Breitbandiges PIN-Dioden-Dämpfungsglied für allgemeine Anwendungen

Design und Leistungsfähigkeit eines auf vier PIN-Dioden basierenden Hochleistungsdämpfungsgliedes

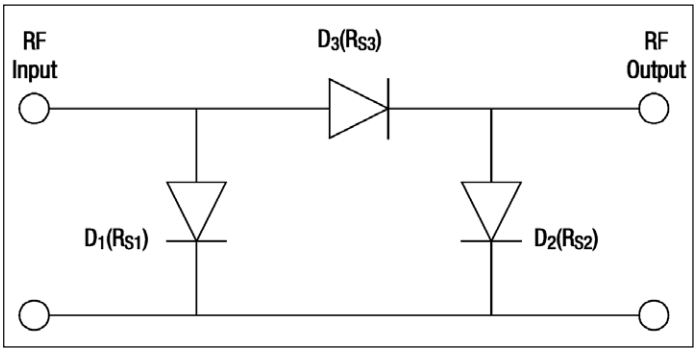

Bild 1: Das klassische PI-Dämpfungsglied mit drei Dioden

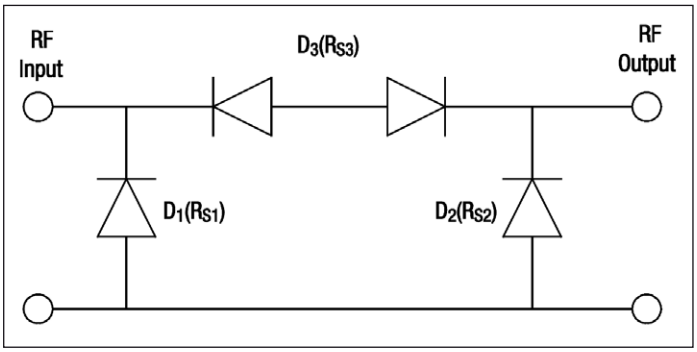

Bild 2: Ein Vierdioden-Dämpfungsglied

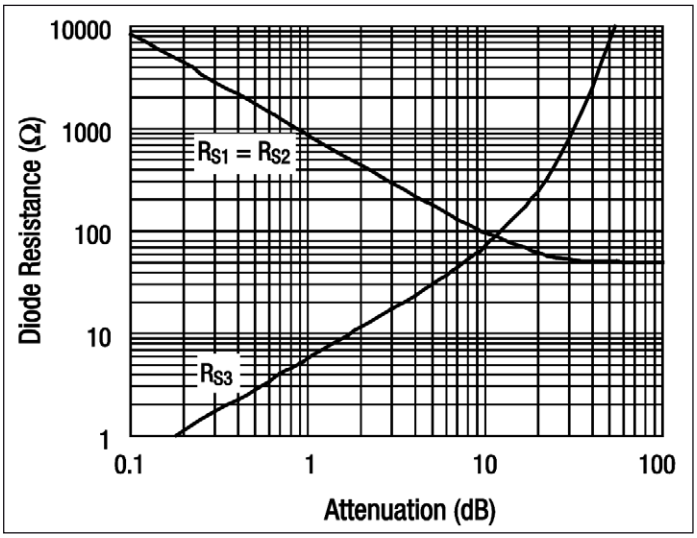

Bild 3: Gesamtdämpfung und HF-Widerstände der Dioden

Dämpfungsglieder für die automatische Verstärkungsregelung (AGC = automatic gain control) auf der Basis von PIN-Dioden haben eine hohe Verbreitung in vielen breitbandigen Anwendungen, wie TV-Übertragungssysteme mit herkömmlichen Kabeln oder Glasfasern, drahtlose CDMA oder zellulare Kommunikation. PIN-Dioden sind kostengünstig in diversen kleinen Plastikgehäusen verfügbar und verursachen nur geringe Verzerrungen.

Grundlagen des PI-Dämpfungsgliedes

Die Pi-Struktur (Bild 1) ist ein gängiges Design für den enormen Frequenzbereich von 10 MHz bis über 2 GHz. Die Vorteile dieses Designs sind die weitgehend frequenzunabhängige Impedanz, der große Dynamikbereich und die gute Kompatibilität zu AGC-Signalen. Die PIN-Diode wird darin als stromgesteuerter Widerstand genutzt. Noch weiter verbessern lassen sich die Eigenschaften mit der Struktur gemäß Bild 2. Setzt man hier die Low-Cost-Typen SMP 1307-011LF mit ihrem Plastikgehäuse SOD-323 ein, kann man Frequenzen zwischen 10 MHz und 3 GHz sehr gut verarbeiten. Die Vorteile dieser Vierdiodenstruktur sind eine einfachere Bias-Lösung infolge der Symmetrie und ein sehr geringer Klirrfaktor infolge der Ausblendung harmonischer Anteile durch die Back-to-Back-Anordnung der Seriendioden.

