Ein 90W Leistungsverstärker für das 6cm Amateurfunkband

Matthias Bopp, DD1US, 15. Juni 2025, Version 2.0

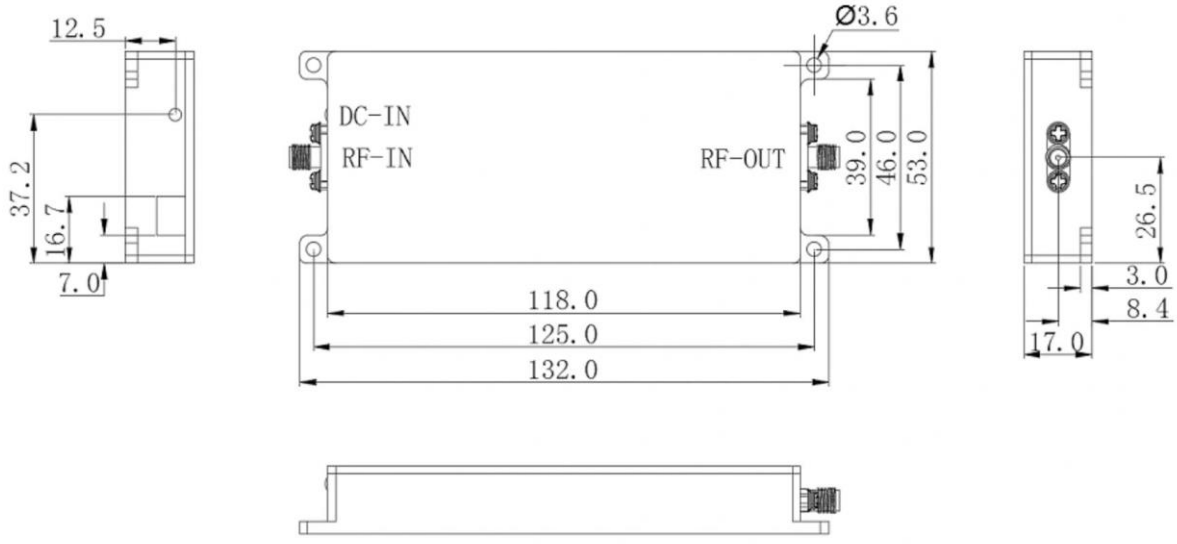
Zukünftige geostationäre Amateurfunksatelliten werden vermutlich neben dem bisherigen 13cm Uplink-Band für DATV und Schmalbandbetriebsarten auch einen Uplink im 6cm nutzen. Um ein ausreichend sauberes DVB-S2 Signal zu erzeugen darf man in der Regel eine Endstufe nur bis ca. ¼ der maximalen Ausgangsleistung aussteuern. Deshalb ist ja nach verwendeter Größe des Parabolspiegels ein Leistungsverstärker mit einer Ausgangsleistung von ca. 100W nötig. In der Zwischenzeit kann man eine solche Endstufe auch sehr gut für EME einsetzen.

Kürzlich sind Leistungsverstärkermodule auf GaN-Basis von einer chinesischen Quelle namens Szhuashi aufgetaucht. Das 50-W-Modul YPM5850B für das 6-cm-Band weist sehr interessante Daten auf.

Der Verkäufer gibt die folgenden Spezifikationen an:

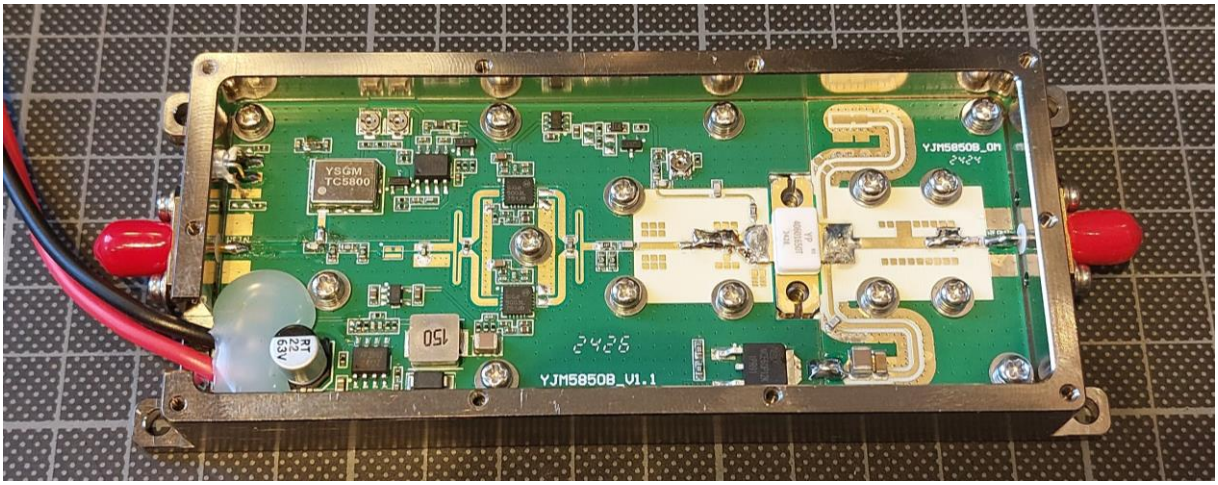
Testumgebung:	DC = 32 V, Tamb = 25 °C
Frequenzbereich:	5700 ... 5900 MHz
Leistungsverstärkung:	42 dB
Ausgangsleistung:	47-48 dBm
Verstärkungsschwankung:	<1 dB
Maximale Eingangsleistung:	+6 dBm
Stromaufnahme:	3,6 A
Betriebstemperaturbereich:	-30 °C ... +85 °C
Lagertemperaturbereich:	-40 °C ... +150 °C
Relative Luftfeuchtigkeit:	<80 % RH

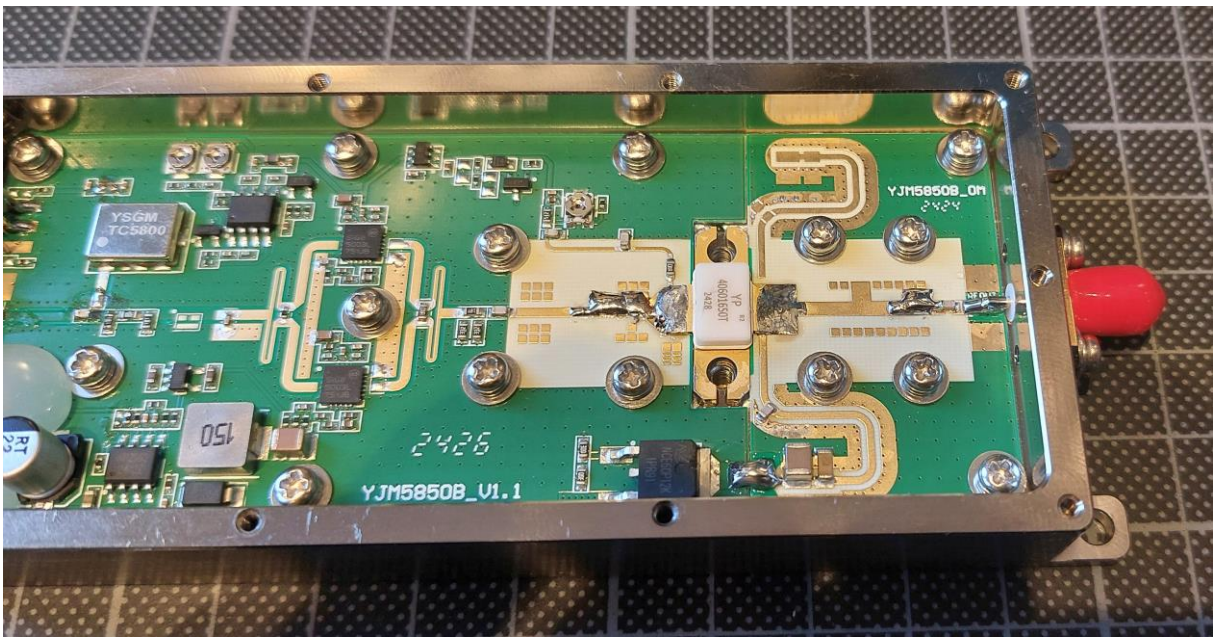
Abmessungen:



Ich habe das Modul bei Ebay gekauft und nach etwas 3 Wochen kam es gut verpackt bei mir an.

Die Endstufe ist in einem kompakten Aluminiumgehäuse untergebracht. Es ist ein zweistufiger Verstärker, wobei die erste Stufe aus zwei parallel arbeitenden MMIC-Verstärkern SiGe SE5003L besteht und die zweite Stufe auf einem GaN-HEMT-Transistor mit der Teilenummer YP40601650T von Innotion basiert. Hier sind einige Bilder des geöffneten PA-Moduls:

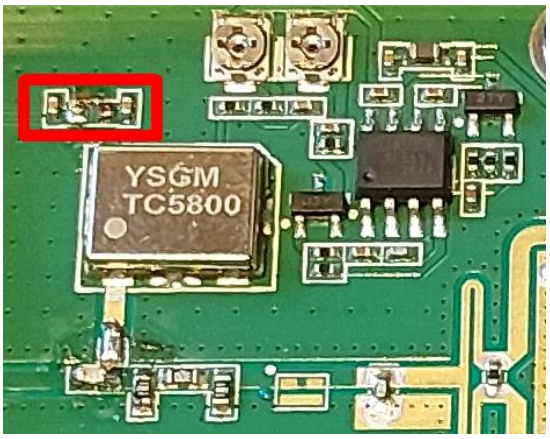




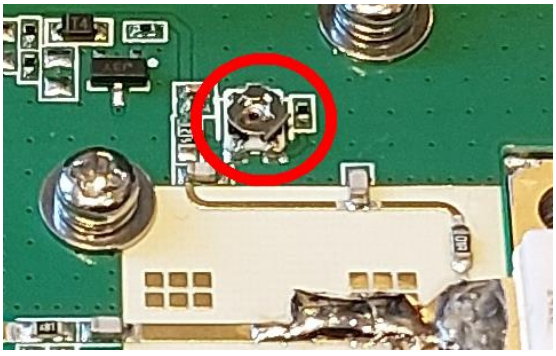
Jeder SiGe SE5003L MMIC wird mit einer Versorgungsspannung von +5 V betrieben und bietet eine Verstärkung von 32dB und eine maximale Ausgangsleistung von P1dB=+32 dBm. Die Stromaufnahme beträgt typischerweise 340 mA.

Der Innotion YP40601650T ist ein 50W intern angepasster GaN HEMT Transistor für den Frequenzbereich 4400 bis 6000 MHz. Seine spezifizierte gesättigte Ausgangsleistung bei 5700 MHz beträgt 48,6 dBm. Hierbei weist er einen ausgezeichneten Wirkungsgrad von 50,4 % und benötigt eine Eingangsleistung von 37,4 dBm.

