

Schlussbericht zu Verbundvorhaben TRIPLE FRS:

„Entwicklung des Vorfelderkundungssystems für die TRIPLE-Schmelzsonde zur Navigation und zur Detektion des Eis-Wasser-Übergangs zu subglazialen Flüssigkeitsreservoirs (Teilvorhaben Pulsverstärker, GloMic GmbH)“

Teilprojekt: Pulsverstärker
Förderkennzeichen: 50RK2052
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2020 - 30.06.2023
Zuwendungsempfänger: GloMic GmbH, Krampnitzer Weg 102,
14089 Berlin

Verfasser: Dr.-Ing. Chi Thanh NGHE
Prof. Dr.-Ing. Georg BÖCK

Inhalt

Teil I, Kurzdarstellung	3
1. Aufgabenstellung	3
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	3
4. Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde	4
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	4
6. Literatur zu Teil I	4
Teil II, Umfassende Darstellung	
1. Verwendung der Zuwendung, Ergebnisse, Vergleich mit den Zielen	6
1.1 Einleitung und Ziele des Verbundprojektes	6
1.2 Teilprojekt der GloMic GmbH – Pulsverstärker	6
1.2.1 Verstärkerkonzept und Zielspezifikationen	7
1.2.2 Verstärkerdesign	8
1.2.3 Verstärkerrealisierung	10
1.2.4 Messplatzaufbau	11
1.2.5 Charakterisierung, Messergebnisse	13
1.2.6 Zusammenfassung, Bewertung der Ergebnisse; Vergleich mit den vorgegebenen Zielen	18
1.2.7 Literatur	20
2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	21
2.1 Material	21
2.2 Personalmittel	21
2.3 Reisen	21
2.4 Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	21
2.5 Selbstkosten	21
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	21
4. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse	22
5. Während des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens	23
6. Veröffentlichungen	23
6.1 Patente	23
6.2 Publikationsliste	23

Teil I, Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung der GloMic GmbH war die Entwicklung des 1,35 GHz Pulsverstärkers mit einer Pulsausgangsleistung von mehr als 100 W bei einer Pulsbreite von 10 ns. Diese Schlüsselparameter sollten bei gleichzeitig exzellenter Signalintegrität und hohem Wirkungsgrad erzielt werden.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben startete planmäßig und wurde in Kollaboration mit den in der Gesamtvorhabenbeschreibung genannten Projektpartnern durchgeführt. Mit allen Partnern gab es einen intensiven Austausch in Form von regelmäßigen, 14-tägigen Videokonferenzen. Darüber hinaus wurde der Projektfortschritt in Form mehrere Reviews überprüft. Die fortwährende Einordnung und Anpassung in das gesamte TRIPLE Vorhaben erfolgte in Form regelmäßiger Synergie-Treffen. Die Reisetätigkeit während der ersten Projekthälfte war durch die Corona-Pandemie reduziert. Aufgrund der Verfügbarkeit von mittlerweile hervorragenden Werkzeugen für Videokonferenzen wurden die Projektarbeit und damit das Projektergebnis dadurch nicht eingeschränkt.

Alles in allem konnte das Projekt unter Erreichung aller Ziele am 30.06.2023 planmäßig abgeschlossen werden.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt startete planmäßig am 01.07.2020. Am 19.08.2020 fand das Kick-Off Meeting statt – aufgrund der Corona-Pandemie in Form einer Videokonferenz. Seit dem 20.07.2020 fanden für das Kernteam regelmäßige Telefon- und/ oder Videokonferenzen im Zweiwochen-Rhythmus statt, bei denen alle aktuellen Fragestellungen ausgetauscht und diskutiert wurden. Weiterhin wurden hier alle Vorbereitungen für aktuell anstehende Ereignisse getroffen wie z.B. für das TRIPLE Concurrent Engineering (CE) und die Component Requirement Reviews (CRR). Um die Kommunikation möglichst komfortabel zu gestalten, wurde innerhalb des Kernteams auf „Slack“ zurückgegriffen und für den Datenaustausch wurde u.a. die „Cloud“ herangezogen.

Seitens der GloMic GmbH gab es von Beginn an eine besonders intensive Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Institut für HF-Technik. In diesem Zusammenhang fand am 10.08.2020 an der FAU ein Präsenz-Meeting mit Teilnehmern von FAU und GloMic statt. Hierbei wurden alle wichtigen Fragen zum Systemkonzept, zur Verstärkerarchitektur und zu den Zielspezifikationen von Verstärker und Radar inkl. der zugehörigen Schnittstellen diskutiert und vorläufige Zielspezifikationen festgelegt.

4. Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Arbeit wurde nach umfassendem Literaturstudium auf Basis des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik durchgeführt. Besondere Aufmerksamkeit genoss dabei die Hochfrequenzleistungserzeugung unter besonderer Berücksichtigung des Kurzpulsverhaltens.

Wegen des enormen technologischen Fortschritts auf dem Gebiet der Gallium Nitrid (GaN) Heterostrukturbauelemente wurde von vornherein auf diese Technologie gesetzt, was sich im Projektverlauf als sinnvoll erwies. GaN-Hochfrequenztransistoren weisen gegenüber Siliziumbauelementen höhere Grenzfrequenzen, Schaltgeschwindigkeiten, Leistungsdichten und eine höhere Wärmeleitfähigkeit auf, [1], [2]. Dafür wurden einige bekannte Nachteile in Kauf genommen: Die sehr frühe und weich einsetzende Kompression der Ausgangsleistung (Soft-Compression) [3], [4]), die frequenz- und zeitabhängige Veränderung der Transistorparameter wie z. B. Verstärkung, Ausgangsleitwert etc. (Dispersion) [5] und die derzeit noch unzureichend beschriebene elektro-thermische Kopplung in heute verfügbaren GaN Transistormodellen von CAE-Werkzeugen, [6].

Der Beseitigung bzw. zumindest der Minimierung dieser nachteiligen Bauelemente-Einflüsse wurde im Verlauf der Konzeptionsphase große Aufmerksamkeit gewidmet - durch umfassende Untersuchungen zur Schaltungstopologie und zur Auswahl von Verstärkerklasse, Transistor-größe, Combiningmethode und Biaskonzept.

Aufgrund der zeitlichen und finanziellen Rahmenbedingungen war es naheliegend, auf eine planare Hybridtechnologie in Streifenleitungstechnik zurückzugreifen (Microwave integrated Circuit- oder MIC-Technologie) [7].

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Einen wissenschaftlichen Austausch zu Fragen des Leistungsverstärkers gab es mit führenden europäischen Institutionen und Experten auf diesem Gebiet:

- Prof. Dr. Renato Negra, RWTH Aachen
- Dr.-Ing. Michael Schlechtweg, IAF Freiburg
- Prof. Dr. Herbert Zirath, Chalmers University Göteborg, Schweden

6. Literatur zu Teil I

- [1] <https://www.wolfspeed.com/products/rf/>.
- [2] <https://www.wolfspeed.com/knowledge-center/article/gan-on-sic-or-gan-on-si/>.
- [3] José C. Pedro, Luís C. Nunes, Pedro M. Cabral, "Soft Compression and the Origins of Nonlinear Behavior of GaN HEMTs", 2014 44th European Microwave Conference Proceedings, 2014, pp. 1297-1300, DOI: 10.1109/EuMIC.2014.6997865.
- [4] H. Sarbishaei, D. Y.-T. D. Wu, S. Boumaiza, "Linearity of GaN HEMT RF-Power Amplifiers – A Circuit Perspective", 2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2012, pp. 1-3, DOI: 10.1109/MWSYM.2012.6259553.
- [5] Sayed A., Albahrani Anthony, E. Parker, "Characterization of trapping and thermal dispersion in GaN HEMTs", 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2010, pp. 413-416, DOI: 10.1109/MWSYM.2010.5515028.

- [6] S.C. Hung, Y.K. Su, S.J. Chang, S.C. Chen, L.W. Ji, T.H. Fang, Y.H. Chen, "Electro-thermo-mechanical transient modeling of stress development in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors (HEMTs)", 2014 14th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), pp. 959-965, DOI: 10.1109/ITHERM.2014.
- [7] C. Berrached, D. Bouw, M. Camiade, D. Barataud, "Wideband high efficiency high power GaN amplifiers using MIC and quasi-MMIC technologies", 2013 European Microwave Integrated Circuit Conference Proceedings, pp. 424-427, Electronic ISBN: 978-2-87487-032-3.

