Ohm}$ , weil bei diesem Wellenwiderstand die MS-Leitungsverluste minimal sind.

Mit SUPER-COMPACT ermittelt man daraus eine Streifenbreite von 1.434mm. Eine Breite von 1.5mm ist für das Layout einfacher und ergibt  $Z_0 = 68.52 \text{ Ohm}$  :

SUPER-COMPACT Version 1.6+158 06/30/83 3-MAR-84 11:46:02

CMD > TRL CF  
TRLCF > H=1.5MM ER=4.7 MET1=CU 35UM F=0.48  
TRLCF > ZO=70  
TRLCF > SYN

Microstrip Single Line Synthesis

ZO = 70.0  
H = 1.500MM ER = 4.70 TAND = 0.00000 T/H = 0.0233  
Freq = 0.5GHZ

W = 1.434MM  
TRLCF > W=1.5MM  
TRLCF > ANA

Single Line in Microstrip

Metals: CU 35.0000UM  
H = 1.500MM ER = 4.70 TAND = 0.00000 T/H = 0.0233

Freq GHZ	Width MM	W/H	ZO Ohms	$\epsilon_{\text{eff}} = K_{\text{eff}}$	D Loss	C Loss dB/CM
0.5	1.500	1.000	68.52	3.365	0.0000	0.0035

Aus (2) berechnet man für

$$L_1 = 24.7\text{nH} \quad l_1 = 44.9\text{mm}$$

$$L_2 = 8.4\text{nH} \quad l_2 = 19.2\text{mm}$$

Durch eine abschließende Optimierung mit Berücksichtigung der Verluste soll eine möglichst konstante und niedrige Dämpfung erreicht werden.

Am Eingang werden 2.2pF statt 1.7pF eingesetzt, um den Einfluß der Schaltkapazität berücksichtigen zu können, z.B. 1.5pF Fest-C (E12-Reihe) + 0.7pF Schaltkapazität (oder 1.8pF+0.4pF).

Am Ausgang werden 5.4pF als Startwert verwendet, im Verlauf der Optimierung aber auf 3.3pF reduziert. Die MS-Leitungslängen und die Koppelkapazität  $C_k$  werden variiert.

Die folgenden Seiten enthalten das Protokoll der SCOMPACT-Optimierung.

SUPER-COMPACT Version 1.6+158 06/30/83 3-MAR-84 16:39:42

CMD > HGDHL

CMD > LIS

LAD

CAP 1 0 C=2PF

CAP 1 0 C=2.2PF Q2=300 F=480MHZ

SST 1 0 W=1.5MM P=?44.7MM? EPOXY

CAP 1 2 C=?0.8PF,0.8PF,2PF? Q2=250 F=480MHZ

SST 2 0 W=1.5MM P=?19.2MM? EPOXY

CAP 2 0 C=?5.4PF? Q2=500 F=480MHZ

CAP 2 0 C=7PF

BP: 2POR 1 2

END

FREQ

STEP 455MHZ 505MHZ 10MHZ

END

OUT

FRI BP S R1=1000 R2=340

END

OPT

BP R1=1000 R2=340 MS11 W=20 MS22 W=20 MS21=-0.5DB

END

DATA

EPOXY: MS H=1.5MM ER=4.7 MET1=CU 3SUM

END

CMD > ANA

CIRCUIT: BP

S-MATRIX, ZS = 1000.0+J 0.0 ZL = 340.0+J 0.0

FREQ MHZ	S11		S21		S12		S22		S21
	MAG	ANG	MAG	ANG	MAG	ANG	MAG	ANG	db
455.00000	0.288	-55	0.870	133	0.870	133	0.388	136	-1.21
465.00000	0.499	-126	0.814	100	0.814	100	0.515	141	-1.79
475.00000	0.553	-147	0.796	75	0.796	75	0.533	116	-1.98
485.00000	0.512	-147	0.822	47	0.822	47	0.453	62	-1.70
495.00000	0.608	-135	0.754	12	0.754	12	0.544	-26	-2.45
505.00000	0.811	-139	0.546	-18	0.546	-18	0.779	-84	-5.25

PLOT, PRINT OR QUIT? (PL/PR/<Q>):

CMD > OPT

GRADIENT, RANDOM OR QUIT? (G/R/Q): .R

NUMBER OF TRIALS? (X/<Q>): 100

RANDOMIZE RANDOM NUMBER GENERATOR? (Y/<N>):

<OPTIM> TIMER STARTS

ERR. F. = 17.806

RECORD OF IMPROVEMENT

TRIAL	ERR. F.
18	10.082
20	8.205
25	7.275
34	5.833
38	5.707
40	5.545
44	5.256
75	5.239

Der weitere Optimierungsverlauf wird aus Platzgründen weggelassen.

