



Hochfrequenztechnik Praktikum - Versuch 2 Modelling von HF-Spulen mit ADS

Frank Terbeck <ft@bewatermyfriend.org>

25. Mai 2008

1 Einleitung

1.1 Entstehung und Zielsetzung

Dieser Bericht entstand im Versuch Nummer 2 des HOCHFREQUENZ Praktikums der *FH Aachen* im Sommersemester 2008.

Ziel des Versuchs war es eine real vermessene HOCHFREQUENZ Spule mittels geeigneter Ersatzschaltungen zu fitten und mit Hilfe der Simulationssoftware *ADS* möglichst genau inklusive aller Schmutzeffekte zu modellieren.

Die reale Vermessung der Spule in Form von (den in der Praxis sehr gebräuchlichen) Zweitor S-Parametern - als S2P Datei - war im Vorfeld gegeben.

1.2 Material

Die theoretischen Grundlagen zu diesem Bericht stützen sich vor allem auf das vorlesungsbegleitende Buch von Professor Heuermann¹. Sollten andere Quellen herangezogen worden sein, sind diese entsprechend markiert.

1.3 Online Version

Dieser Bericht ist in elektronischer Form verfügbar (inklusive farbiger Plots); unter:

`<http://ft.bewatermyfriend.org/etech/hf_p2_bericht.html>`

¹[Heu05]

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Entstehung und Zielsetzung	2
1.2	Material	2
1.3	Online Version	2
2	Fitting der HF Spule coil18_4.s2p	6
2.1	Fitting mittels PI Ersatzschaltbild	6
2.1.1	PI-ESB: Einstufiges Fitting	6
2.1.2	PI-ESB: Zweistufiges Fitting	8
2.2	Fitting mittels PISK Ersatzschaltbild	9
2.2.1	PISK-ESB: Einstufiges Fitting	9
2.2.2	PISK-ESB: Zweistufiges Fitting	10
2.3	Sweeping der Serienwiderstände	10
2.4	Fazit	11
	Anhang	12
	A Frequenzgänge	12
	Literaturverzeichnis	22

Abbildungsverzeichnis

2.1	Erweitertes PI-Ersatzschaltbild für Spulen	6
2.2	Zu einem Tiefpass erweiterte Spule	8
2.3	PISK-Ersatzschaltbild für Spulen	9
A.1	PI-ESB: Frequenzgang Reflexion (Betrag)	12
A.2	PI-ESB: Frequenzgang Reflexion (Phase)	13
A.3	PI-ESB: Frequenzgang Transmission (Betrag)	13
A.4	PI-ESB: Frequenzgang Transmission (Phase)	14
A.5	PI-ESB (Tiefpass-erweitert): Frequenzgang Reflexion (Betrag)	14
A.6	PI-ESB (Tiefpass-erweitert): Frequenzgang Reflexion (Phase)	15
A.7	PI-ESB (Tiefpass-erweitert): Frequenzgang Transmission (Betrag)	15
A.8	PI-ESB (Tiefpass-erweitert): Frequenzgang Transmission (Phase)	16
A.9	PI-ESB (Tiefpass-erweitert): Transmission (Zoom)	16
A.10	PISK-ESB: Frequenzgang Reflexion (Betrag)	17
A.11	PISK-ESB: Frequenzgang Reflexion (Phase)	17
A.12	PISK-ESB: Frequenzgang Transmission (Betrag)	18
A.13	PISK-ESB: Frequenzgang Transmission (Phase)	18
A.14	PISK-ESB (Tiefpass-erweitert): Frequenzgang Reflexion (Betrag)	19
A.15	PISK-ESB (Tiefpass-erweitert): Frequenzgang Reflexion (Phase)	19
A.16	PISK-ESB (Tiefpass-erweitert): Frequenzgang Transmission (Betrag)	20
A.17	PISK-ESB (Tiefpass-erweitert): Frequenzgang Transmission (Phase)	20
A.18	PISK-ESB (Tiefpass-erweitert): Transmission (Zoom)	21

Tabellenverzeichnis

2.1	Ergebnisse, einstufiges Fitting (PI-ESB)	8
2.2	Ergebnisse, zweistufiges Fitting (PI-ESB)	9
2.3	Ergebnisse, einstufiges Fitting (PISK-ESB)	10
2.4	Ergebnisse, zweistufiges Fitting (PI-ESB)	10

2 Fitting der HF Spule coil18_4.s2p

2.1 Fitting mittels PI Ersatzschaltbild

2.1.1 PI-ESB: Einstufiges Fitting

Wie von Professor Heuermann dargestellt¹ beinhaltet das erweiterte PI Ersatzschaltbild die für das Design wichtigsten (und physikalisch interpretierbaren) Elemente (Bild 2.1).

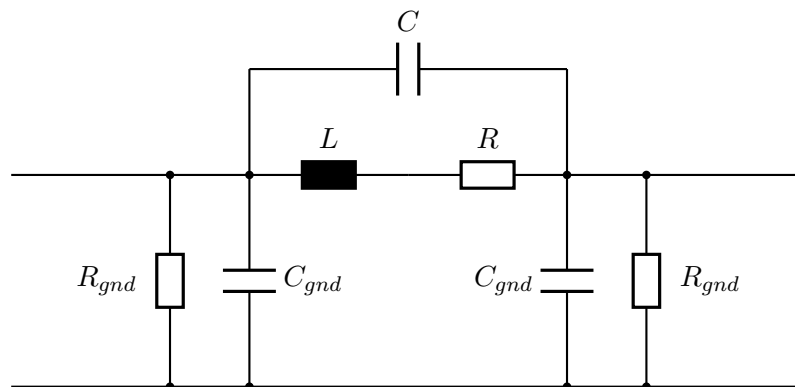


Abbildung 2.1: Erweitertes PI-Ersatzschaltbild für Spulen

Kernelement ist hier natürlich die Serieninduktivität L , welche aus der eigentlichen Spule sowie den Anschlusselementen besteht.

Der Serienwiderstand R stellt Verluste dar, die nicht von der Frequenz abhängen. Der Kondensator C stellt die Kopplungskapazität zwischen Ein- und Ausgangswicklung der Spule dar. Die beiden Kondensatoren C_{gnd} stehen für die Kapazität zwischen Masse und den Spulenwicklungen. Zu guter letzt stellen die beiden Widerstände R_{gnd} mögliche Substratverluste bei Spulen in Halbleitertechnologie dar.