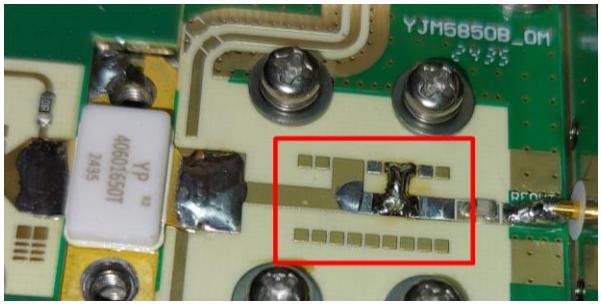
Neben der Verstärkerkette befindet sich im Gehäuse ein zusätzlicher Oszillator, der mit YSGM TC5800 gekennzeichnet ist. Anscheinend kann dieser Verstärker auch als Drohnenstörsender verwendet werden, wenn der Oszillator aktiviert ist. In meinem Modul war der Oszillator deaktiviert, aber ich habe von anderen Benutzern gehört, dass sie den Oszillator in ihren Geräten deaktivieren mussten. Bitte überprüfen Sie dies, wenn Sie das Gerät erhalten, sonst könnte das Modul bereits ohne Eingangssignal volle Ausgangsleistung liefern. Sie können einfach den rot markierten SMD-Baustein im folgenden Bild entfernen:



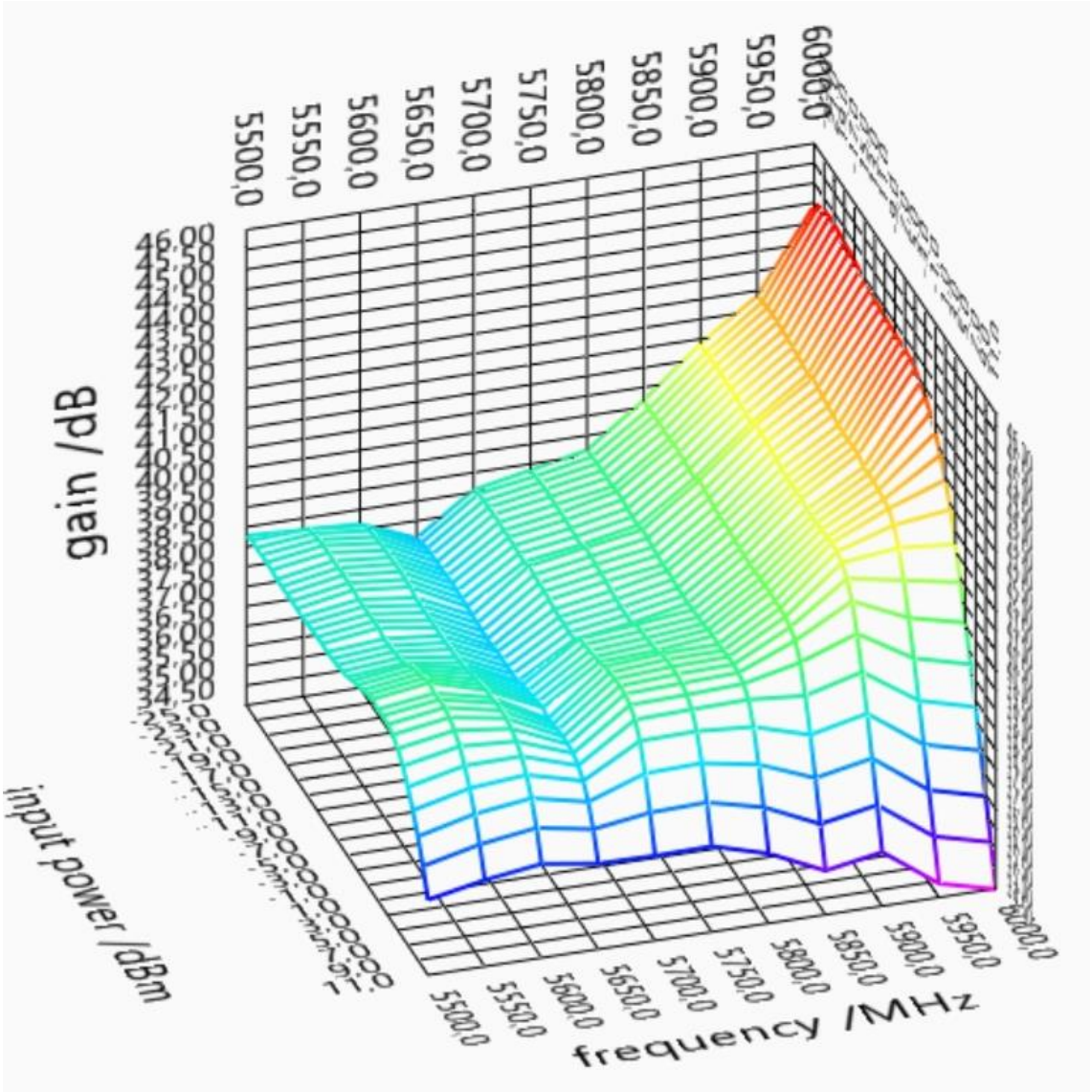
Der Ruhestrom der PA war ursprünglich auf ca. 2,2 A eingestellt. Ich habe festgestellt, dass ein Ruhestrom von 0,7 A fast die gleiche maximale Ausgangsleistung ergibt. Insbesondere bietet dieser Arbeitspunkt eine linearere Verstärkung über den Eingangsleistungsbereich ohne übermäßige Verstärkungsspitzen kurz unterhalb des 1dB-Kompressionspunkts. Der Ruhestrom kann mit einem kleinen Trimmer auf der Platine eingestellt werden:



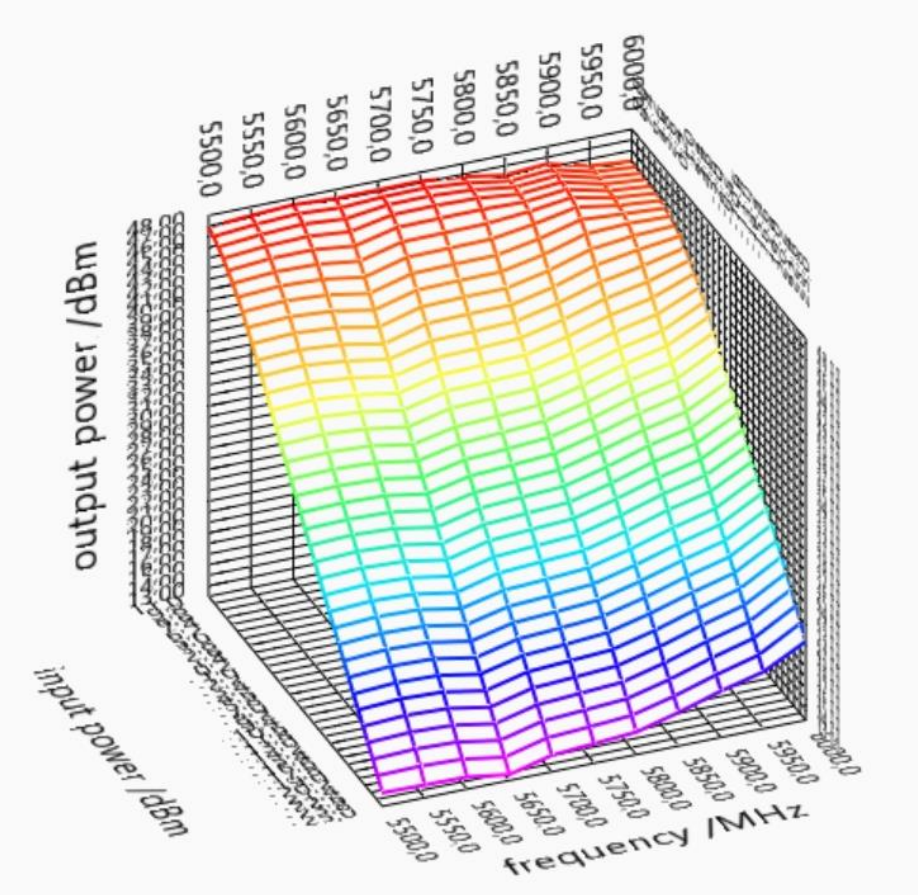
Außerdem habe ich die Ausgangsanpassung des Endtransistors für optimale Ausgangsleistung und Effizienz leicht verändert. Dies führte zu einer leichten Verbesserung der Ausgangsleistung (ca. +0,2 dB) und der Effizienz (ca. +5 %). Ich habe noch einige weitere Module abgestimmt, und die Abstimmung war bei jedem Modul etwas anders. Aber auch ohne diesen Abgleich funktionieren die Module recht gut.



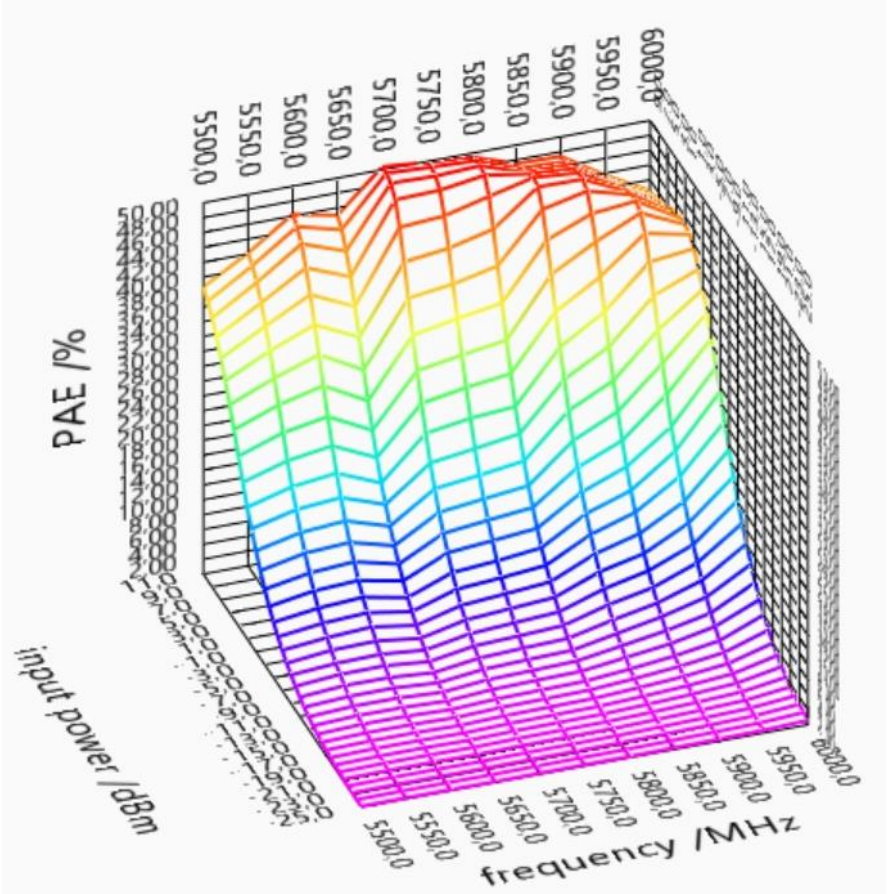
Nachfolgend finden Sie die Messergebnisse nach der Einstellung des Ruhestroms des PA von 700 mA. Ich habe den PA mit meinem automatischen Messaufbau charakterisiert. Zunächst finden Sie Diagramme der Verstärkung (Gp), der Ausgangsleistung (Pout) und des Wirkungsgrads (PAE power added efficiency) als Funktion der Eingangsleistung (Pin) und der Frequenz (f). Der betrachtete Frequenzbereich ist 5500 MHz bis 6000 MHz in 50 MHz-Schritten. Der Eingangsleistungsbereich ist -25 dBm bis +11 dBm in 1-dB-Schritten.