Das Ergebnis ist:

SUPER-COMPACT Version 1.6+158 06/30/83 3-MAR-84 21:02:25

CMD > HGOHL

CMD > LIS

LAD

CAP 1 0 C=2PF

CAP 1 0 C=2.2PF Q2=300 F=480MHZ

SST 1 0 W=1.5MM P=41.8MM EPOXY

CAP 1 2 C=0.9PF Q2=250 F=480MHZ

SST 2 0 W=1.5MM P=22.5MM EPOXY

CAP 2 0 C=3.3PF Q2=500 F=480MHZ

CAP 2 0 C=7PF

BF: 2POR 1 2

END

FREQ

STEP 455MHZ 505MHZ 10MHZ

END

OUT

PRI BF S R1=1000 R2=340

END

OPT

BF R1=1000 R2=340 MS11 W=20 MS22 W=20 MS21=-0.5DB

END

DATA

EPOXY: MS H=1.5MM ER=4.7 MET1=CU 35UM

END

CMD > ANA

CIRCUIT: BF

S-MATRIX, ZS = 1000.0+J 0.0 ZL = 340.0+J 0.0

FREQ MHZ	S11		S21		S12		S22		S21 db
	MAG	ANG	MAG	ANG	MAG	ANG	MAG	ANG	
455.00000	0.359	115	0.874	159	0.874	159	0.312	40	-1.16
465.00000	0.272	178	0.919	122	0.919	122	0.217	-126	-0.73
475.00000	0.415	-179	0.877	95	0.877	95	0.389	-173	-1.14
485.00000	0.387	174	0.890	73	0.890	73	0.359	155	-1.02
495.00000	0.223	-171	0.935	47	0.935	47	0.161	90	-0.59
505.00000	0.395	-116	0.871	14	0.871	14	0.366	-49	-1.20