Teil II, Umfassende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung, Ergebnisse, Vergleich mit den Zielen

1.1 Einleitung und Ziele des Verbundprojektes

Das durchgeführte Verbundvorhabens „TRIPLE-FRS“ ist in den Gesamtkontext der Suche nach extraterrestrischem Leben einzuordnen. Als potentielle Orte dafür werden innerhalb unseres Sonnensystems Ozeane unter den Eispanzern div. Planeten angesehen. Die Erforschung terrestrischer subglazialer Strukturen ist deshalb von herausragender Bedeutung für dieses Forschungsgebiet.

Ein Schlüsselinstrument zur Erforschung subglazialer Strukturen sind Schmelzroboter. Schmelzroboter müssen in der Lage sein, einen Eispanzer bis zu einer Dicke von ca. 1 km zu durchdringen und das eingeschlossene Wasserreservoir kontaminationsfrei zu beproben. Derartige Schmelzroboter sind derzeit nicht verfügbar. Ihre Entwicklung und Erprobung ist erklärtes Ziel der TRIPLE-Projektline.

Das Verbundprojekt TRIPLE-FRS (**Forefield Reconnaissance System**) soll innerhalb der TRIPLE-Projektline einen Beitrag zur Vorfeldererkennung derartiger Schmelzroboter liefern. Die Vorfeldererkennung besteht in der Erkennung von Hindernissen im Eis auf dem Weg zur Eis-Wasser-Grenzschicht am Boden des Eispanzers und der sicheren Erkennung des Eis-Wasser-Übergangs. Als technischer Ansatz für ein solches System wurde die Realisierung eines hybriden Radar-/ Sonar-Sensors ins Auge gefasst, der in den Kopf der Schmelzsonde integriert werden soll. Ergänzt werden soll die Vorfelderkundung durch eine fortlaufende Permittivitätsbestimmung.

Das TRIPLE-FRS-Konsortium zur Umsetzung der Projektidee bestand aus den Projektpartnern Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik (Projektleitung, Radar), GloMic GmbH Berlin (Pulsverstärker), Bergische Universität Wuppertal, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften (Permittivitätsmessung) und RWTH Aachen, Physikzentrum, III. Physikalisches Institut B (Sonarsystem).

1.2 Teilprojekt der GloMic GmbH – Pulsverstärker

Das Teilprojekt der GloMic GmbH bestand in der Realisierung des Leistungsverstärkers für das Radar Frontend (AP 4000, Pulsverstärker). Die in der Gesamtvorhabenbeschreibung definierten Arbeitspakete sind nachfolgend zusammengestellt:

- AP 4100 Entwurf Endstufe
- AP 4200 Entwurf Vor- und Treiberstufen
- AP 4300 Entwurf der Umgebungsnetzwerke
- AP 4400 Gehäusedesign, Entwärmung
- AP 4500 Assembling
- AP 4600 Messplatzaufbau, Charakterisierung

1.2.1 Verstärkerkonzept und Zielspezifikationen

Das Systemkonzept für das Radar Frontend wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner FAU entwickelt. Zu diesem Arbeitspaket fand am 10.08.2020 an der FAU ein Präsenz-Meeting statt, auf dem die ersten Randbedingungen formuliert und die in der nachfolgenden Tabelle 1 zusammengefassten Zielspezifikationen für den Pulsverstärker festgelegt wurden.

Als Kernaufgabe der Verstärkerrealisierung wurde die Erzielung einer möglichst hohen Ausgangsleistung bei gleichzeitig höchster Signalintegrität unter Kurzpulsbeaufschlagung angesehen.

Tab. 1: Zielspezifikationen Pulsverstärker.

Topology	two-stage
Supply voltage	48 V
Max. drain current (CW operation)	8.5 A (power-stage)
Center frequency	1.35 GHz
Output power	>100 W @ P3dB (pulsed)
Gain	>40 dB (pulsed)
Pulse width (@50% P_{max})	10 ns
Pulse rise time (10% to 90% P_{max})	3 ns
Pulse fall time (90% to 10% P_{max})	3 ns

Um die erforderliche Verstärkung von ca. 40 dB zu erreichen, wurde von einer zweistufigen Topologie ausgegangen. Für beide Stufen wurde GaN-HEMT Technologie ins Auge gefasst. Die selbstleitende Charakteristik dieser Transistoren macht Bias-Sequenzerschaltungen für die DC-Versorgung eines jeden Transistors erforderlich, da Gate- und Drain- Versorgungsspannungen nicht gleichzeitig angelegt werden dürfen. Die Bias-Versorgung leistet gleichzeitig einen Beitrag zum Zerstörungsschutz – zusammen mit einem Zirkulator, der am Verstärker-ausgang vorgesehen wurde. Als weiterer wichtiger Baustein am Verstärkerausgang wurde ein dualer Richtkoppler für die Waveform-Analyse des abgestrahlten und reflektierten Signals eingeplant. Damit lassen sich Genauigkeit und Auflösung des Radars verbessern. Das Blockschaltbild des gesamten Verstärkers ist in Abb. 1 gezeigt.

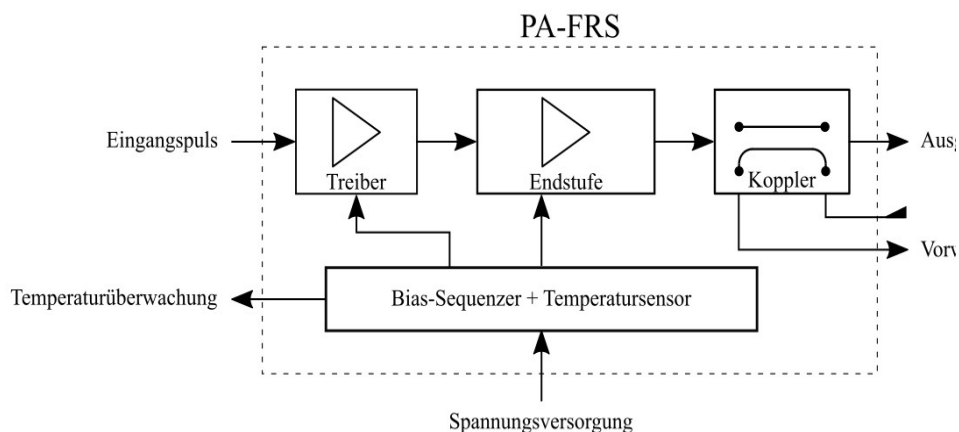


Abb. 1: Blockschaltung des Pulsverstärkers.

1.2.2 Verstärkerdesign

Endstufe

Hinsichtlich der erfolgreichen Umsetzung der genannten Zielspezifikationen ist die Endstufe das am stärksten limitierende Modul. Die Forderungen nach exzellenter Kurzpulstauglichkeit von 10 ns Pulsdauer, extrem steilen Flanken, verbunden mit der relativ hohen Ausgangsleistung von >100 W bei 1,35 GHz, stellen die zentralen Herausforderungen der Endstufenrealisierung dar. Als geeignetes Endstufenbauelement wurde der Gallium Nitrit High Electron Mobility Transistor (GaN-HEMT) CGHV14250F von Wolfspeed™ angesehen. Dieser Transistor liefert zwar laut Datenblatt die deutlich höhere Ausgangsleistung von 250 W, jedoch befindet er sich dann in der tiefen Sättigung oder mit anderen Worten – in diesem Betriebszustand ist der Transistor sicher nicht mehr in der Lage, den nur 10 ns breiten Eingangspuls nicht zu verbreitern bzw. die Pulsflanken zu degradieren. Aufgrund dieser Überlegungen wurde ein relativ großzügiges Derating hinsichtlich Transistorausgangsleistung in Kauf genommen, um von vornherein günstige Voraussetzungen für die Erzielung einer hohen Signalintegrität zu schaffen. Weitere Anfangsuntersuchungen ließen darauf schließen, dass das verfügbare CAE-Transistormodel bezüglich Kurzpulsanwendungen nur eine begrenzte Genauigkeit aufweist, was der Forderung nach ausgeprägtem Derating weiteren Nachdruck verlieh.

