

Schaut man sich Schaltungskonzepte im Amateurfunk-Selbstbau an, fristen PIN-Dioden ein eher vernachlässigtes Dasein, wenn es um die Regelung von HF-Spannungen geht. Damit sind sowohl die Absenkung des Pegels um einen einstellbaren Bereich, etwa in AGC-Schaltungen, als auch das Schalten von HF gemeint, z.B. in RX/TX-Umschaltungen an Antennen. Die Untersuchung an 3-Dioden-Abschwächern von 2016 soll hier mit der 4-Dioden-Version nun mal abgeschlossen werden.

1 Aufbau und Wirkungsweise von PIN-Dioden

Eine **PIN-Diode** (Positive Intrinsic Negative Diode) ist, wie der Name schon sagt, eine dreischichtige Anordnung einer P-, einer I- und N-Halbleiterschicht. Sie unterscheidet sich also von einer normalen Diode mit einem einfachen Übergang von einer P- zu einer N-dotierten Schicht durch eine zusätzliche schwach, zumeist N-dotierte Halbleiterschicht, der I-Schicht dazwischen. Wegen der schwachen Dotierung enthält sie nur wenige freie Ladungsträger, so dass hier nur Eigenleitung stattfindet. Daher "I" für intrinsisch. Die I-Schicht ist somit hochohmig. Sie bildet zumeist das Substrat, auf dem die N- und P-Halbleiter aufgebracht sind.

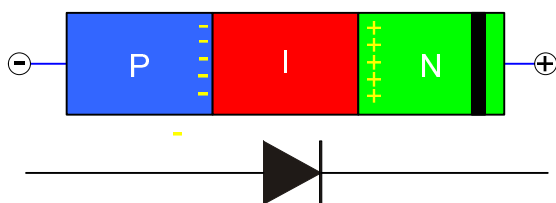


Abb. 1: PIN-Diode in Sperrrichtung (schematisch).

Die Isolation durch die I-Schicht zwischen den P- und N-Schichten erhöht auch die Spannungsfestigkeit der Diode, was z.B. bei der 1000V-Diode 1N4007 der Fall ist, weshalb diese sich auch wie eine PIN-Diode verhält, was im Sende-/Empfangsumschalter des TRX auf dieser Website ausgenutzt wurde. Das waren allerdings Restbestände aus den 1970er Jahren. Möglicherweise verhalten sich 1N4007 aus laufender Produktion infolge anderer Fertigungsprozesse inzwischen anders.

Im Gleichstrombetrieb verhält sich eine PIN-Diode wie eine normale Diode mit einem direkten PN-Übergang. Für unsere Anwendung mit Hochfrequenz interessant wird das Verhalten in Sperr- bzw. Durchlassrichtung durch Anlegen einer DC-Gleichspannung.

- In Sperrrichtung entsteht zwischen der P- und der I-Schicht eine an Ladungsträgern verarmte Raumladungszone. Die Diode wirkt wie ein Kondensator. Je nach Stärke der I-Schicht bildet sich eine sehr geringe Kapazität von einigen zehntel pikoFarad aus mit entsprechender Sperrwirkung bzw. hohem kapazitivem Widerstand für Hochfrequenz.
- In Durchlassrichtung strömen Elektronenlöcher von der P-Schicht und Elektronen von der N-Schicht, beide hoch dotiert, in die I-Schicht. Die I-Schicht wird leitend. Der Leitungswiderstand nimmt mit zunehmender Gleichspannung, d.h. Durchlassstrom, ab. Die Ladungsträger - Elektronen und Elektronenlöcher - rekombinieren in der I-Schicht erst nach einer gewissen Zeit.

Maßgeblich für die HF-Eigenschaften und die Wirkung als steuerbarer HF-Widerstand ist die **Lebensdauer der Ladungsträger** in der I-Schicht ("Minority carrier lifetime" in den Datenblättern), z.B. 4µs für die BA479 bei einem Vorwärtsstrom von 10mA. Für Periodendauern der Wechselspannung unterhalb dieser Lebensdauer bleibt die PIN-Diode also noch leitfähig. Unter nachfolgenden Bedingungen verhält sich die Diode für HF wie ein ohmscher Widerstand, steuerbar durch einen extern zugeführten DC-Durchlassstrom.

In [2], Appendix A, sind Richtwerte hierzu angegeben. Die Eigenschaft als stromgesteuerter Widerstand ist erst deutlich oberhalb einer Grenzfrequenz (cut off frequency) gegeben:

$$f_c = 1/2\pi\tau$$

Mit τ = "Minority carrier lifetime" oder auch "Recombination lifetime" nach Datenblatt, bestimmt durch Materialeigenschaften und Geometrie der I-Schicht. 2π entspricht der o.g. Periodendauer.