Verstärkung /dB in Abhängigkeit von Frequenz /MHz und Eingangsleistung /dBm

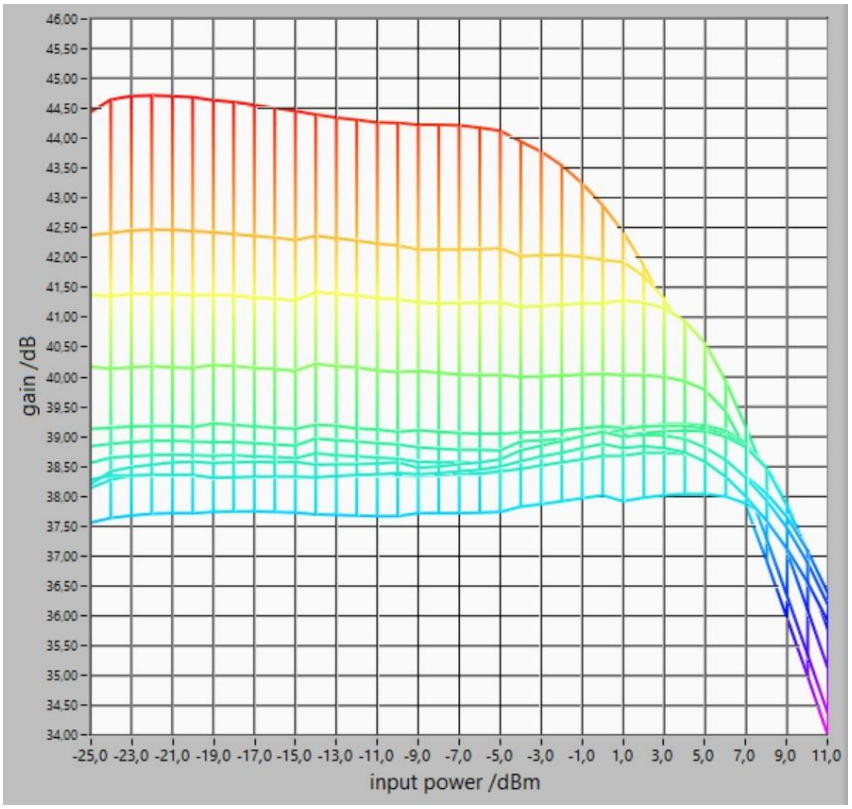


Ausgangsleistung /dBm in Abhängigkeit von Frequenz /MHz und Eingangsleistung /dBm

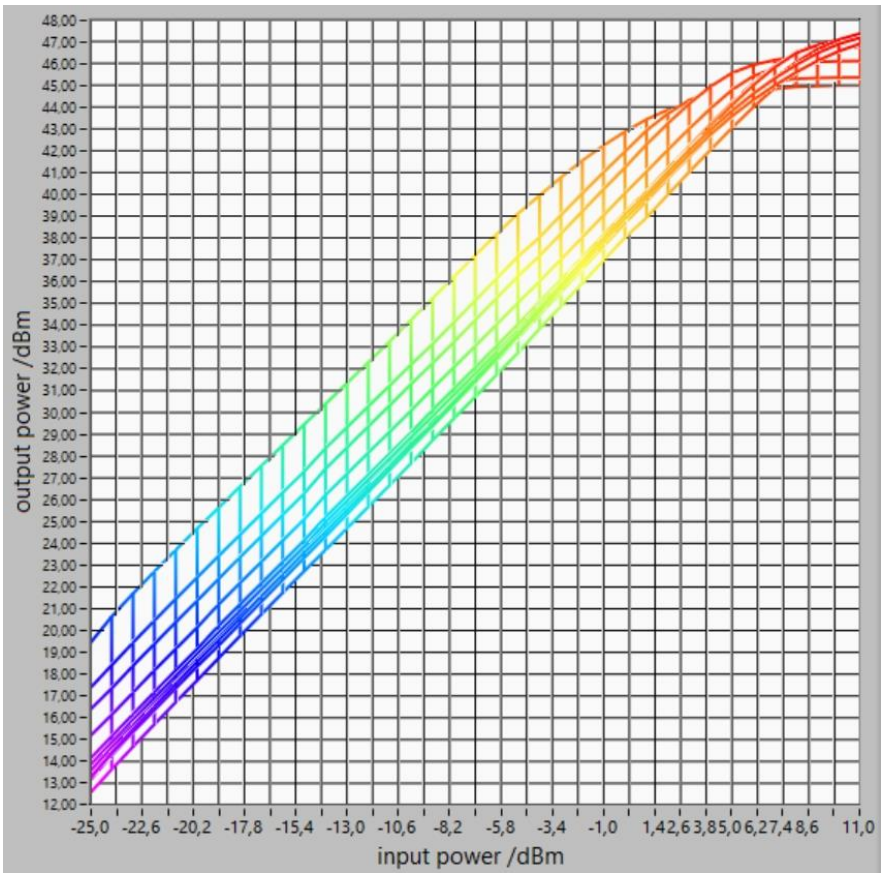


Wirkungsgrad /% in Abhängigkeit von Frequenz /MHz und Eingangsleistung /dBm

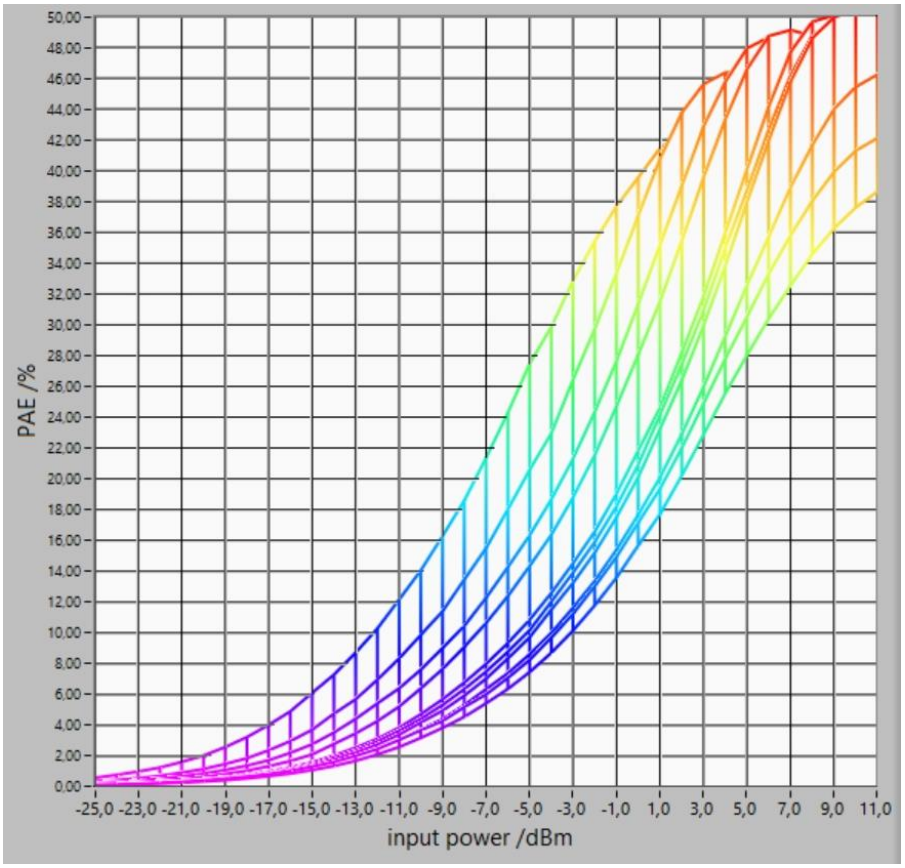
In den nächsten drei Diagrammen sind Verstärkung, Ausgangsleistung und Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Eingangsleistung von -25 dBm bis +11 dB) dargestellt. Die verschiedenen Messkurven repräsentieren unterschiedliche Frequenzen.