Im Einzelnen wurden im Verlauf des Endstufendesigns folgend Untersuchungen bzw. Arbeiten durchgeführt:

- Architektur Auswahl und Festlegung
- umfassende Untersuchungen zur Abhängigkeit der Pulsperformance von der Verstärkerklasse und vom Arbeitspunkt
- DC-, AC-, Harmonic Balance- und Transient-Simulationen der Endstufe unter idealisierten Umgebungsbedingungen
- Entwurf und technologische Auswahl weitgehend realer Umgebungsnetzwerke
- Schaltkreissimulation der realen Umgebungsnetzwerke
- vorläufiger Layout Entwurf
- Nachsimulation und Optimierung, 3D-EM Simulationen
- Finaler Layout Entwurf
- Analyse und Simulation des Temperaturverhaltens
- Leiterplatten und Bauelemente Selektion und -Bestellung

An dieser Stelle ist zu bemerken, dass der finale Verstärker nach Vorversuchen, einem ersten Designdurchgang und einem Re-Design finalisiert wurde. Das Endstufenlayout des ersten Designdurchgangs ist in Abb. 2 gezeigt.

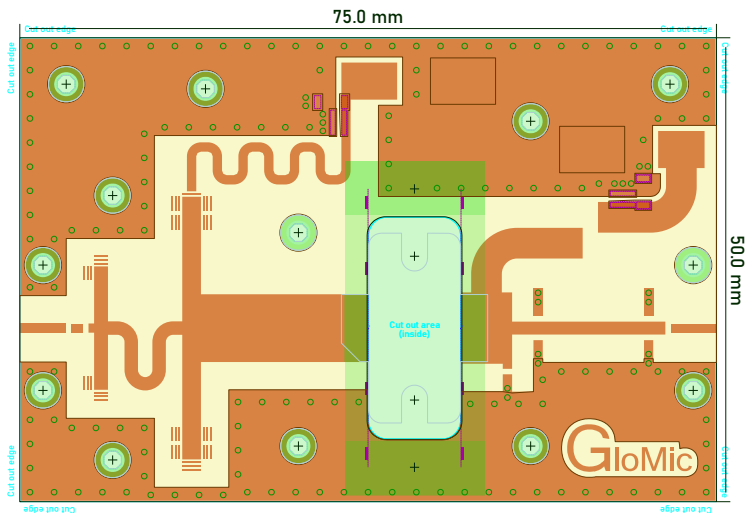


Abb. 2: Endstufenlayout des ersten Designdurchgangs

Treiberstufe

Für die Treiberstufe wurde der GaN-HEMT CGH40010F ausgewählt, der aus der gleichen Wolfspeed™ GaN-HEMT Technologie Linie stammt wie schon der Endstufentransistor. Dies macht ihn u.a. kompatibel zur festgelegten Versorgungsspannung von 48 V und erspart deshalb zusätzlichen Aufwand seitens der Stromversorgung. Wegen der geringeren Transistorkapazitäten erfordert das gesamte Treiberstufendesign weniger Aufwand als das Endstufendesign. Ansonsten entspricht der gesamte Entwurfsablauf demjenigen der Endstufe sinngemäß. Das Layout des ersten Treiberstufendesigns ist in Abb. 3 gezeigt.

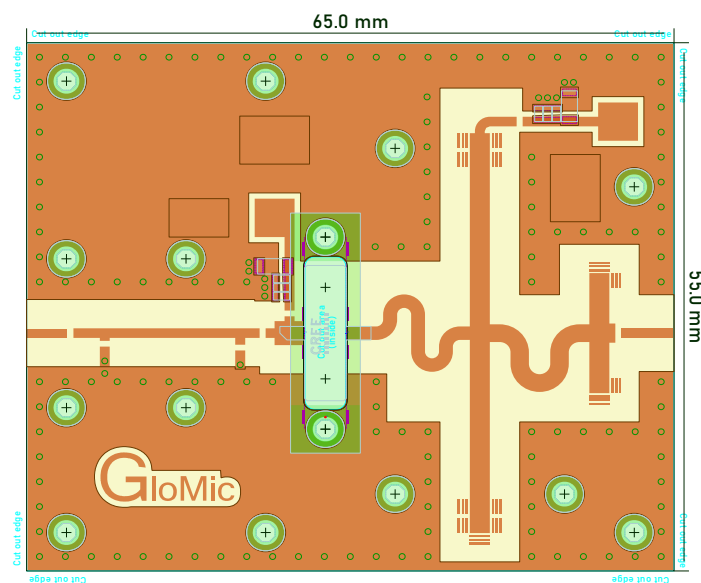


Abb. 3: Treiberstufenlayout des ersten Designdurchgangs

Umgebungsnetzwerke

Neben den aktiven Bauelementen selbst bestimmen insbesondere die Umgebungsnetzwerke der aktiven Bauelemente die erzielbare Performanz, die Einfachheit, Zuverlässigkeit und den Preis des Aufbaus und der Entwicklung und damit den späteren

Erfolg oder Misserfolg eines Produkts. Dem Design der Umgebungsnetzwerke muss deshalb besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Grundsätzlich wurde hier eine planare Aufbauweise in Mikrostriptechnologie gewählt, mit so wenig Zusatz-Bauelementen in Surface Mounted Device (SMD) Technologie wie möglich. Hinsichtlich der Verwendung von SMD-Bauelementen kann als vorteilhaft angesehen werden, dass sich bei moderaten Frequenzen, wie im hier vorliegenden Fall, die Layout Fläche gegenüber einem reinen Mikrostrip Design verkleinern lässt. Nachteilig daran ist, dass die parasitären Elemente und zu berücksichtigenden Toleranzen dadurch zunehmen. Dies erhöht den Analyse- und Simulationsaufwand. Auch auf die Zuverlässigkeit wirkt sich die Verwendung von SMD-Bauelementen eher nachteilig aus. Entwurf und Realisierung der Umgebungsnetzwerke erfordern deshalb bei jeder Entwicklung einen Kompromiss – hauptsächlich hinsichtlich Layout-Größe und Entwicklungsaufwand. Bei den Entwürfen im Rahmen von TRIPLE-FRS wird die Anzahl an verwendeten SMD-Bauelementen so geringgehalten wie noch verantwortbar. Die beiden Layouts für die Treiber- und die Endstufe (Abb. 2, Abb. 3) belegen die nur geringe Anzahl an verwendeten SMD-Bauelementen. Die Umgebungsnetzwerke wurden zunächst auf Schaltungsebene entworfen, simuliert und optimiert und später mit dem 3D EM-Simulator verifiziert und bei Bedarf nachjustiert. Beim Interstage-Netzwerk wurde eine sog. „Direktanpassung“ vorgenommen, was gegenüber einem Matching auf der realen Impedanzebene weitere Fläche erspart.