Aus Bild 3 sind die Widerstandswerte der einzelnen Dioden des einfachen PI-Glieds zu entnehmen, die bei einer bestimmten Dämpfung der gesamten Anordnung auftreten. Die Längsdiode vergrößert mit steigender Gesamtdämpfung ihren Widerstand, während die Querdioden im Widerstand nachlassen. Bei 10 dB Gesamtdämpfung beispielsweise sind jeweils etwa 100 Ohm vorhanden. Dies alles gilt für ein 50-Ohm-Dämpfungsglied. Die Querdioden können daher niemals weniger als 50 Ohm erreichen.

Modellierung des Vierdioden-Dämpfungsgliedes

In dem Libra-IV-Model gemäß Bild 4 gibt es zwei symmetri-

Quelle: Application Note, A Wideband General Purpose PIN Diode Attenuator Skyworks Solutions, www.skyworksinc.com übersetzt von FS

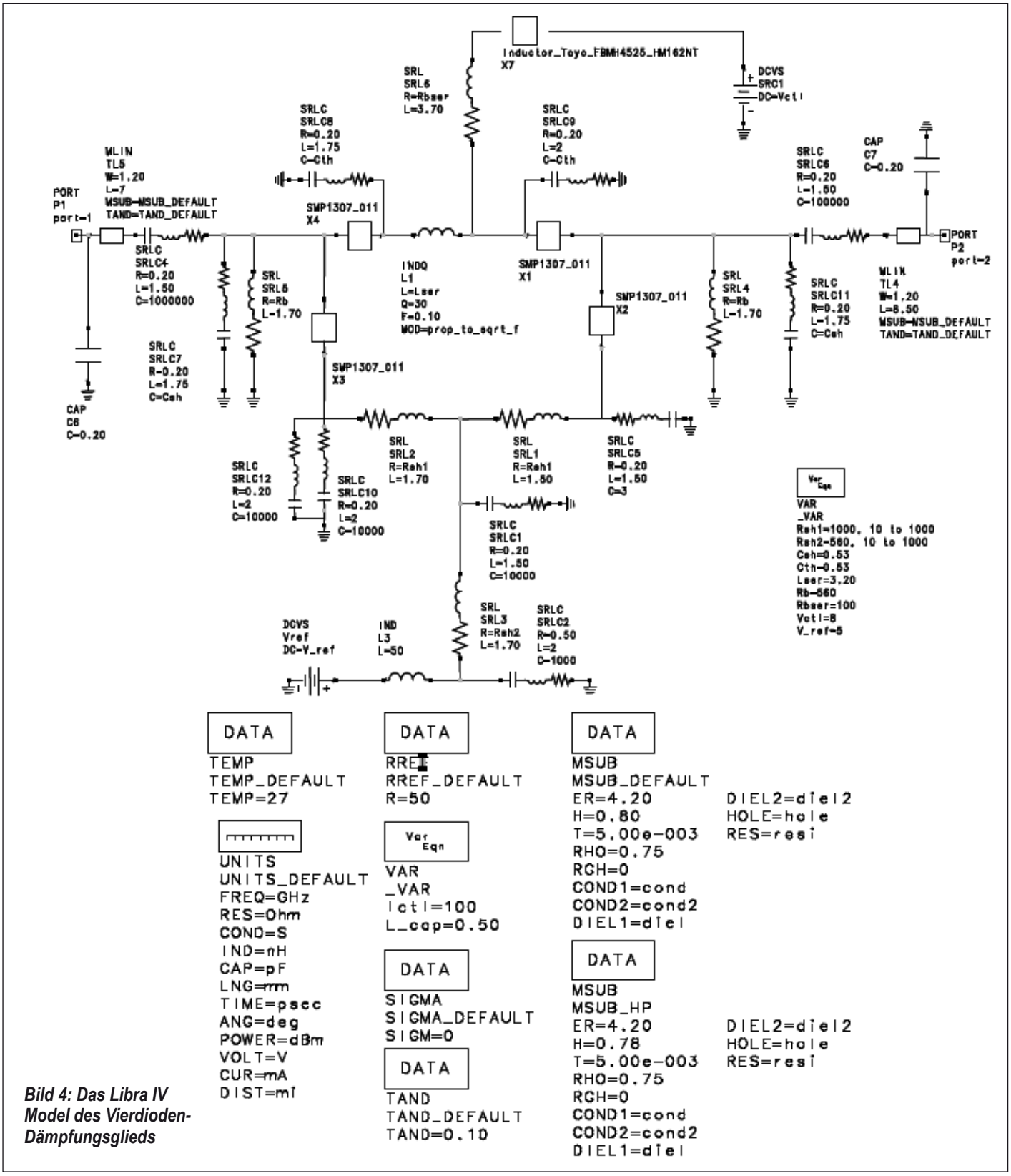

Bild 4: Das Libra IV Model des Vierdioden-Dämpfungsglieds

sche PIN-Dioden-Paare X3/X4 und X1/X2. Sie werden symmetrisch von zwei DC-Quellen gesteuert. Eine 5-V-Referenz sorgt dabei für ein adäquates Biasing, um die HF-Widerstände der Shunt-Dioden X2 und X3 nicht unter 50 Ohm sinken zu lassen bzw. bei höchster Dämpfung nahe 50 Ohm zu halten, während die Längsdioden hohe Widerstände aufweisen. Die Werte der Biasing-Widerstände SRL3, SRL2, SRL1 und SRL4 wurden so gewählt, dass sich im gesamten Dämpfungsbereich