Frequenzbereich	HF-Verhalten der PIN-Diode
$< 0,1 \cdot f_c$	Wie eine normale Gleichrichterdiode
0,1 bis $10 \cdot f_c$	Sehr komplex, frequenzabhängig
$> 10 \cdot f_c$	Wie ein stromgesteuerter ohmscher Widerstand

Beispiele:

Diode	τ (ns) @ 10mA	f_c (MHz)	$10 \cdot f_c$ (MHz)
BA479G, BA679	4.000	0,040	0,398
BAR17	4.000	0,040	0,398
BAR64	1.550	0,103	1,027
HSMP-381x	1.500	0,106	1,061
BAR14, BAR15, BAR60, BAR61	1.000	0,159	1,592

Die für Tests vorhandenen BA479G ist danach also oberhalb 400kHz als regelbarer Widerstand einsetzbar.

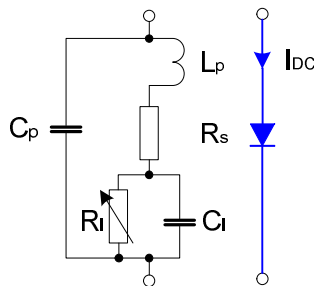
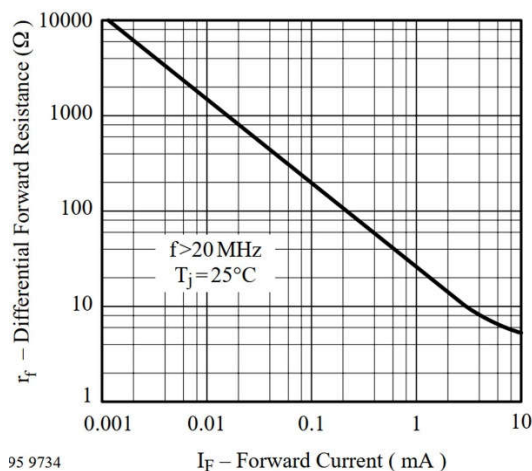


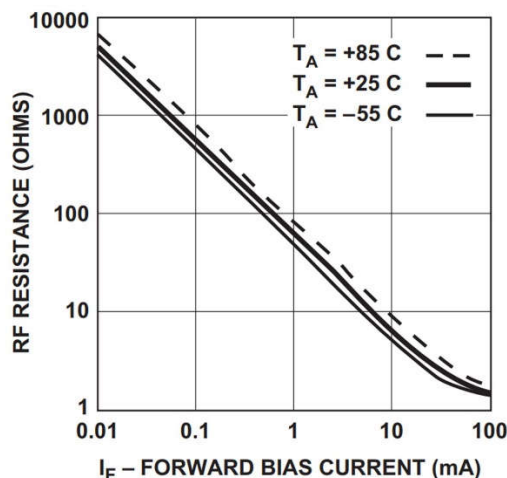
Abb. 2: Ersatzschaltbild einer PIN-Diode für Frequenzen $> 10f_c$.

L_p und C_p sind die exemplarbedingten Leitungsinduktivität und Parallelkapazität. R_s ist der Bahnwiderstand, C_i ist die Kapazität der I-Schicht, bei hohen Frequenzen $> 10 \cdot f_c$ nur abhängig von der Geometrie der I-Schicht. Bei niedrigen Frequenzen 0,1 bis $10 \cdot f_c$ ist C_i abhängig von der anliegenden Spannung. R_i ist der mit dem eingepprägten Gleichstrom für HF wirksame Durchgangswiderstand. Eine zunehmende Gleichspannung über der Diode in Durchlassrichtung, damit I_{dc} , erhöht die Anzahl der Ladungsträger in der I-Schicht, womit der Widerstand R_i abnimmt.



95 9734

BA479G (Vishay Telefunken)



HSMP-381x (AVAGO)

Abb. 3: Widerstandskennlinien von BA479G und HSMP-381x.

Im Ergebnis haben wir es also durch simples Anlegen einer Gleichspannung an die PIN-Diode ab einer bestimmten Frequenz mit einem steuerbaren HF-Widerstand zu tun. Die Polung der Diode ist nur für die DC-Steuerspannung von Bedeutung, für die Durchleitung der HF jedoch *nicht*.