1.2.3 Verstärkerrealisierung

Abb. 4 zeigt die im Gehäuse eingebauten beiden Funktionsmuster des zweistufigen Pulsverstärkers (mit offenen Gehäusedeckeln) mit Bias-Sequencer und Dual-Ausgangskoppler. Das obere Bild zeigt das Funktionsmuster des ersten Designdurchgangs. Der im Verlauf des zweiten Designdurchgangs entwickelte Verstärker enthält zusätzlich einen Temperatursensor und einen Ausgangszirkulator (Aerotek). Für beide Versionen wurde als Substrat Rogers 4350B der Substratdicke 0,5 mm und Permittivitätszahl 3,5 verwendet. Die Leiterplattengröße beträgt 95 x 60 mm². Sämtliche Leiterplatten wurden im Rahmen des Projektes mittels Handlötung bestückt. Die Leiterplatten sind auf einer 12 mm dicken Kupferplatte montiert, die gleichzeitig als Wärmesenke und Wärmeverteilelement dient. Zwecks möglichst guter Wärmeabfuhr sind die Transistoren direkt auf der Kupferplatte befestigt – im Rahmen des Projektes mit Wärmeleitpaste und mittels Schraubverbindung montierten Klemmbügeln, um für die Laborversuche ein hohes Maß an Flexibilität zu gewährleisten (beispielsweise im Ggs. zu Lötverbindungen). Die beiden GaN-Transistoren von Treiber und Endstufe befinden sich in Abb. 4 unter den anthrazitgrauen Klemmbügeln. Links oben ist der Bias-Sequencer zu erkennen, der die Strom- und Spannungsversorgung für die Transistoren bereitstellt und darüber hinaus verschiedene Überwachungs- bzw. Schutzfunktionen übernimmt. Ganz rechts - dicht beim Ausgang – befindet sich der Dual-Richtkoppler, mit dem das transmittierte und reflektierte Signal am Ausgang gemessen werden kann. Der gesamte Verstärker benötigt Versorgungsspannung von 48 V DC. Der Verstärkerruhestrom (ohne angelegtes Eingangssignal) beträgt etwa 500 mA, d.h., die benötigte Leistung des Netzteils liegt bei ca. 25 W. Diese Leistung ist auch für Vollast ausreichend, da wegen des geringen Puls-/ Pausenverhältnisses und infolge des mit

zunehmender Eingangsleistung abnehmenden DC-Stromes der Endstufe (Übergang von AB nach B bzw. C-Betrieb) die benötigte DC-Leistung des Netzteils abnimmt. Allerdings muss die Versorgungsspannung wegen der hohen Pulsleistung von einigen 100 W mit Stützkondensatoren von ca. 2000 μF zusätzlich stabilisiert werden.

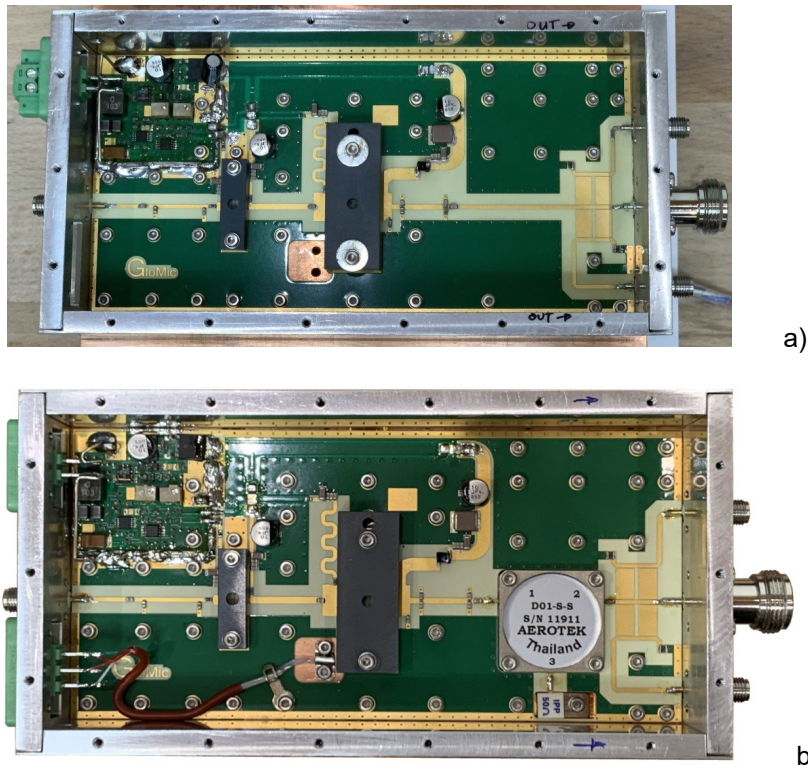


Abb. 4: Erstes (a) und zweites (Re-Design) (b) Funktionsmuster des Pulsverstärker im Gehäuse.

1.2.4 Messplatzaufbau

Abb. 5 zeigt die Blockschaltung des aufgebauten Messplatzes zur Verstärkercharakterisierung. Auf die Kleinsignalcharakterisierung wird hier nicht eingegangen, da sie allenfalls für Vorversuche im Projekt-Anfangsstadium von Interesse war. Generator, Source und Load Monitor werden vom angewendeten Messverfahren bestimmt. Für die CW-Großsignalcharakterisierung dient als Generator ein Mikrowellen-Synthesizer und als Source- und Load-Monitor jeweils ein Mikrowellen-Leistungsmesser. Die Erfassung der Ein- und Ausgangsgrößen vereinfacht die Kalibration und gestattet die Bestimmung der Verstärkung.

Für die Pulscharakterisierung wurde als Generator ein vom Projektpartner FAU entwickelter Pulsgenerator mit variabler Ausgangsleistung und einer Pulsbreite von etwa 10 ns zur Verfügung gestellt. Verfügbare Repetitionsfrequenzen waren 100 kHz und 1 MHz. Source- und Load-Monitoring erfolgte durch ein 4-kanaliges Sampling Oszilloskop.

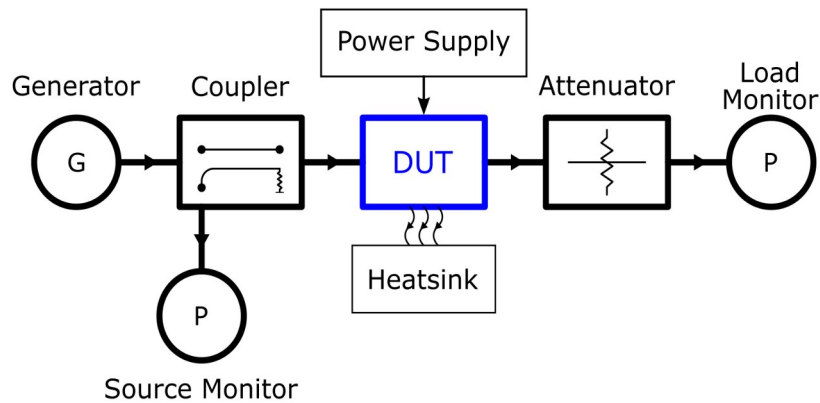


Abb. 5: Blockschaltung des aufgebauten Messplatzes zur Verstärkercharakterisierung.

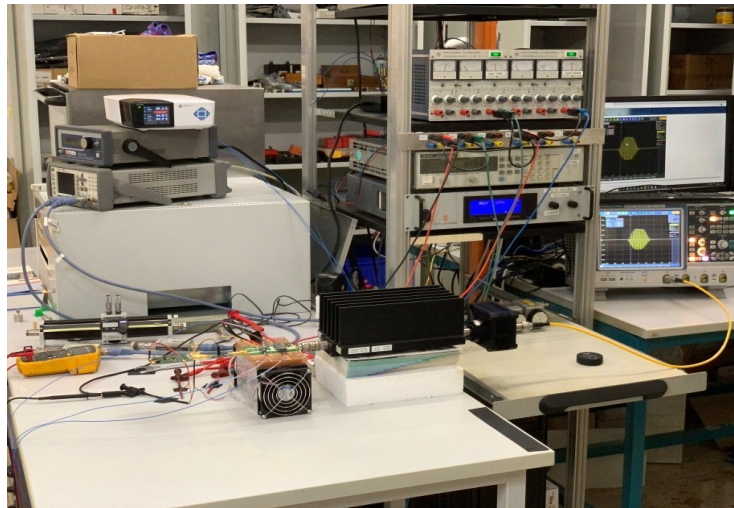


Abb. 6: Messplatz zur Verstärkercharakterisierung.