ein möglichst niedriges SWR ergibt. Es wurde versucht, die Werte von SRL5 und SRL4 so zu bemessen, dass ein hoher Durchlasstrom durch die seriellen Dioden X4 und X1 fließt, ohne dabei die Einfügedämpfung zu beeinträchtigen. Die Dämpfung wird über die Steuerspannung VCTL von 1 bis 6 V eingestellt. Diese Quelle treibt je einen Durchlassstrom durch die

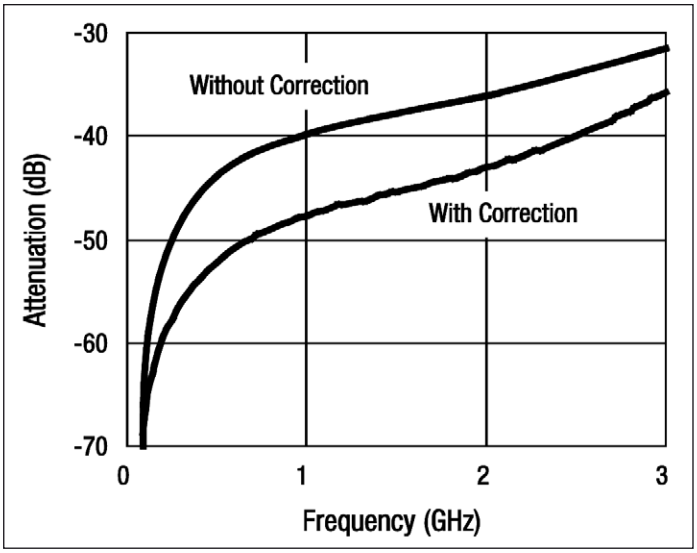

Bild 5: Effekt mit und ohne PI-Struktur. Die etwa 5 dB höhere Dämpfung mit Korrektur kommt durch eine entsprechend verbesserte Entkopplung zustande.

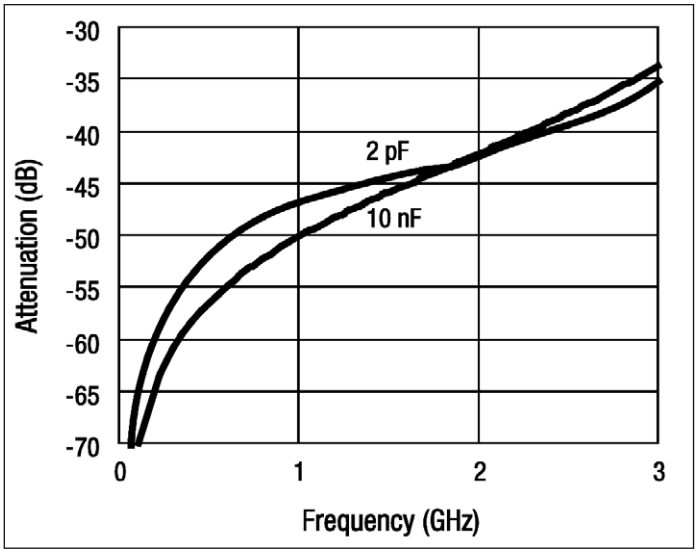

Bild 6: Kennlinie mit kleinem und großem Kondensator SRLC5

Seriendioden X4 und X1 über eine breitbandige Hochimpedanz-Ferritkernspule X7 vom Typ Taiyo-Yuden FBMH 4525. sowie die Widerstände SRL5, SRL4 und SRL6. Die Kapazitäten SRLC12, SRLC10 und SRLC5 schaffen die HF-Erde für die Shunt-Dioden. Die Auftrennung des Biasing-Pfades in die zwei Wege SRL2 und SRL1 reduziert die HF-Verkopplung zwischen Ein- und Ausgang, die besonders bei hoher Dämpfung und hohen Frequenzen einen kritischen Punkt darstellen würde. Die Kapazitäten C6 und C7 simulieren den Einfluss der koaxialen SMA-Anschlüsse. Die an den Shunts liegenden Kapazitäten SRLC7 und SRLC11 wurden eingesetzt, um die parasitäre