Um nun mittels verschiedener Simulationen mit Hilfe des Programms ADS ein Modell für die reale Spule zu erhalten, baut man gleichzeitig das erweiterte PI Modell (Bild 2.1),

¹[Heu05, S.224f] *Das PI-Modell*

sowie (in einer separaten Schaltung, im gleichen Bild) ein theoretisches Bauteil, welches sich anhand der S2P Datei exakt nach dem Vorbild der vermessenen realen Spule verhält.

ADS ist nun in der Lage die Streuparameter der Modellschaltung nach Betrag und Phase zu ermitteln. Zusätzlich ist es in der Lage die Werte der Bauteile der Modellschaltung so zu optimieren, daß sie möglichst exakt einem mathematischen Zusammenhang genügen.

In diesem Fall wählt man zwei solche Zusammenhänge, um die Reflexions (R_{opt}) sowie Transmissionsparameter (T_{opt}) des Modells an die der real vermessenen Spule anzugleichen:

$$T_{opt} = \frac{S_{21}}{S_{43}} \quad (2.1)$$

$$R_{opt} = \frac{S_{11}}{S_{33}} \quad (2.2)$$

Da es sich bei Streuparametern im Allgemeinen um komplexe Werte handelt, optimiert man nun nach Betrag und Phase - und das über den gesamten vermessenen Frequenzbereich bis 15GHz. Dabei optimiert man auf Werte um Eins für den Betrag und um Null für die Phase:

$$mag(T_{opt}) = [0.99, 1.01] \quad (2.3)$$

$$phase(T_{opt}) = [0.99, 1.01] \quad (2.4)$$

$$mag(R_{opt}) = [-0.01, 0.01] \quad (2.5)$$

$$phase(R_{opt}) = [-0.01, 0.01] \quad (2.6)$$

Dabei ist es zweckmäßig, den verschiedenen Optimierungsparametern unterschiedliche Gewichtungen zu geben, um dem Optimieren von ADS eine Chance zu geben in mehrdeutigen Fällen einen vernünftigen Weg einzuschlagen. Dabei wurde hier den Betragsparametern eine deutlich höhere Gewichtung als den Phasenparametern gegeben. Das Verhältnis betrug etwa 60 bis 70 zu 1 (wobei dem Transmissionsbetrag eine leicht höhere Wichtigkeit als dem Reflexionsbetrag zugeteilt wurde).

Der Optimierer von ADS verfügt über eine Fülle von Optimierungsalgorithmen, von denen in diesem Praktikum zwei Verwendung fanden. Zuerst wurden 500 Schritte im RANDOM Verfahren gemacht. Anschliessend kamen 100 Schritte im GRADIENT Verfahren zur endgültigen Optimierung zum Einsatz.

Im Ergebnis dieses ersten Schrittes findet man grafisch Aufgenommene Frequenzgänge der Transmission nach Betrag (Bild A.3) und Phase (Bild A.4), sowie der Reflexion, wiederum nach Betrag (Bild A.1) und Phase (Bild A.2).

BAUTEIL	WERT
R	5.93Ω
L	$11.4nH$
C	$46.7pF$
C_{gnd}	$216fF$
R_{gnd}	$2.13k\Omega$

Tabelle 2.1: Ergebnisse, einstufiges Fitting (PI-ESB)

Die dabei erreichten Werte der einzelnen Bauteile im Modell sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

2.1.2 PI-ESB: Zweistufiges Fitting

Um nun die wichtigen Transmissionseigenschaften der Spule besser modellieren zu können, baut man die Spulen (das Modell und das real vermessene Objekt) in jeweils einen Tiefpass ein (Bild 2.2). Da ein Tiefpass in seinem Durchlassbereich eine möglichst niedrige Transmissionsdämpfung haben sollte, ist dies eine sehr empfindliche Schaltung, um die Spule genauer zu fitten.

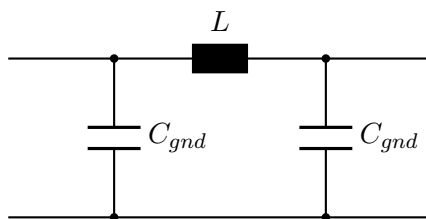


Abbildung 2.2: Zu einem Tiefpass erweiterte Spule

Der dort verwandte Kondensator C_T liegt natürlich fest und wird von den Optimierungsvorgängen nicht verändert.

Die Ergebnisse dieses Schrittes der einzelnen Bauteile sind wiederum in einer Tabelle (2.2) dargestellt.

Auch hier sind die Frequenzgänge grafisch dargestellt (Transmission, Bilder: A.7, A.8; Reflexion, Bilder: A.5, A.6).

BAUTEIL	WERT
R	6.39Ω
L	$13.6nH$
C	$38.9pF$
C_{gnd}	$92.0fF$
R_{gnd}	$2.48k\Omega$
C_T	$3pF$

Tabelle 2.2: Ergebnisse, zweistufiges Fitting (PI-ESB)

2.2 Fitting mittels PISK Ersatzschaltbild

2.2.1 PISK-ESB: Einstufiges Fitting

Bei höheren Frequenzen ist ein sehr grosser Verlustmechanismus bei Spulen, die Eindringtiefe δ . Diese Verlust werden durch die zusätzliche Parallelschaltung von L_{sk} und R_{sk} modelliert² (Bild 2.3).