Verstärkung /dB in Abhängigkeit von der Eingangsleistung /dBm

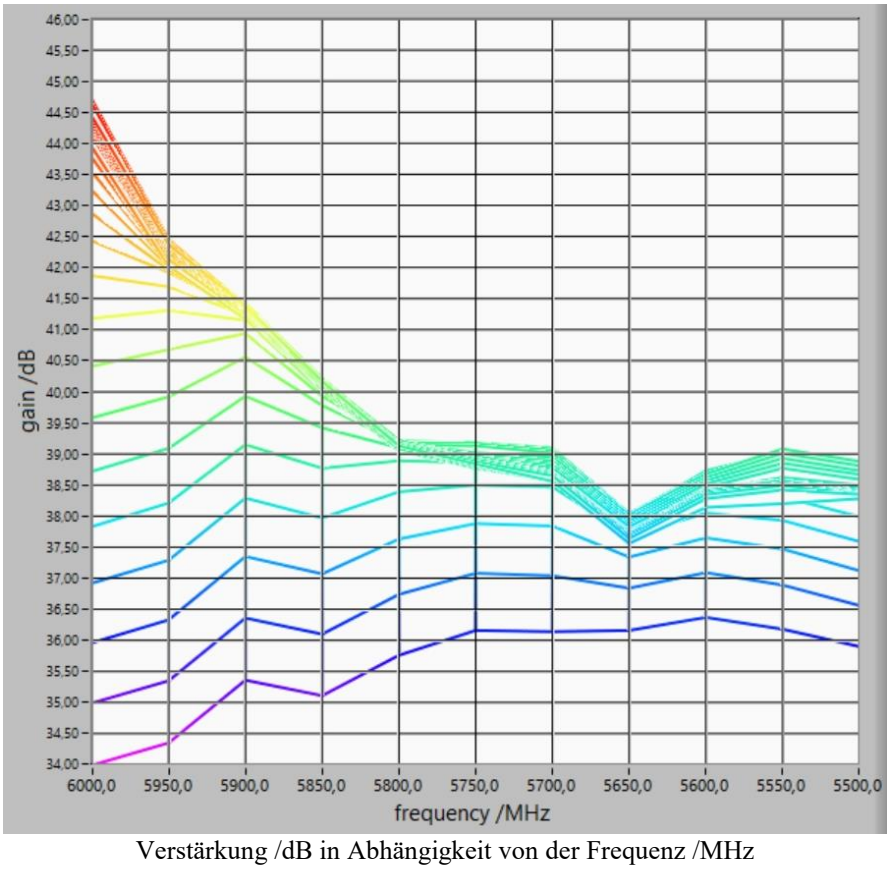


Ausgangsleistung /dBm in Abhängigkeit von der Eingangsleistung /dBm

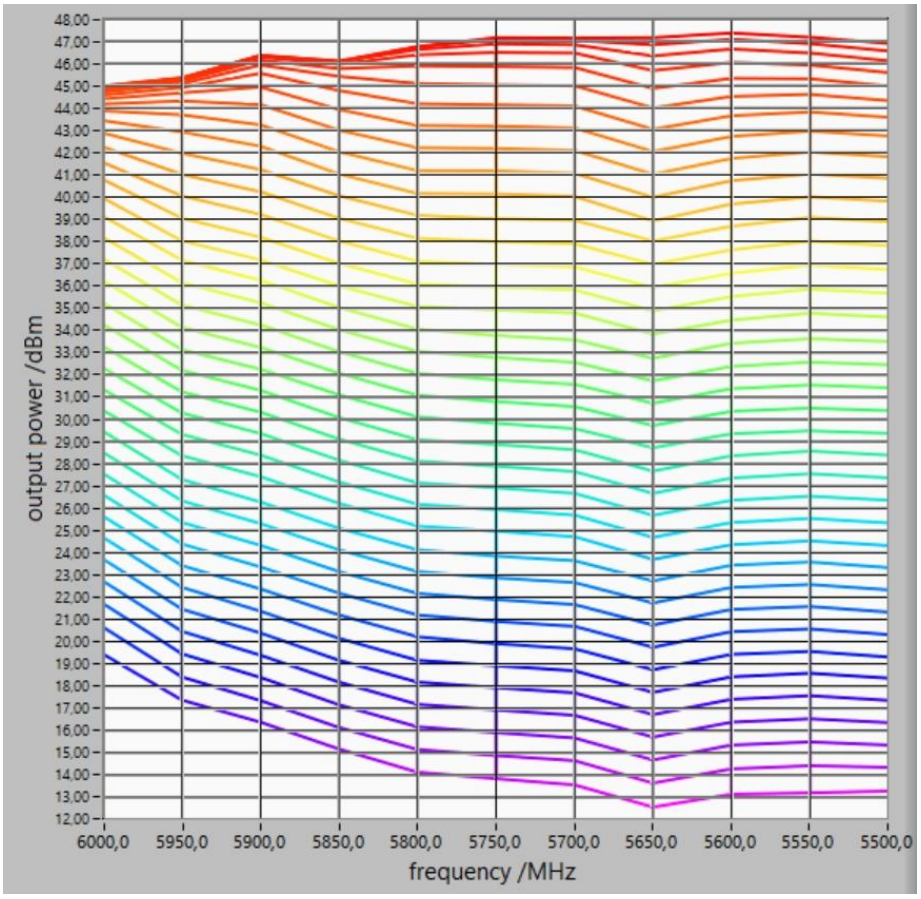


Wirkungsgrad /% in Abhängigkeit von der Eingangsleistung /dBm

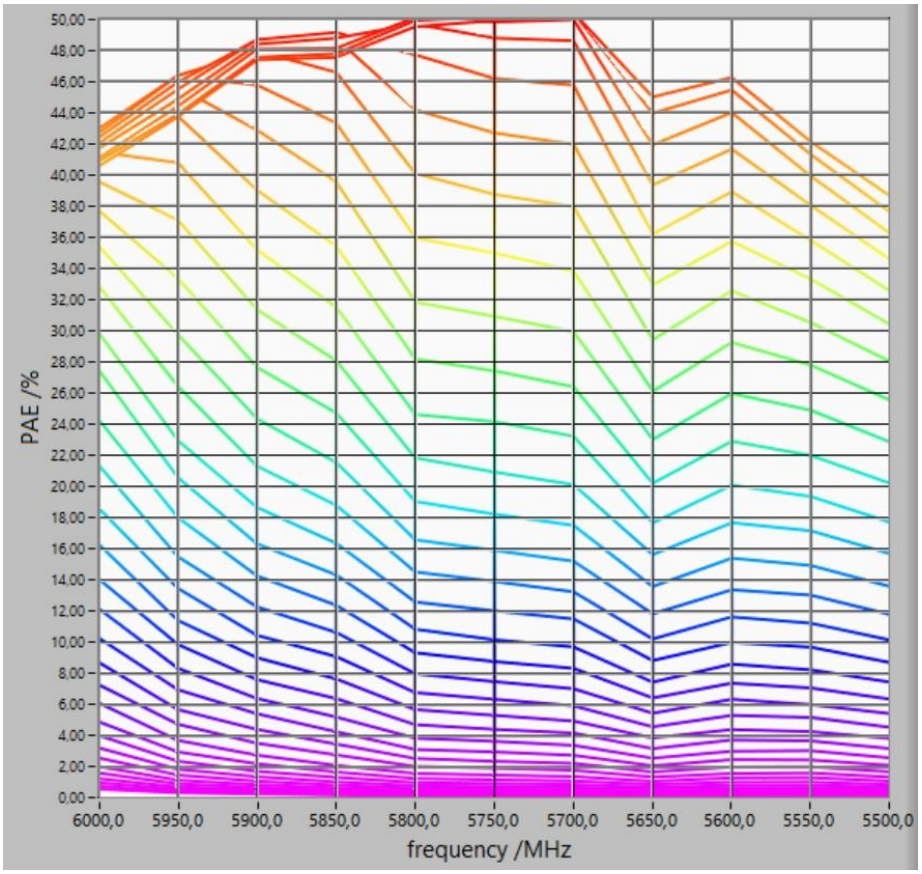
In den letzten drei Diagrammen sind die Verstärkung, die Ausgangsleistung und der Wirkungsgrad über der Frequenz (von 5500 bis 6000 MHz) aufgetragen. Die verschiedenen Messkurven repräsentieren unterschiedliche Eingangsleistungspegel.



Verstärkung /dB in Abhängigkeit von der Frequenz /MHz



Ausgangsleistung /dBm in Abhängigkeit von der Frequenz /MHz



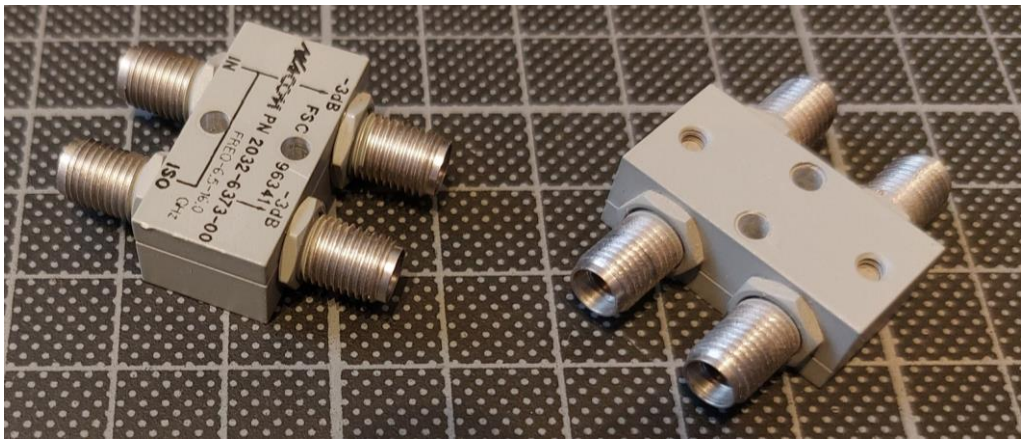
Wirkungsgrad /% in Abhängigkeit von der Frequenz /MHz

Die Leistung des PA-Moduls kommt den spezifizierten Werten recht nahe. Mit ein wenig Tuning kann eine maximale Ausgangsleistung bei 5700 MHz von 50 W und eine PAE von 50 % erreicht werden. Die dafür nötige Eingangsleistung beträgt +1 dBm. Ich habe 3 verschiedene Module gemessen und ihre Leistung variiert nur geringfügig. Die optimale Ausgangsanpassung für maximale PAE und Leistung war bei jedem Modul etwas anders.

Bitte beachten Sie, dass bei allen obigen Messungen ein leichter Abfall der Verstärkung, Leistung und Effizienz bei 5650 MHz zu verzeichnen ist. Dies ist ein Problem meines Messaufbaus und war bei allen Geräten, die ich gemessen habe, gleich. Bitte ignorieren Sie dies.

Nachdem ich so hervorragende Ergebnisse mit den Modulen erzielt hatte, beschloss ich, eine PA-Einheit zu bauen, die auf zwei solcher Module in Kombination mit 90°-Hybridkopplern basiert. Ich beabsichtige demnächst auch EME-Versuche im 6cm vorzunehmen und dafür sind 75W am Speisepunkt der Antenne das Ziel. Für den möglichen DATV-Betrieb über einen geostationären Satelliten benötigt man eine hohe Linearität des kompletten Senders inklusive der Endstufe. Eine grobe Faustformel sagt, dass man die Endstufe nur bis zu ca. 1/4 ihrer maximalen Leistung aussteuern sollte um eine ausreichend gute Signalqualität des Sendesignals zu erreichen.

Für den Eingang verwendete ich einen Hybrid-Splitter / Combiner von M/A-COM mit der Teilenummer 2032-6373-00. Er ist für höhere Frequenzen (6,5 bis 12,3 GHz) spezifiziert, aber ich konnte durch eigene Messungen verifizieren, dass er bei 5700 MHz sehr gut funktioniert.



Über den gesamten Frequenzbereich ist dieser Koppler mit einer maximalen Amplitudenunsymmetrie von ±0,5 dB, einer maximalen Einfügedämpfung von 0,5 dB und einer Mindestisolation von 18 dB spezifiziert. Das maximale VSWR an allen Anschlüssen beträgt 1,35, was einer Rückflussdämpfung von 16,5 dB entspricht. Er kann eine maximale Dauerleistung von 30 W übertragen.
Ich habe die Leistung des Kopplers bei 5,7 GHz überprüft und seine Parameter für den vorgesehenen Anwendungsfall als Splitter gemessen (Anschlussnummerierung im Uhrzeigersinn mit In = Port1, -3dB = Port2, -3dB = Port3, ISO = Port4):

S11 = -24.5 dB (VSWR = 1.13)
S22 = -19.2 dB (VSWR = 1.25)
S33 = -22.8 dB (VSWR = 1.16)
S21 = -3.13 dB
S31 = -3.18 dB

Die Phasendifferenz zwischen den beiden -3-dB-Ausgängen betrug 92,2 °, der resultierende Phasenfehler 2,2 °.

Für die Zusammenführung der Ausgänge der beiden Verstärkermodule habe ich einen 90°-Hybrid-Combiner von NARDA mit der Modellnummer 3034 verwendet. Er ist für den Frequenzbereich 4,0 bis 8,0 GHz mit einer maximalen Dauerleistung von 200 W spezifiziert. Der nominale Kopplungsfaktor vom gemeinsamen Eingangsanschluss zu jedem Ausgangsanschluss beträgt 3,0 bis 3,3 dB. Die maximale Amplitudenabweichung zwischen den Ausgangsanschlüssen beträgt ±0,5 dB. Die Mindestisolation beträgt 18 dB. Das maximale VSWR an allen Anschlüssen beträgt 1,3, was einer Rückflussdämpfung von 17,8 dB entspricht.