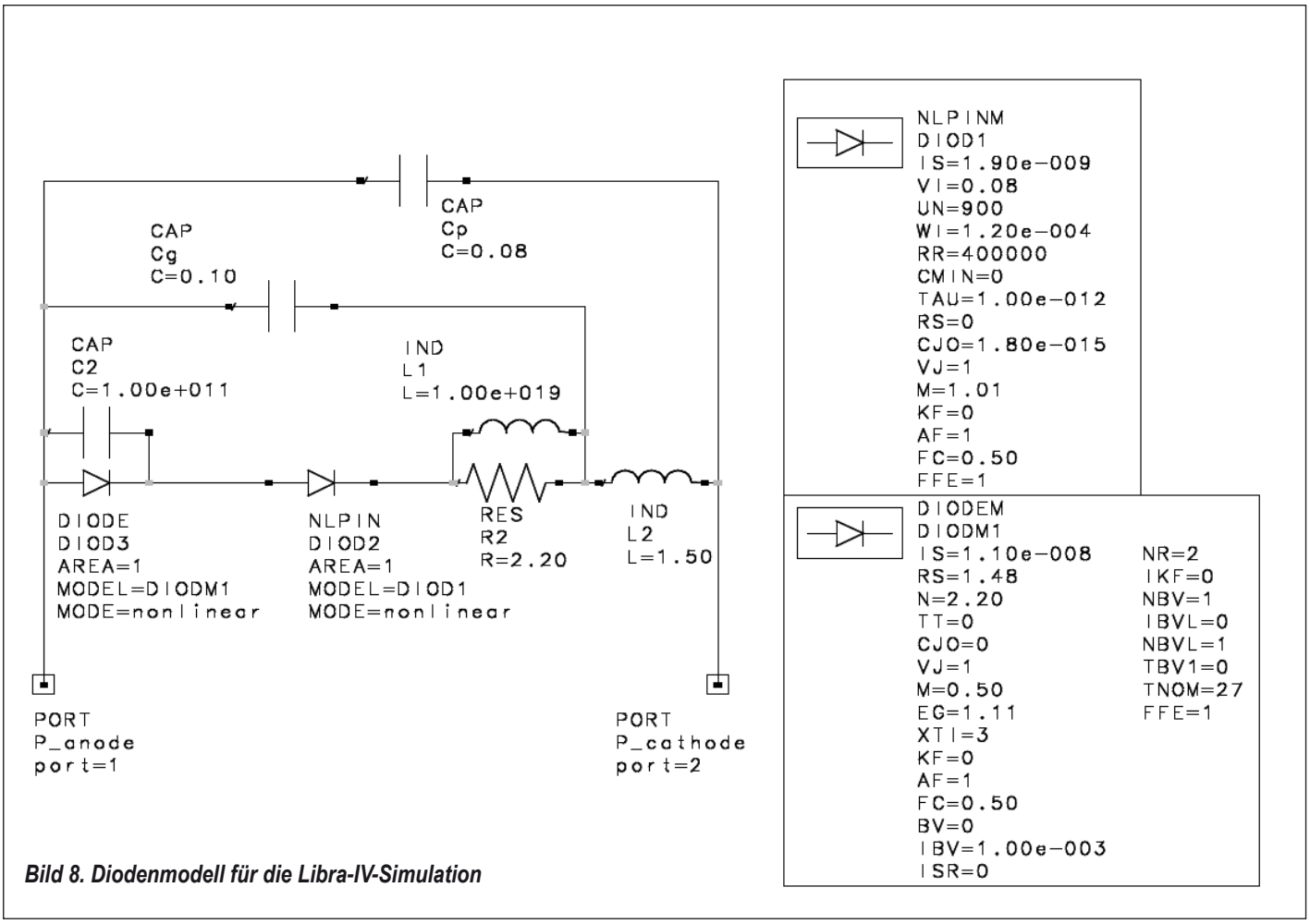

Bild 8. Diodenmodell für die Libra-IV-Simulation

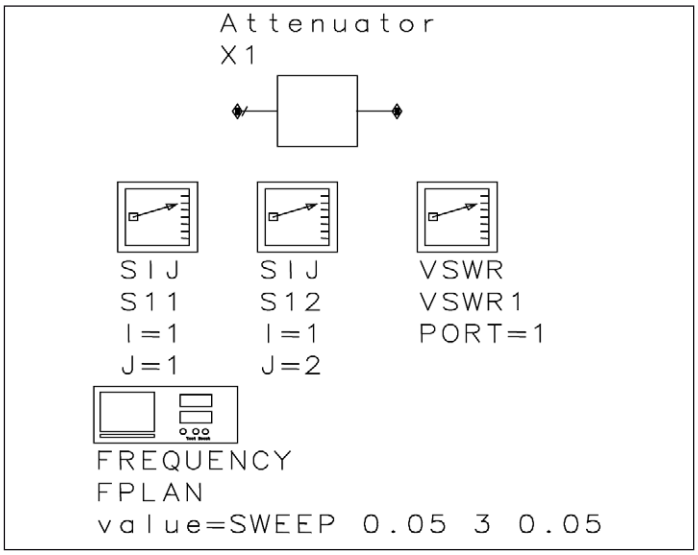

Bild 7: Prüfstand für Libra IV

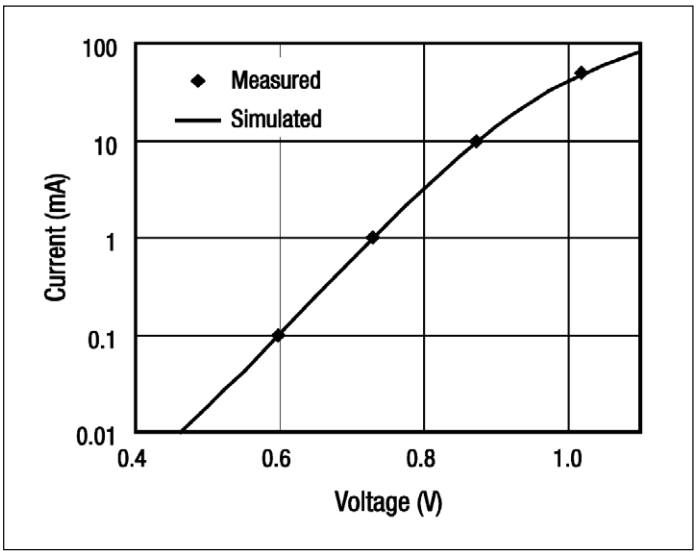

Bild 9: Verlauf des Gleichstroms über der Gleichspannung

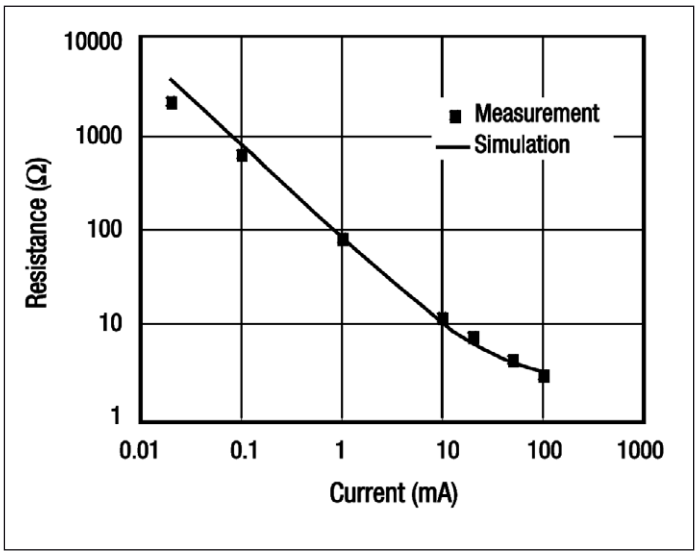

Bild 10: Verlauf des HF-Widerstands der Diode über dem Gleichstrom

Induktanz der Entkopplungskondensatoren SRLC4 und SRLC6 zu kompensieren. Diese parasitäre Induktanz wirkt besonders bei Frequenzen über 2 GHz störend. Zwischen den Seriendioden liegt eine CLC-PI-Struktur mit SRLC8, L1 und SRLC9. Diese wurde eingefügt, um die Entkopplung bei höheren Frequenzen zu maximieren und den Einfügeverlust bei geringer Dämpfung zu optimieren.

Bild 5 verdeutlicht den Effekt mit und ohne diese PI-Struktur. Eine Verbesserung der Entkopplung um etwa 5 dB ist klar erkennbar. Ein- und Ausgang sind nicht symmetrisch ausgeführt: Nur im Eingang liegen große Kapazitäten (SRLC12 und SRLC10). Der sehr geringe SRLC5-Wert wurde gewählt, um die Isolation bei hohen Frequenzen durch Kompensation der parasitären Serieninduktivität der Shunt-Diode X2 zu verbessern. Eine Verbesserung um mehrere Dezibel über 1 GHz ist der Lohn. Als Nebeneffekt muss ein Anstieg des SWRs bei geringen Frequenzen hingenommen werden.