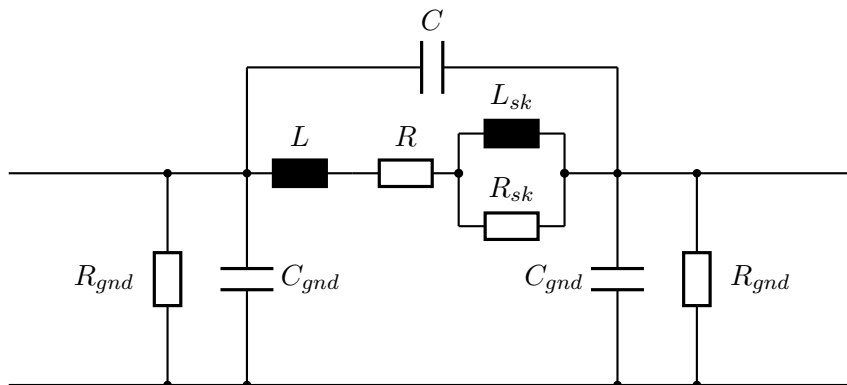


Abbildung 2.3: PISK-Ersatzschaltbild für Spulen

Die Ergebnisse sind wiederum grafisch dargestellt (Transmission, Bilder: A.10, A.11; Reflexion, Bilder: A.12, A.13).

Die Werte der einzelnen Bauteile findet man in Tabelle 2.3.

²[Heu05, S.225] Das PISK-Modell

BAUTEIL	WERT
R	4.13Ω
L	$13.1nH$
C	$39.0pF$
C_{gnd}	$216fF$
R_{gnd}	$2.50k\Omega$
R_{sk}	4.12Ω
L_{sk}	$0.412nH$

Tabelle 2.3: Ergebnisse, einstufiges Fitting (PISK-ESB)

2.2.2 PISK-ESB: Zweistufiges Fitting

Auch beim PISK Modell erweitert man nun sie Spulen zu zwei Tiefpässen um die Transmissionseigenschaften besser beurteilen zu können (entsprechend Bild 2.2).

Nach weiteren Optimierungsdurchgängen erhält man die in Tabelle 2.4 dargestellten Bauteilwerte, sowie die neuen Frequenzgänge für Transmission (Bilder A.16, A.17) und Reflexion (A.14, A.15).

BAUTEIL	WERT
R	5.05Ω
L	$13.3nH$
C	$38.8pF$
C_{gnd}	$198fF$
R_{gnd}	$2.50k\Omega$
R_{sk}	4.00Ω
L_{sk}	$0.416nH$
C_T	$3pF$

Tabelle 2.4: Ergebnisse, zweistufiges Fitting (PI-ESB)

2.3 Sweeping der Serienwiderstände

Man kann mit ADS einzelnen Bauteilen verschiedene Werte annehmen lassen und diese dann in einem einzigen Ergebnisplot darstellen lassen.

In diesem Versuch haben wir dieses Feature genutzt, um bei den zu Tiefpässen erweiterten Modellschaltungen die Serienwiderstände über kleine Bereiche zu “sweepen”. Dies macht die Abhängigkeit der Transmissionsdämpfung von eben diesen Serienwiderständen

deutlich. Eventuell lassen sich hier sogar besser geeignete Werte für die Widerstände finden als dies nach den Optimierungsdurchgängen der Fall war.

Plots dieser Sweeping Vorgänge (der Betrag der Transmission auf die 3dB Frequenz “gezoomt”) sind in Bild A.9 (PI Modell) und Bild A.18 (PISK Modell) enthalten.

2.4 Fazit

In diesem Versuch wurde eine sehr gute Vorstellung davon vermittelt, wie man für (durch präzise Messungen) gegebene reale Bauelemente, durch geeignete Methoden sehr genaue Modelle zur Simulation echter Schaltungen erreichen kann. Dabei kam man mit dem Simulationsprogramm ADS mit einem Werkzeug in Berührung, welches als absoluter Industriestandard gilt.

Durch die Gegenüberstellung zweier leicht unterschiedlicher Modelle wurde sehr plastisch dargelegt, wie man vorgehen kann, um zusätzliche physikalische Phänomene modellieren kann (in diesem Fall Dispersionen aufgrund der Eindringtiefe durch L_{sk} und R_{sk} in Bild 2.3).

Zuletzt wurde noch ein möglicher Ansatz aufgezeigt, mit dem man Sensibilisierungen durch die Einbindung eines Bauteils in eine einfache Grundschaltung erreichen kann, in dem man sich mit der Schaltung zusammen hängende Grundlagen (hier: Empfindlichkeit der Transmissionsdämpfung für den Serienwiderstand) zu Nutze macht.

Zu wissen, daß diese in der Theorie angesprochenen Modelling Verfahren auch in der Praxis, ohne großen Aufwand, sehr brauchbare Ergebnisse liefern, erhöht das Vertrauen in auf diesen Methoden beruhenden Entwicklungsmöglichkeiten.