2 Anwendungsbereich von PIN-Dioden

Mit der elektrischen und der geometrischen Ausprägung der I-Schicht haben die Hersteller die Möglichkeit, PIN-Dioden für den jeweiligen Anwendungsfall zu optimieren:

- Geringe nichtlineare Signalverzerrungen
- Hohe Austeuerbarkeit
- Anwendung für **HF-Schalter** mit geringem Minimalwiderstand in Durchlassrichtung, minimalen Kapazitäten in Sperrichtung und kurzen Schaltzeiten. Wahlweise auch für höhere Leistungen durch Parallelschaltung von PIN-Strukturen in einem Bauteil.
- Anwendung für **HF-Abschwächer** mit geringen Steuerströmen, geringen Signalverzerrungen und weitem Stellbereich.

Weiterführende Literatur in Microsemi "The PIN Diode Circuit Designers' Handbook" [6] und Skyworks "Design with PIN Diodes" [7].

Bei der Suche im Internet nach PIN-Dioden-Abschwächern landet man ziemlich treffsicher bei Anwendungen mit PIN-Dioden der HSMP-Serie des damaligen Platzhirsches HP/Agilent/Avago, nun Broadcom. Die sind mittlerweile abgekündigt. Hersteller wie Infineon (Serie BAR) oder NXP (Serie BAP) bieten aber Ersatz. Bei Reichelt leider Fehlanzeige. Die Cross Reference [4] mag dabei helfen.

3 Regelbare HF-Abschwächer in der Praxis

Übliche Festabschwächer werden meist in π -Form, daneben auch in T-Form, mit Widerständen realisiert.

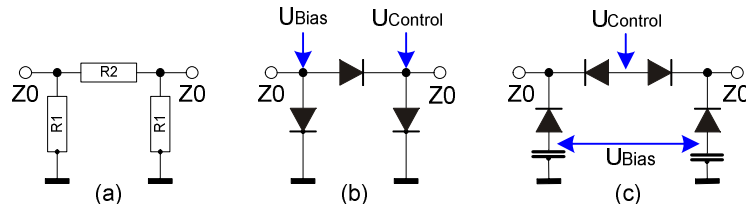


Abb. 4: Pi-Abschwächer mit Widerständen und PIN-Dioden (schematisch).

Ersetzen wir die Widerstände durch PIN-Dioden, haben wir einen einstellbaren HF-Abschwächer. Nachfolgende Abschwächer für $Z_0 = 50\Omega$. Die Einstellung erfolgt durch den Diodenstrom aus der Spannungsdifferenz zwischen einer festen Vorspannung U_{Bias} und der Regelspannung $U_{Control}$. Die Widerstände R_1 und R_2 im Vergleichsbild (a) lassen sich damit verändern, dabei aber die beiden Shunt-Widerstände R_1 identisch und im richtigen Verhältnis zu R_2 einzustellen, ist eine Herausforderung.

Die Variante (b) ist die einfachere

- Vorteil: geringe Einfügedämpfung durch nur eine Seriendiode.
- Nachteil: unsymmetrische Einspeisung der Steuerspannungen, damit schwieriges Einstellverhalten der Diodenwiderstände mit zumindest teilweise hohem VSWR.

Die Variante (c) ist die bessere (und ästhetisch schönere)

- Vorteil: Symmetrische Einspeisung der Steuerspannungen mit der Möglichkeit, die Diodenströme auf optimalen VSWR-Verlauf abzugleichen, Reduktion nichtlinearer Signalverzerrungen durch die "Back-to-Back"-Anordnung der beiden Seriendiode.
- Nachteil: Höhere Minimaldämpfung durch zwei Seriendiode.

3.1 3-Dioden-Abschwächer

Mit PIN-Dioden gab es so um 2009 die erste Berührung im Selbstbau-TRX, Einsatz in der Verstärkungsregelung (AGC) des 9MHz-ZF-Verstärkers [8].

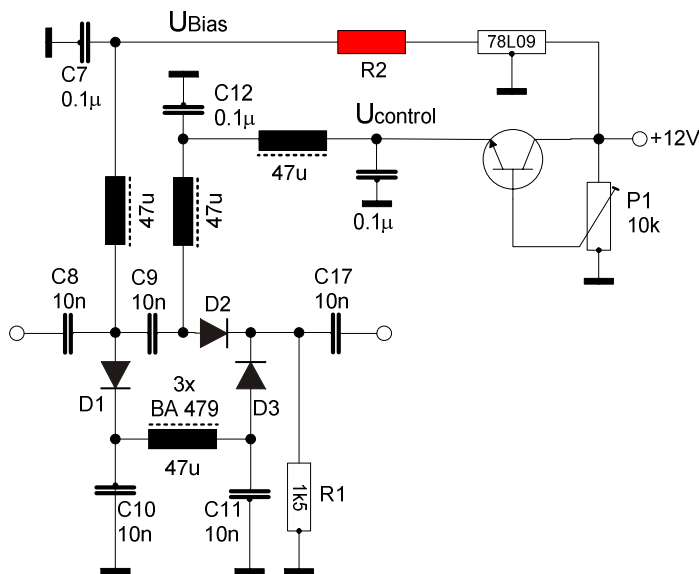


Abb. 5: Testschaltung zum AGC-Abschwächer im ZF-Verstärker.