Dies ist für viele Anwendungen unkritisch, denn es handelt sich um einen Ausgangswiderstand, sodass Reflexionen unterbleiben. Sollte dennoch der bestmögliche Wert erzielt werden, kann man SRLC5 auf 10 nF erhöhen. Das Ergebnis bezüglich Dämpfung ist in Bild 6 dargestellt. Infolge der guten Isolation bleibt das gute Eingangs-SWR praktisch unberührt. Die der Simulation entsprechende Test Bench zeigt Bild 7.

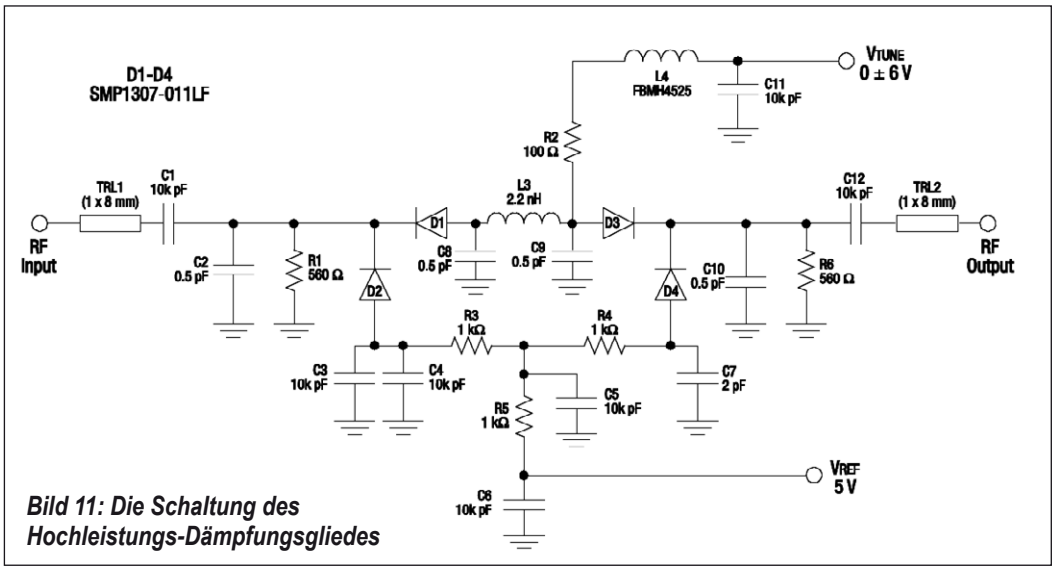

Bild 11: Die Schaltung des Hochleistungs-Dämpfungsgliedes

SPICE-Modell der SMP 1307

Bei der SMP 1307-011LF handelt es sich um eine Silizium-PIN-Diode mit einer 175 µm dicken I-Region und einer langen Träger-Lebenszeit (1,5 µs). Dies ermöglicht einen hohen nutzbaren Widerstandsbereich bei geringer Verzerrung. Bild 8 zeigt das für die Libra-IV-Umgebung definierte SPICE-Modell der Diode einschließlich der Parameterbeschreibung. Hier