Das Foto in Abb. 6 zeigt den Messaufbau mit Generator, Device under Test (DUT), Heatsink und Ausgangsattenuator. Auf der grauen Box links befinden sich die Leistungs- und Temperaturmessgeräte, auf der Tischplatte rechts daneben das DUT mit Generator, Heatsink und Ausgangsdämpfungsglied, wieder rechts daneben im Rack die Stromversorgungsgeräte und rechts außen auf dem Tisch die Geräte zur Signalanalyse, u.a. das Samplingoszilloskop. Das DUT ist der zu messende Pulsverstärker, der von dem Power-Supply mit Strom versorgt wird. Der Verstärker ist auf der Heatsink, einem luftgekühlten Aluminium Kühlkörper montiert. Die Luftkühlung wird nur für die CW-Großsignalcharakterisierung benötigt. Der Attenuator muss in der Lage sein, die RF-Ausgangsleistung des DUT aufzunehmen und bei hohen Leistungen im CW-Betrieb ebenfalls gekühlt werden. Der Messplatz muss vor Messbeginn umfassend kalibriert werden, um alle nicht zum DUT gehörenden Einflüsse auf die Messung zu eliminieren. Der Messplatz

ist komplett digitalisiert. Kalibration, Fehlerkorrektur, Messung bis hin zur graphischen Darstellung der Ergebnisse laufen automatisiert ab.

1.2.5 Charakterisierung, Messergebnisse Großsignalverhalten im CW-Betrieb

Die nachfolgend zum Großsignalverhalten im CW-Betrieb gezeigten Messungen in Abb. 7 wurden in erster Linie aus Gründen der Modellverifikation durchgeführt. Im Hinblick auf die Pulseigenschaften des Verstärkers sind als zweitrangig einzustufen. Das linke Bild zeigt die Ausgangsleistung bei 1,35 GHz in Abhängigkeit von der Eingangsleistung. Die Sättigungsausgangsleistung liegt bei etwa 53 dBm bzw. 200 W. Simulation und Messung zeigen eine gute Übereinstimmung, abgesehen von der Verstärkung bei kleinen Pegeln. Dies lässt vorläufig auf einen von größeren Fehlern freien Entwurf und eine relativ hohe Designqualität schließen. Die zu kleineren Signalen hin zunehmende Abweichung zwischen Simulation und Messung konnte aus Zeitgründen nicht zufriedenstellend aufgeklärt werden. Im Hinblick auf das in diesem Projekt zu realisierende Pulsradar ist das Verstärkerverhalten bei kleinen Pegeln auch von eher untergeordneter Bedeutung. Die Messung wurde bei ca. 200 W Ausgangsleistung wegen zu hohen Transistortemperaturen nicht weiter fortgesetzt.

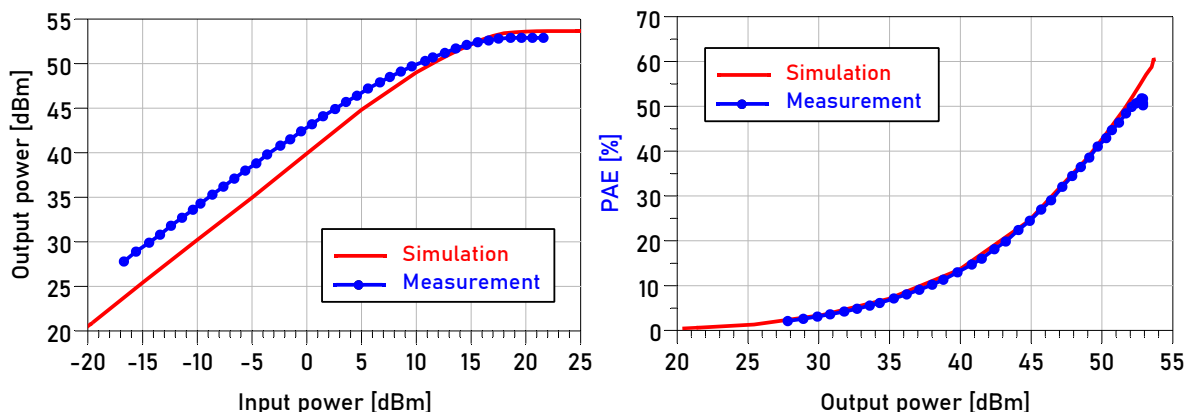


Abb. 7: Kompressionsverhalten (links) und PAE (rechts) des zweistufigen Verstärkers im CW-Betrieb; Vorstufe: $ID_q=110\text{ mA}$; $V_{DS}=48\text{ V}$; Endstufe: $ID_q=400\text{ mA}$; $V_{DS}=48\text{ V}$.

Das rechte Bild von Abb. 7 zeigt den Wirkungsgrad des zweistufigen Pulsverstärkers in Form der Power Added Efficiency (PAE). Auch hier ist bis zu einer Ausgangsleistung von etwa 52 dBm eine sehr gute Übereinstimmung von Simulation und Messung zu erkennen.

Pulsverhalten

Das linke Diagramm von Abb. 8 zeigt die an Funktionsmuster 1 gemessenen Spannungen am Verstärker Ein- und -Ausgang für **11 dBm Eingangsleistung**; das rechte Bild die Momentan-Ausgangsleistung. Dem linken Bild kann entnommen werden, dass der Verstärker bei einem Eingangspegel von 11 dBm eine hohe Signalintegrität aufweist, was aus den nahezu deckungsgleichen Kurven von Ein- und Ausgangsspannung geschlossen werden kann. (Bemerkung: Die Ordinatenskalierung gilt nur für die Ausgangsspannung). Folglich werden Anstiegs-, Abfallzeiten und die Pulsweite vom Verstärker kaum degradiert. Die gemessene Spitzenausgangsleistung ist deutlich höher als die simulierte und erreicht im

vorliegenden Fall mehr als 274 W. Dem Diagramm ist auch zu entnehmen, dass es zu Amplitudenasymmetrien bezüglich der virtuellen Spannungsnulllinie kommt.

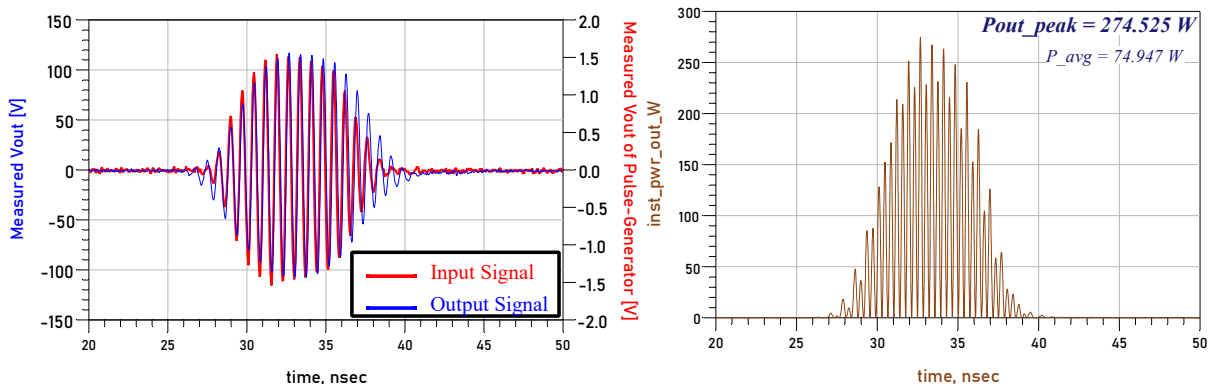


Abb. 8: Links: Gemessene Ein-/ Ausgangsspannungen des 2-stufigen Pulsverstärkers; $P_{in}=11$ dBm; Rechts: Gemessene Momentanleistung; Vorstufe: $IDq=110$ mA; $VDS=48$ V; Endstufe: $IDq=400$ mA; $VDS=48$ V.

Die Diagramme in Abb. 9 zeigen die entsprechenden Ergebnisse bei einer Generatorleistung von ca. 17 dBm.