A Frequenzgänge

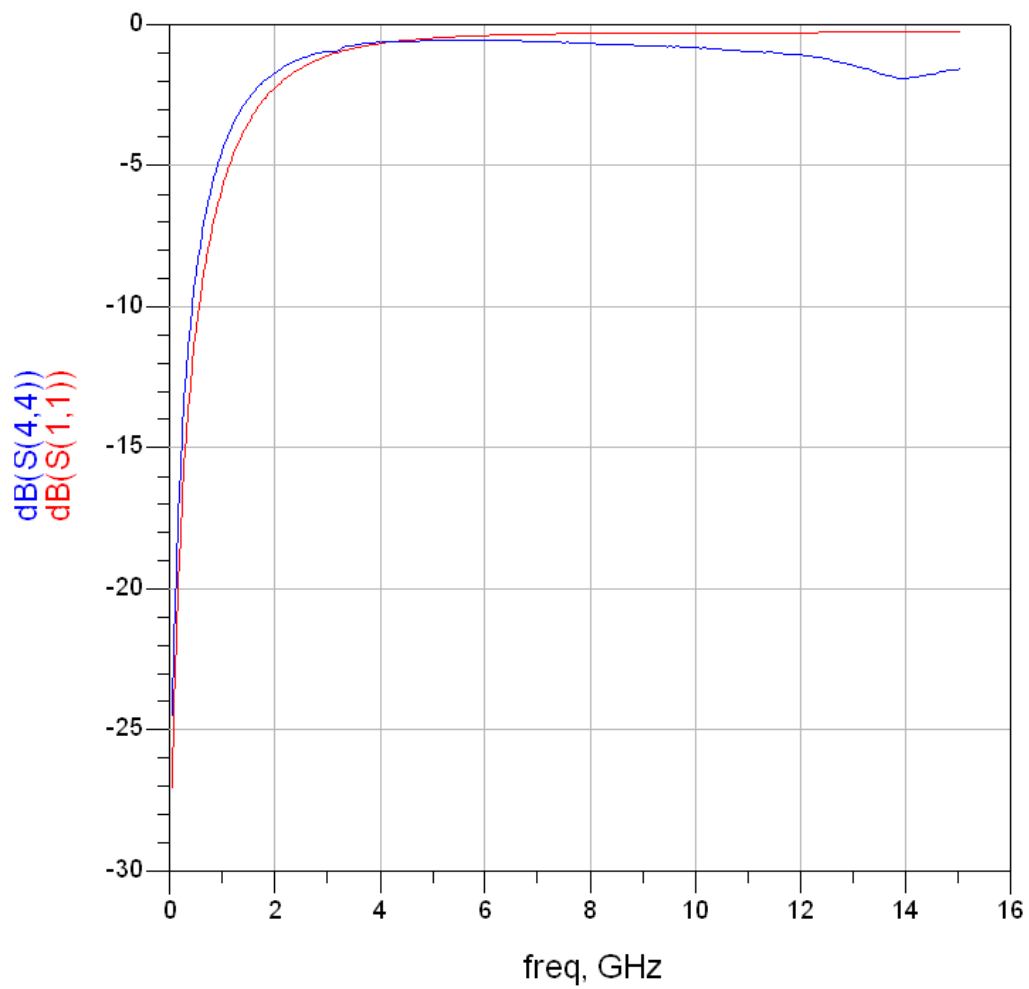


Abbildung A.1: PI-ESB: Frequenzgang Reflexion (Betrag)

2.4 Fazit

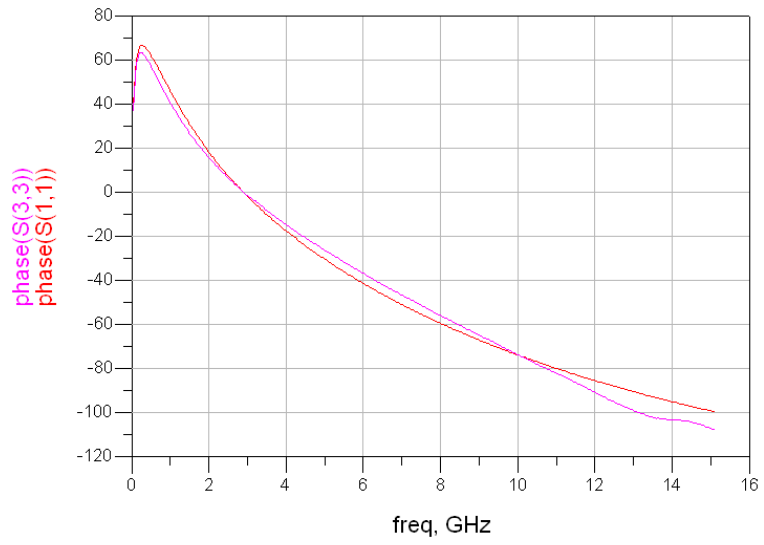


Abbildung A.2: PI-ESB: Frequenzgang Reflexion (Phase)

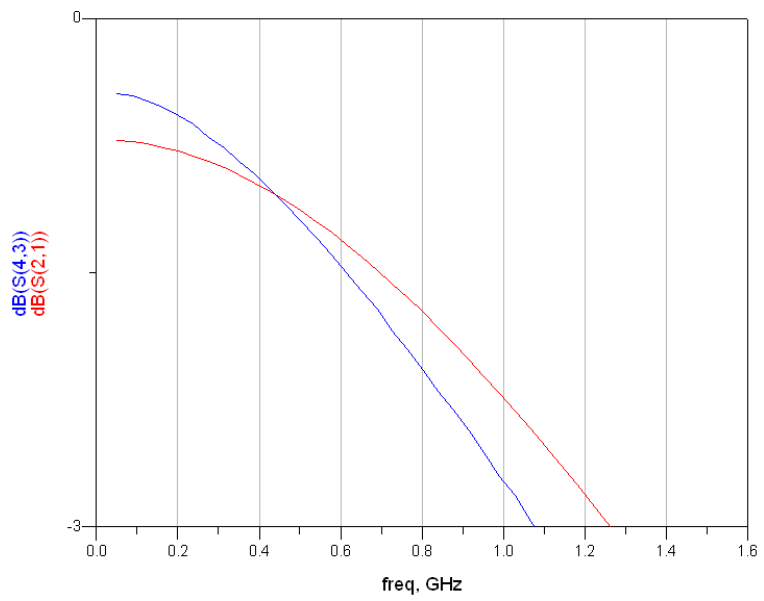


Abbildung A.3: PI-ESB: Frequenzgang Transmission (Betrag)

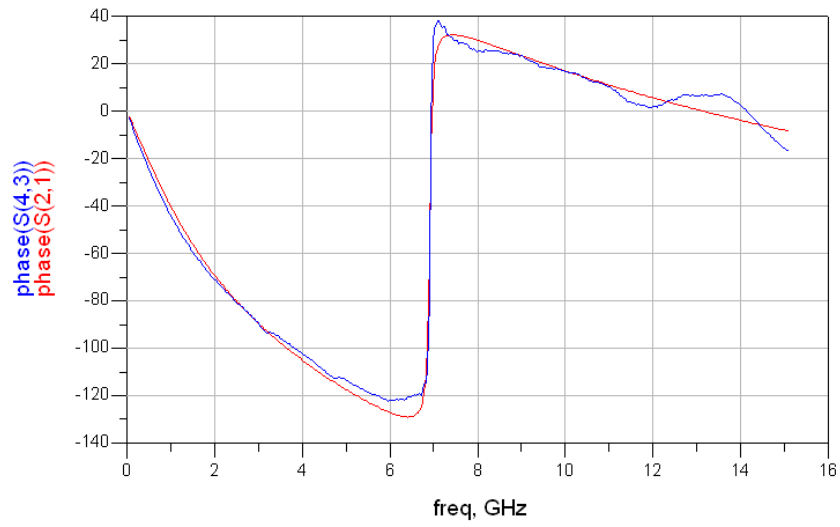


Abbildung A.4: PI-ESB: Frequenzgang Transmission (Phase)