Nachmessungen brachten 2016 schließlich eine beschämende Eingangsanpassung an 50Ω, SWR ~5 bei Maximalabschwächung, zutage. Zusammen mit DC4KU wurde versucht, diese Schaltung zu optimieren [9]. Eine der Optionen war ein zusätzlicher Widerstand R2 (rot) von ca. 1 bis 10k (ausprobieren) zur Reduzierung des Stroms durch die Shunt-Dioden D1 und D3. Damit war das maximale Eingangs-VSWR auf ca. 1,6 zu reduzieren. Da sich damit auch der zur Regelung notwendige Spannungsbereich von Ucontrol vergrößert, wäre eine Reduzierung der Festspannung UBias (hier 9V) auf z.B. 5V angebracht. Insgesamt ist hier Experimentieren angesagt, mit anderen Dioden allemal.

Einstellbare Maximaldämpfung: ca. 60dB, Minimaldämpfung 1,4dB.

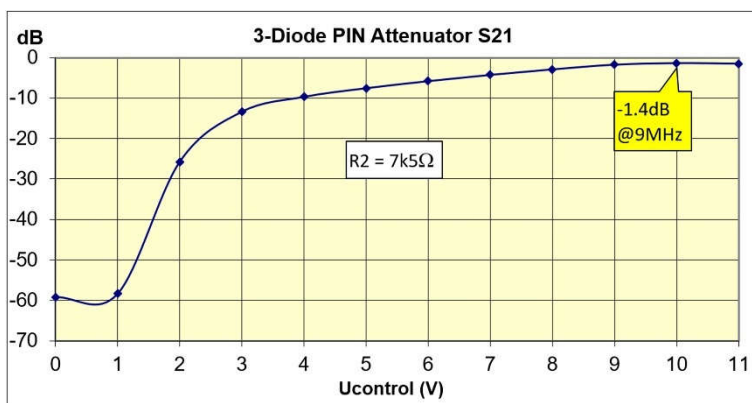


Abb 6: 3 PIN BA679G Dämpfungsverlauf S21, R2=7k5Ω.

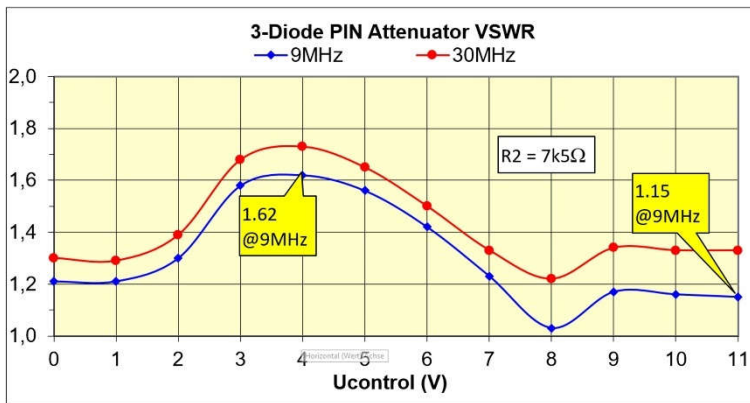


Abb. 7: 3 PIN BA679G Verlauf VSWR, R2=7k5Ω.

3.2 4-Dioden-Abschwächer

Eine Ausweitung der o.a. Betrachtungen auf einen 4-Dioden-Abschwächer unterblieb damals wegen einer angenommenen zu hohen Minimdämpfung der nun zwei seriellen Dioden (Abb. 4c). Aber stimmt das wirklich?

Wegen der halbwegs vergleichbaren Kennlinien der vorhandenen BA479G und der Avago HSMP-381x (Abb. 3) machte die Beschaltung des Diodenquartetts HSMP-3816 in [2] den Aufschlag. Weiteres Beispiel mit einem Diodenquartett HMSP-3814 in [3].