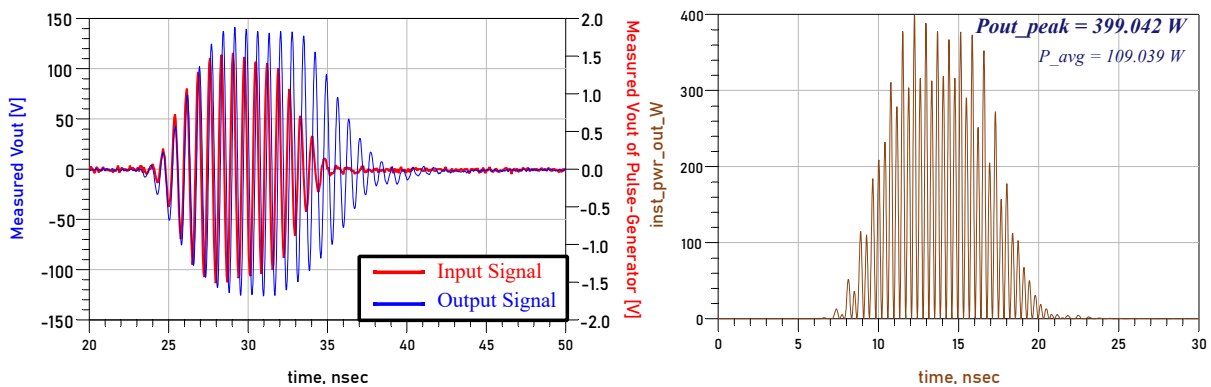


Abb. 9: Gemessene Ein-/ Ausgangsspannungen und Ausgangsleistung des 2-stufigen Pulsverstärkers für $P_{in}\approx 17$ dBm; restliche Angaben wie in Bild 8.

Bei **17 dBm Eingangsleistung** kommt es zu einer deutlichen Verbreiterung des Ausgangspulses. Dagegen ändern sich die Anstiegs- und Abfallzeiten kaum. Die gemessene Spitzenausgangsleistung ist wieder deutlich höher als die simulierte und erreicht im vorliegenden Fall nahezu 400 W. Die schon bei 11 dBm Eingangsleistung beobachteten Amplitudenasymmetrien bez. der virtuellen Spannungs-Nulllinie sind im vorliegenden Fall noch ausgeprägter.

Die Graphiken in Abb. 10 zeigen die Ausgangsleistung (links) und die Verstärkung (rechts) in Abhängigkeit von der Eingangsleistung für die beiden Pulswiederhol frequenzen 100 kHz und 1 MHz. Hieraus ist praktisch keine Abhängigkeit von der Pulswiederhol frequenz erkennbar. Dem linken Diagramm ist eine nur sehr moderat einsetzende Gainsättigung ab etwa 8 dBm Eingangsleistung entnehmbar, mit einer Beschleunigung des Abfalls jenseits dieses Wertes. Ab Ausgangspegeln von etwa 54 dBm wird der Verstärker tief in die Kompression getrieben, was die Signalqualität schnell und deutlich verschlechtert, vgl. Abb. 9. Andererseits korrespondiert die Ausgangsleistung von 54 dBm mit einer Eingangsleistung von etwa 11 dBm (vgl. linkes Bild), für die in Abb. 7 eine noch recht gute Signalqualität nachgewiesen

wurde. Bei Erhöhung der Eingangsleistung auf 17 dBm verschlechtern sich Amplitudensymmetrie und Pulsweite deutlich. Es ist letztlich eine Frage der Systemauslegung, welcher der beiden Fälle für die Systemperformance von Vorteil ist: Eine moderate Ausgangsleistung mit hoher Signalqualität oder eine höhere Ausgangsleistung mit schlechteren Signaleigenschaften.

Zusammenfassend lässt sich damit festhalten, dass der Verstärker bis zu einer Eingangsleistung von 11 dBm (bzw. Ausgangsleistung von ca. 54 dBm oder 274 W) eine hohe Signalqualität am Ausgang zur Verfügung stellen kann, obwohl er sich bereits schwach in der Sättigung befindet.

Alles in allem übertrifft die am ersten Funktionsmuster gemessene Verstärkerperformanz die vom Konsortium vor Designbeginn festgelegten Zielvorgaben in jeder Hinsicht. Der Verstärker erreicht eine gegenüber den Zielvorgaben deutlich erhöhte Ausgangsleistung bei exzellenter Signalintegrität. Die angestrebte Systemperformance sollte damit in jedem Fall erreichbar sein.

Die Abbildungen 10 zeigen die Ausgangsleistung und die Verstärkung für die beiden Pulswiederholffrequenzen 100 kHz und 1 MHz. Die Graphen bestätigen die weitgehende Unabhängigkeit dieser beiden Größen von der Pulswiederholffrequenz.

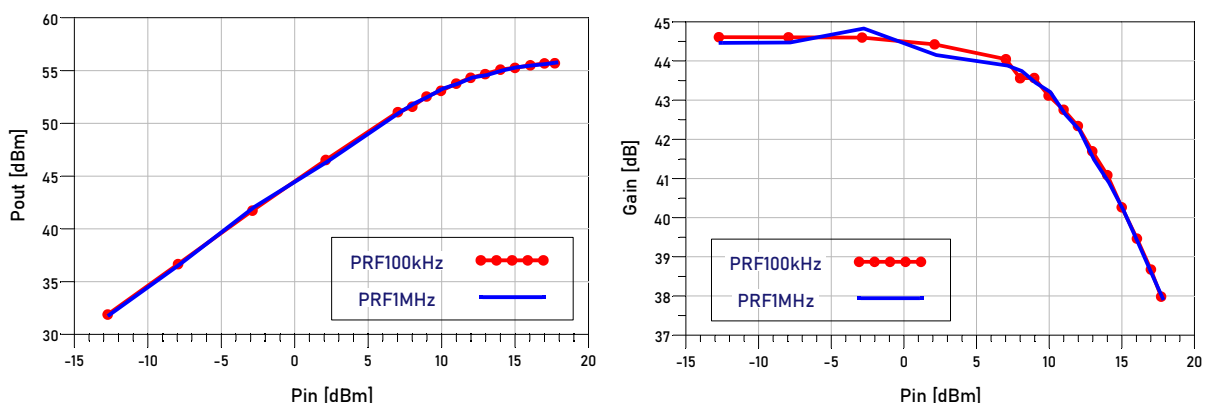


Abb. 10: Gemessene Ausgangsleistung (links) und Verstärkung (rechts) als Funktion der Eingangsleistung Pin für die Pulswiederholffrequenzen 100 kHz und 1 MHz.

Die mit steigendem Eingangssignalpegel sich verschlechternde Signalintegrität artikuliert sich primär in der Verbreiterung der Pulse und in einer zunehmenden Amplitudenasymmetrie. Dagegen bleiben die Puls- Anstiegs- und Abfallzeiten weitgehend unverändert. Alle genannten Größen wurden quantitativ als Funktion der Signaleingangsleistung messtechnisch erfasst und sind nachfolgend dargestellt.

Das linke Bild von Abb. 11 zeigt die in der Diskussion zu den Abb. 8, 9 bereits angesprochene Asymmetrie der Amplitude bezüglich der virtuellen Spannungs-Nulllinie. Dem Graphen kann eine mit größer werdender Eingangsleistung zunehmende Asymmetrie entnommen werden, mit einem Maximalwert von etwa 15 V, was etwa 10 % entspricht. Die Pulswiederholffrequenz hat praktisch keinen Einfluss auf das Verhalten.

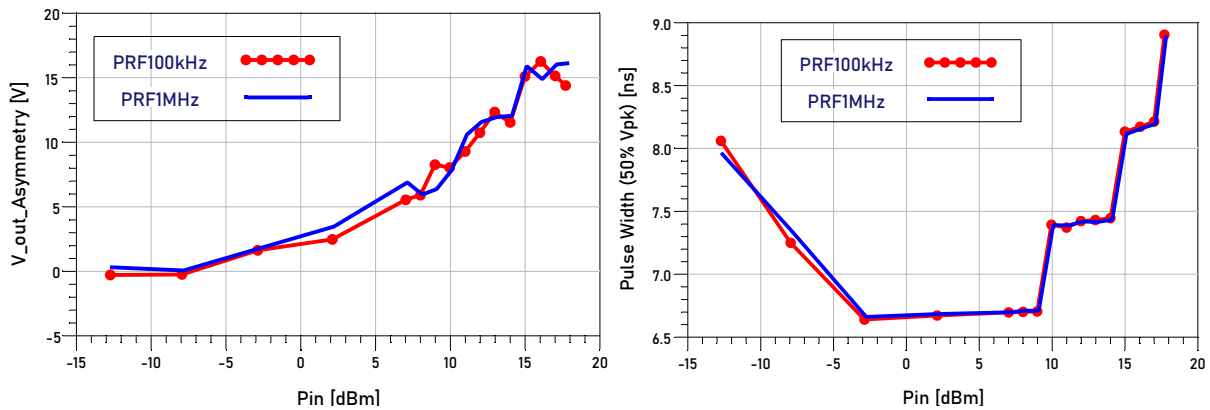


Abb. 11: Links: Gemessene Amplitudenasymmetrie als Funktion der Eingangsleistung Pin für die Pulswiederhol frequenzen 100 kHz und 1 MHz.
Rechts: Pulsverbreiterung bei 50 % Amplitude als Funktion der Eingangsleistung Pin.