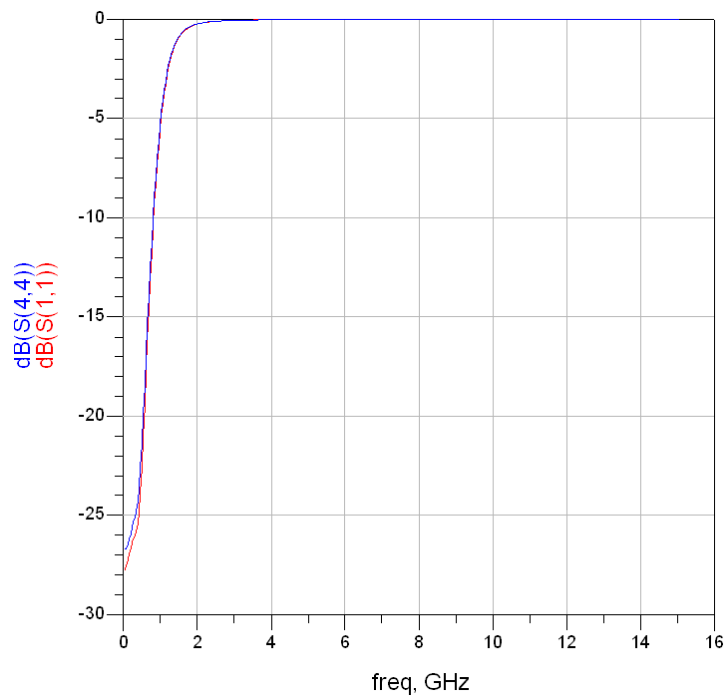


Abbildung A.5: PI-ESB (Tiefpass-erweitert): Frequenzgang Reflexion (Betrag)

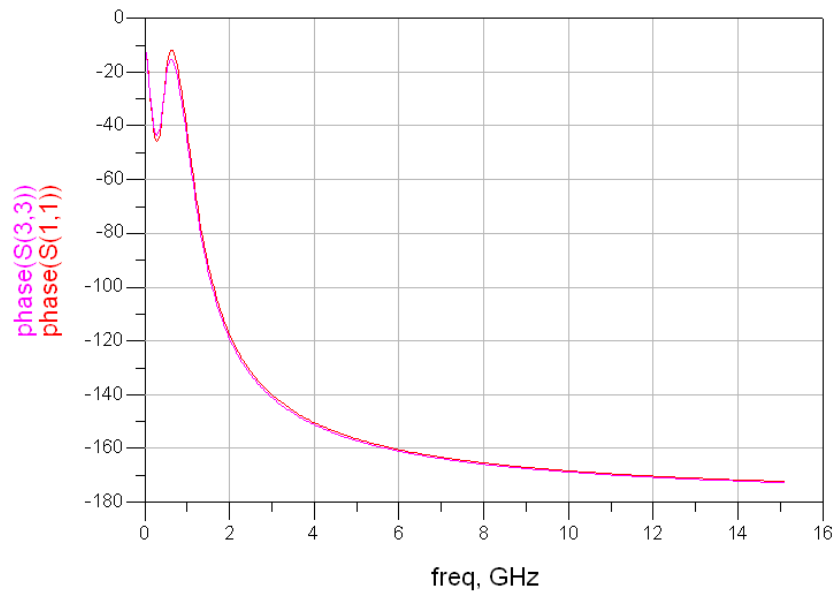


Abbildung A.6: PI-ESB (Tiefpass-erweitert): Frequenzgang Reflexion (Phase)

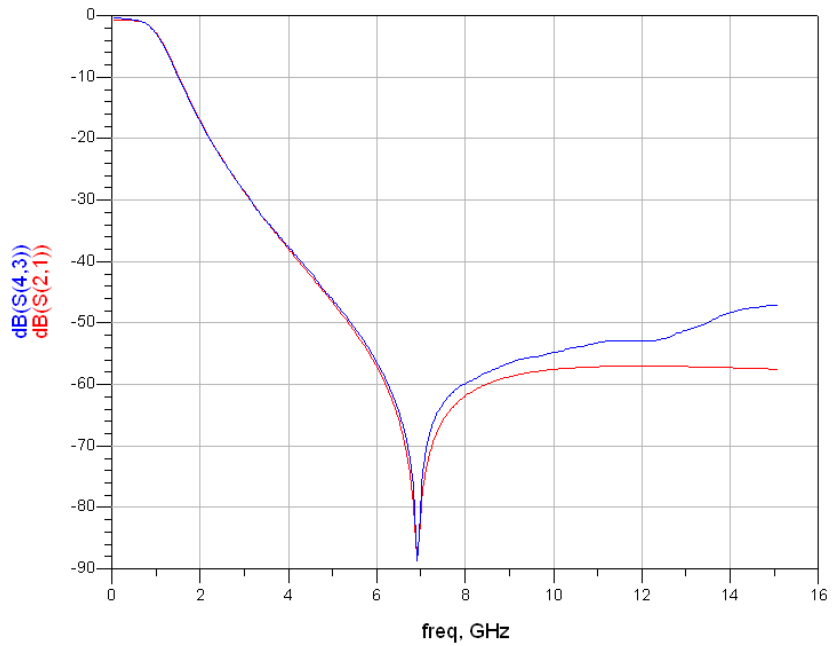


Abbildung A.7: PI-ESB (Tiefpass-erweitert): Frequenzgang Transmission (Betrag)

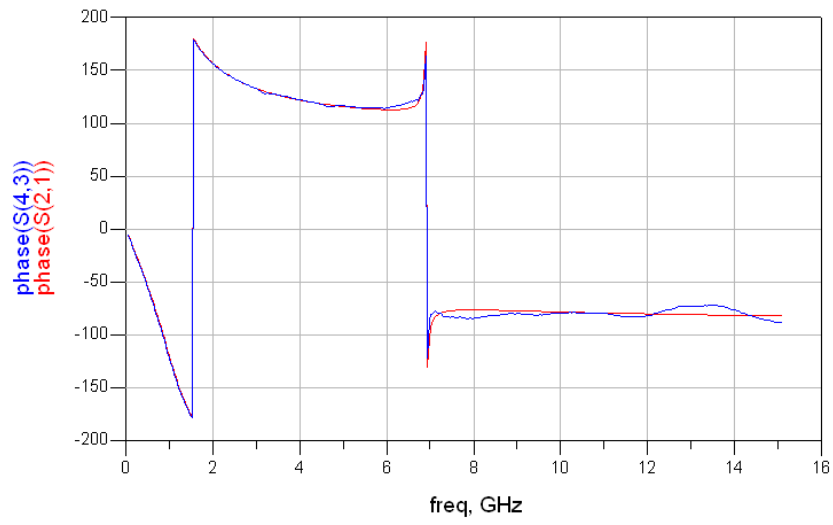


Abbildung A.8: PI-ESB (Tiefpass-erweitert): Frequenzgang Transmission (Phase)