Ich habe die Eigenschaften des Kopplers bei 5,75 GHz gemessen (Anschlussnummerierung im Uhrzeigersinn mit In = Port1, -3dB/0° = Port2, -3dB/-90° = Port3, ISO = Port4):

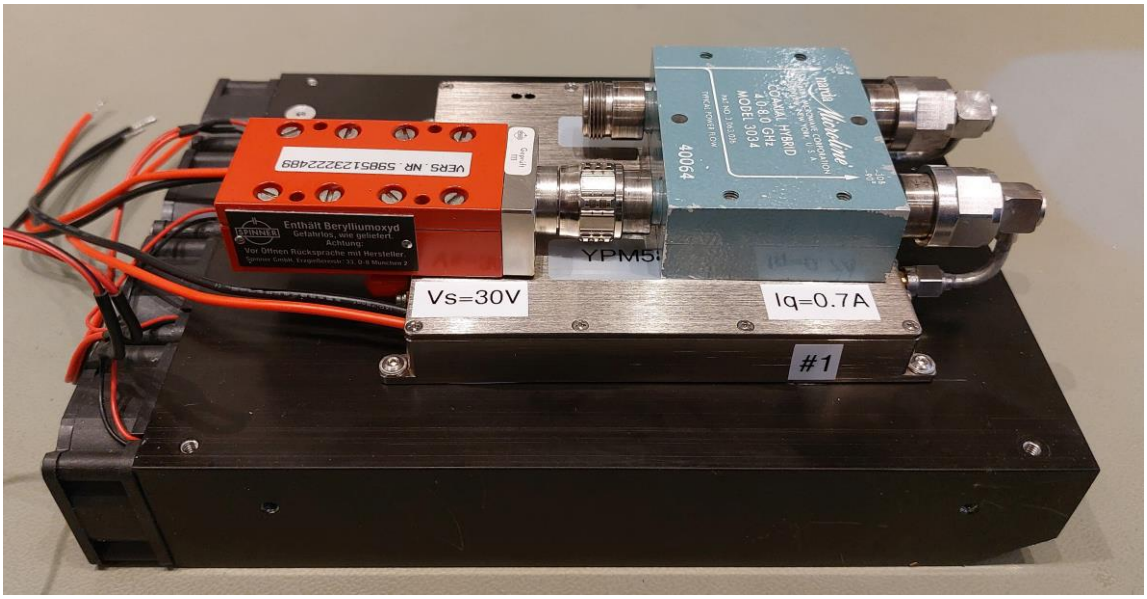
S11 = -19.6 dB (VSWR = 1.23)
S22 = -12.9 dB (VSWR = 1.59)
S33 = -16.7 dB (VSWR = 1.34)
S21 = -2.94 dB
S31 = -3.32 dB

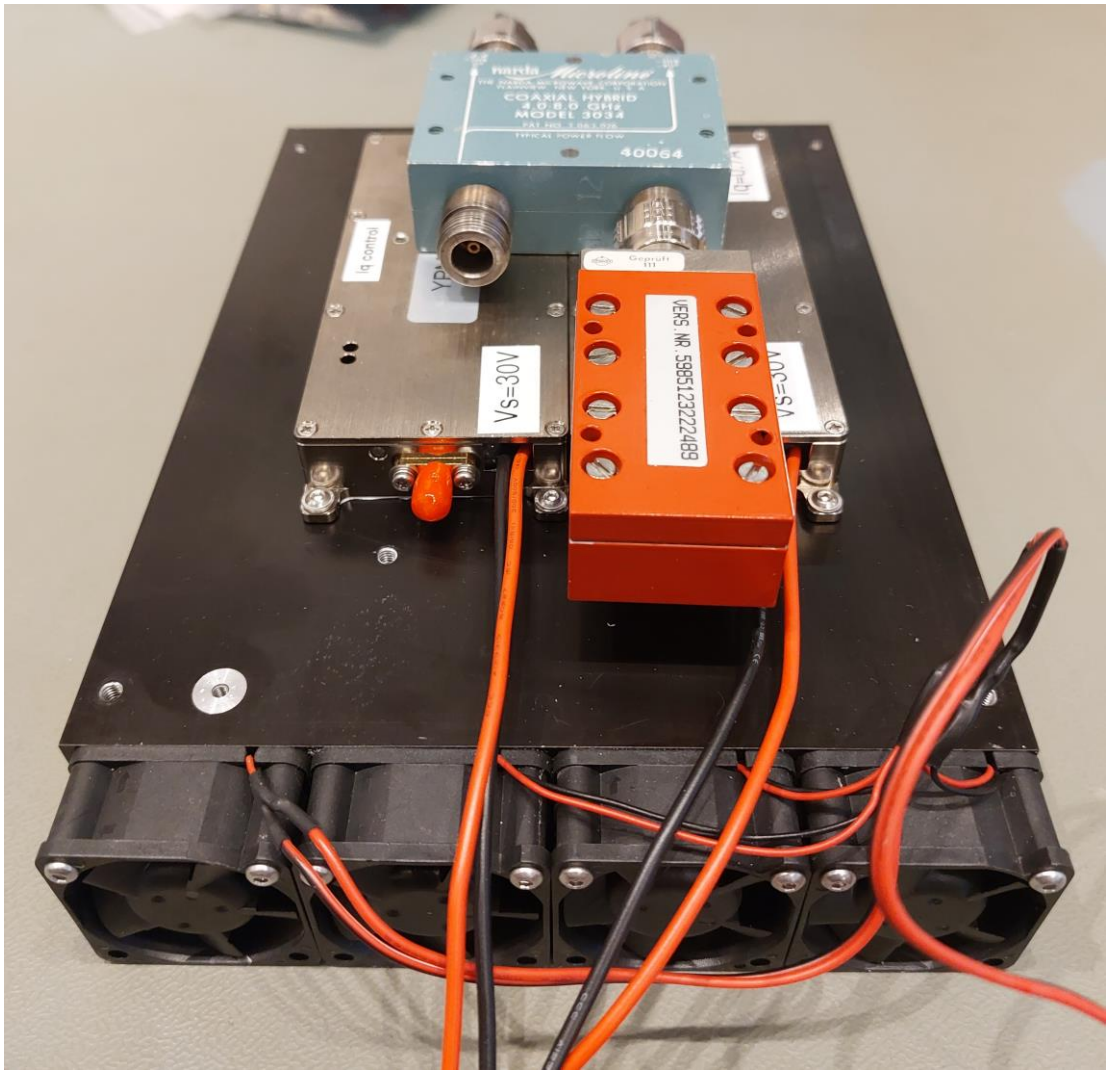
Die Phasendifferenz zwischen den beiden -3dB-Ports bei Verwendung als Splitter betrug 87,6 °, der resultierende Phasenfehler 2,4 °.

Die Phasendifferenz zwischen den beiden -3dB-Ports bei Verwendung als Combiner betrug 88,3 °, der resultierende Phasenfehler 1,7 °.

Um die Phase der beiden Verstärkerzweige abzustimmen, verwendete ich einen variablen Phasenschieber des Typs JYE BAO PTS-A3A8-18-15*f. Er ist für einen Frequenzbereich bis 18 GHz spezifiziert. Bei 6 GHz beträgt der angegebene Phasenverschiebungsbereich 90 °.

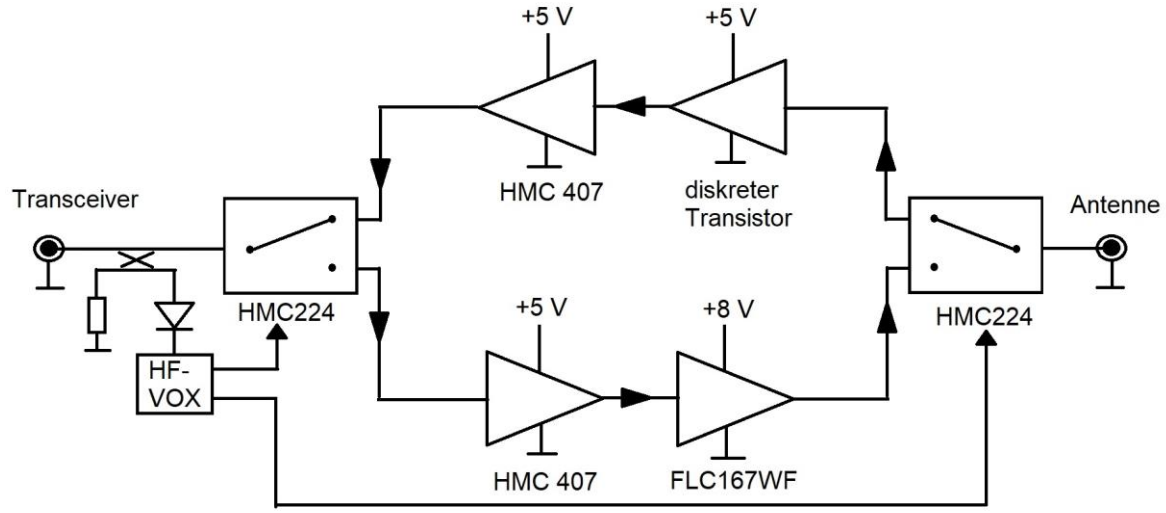
Ich habe die beiden PA-Module auf einen Kühlkörper montiert und vier 40-mm-Lüfter hinzugefügt, was sich als eine ausreichende Kühllösung erwiesen hat. Ich habe die Endstufe bei maximaler Leistung für Sendezeiten von mehr als 10 Minuten problemlos betrieben ohne dass die Module über 50 Grad heiss wurden.



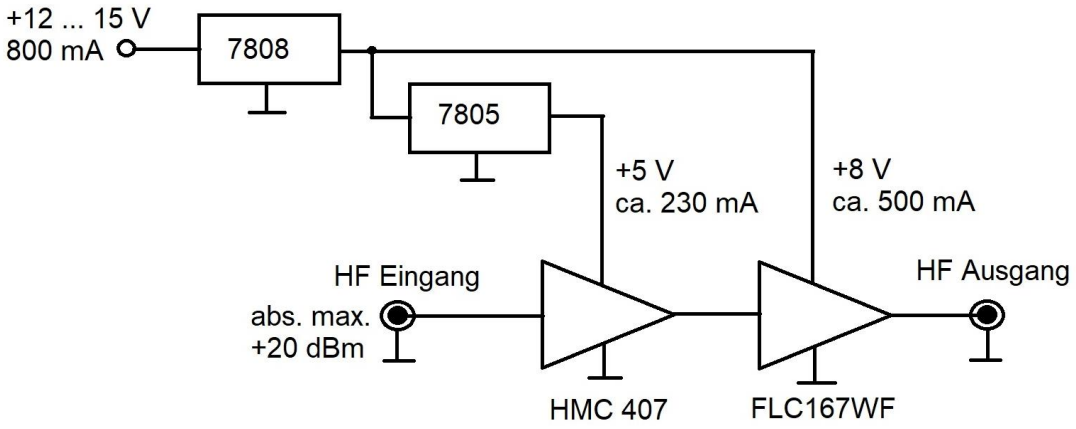


Die in den vorherigen Bildern gezeigten kurzen Jumperverbindungen von SMA-Stecker zu N-Stecker erwiesen sich als für 5700 MHz nicht geeignet. Ich vermute, dass es an den rechtwinkligen N-Steckern liegt und habe sie durch gerade Verbindungen ersetzt. Der Isolationsport des Ausgangskombinators ist mit einer Spinner BN-527711 50 Ohm Dummy-Last mit einer maximalen Leistung von 25 W abgeschlossen. Bei Bedarf kann er auf einen Kühlkörper montiert werden, wodurch sich die maximale Leistung auf 80 W erhöht. Diese künstliche Last hat eine hervorragende Rückflussdämpfung von mehr als 30 dB bei 5,7 GHz.