Das rechte Bild in Abb. 11 zeigt die Abhängigkeit der Pulsweite von der Eingangsleistung bei 50 % des Amplitudenwertes. Die in Abb. 9, links, bereits gezeigte Pulsverbreiterung bei 17 dBm Eingangsleistung wird hierdurch bestätigt. Wie schon im linken Bild ist die Pulswiederhol frequenz praktisch ohne Einfluss.

Die Pulsanstiegszeiten (Abb. 12, links) und -Abfallzeiten (Abb. 12, rechts) zeigen eine geringe, leicht abfallende Tendenz von der Eingangsleistung. Bei der Beurteilung der Graphiken ist zu beachten, dass die Ordinatenauflösung 100 ps beträgt!

Die Abbildungen 13 zeigen für die Pulswiederhol frequenz 100 kHz einen Vergleich von Simulation und Messung für die Puls-Ausgangsleistung (links) und die Verstärkung (rechts). Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass sich die entsprechenden Ergebnisse für die Pulswiederhol frequenz 1 MHz von denen bei 100 kHz praktisch nicht unterscheiden.

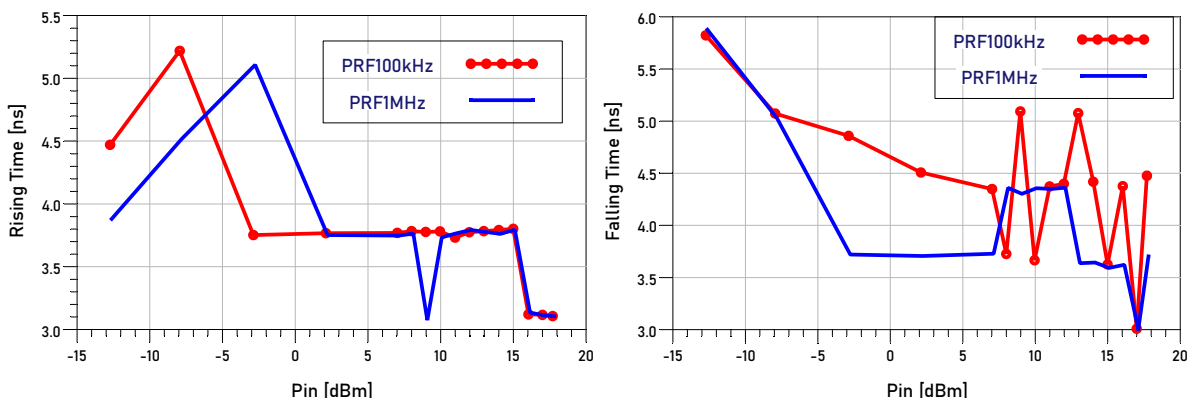


Abb. 12: Links: Gemessene Pulsanstiegszeit (10-90 %) als Funktion der Eingangsleistung Pin für die Pulswiederhol frequenzen 100 kHz und 1 MHz.
Rechts: Pulsabfallzeit (90-10 %) als Funktion der Eingangsleistung Pin.

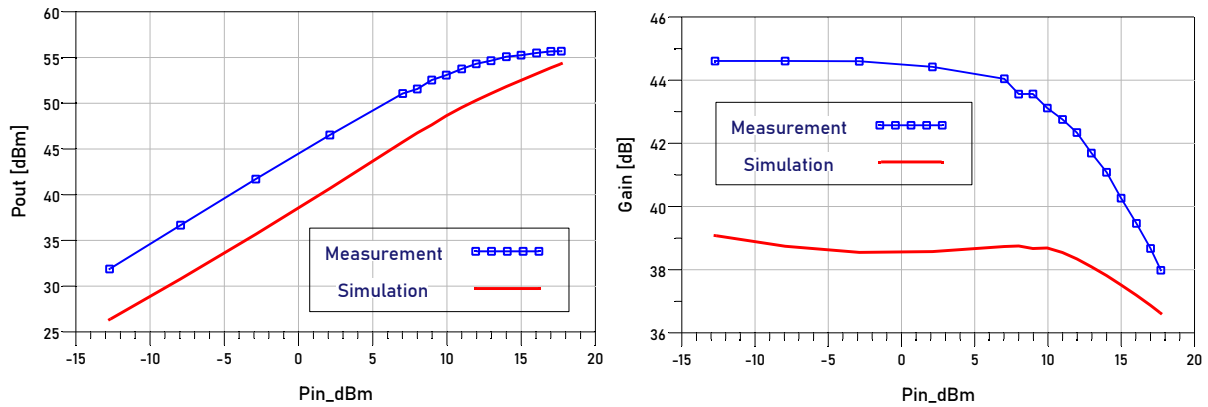


Abb. 13: Vergleich Simulation – Messung als Funktion der Eingangsleistung im Pulsbetrieb bei 100 kHz Pulswiederholfrequenz. Links: Ausgangsleistung; Rechts: Verstärkung.

Besonders hervorstechend bei dem Vergleich ist die um ca. 6 dB und damit deutlich höhere Verstärkung (im linearen Bereich des Verstärkers) bei der Messung gegenüber der Simulation. Der Ursache dafür konnte bisher nicht abschließend nachgegangen werden, wird aber in einem nicht hinreichender Kurzpulstauglichkeit des Modells gesehen. Die Tatsache, dass die Messergebnisse „besser“ als die Simulation sind, ist jedoch in jeder Hinsicht erfreulich und im Hinblick auf den Einsatz im Radarsystem vorteilhaft.

Die markante Veränderung des vom Verstärkernetzteil gezogenen DC-Stromes als Funktion der HF-Pulsleistung zeigt Abb. 14. Der dem Verstärker zugeführte Gleichstrom nimmt ab etwa 45 dBm Pulsleistung von knapp 450 mA kontinuierlich bis auf etwa 100 mA ab (bei knapp 57 dBm bzw. ≈ 500 W Pulsleistung). Bei 48 V Versorgungsspannung entsprechen die beiden Stromwerte zugeführten DC-Leistungen von etwa 22 W und 5 W. Die Abbildung ist auch ein gutes Beispiel und klarer Hinweis auf die Zunahme des Verstärkerwirkungsgrades mit steigender Ausgangsleistung. Der Vollständigkeit halber ist zu erwähnen, dass der Netzteilausgang durch einen 2000 μ F Kondensator gepuffert wird. Der Kondensator hat die Aufgabe, während der ca. 10 ns langen und damit sehr kurzen, aktiven Pulsphase (Entladephase des Kondensators), den hohen Verstärkerstrom zu liefern und die Versorgungsspannung möglichst konstant zu halten. Während der vergleichsweise langen Pulspause wird der Kondensator durch einen entsprechend kleinen Strom aus dem Netzteil wieder aufgeladen.

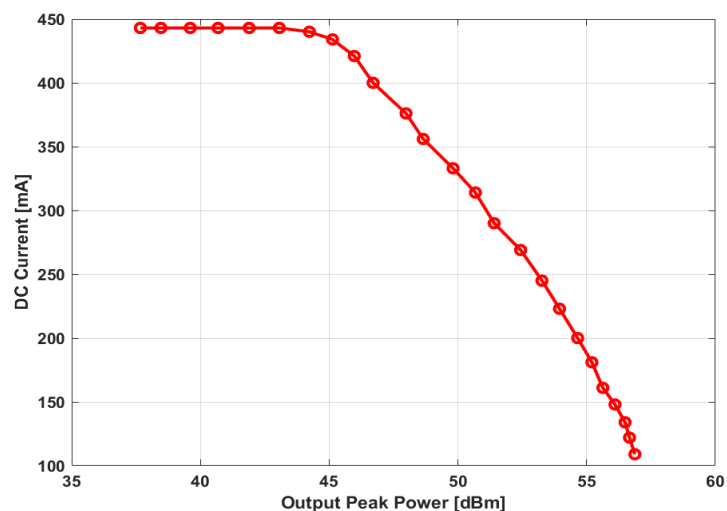


Abb. 14: DC-Stromaufnahme als Funktion der HF-Ausgangsleistung; $U_{DC}=48$ V.