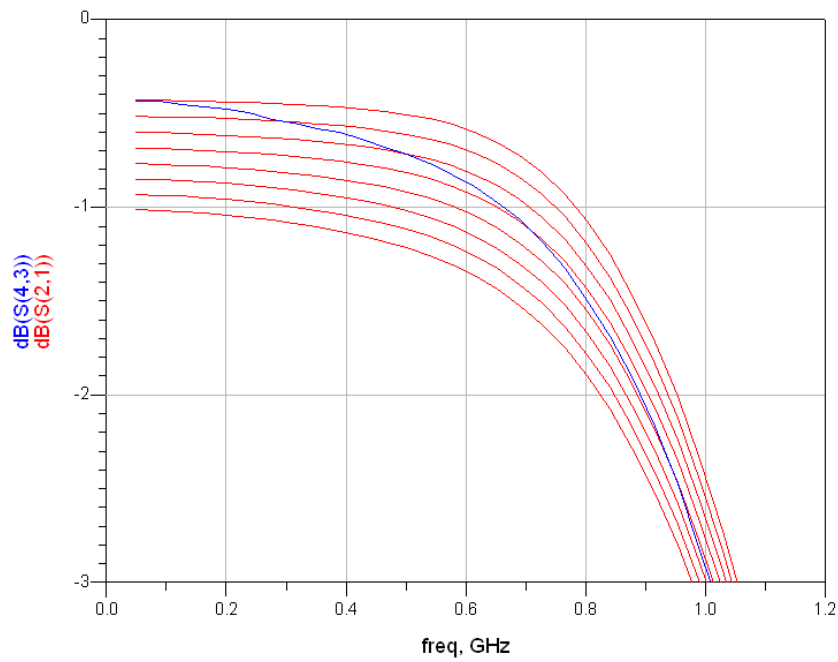


Abbildung A.9: PI-ESB (Tiefpass-erweitert): Transmission (Zoom)

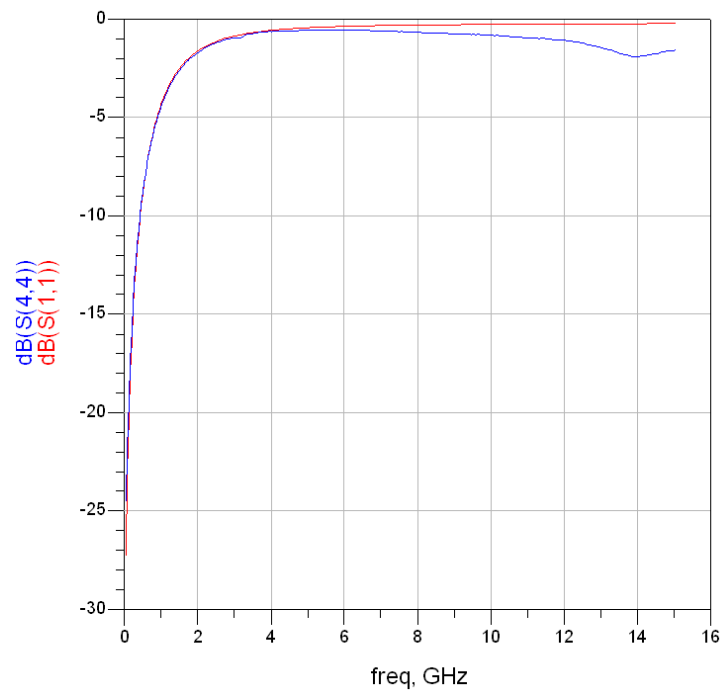


Abbildung A.10: PISK-ESB: Frequenzgang Reflexion (Betrag)

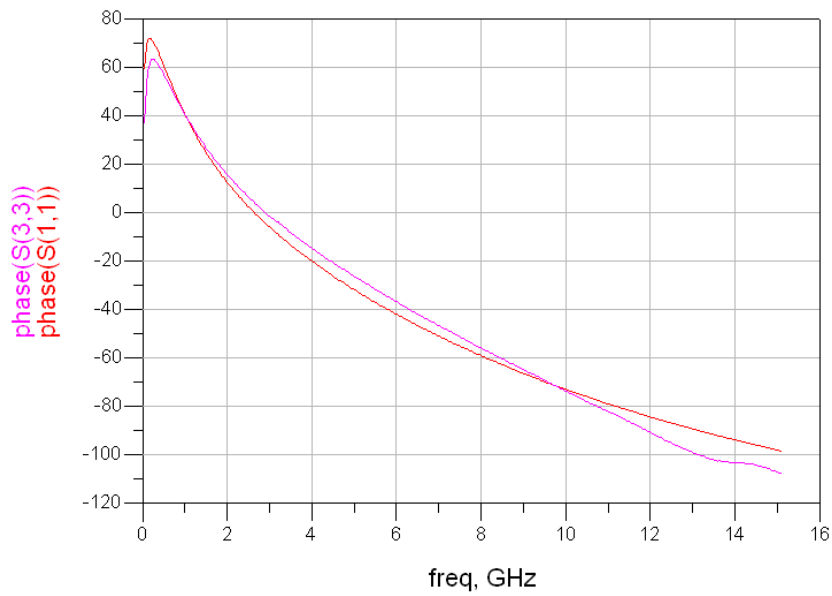


Abbildung A.11: PISK-ESB: Frequenzgang Reflexion (Phase)