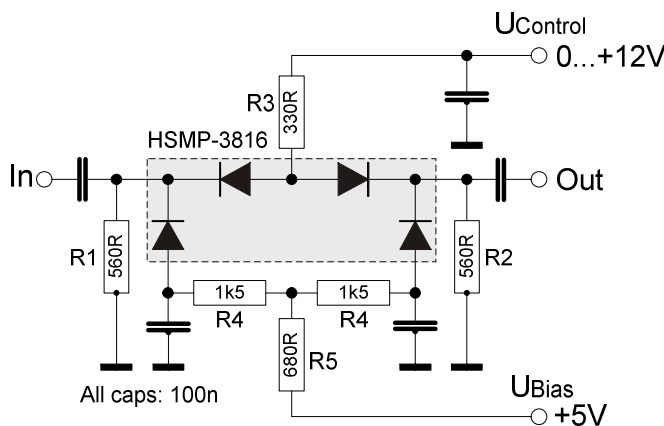


Abb. 8: 4-Dioden-Abschwächer nach [2].

Alle vier Dioden zeigen mit den Kathoden auf die Ableitwiderstände R1 und R2. Zusammen mit diesen werden die Steuerströme der Seriendioden durch R3 und der Shunt-Dioden durch R4/R5 in Abb. 8 bestimmt.

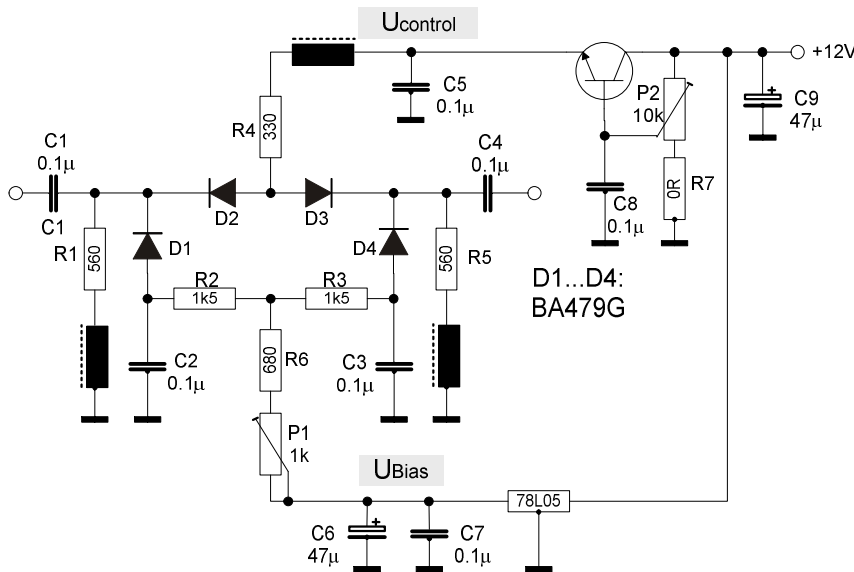


Abb. 9: Erweiterte Testschaltung für Diodenquartett 4 x BA479G.

Wenn schon, denn schon:

- R1, R4 und R5 wurden zusätzlich mit Drosseln zur HF-Abblockung versehen. Maßgeblich dabei: Eigenresonanz deutlich größer Nutzfrequenz (hier 32µH Neosid, $f_{res} > 20\text{MHz}$). Für R1 und R5, mit $560\Omega > 10 \cdot 50\Omega$ Systemimpedanz nicht unbedingt nötig.
- Für die Anpassung des Bias-Stroms durch die Shunt-Dioden D1 und D4 ist P1 zusammen mit R6 vorgesehen, Anpassung des Control-Stroms mit R4.

Auch wenn die vier BA479G aus einem Gurt entnommen wurden, werden deren Daten doch individuell streuen. Ein echtes Quartett auf einem Chip wäre wohl besser.

Gemessen wurden Transmission (S_{21}), Reflexion/Return Loss (S_{11}) und daraus berechnetes VSWR mit dem VNWA für $U_{control} = 0,5$ bis 11V. Variiert wurden R4 ($I_{control}$) und P1 (I_{Bias}) mit dem Ziel

1. Maximales VSWR deutlich kleiner als 2 im gesamten Bereich $U_{control}$,
 2. Möglichst geringe Durchlassdämpfung bei Minimalabschwächung.
- Dann schau'n mer mal, wie weit wir damit kommen...