Da ich in der Lage sein wollte, die PA mit einem SDR-Transceiver zu betreiben, beschloss ich, einen Treiberverstärker hinzuzufügen. Ich hatte noch eine Platine eines alten bidirektionalen RF-LINX WIFI-Verstärkers (Antennafier MN-5080SX) und habe diese modifiziert. Hier eine Skizze des ursprünglichen Blockschaltbilds dieses Verstärkers:



Dieses Modul bot eine Sendeverstärkung von 14 dB und eine Empfangsverstärkung von 17 dB. Die gemessene maximale Ausgangsleistung betrug 24,7 dBm bei einer Eingangsleistung von 11,4 dBm.
Die Sendeverstärkung von maximal 14 dB war für meine Anwendung etwas zu niedrig. Daher beschloss ich, den Empfangsverstärkerweg zu deaktivieren und die HMC407 Sende-Empfangsschalter zu entfernen. Außerdem deaktivierte ich die HF-VOX-Funktion, die erst bei einer Eingangsleistung von etwa +2 dBm von RX auf TX umschaltete. Nun ist die Sendeverstärkerkette aktiviert, sobald die Versorgungsspannung angelegt wird. Hier eine Skizze des Blockschaltbilds des modifizierten Verstärkers:

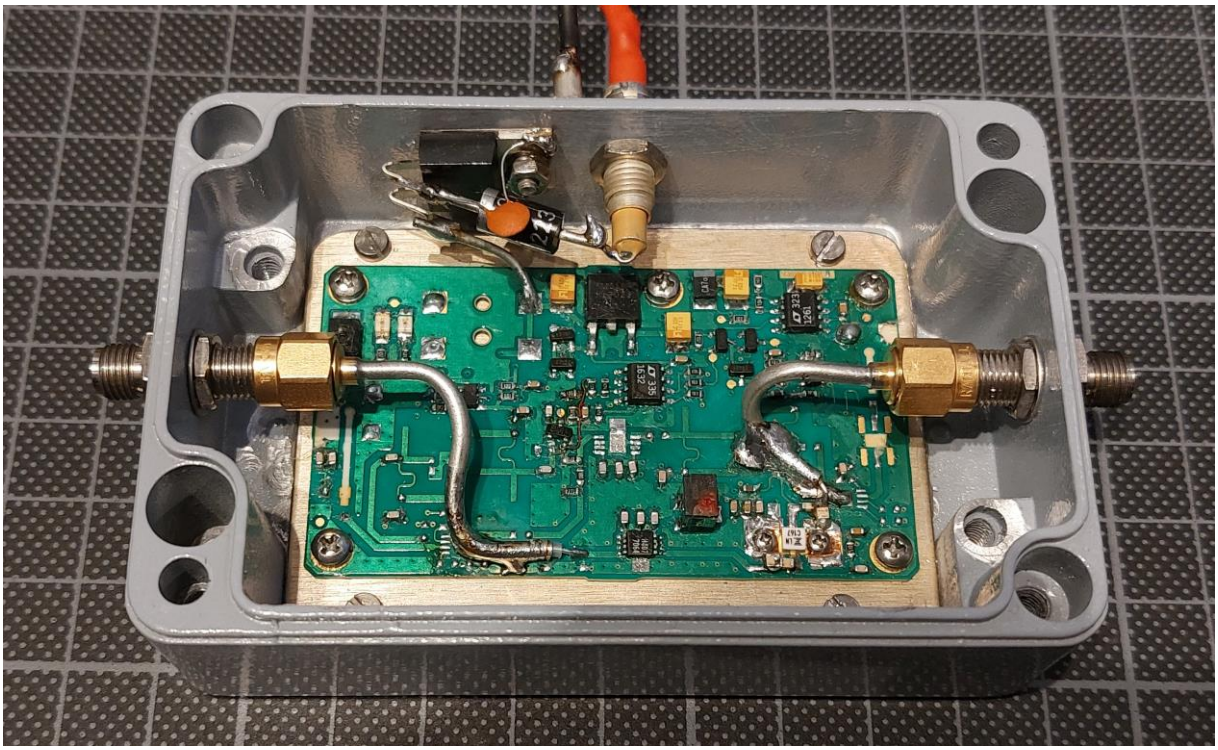


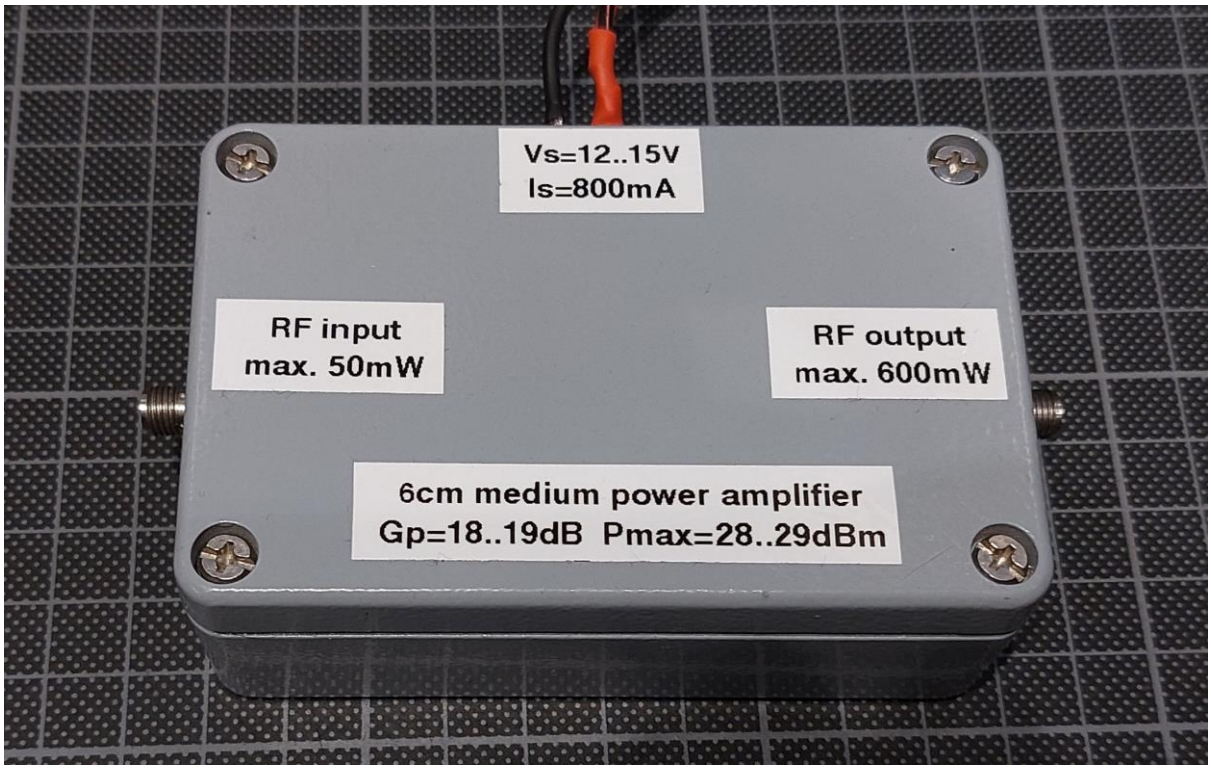
Um den Treiberverstärker an dem vorhandenen 12-V-Netzteil betreiben zu können, habe ich einen zusätzlichen Spannungsregler eingebaut, der die Spannung von 12 V auf 8 V reduziert. Hier sind die gemessenen Parameter des modifizierten Verstärkers:

Eingangsleistung /dBm	Ausgangsleistung /dBm	Leistungsverstärkung /dB
0	19	19
5	24,3	19,3
10	27,8	17,8
13	28,8	15,8

Der Treiberverstärker liefert nun eine lineare Verstärkung von etwa 19 dB bei 5700 MHz mit einem P1dB von etwa 27 dBm. Bei Bedarf kann die maximale Ausgangsleistung auf +30 dBm erhöht werden, wenn die Versorgungsspannung der Endstufe von 8 V auf 10 V erhöht wird. Dies ist in meinem Aufbau nicht erforderlich.

Ich habe die Leiterplatte in ein Aluminiumdruckgussgehäuse eingebaut, das an eine Seitenwand des PA-Gehäuses geschraubt wurde.





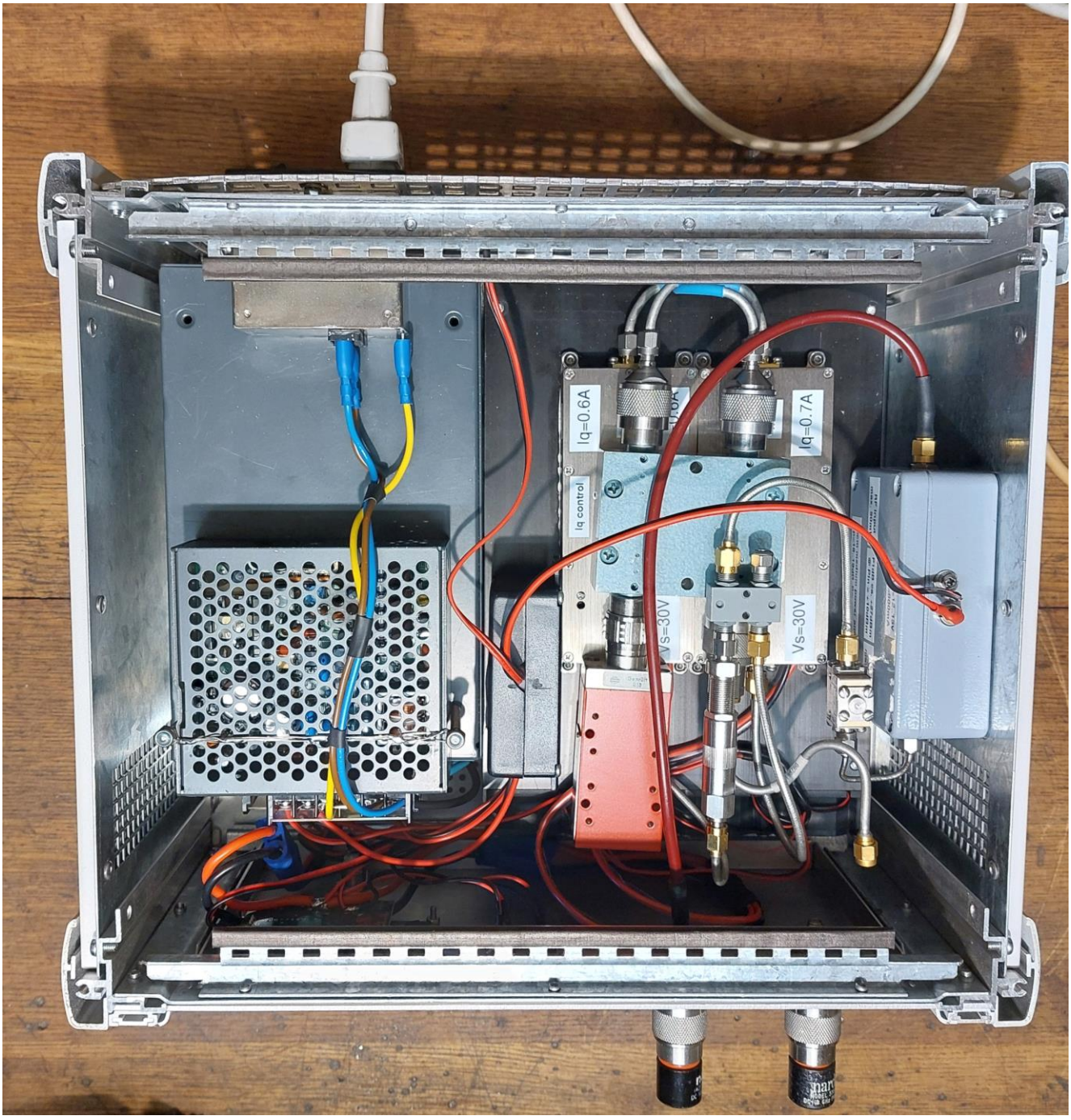
Zur Entkopplung von Treiberverstärker und Endstufe habe ich dazwischen noch einen Isolator des Typs NARDA AER1193 mit einer Einfügedämpfung von 0,5 dB und einer Isolation von 30 dB eingebaut.