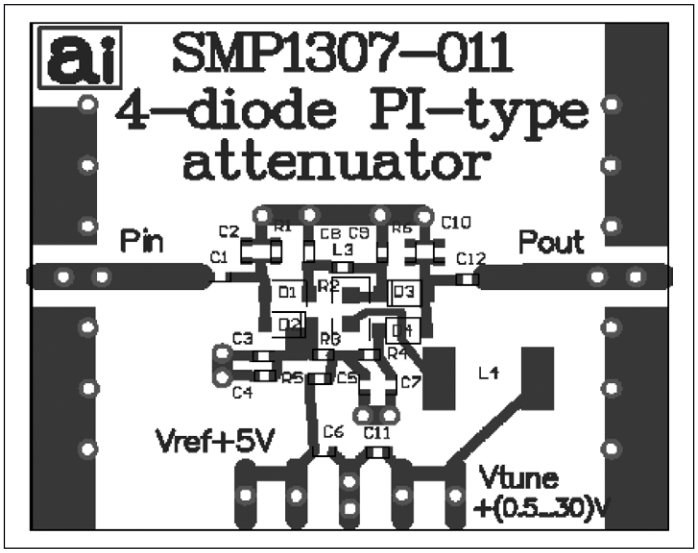

Bild 12: Layout und Bestückung

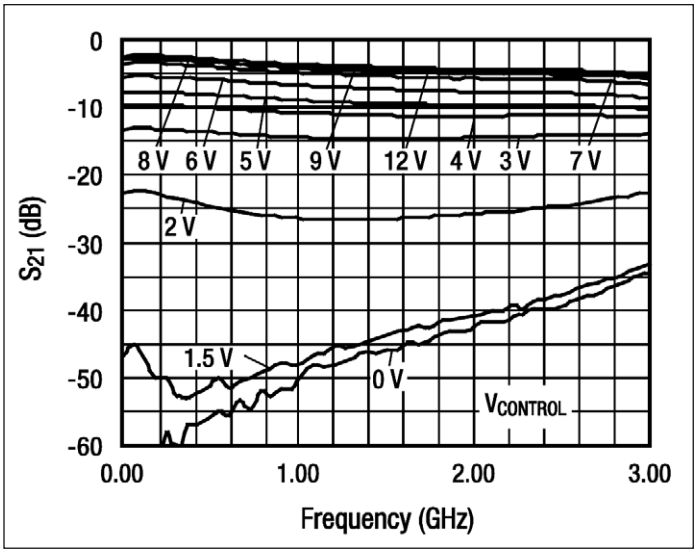

Bild 13: Frequenzgang der Dämpfung bei verschiedenen Steuerspannungen

wurden zwei Dioden genutzt, um sowohl die DC- als auch die HF-Belange richtig darstellen zu können.

Die in Libra IV integrierte PIN-Diode wurde herangezogen, um das Verhalten des HF-Widerstands in Abhängigkeit vom Durchlassstrom zu zeigen, während das Modell einer PN-Diode dazu diente, die DC-Abhängigkeit von der Gleichspannung einzubringen. Beide Dioden liegen in Serie, erhalten also den gleichen Strom. Die PN-Diode wird jedoch durch eine sehr große Kapazität für HF praktisch kurzgeschlossen.

R2 ist der verbleibende minimale Serienwiderstand von lediglich 2,2 Ohm. Aber auch dieser ist mit der sehr hohen Induktivität L1 für bestmögliche DC-Performance geshunted. Die Kapazitäten C6, C_P und die Induktivität L2 spiegeln die parasitären Verhältnisse von Sperrschicht und Gehäuse wieder.

Das geschaffene Modell ist linear und repräsentiert das DC- und HF-Verhalten der PIN-Diode für Frequenzen über 42,5 kHz. Die Modellparameter kann man zwei Tabellen in der Originalveröffentlichung entnehmen.

Bild 9 zeigt das DC-Verhalten der Diode gemäß Simulation und Messung als Kennlinie. Die Übereinstimmung ist jeweils sehr gut. In Bild 10 ist das HF-Verhalten der Diode dargestellt. Die parasitären Größen C6, C_P und L2 wurden „de-emdeded". Auch hier stimmen Messung und Simulation gut überein.

Das Dämpfungsglied in der Praxis

Bild 11 zeigt den Schaltplan des Vier-Dioden PI-Dämpfungsgliedes, Bild 12 das dazugehörende Leiterplattenlayout. Zur Herstellung des Boards wurde FR4-Standardmaterial verwendet. Den Frequenzgang verschiedener Dämpfungen (S21) stellen die Bilder 13 und 14 dar. Er läuft nur bei kleinen Dämpfungen einigermaßen linear. Bei großen Dämpfungen macht die mit der Frequenz abnehmende Isolation einen Strich durch die Rechnung. Für AGC-Anwendungen stört das nicht, wenn man es beachtet. Mittlere Dämpfungen sind bezüglich Steuerspannung recht kritisch, daher blieb dieser Bereich ausgespart. Er zeigt