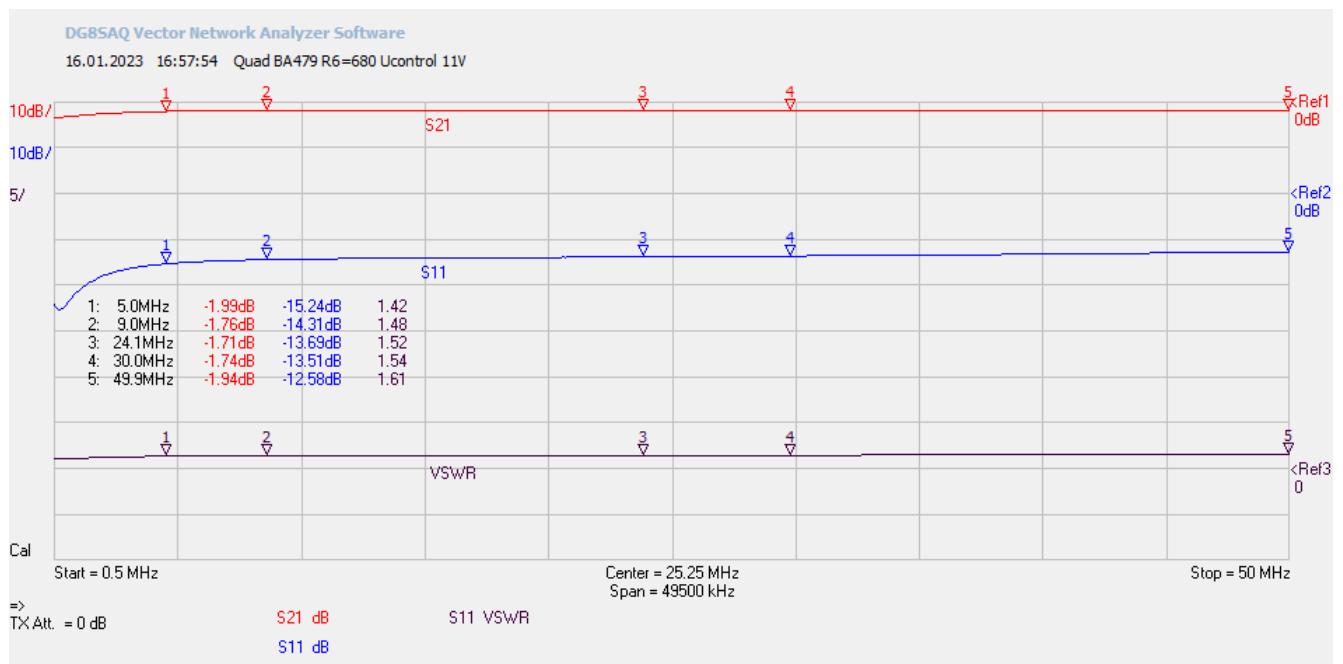


Abb. 10: VNWA-Plot $R_4=330\Omega$, $R_6+P_1=680\Omega$, $U_{control}=11\text{V}$ (minimale Dämpfung).

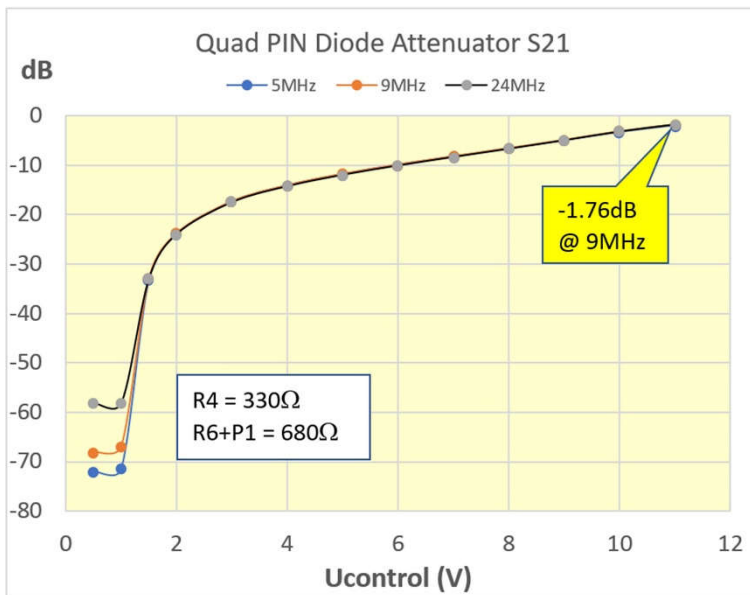


Abb. 11: Quad BA479G Dämpfungsverlauf S21, R4=330Ω, R6+P1=680Ω.