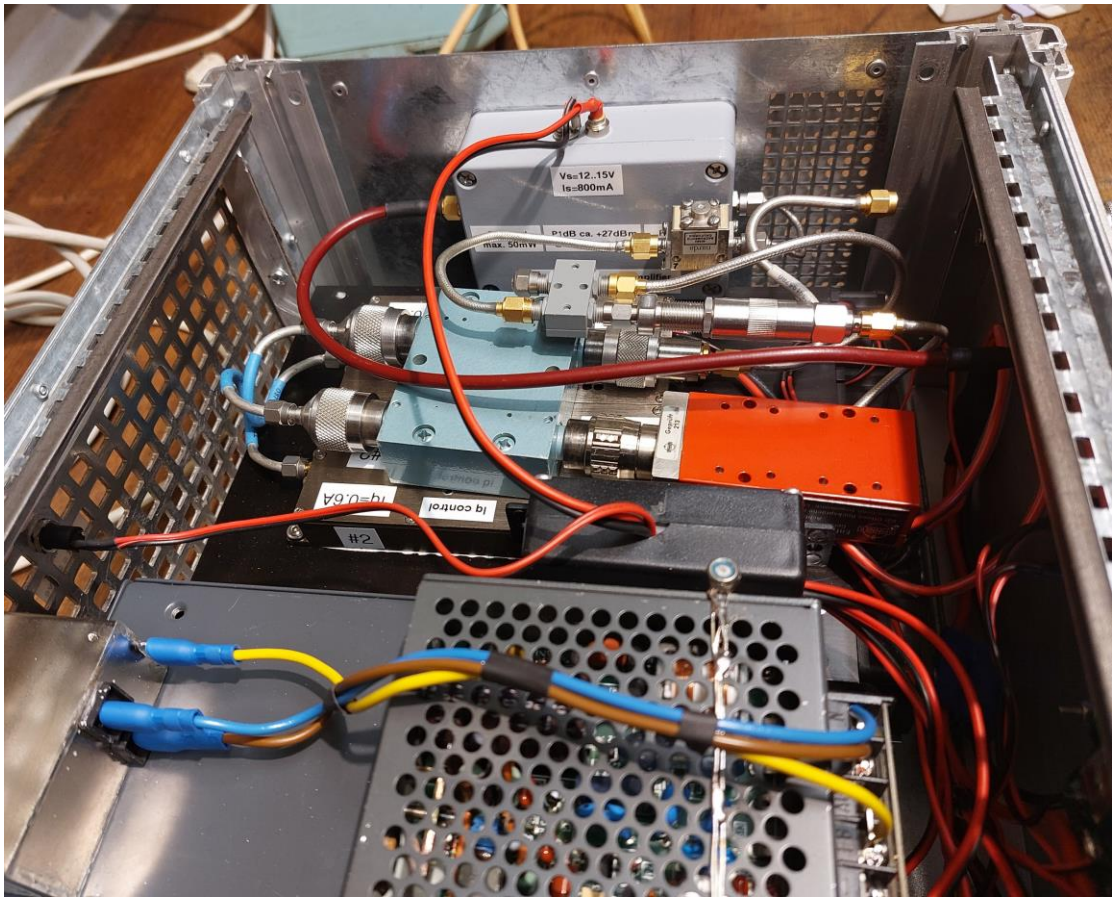
Ich verwende zwei Netzteile von DENSEI Lambda.

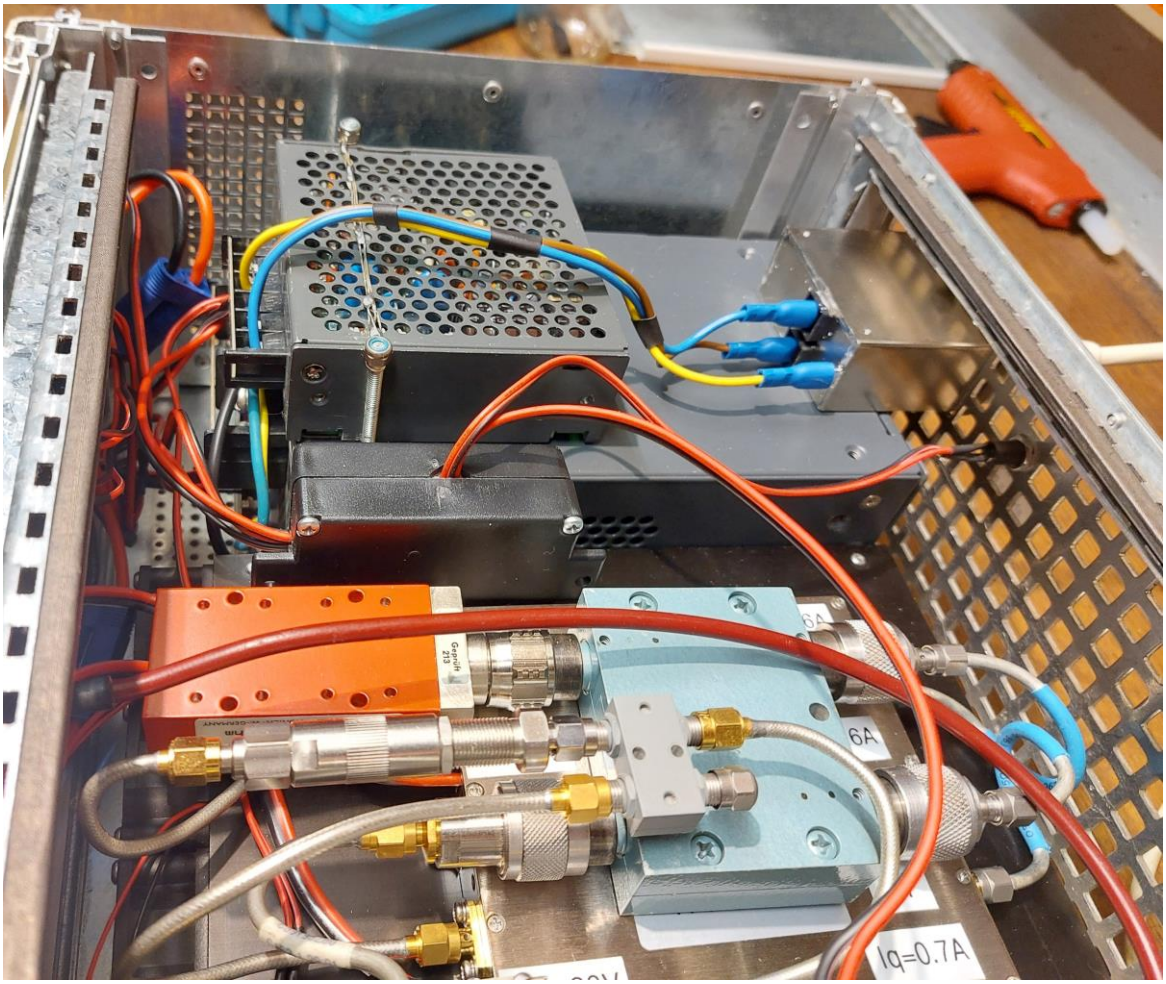
Das Hauptnetzteil ist ein EWS300 24 V / 14 A Modul mit einer auf 30 V eingestellten Ausgangsspannung. Das Schöne an diesem Netzteil ist, dass die Ausgangsspannung durch Verbinden von den beiden Pins TOG und CNT aktiviert werden kann. Ich schalte diese mit einem kleinen Hilfsrelais kurz, wenn die PTT aktiviert wird. So werden die beiden PA-Module nur dann mit Spannung versorgt, wenn die PTT aktiviert ist.

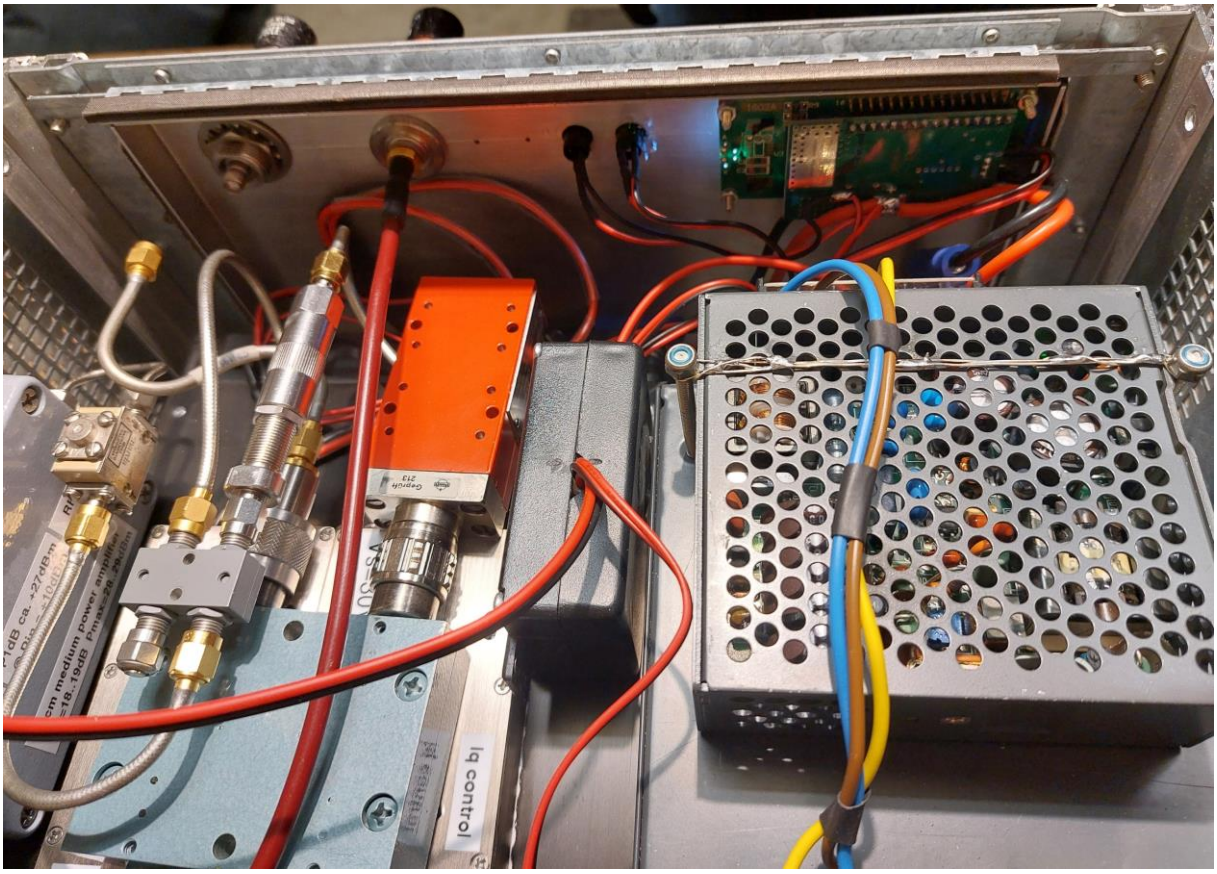
Das zweite Netzteil ist ein Lambda EWS-15-15 15 V / 1,1A, welches auf eine Ausgangsspannung von 12 V eingestellt ist. Damit werden der Treiberverstärker und die Lüfter auf dem Kühlkörpers betrieben. Die 12 V sind immer eingeschaltet, sobald der Netzschalter der kompletten PA eingeschaltet wird.