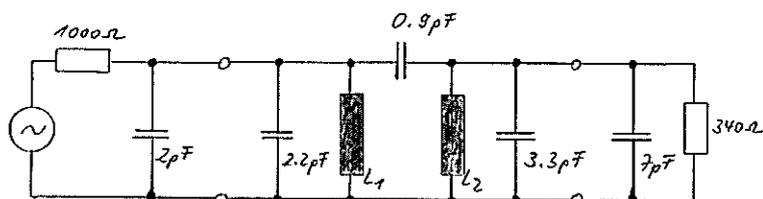


Bild 4

$L_1$  :  $w = 1.5 \text{ mm}$   $l = 41.8 \text{ mm}$

$L_2$  :  $w = 1.5 \text{ mm}$   $l = 22.5 \text{ mm}$

CIRCUIT: BP

FILE: HGOHL

3-MAR-84 21:13:31

SUPER-COMPACT

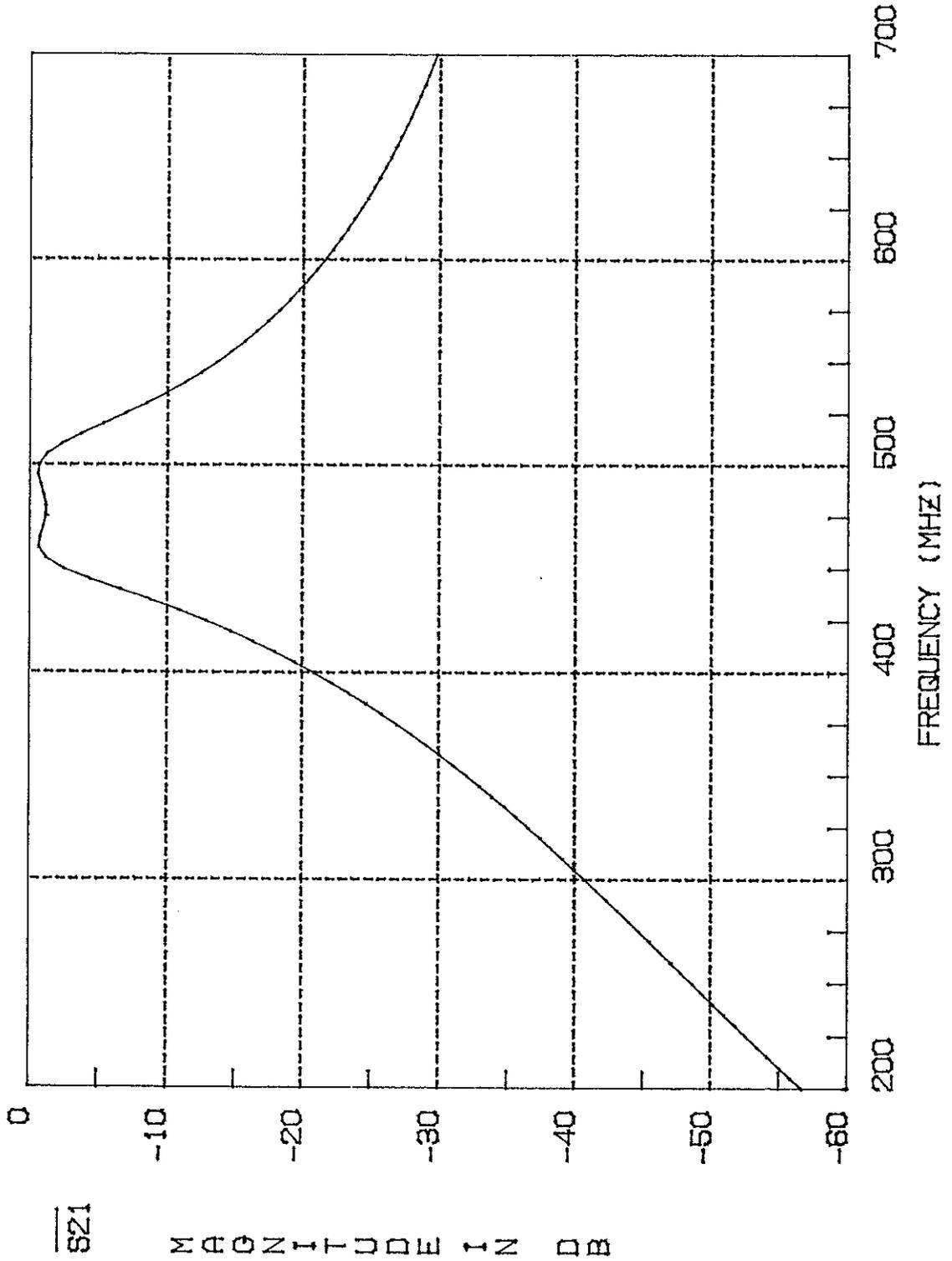


Bild 4 zeigt die fertige Anpaßschaltung, die abschließend noch von 200MHz bis 700MHz analysiert wird (Dämpfungsverlauf siehe Seite 10). Die Gesamtdämpfung im Bereich 455 bis 505MHz beträgt etwa 1.2dB.

Bedingt durch das Frequenzverhalten der beiden MS-Leitungen tritt bei 2.1GHz eine Parallelresonanz und damit ein Dämpfungsminimum mit 18.5dB auf. Diese Schaltungseigenschaft ist u.U. zu berücksichtigen.

### Zusammenfassung

Dieser Bericht zeigt, wie eine praktische Entwurfsaufgabe durch Anwendung verfügbarer Rechnerprogramme mit geringem Aufwand gelöst werden kann.

Synthese mit anschließender Optimierung erlaubt die Auslegung bis hin zur realisierbaren Schaltung.

In Hinblick auf die Übereinstimmung von Rechnung und gemessenem Schaltungsverhalten ist es wichtig, möglichst viele Realisierungsdetails zu berücksichtigen, die einer Berechnung zugänglich sind.

Ein aus Synthese und Optimierung bestehendes Entwurfsverfahren ist natürlich auch für größere Schaltungen, z.B. Mikrowellenverstärker oder MS-Filter, anwendbar.

### Literatur

S/FILSYN Release 1.0 Version 05 September 1, 1983 User Manual

SUPER-COMPACT Version 1.6 User Manual July 1982 CD-UM-820110 Revised 1-10-83