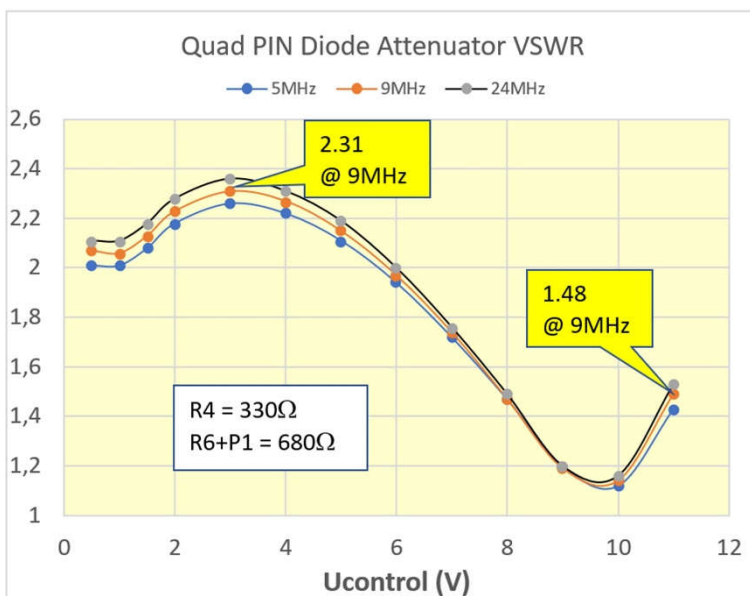


Abb. 12: Quad BA479G Verlauf VSWR, R4=330Ω, R6+P1=680Ω.

Startpunkt:

Quad Attenuator mit 4 x BA479G	R4 = 330Ω	R6 + P1 = 680Ω
Minimaldämpfung bei maximalem Ucontrol	1,76dB	weniger wäre schon nett
VSWR bei maximalem Ucontrol	1,48	ist ganz akzeptabel
VSWR-Maximum	2,31	ist deutlich zu hoch
Regelbereich -70 bis -1,76dB	UBias = 5V, Ucontrol = 0,5 bis 11V	
VSWR 1,16 bis 2,31 @ 9MHz	Gesamtstrom 9 ... 54mA	

Die Ausgangskonfiguration nach [2] in Abb. 9 ist weder schlecht noch richtig gut. Geht da noch was?

Optimierungsversuche:

1. Sukzessive Reduzierung des Bias-Stroms mit Erhöhung von P1.

Mit $R6 + P1 = 1.680\Omega$ waren nur noch geringfügige Verbesserungen zu erzielen:
 Minimale Dämpfung 1,68dB
 Maximales VSWR: 1,55.

2. Erhöhung des Control-Stroms mit R4 ($330\Omega \Rightarrow 270\Omega$).

Noch eine winzige Verbesserung:
 Minimale Dämpfung 1,62dB
 Maximales VSWR: 1,54.

Bei einer weiteren Reduzierung von R4 auf 220Ω wurde die Minimaldämpfung schon bei $U_{control} = 9V$ erreicht, also vorzeitiger Sättigungseffekt.
 Der Kampf um zehntel dB wurde hier dann doch mit einigem Wohlwollen beendet.

Endkonfiguration zu Abb. 9:

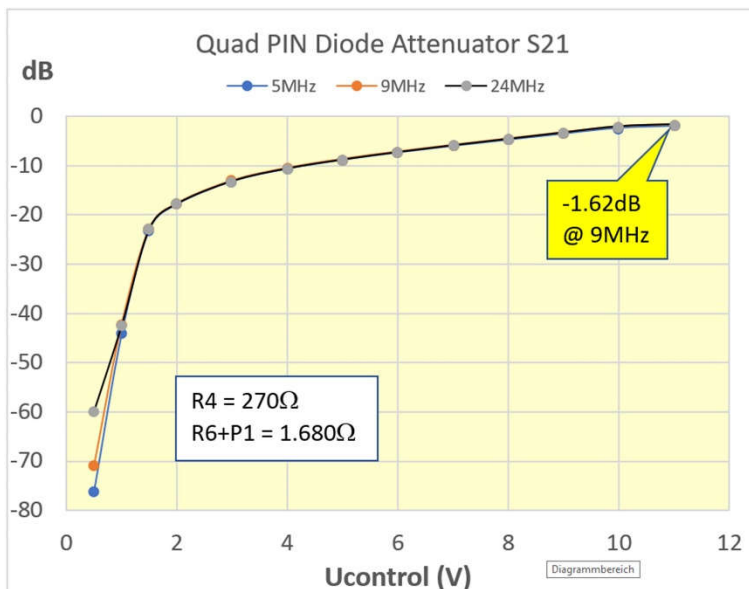
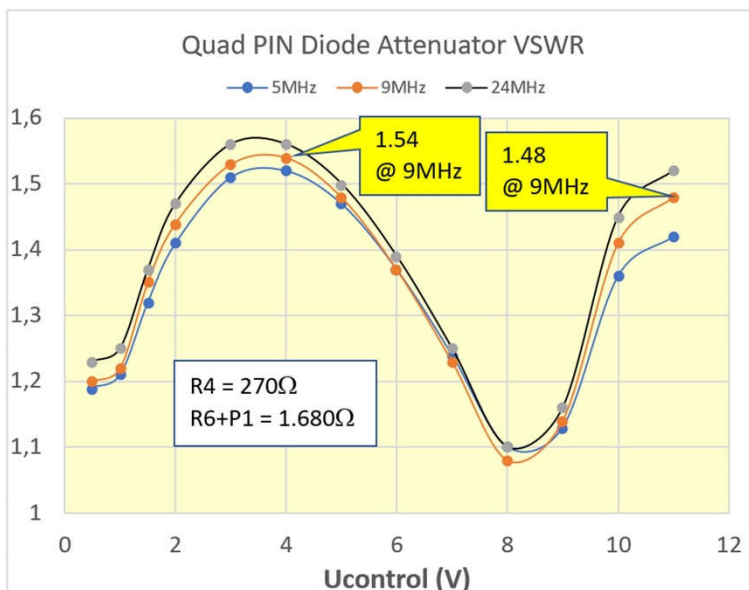