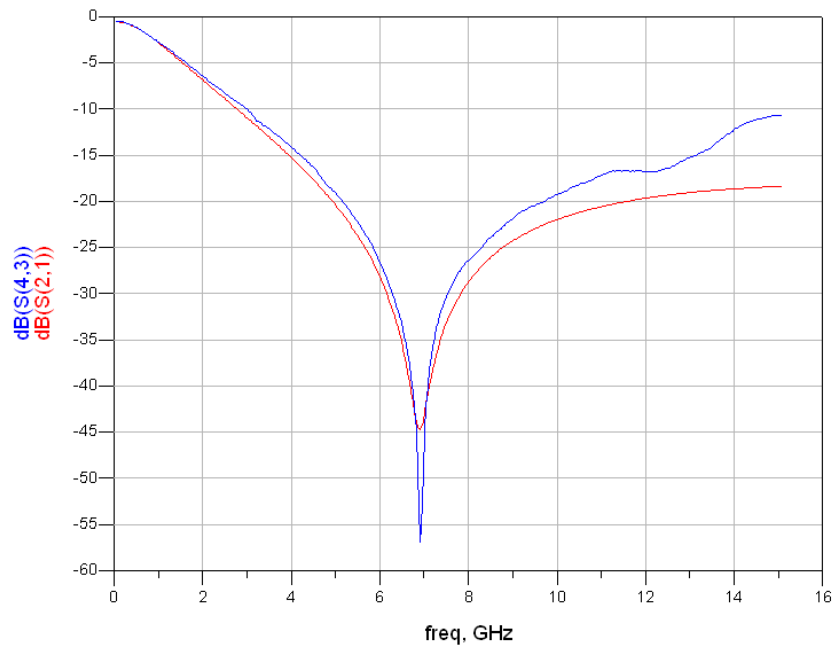


Abbildung A.12: PISK-ESB: Frequenzgang Transmission (Betrag)

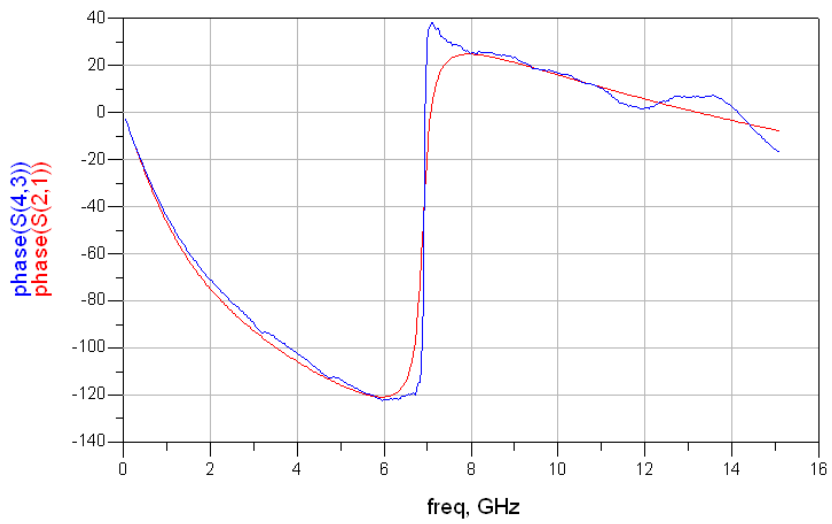


Abbildung A.13: PISK-ESB: Frequenzgang Transmission (Phase)

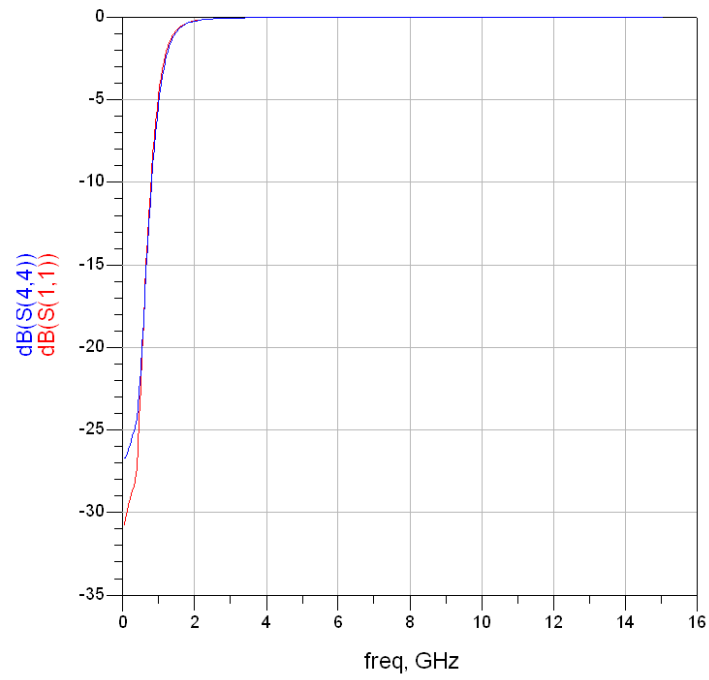


Abbildung A.14: PISK-ESB (Tiefpass-erweitert): Frequenzgang Reflexion (Betrag)

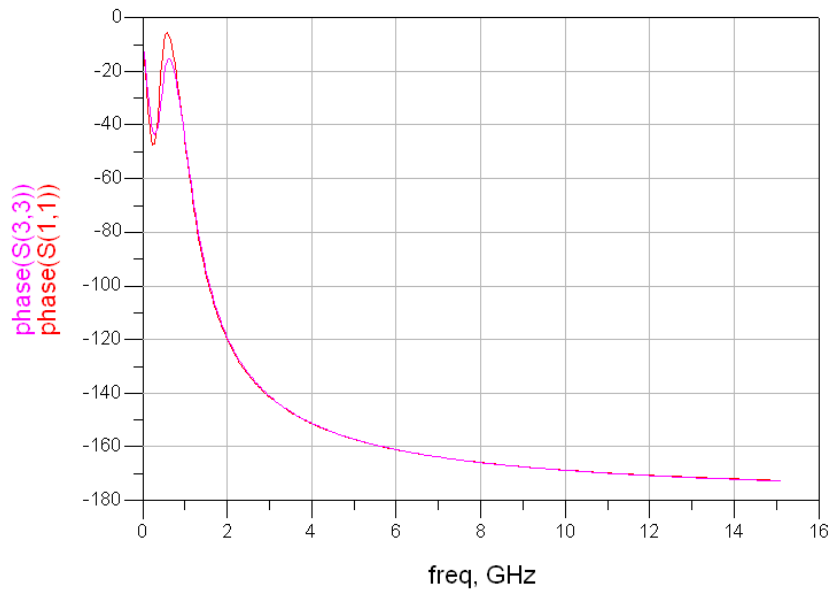


Abbildung A.15: PISK-ESB: (Tiefpass-erweitert): Frequenzgang Reflexion (Phase)