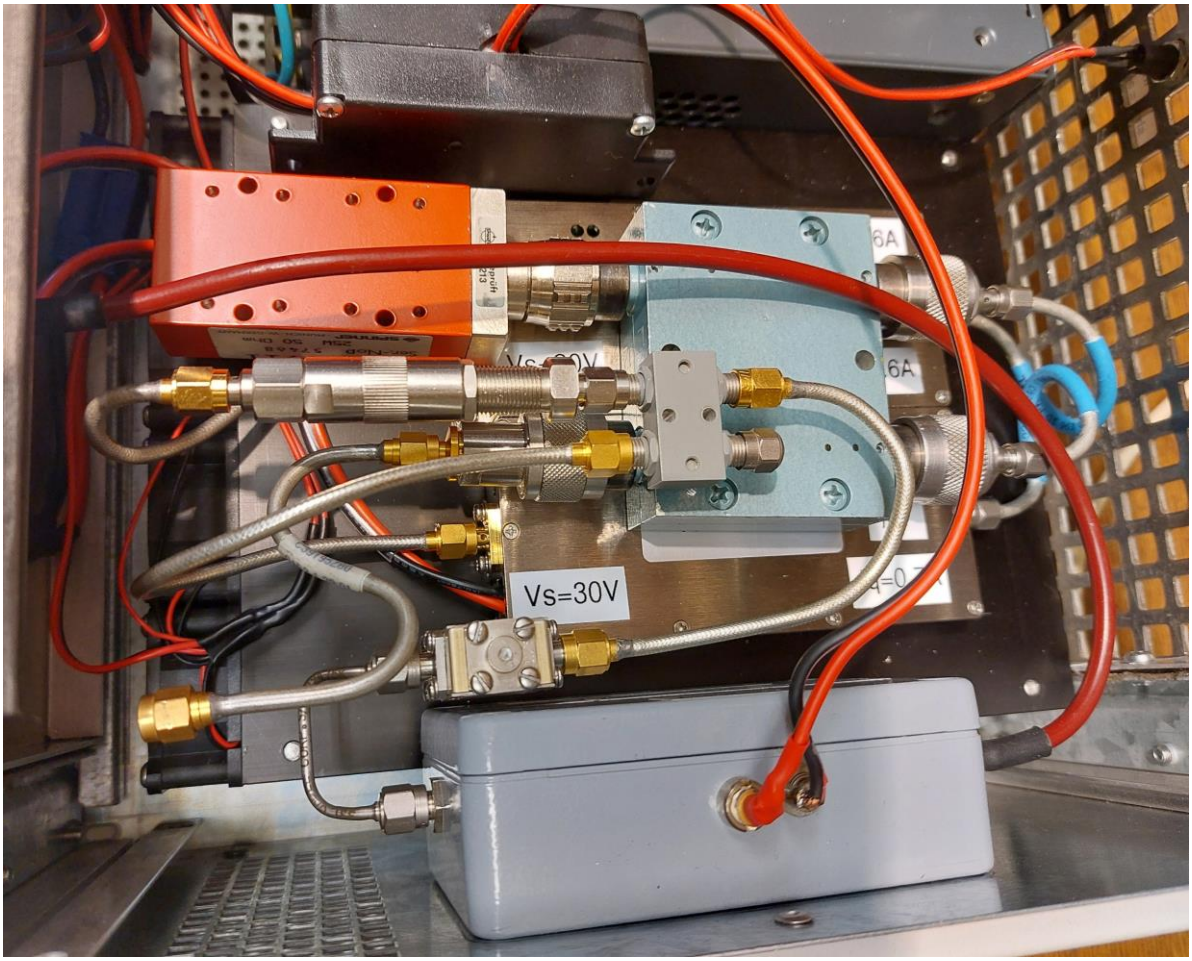
Hier sind einige Bilder der Integration der verschiedenen Module in das Gehäuse.




Vs=12..15V
Is=800mA
#2


6A
Iq=0.7A

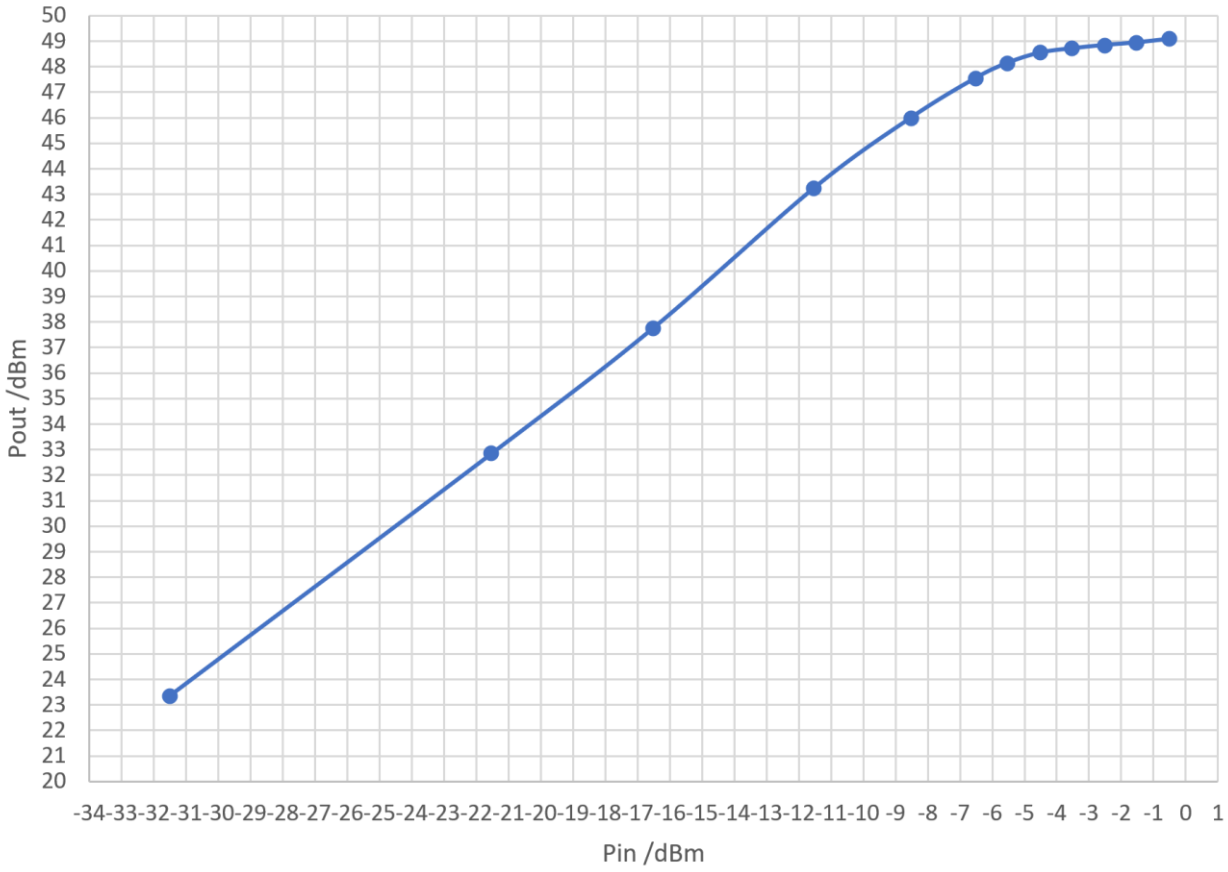

Iq control


Vs=30V

Ich habe in die Frontplatte ein Gleichspannungs- und Strommessgerät für die 30-V-Stromversorgung und zwei LEDs als Anzeigen für die 12-V-Spannung (grün) und die aktivierte PTT (blau) eingebaut. Außerdem fügte ich einen Drucktaster hinzu, um die PTT zu aktivieren bzw. das PA-Modul zu Testzwecken einschalten zu können.

Auf der Rückseite befinden sich auf der rechten Seite ein Netzanschluss, eine Netzsicherung und ein Netzschalter. Die 3,5-mm-Buchse dient zum Aktivieren der PTT und damit zum Einschalten des PA-Moduls durch den Transceiver. Hier sind einige Bilder der fertigen PA.

Schließlich habe ich die Leistung der kompletten PA gemessen. Die Messung wurde vorgenommen, nachdem die Endstufe einige Zeit mit maximaler Leistung betrieben wurde und entsprechend warm war. Die maximale Ausgangsleistung betrug 82 W. Nachfolgend finden Sie die gemessene Ausgangsleistung als Funktion der Eingangsleistung (beides in dBm):



Nach dieser Messung stellte ich fest, dass das Semi-Flex-Patchkabel am Ausgang vom Koppler zur Frontplatte heiß wurde. Offenbar waren die Verluste zu groß.

Nachdem ich dieses Patchkabel durch ein solides Kabel ersetzt hatte, konnte ich in kaltem Zustand der PA eine Ausgangsleistung von 93 W messen. Nach dem Erwärmen der PA durch längeren Betrieb sank die maximale Ausgansleistung auf 88 W.

Übrigens habe ich die optimale Phasenanpassung mit dem variablen Phasenschieber für verschiedene Eingangsleistungen, sowohl im kalten und als auch erwärmten Zustand der PA überprüft. Ich hatte mit einer gewissen Phasenverschiebung gerechnet, aber diese war vernachlässigbar.

Ich werde die Messungen der gesamten PA mit meinem automatischen Messaufbau wiederholen, wenn ich in den nächsten Wochen Zeit finde.

Ich bin immer dankbar für Rückmeldungen und beantworte gerne Fragen.

Bitte richten Sie diese an meine Email-Adresse, die Sie auf meiner Website finden.

Mit freundlichen Grüßen
Matthias DD1US

Homepage: http://www.dd1us.de