Abb. 13: Quad BA479G Dämpfungsverlauf S21, $R4=270\Omega$, $R6+P1=1.680\Omega$.



Ergebnis:

Quad Attenuator mit 4 x BA479G	R4 = 270Ω	R6 + P1 = 1.680Ω
Minimaldämpfung bei maximalem Ucontrol	1,62dB	
VSWR bei maximalem Ucontrol	1,48	
VSWR-Maximum	1,54	
Regelbereich -70 bis -1,62dB	UBias = 5V, Ucontrol = 0,5 bis 11V	
VSWR 1,08 bis 1,54 @ 9MHz	Gesamtstrom 9 ... 43 mA	

Es sieht also so aus, dass die Grundschialtung in Abb. 8 für das Diodenquartett HSMP-3816 nach [2] eine geeignete Basis für einen Aufbau auch mit anderen PIN-Dioden liefert. Lediglich mit R4 und R6 (Abb. 9) sind die Ströme durch die Serien-Dioden D2, D3 sowie die Shunt-Dioden D1, D4 zur Optimierung des VSWR und der Minimaldämpfung anzupassen.

Die Minority carrier lifetime (τ) der I-Schicht, damit die Cut off frequency f_c nach Datenblatt, bestimmt die untere Frequenzgrenze.

Die Befürchtung, dass die Minimaldämpfung im Quad-Abschwächer deutlich höher als in der 3-Dioden-Version ist, war nicht angebracht. Der Quad-Abschwächer war hier um nur 0,2dB schlechter. Das VSWR beherrscht der Quad-Abschwächer besser.

Das Intermodulationsverhalten konnte nicht gemessen werden. Wenn wir die Messungen von DC4KU [9] am 3-Dioden-Abschwächer mit BA479G-Dioden bei 9MHz zugrunde legen,

- IP3 minimal = 26dBm bei 4dB Dämpfung,
- IP3 maximal = 34dBm bei 60dB Dämpfung,

sind für den Quad-Abschwächer mit zwei Seriodioden noch bessere Werte zu erwarten.

Avago gibt für das HSMP-3816-Quartett [2] ein Input-IP3 von ca. 35dBm bei 30MHz mit halbwegs glattem Verlauf über den gesamten Dämpfungsbereich an.

Referenzen

- [1] <https://de.wikipedia.org/wiki/Pin-Diode>
- [2] <https://datasheet.octopart.com/HSMP-3816-TR1G-Avago-datasheet-12558214.pdf>
- [3] <https://www.rf-microwave.com/app/resources/uploads/diodes/AN1048.pdf>
- [4] https://www.hpmemoryproject.org/an/pdf/an_922.pdf
- [5] HP Cross reference, <http://www.minikits.com.au/doc/dioxref.pdf>
- [6] https://www.ieee.li/pdf/essay/pin_diode_handbook.pdf
- [7] https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/Documents/Products/1-100/Design_With_PIN_Diodes_200312E.pdf
- [8] <https://dl6gl.de/selbstbau-trx/2-der-rx-signalpfad/2-6-der-etwas-andere-zf-verstaerker-von-dc4ku.html>
- [9] https://dl6gl.de/media/files/zf-pin-diodenabschwaecher_2016-06.pdf
https://dc4ku.darc.de/Regelbares_PIN-Dioden-Daempfungsglied.pdf