2.4 Fazit

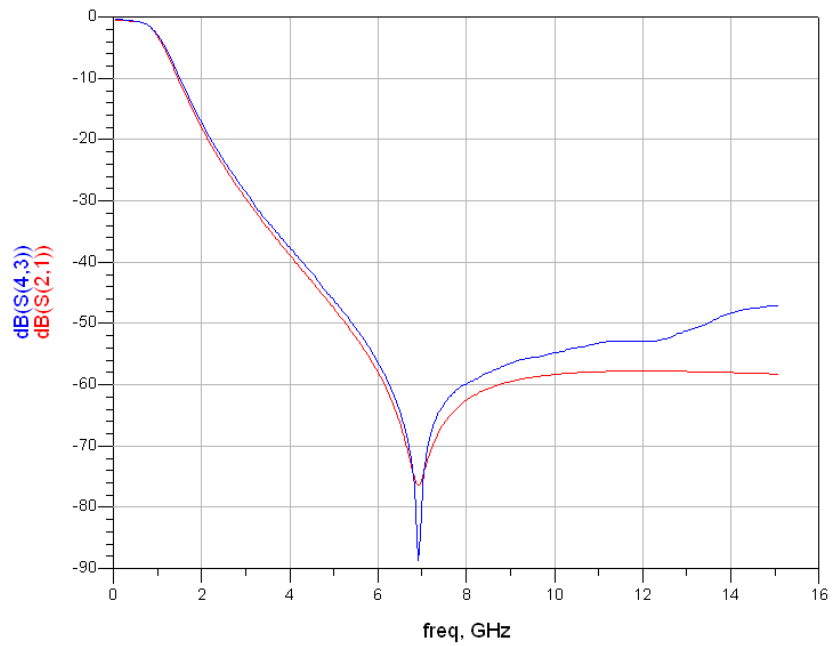


Abbildung A.16: PISK-ESB: (Tiefpass-erweitert): Frequenzgang Transmission (Betrag)

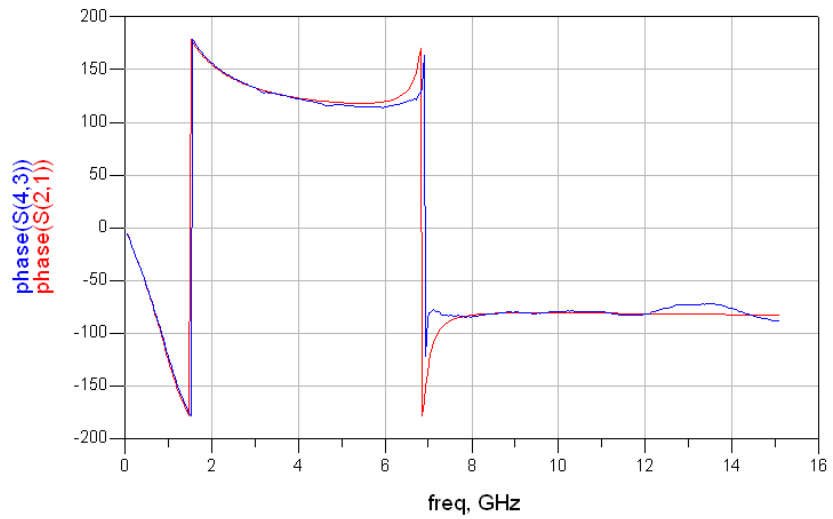


Abbildung A.17: PISK-ESB: (Tiefpass-erweitert): Frequenzgang Transmission (Phase)

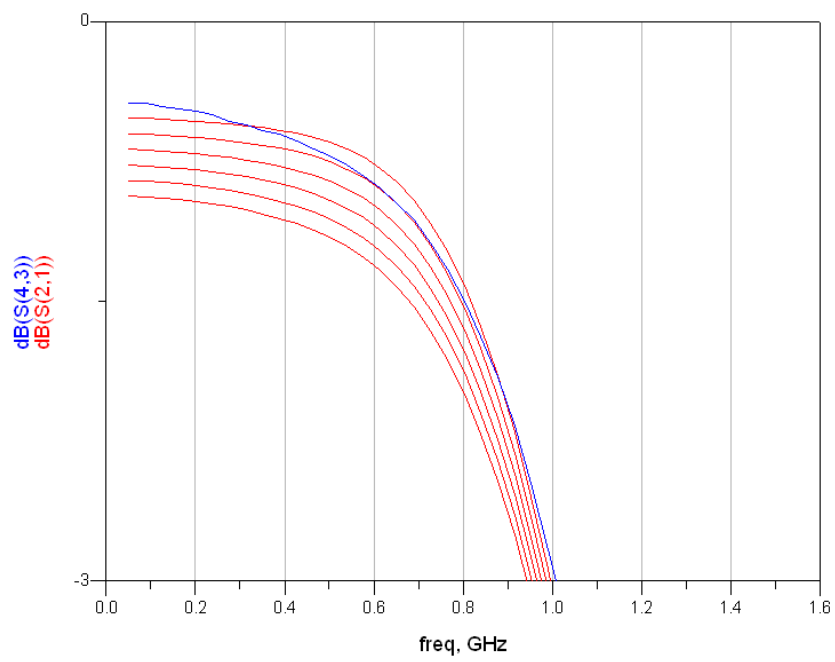


Abbildung A.18: PISK-ESB: (Tiefpass-erweitert): Transmission (Zoom)

Literaturverzeichnis

[Heu05] Holger Heuermann. *Hochfrequenztechnik*. Vieweg, Wiesbaden, Germany, 1st edition, 2005.