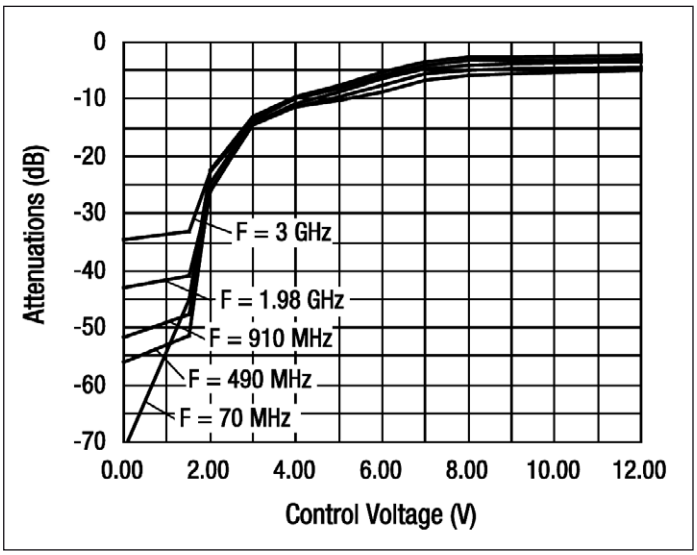

Bild 14: Die Dämpfung über der Steuerspannung mit der Frequenz als Parameter

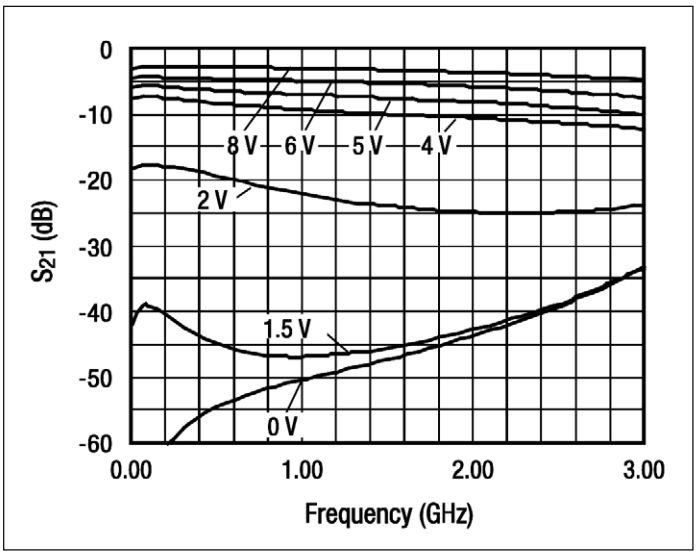

Bild 15: Der simulierte Parameter S21

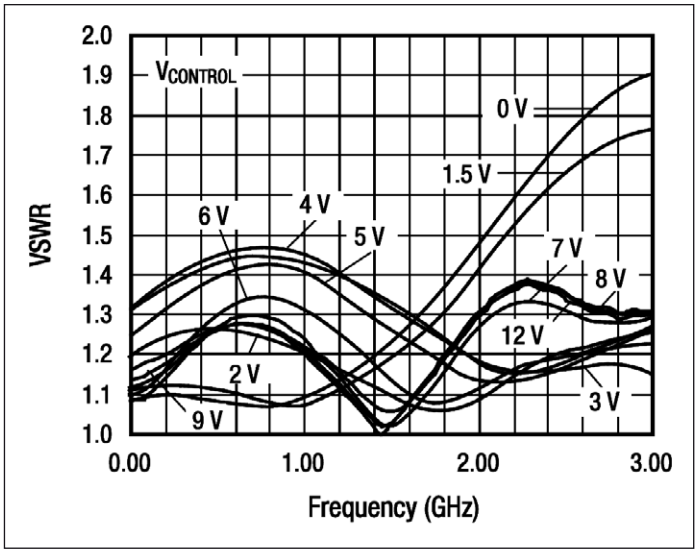

Bild 16: Das SWR über der Frequenz bei verschiedenen Steuerspannungen

sich in Bild 15 durch die große Steilheit zwischen 1,5 und 2 V. Das HF-Widerstandsmodell der Diode macht dies erklärbar.

Bild 16 informiert zum Eingangs-SWR. Es liegt meist unter 1,5, wie es die Simulation vorhersagt.

Die Temperaturabhängigkeit der Dämpfung ist unabhängig von der Steuerspannung recht gering.

Zum wichtigen Intermodulationsverhalten informiert Bild 17. Addiert man die Dämpfung zum Output IP3, erhält man den Input IP3. Bei 20 dB beträgt er z.B. 60 dBm und bei 35 dB 55 dBm.

Weiterführende Literatur:

Skyworks Solutions: SMP 1307 Series: Very Low distortion Attenuator Plastic Packaged PIN Diodes, Data Sheet

Skyworks Solutions: Dssign with PIN Diodes, Application Note

G. Hiller, R. Caverly: Predict PIN Diode Switch Distortion, Microwaves and RF January 1986

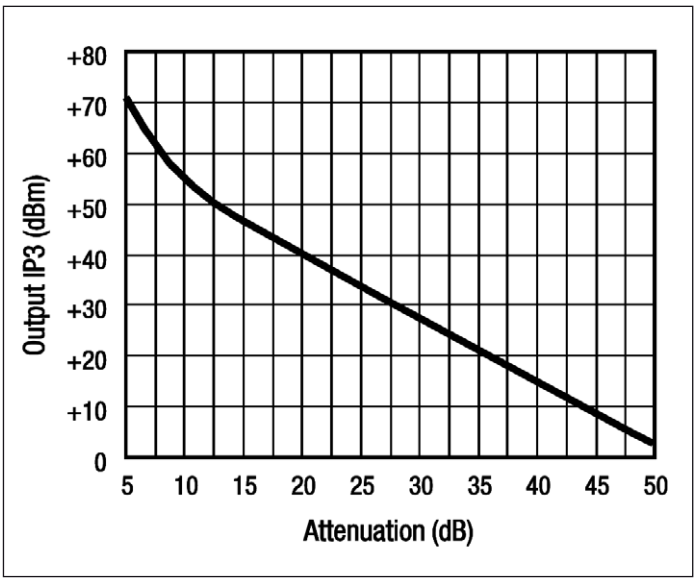

Bild 17: Der IP3 in Abhängigkeit von der Dämpfung bei 900 MHz