1.2.6 Zusammenfassung, Bewertung der Ergebnisse, Vergleich mit den vorgegebenen Zielen

Die GloMic GmbH war im Rahmen des Verbundprojektes TRIPLE-FRS, Teilprojekt Pulsverstärker, für die Entwicklung eines Pulsverstärkers mit einer Mittenfrequenz von 1,35 GHz verantwortlich. Um den Anforderungen des Radars gerecht zu werden, sollte der Verstärker die in Abschnitt 1.2.1, Verstärkerkonzept und Zielspezifikationen, Tabelle 1, zusammengestellten Zielvorgaben erfüllen.

Als besondere Herausforderung dieser Entwicklung muss die hohe Ausgangsleistung in Verbindung mit der extrem kleinen Pulsbreite und den ultrasteilen Flanken angesehen werden. Als Nebenbedingung sollte sich die Pulsform bzw. Signalqualität am Verstärkerausgang gegenüber dem eingespeisten Signal nur minimal verschlechtern (Forderung nach hoher Signalintegrität). Aus Erfahrungen auf dem Gebiet der Verstärkerentwicklung ist bekannt, dass sich eine derartige Forderung nur bei entsprechendem Derating, insbesondere des Endstufenbauelementes, erreichen lässt.

Als Endstufenbauelement wurde deshalb der Gallium Nitrit High Electron Mobility Transistor (GaN-HEMT) CGHV14250F von Wolfspeed™ mit einer spezifizierten Ausgangs-Sättigungsleistung von 250 W und damit hinreichend Leistungsreserve gewählt. Seitens des Herstellers gib es jedoch keinerlei Angaben zum Pulsverhalten des Transistors. Gleichmaßen unsicher war die Tauglichkeit des verfügbaren CAE-Transistormodells für Kurzpulsanwendungen. Mangels Verfügbarkeit zuverlässigerer Werkzeuge wurde auf dieser Basis der Verstärkerentwurf durchgeführt. Neben dem Schaltungsentwurf waren die wesentlichen Schritte Gehäuseentwurf, Assembling, Charakterisierung, Ergebnisauswertung und Interpretation. Als Architektur wurde ein zweistufiges Design gewählt. Im Verlauf von Design und Re-Design Phase wurden zwei Verstärkerexemplare realisiert. Trotz der genannten Modellunsicherheiten zeigte das erste Funktionsmuster exzellente Hochfrequenzeigenschaften, die sich im Zuge des Re-Designs nur noch unwesentlich verbessern ließen. Dennoch wurden im Verlauf des Re-Design Durchgangs einige Änderungen vorgenommen, die sich jedoch auf Erweiterungen des Funktionsumfangs und auf einige Verbesserungen/Vereinfachungen in der Aufbautechnologie bezogen – weniger auf Änderungen hinsichtlich der Hochfrequenzeigenschaften. So wurde beispielsweise der Bias-Sequencer umfassend überarbeitet und bietet zusammen mit einem vor dem Verstärkerausgang integrierten Zirkulator beim zweiten Funktionsmuster einen deutlich verbesserten Schutz gegenüber Zerstörung – beispielsweise infolge überhöhter Temperatur oder Reflexionen am Ausgang. Der Ausgangskoppler wurde in seiner Richtschärfe verbessert, was die Monitoring-Sensitivität und damit die Genauigkeit und Auflösung des gesamten Radarsystems erhöht.

Die beiden Verstärker zeigen erwartungsgemäß eine nahezu identische Hochfrequenzperformance, was auf eine hohe Zuverlässigkeit hinsichtlich Design- und Aufbautechnik schließen lässt. Die schon am ersten Funktionsmuster beobachteten Diskrepanzen zwischen Simulationen und Messungen wurden in ähnlicher Form auch beim zweiten Funktionsmuster

beobachtet. Die bisherigen Hinweise auf ein nicht hinreichend pulstaugliches Model erhärten sich dadurch.

Besonders bemerkenswert ist, dass die Messergebnisse besser ausfallen als die Simulationen, was in der Praxis als eher ungewöhnlich anzusehen ist. Aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht dennoch zu bemängeln ist die Diskrepanz zwischen Simulationen und Messungen, die Stand heute auf die bereits erwähnten Schwächen des CAE-Modells zurückgeführt wird, insbesondere im Hinblick auf dessen unzureichende Pulstauglichkeit.

In Tab. 2 sind die Messergebnisse zusammengefasst.

Tab. 2: Messergebnisse Pulsverstärker.

Center frequency	1.35 GHz
Input pulse power $P_{in} = 11$ dBm:	
Output power	274 W
Gain	43 dB
Output voltage asymmetry	≈ 8 V
Pulse broadening	0,5 ns
Pulse rise time (10% to 90% P_{max})	no degradation
Pulse fall time (90% to 10% P_{max})	no degradation
Input pulse power $P_{in} = 17$ dBm:	
Output power	399 W
Gain	≈ 39 dB
Output voltage asymmetry	≈ 17 V
Pulse broadening	2,5 ns
Pulse rise time (10% to 90% P_{max})	no degradation
Pulse fall time (90% to 10% P_{max})	no degradation

Ein quantitativer Vergleich von Simulations- und Messergebnissen (Tab. 1 und Tab. 2) belegt die ausgezeichnete Signalintegrität des entwickelten Pulsverstärkers bis in den Leistungsbereich von etwa 274 W Pulsleistung. Bis zu dieser Leistungsgrenze ist die Verstärkung >43 dB und es kommt nur zu einer minimalen Pulsverbreiterung von ca. 0,5 ns. Auch die Asymmetrie zwischen positiven und negativen Amplitudenspitzen fällt mit ca. 8 V sehr gering aus. Die Pulsanstiegs- und Abfallzeiten zeigen mit zunehmender Eingangsleistung keine Degradation, was im Übereinklang mit der Theorie ist.

Ab etwa 11 dBm kommt es mit weiter steigender Eingangsleistung zu einer deutlichen Degradation der Verstärkerparameter. Bei 17 dBm Eingangspegel steigt die Ausgangspulsleistung bis auf knapp 400 W an. Dabei zeigt der Ausgang eine deutliche Kompression von ca. 4 dB, was sich in einem Verstärkungsabfall auf ca. 39 dB äußert. Gleichzeitig steigen die Amplitudenasymmetrie und Pulsverbreiterung auf ca. 17 V bzw. 2,5 ns an. Wie schon bei 11 dBm Eingangsleistung, zeigen die Anstiegs- und Abfallzeiten auch mit zunehmenden Eingangspegeln keine Verschlechterung, was im Rahmen der Erwartungen liegt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die in der Antragstellung formulierten Ziele nicht nur in jeder Hinsicht erreicht, sondern klar übertroffen wurden. Die beiden aufgebauten Funktionsmuster sind bis knapp 300 W Pulsleistung mit sehr geringer Signaldegradation einsetzbar. Integriert in das Radarsystem des TRIPLE-FRS Demonstrators sollte dieses eine exzellente Performance zeigen.

1.2.7 Literatur

- [1] <https://www.wolfspeed.com/cghv14250/>
- [2] <https://www.wolfspeed.com/cgh40010/>

2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

2.1	0813, Material	€6.072,41
2.2	0837, Personalmittel (30 FTE)	€327.648,11
2.3	0838, Reisen	€515,52
2.4	0829, sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	€10.396,04
2.5	Selbstkosten	€344.632,08

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Rahmen des Verbundprojektes TRIPLE-FRS, Teilprojekt Pulsverstärker, wurde ein Pulsverstärker mit einer Pulsleistung von >100 W und einer Pulsdauer im 10 ns Bereich entwickelt. Derartige Verstärker sind derzeit am Weltmarkt nicht verfügbar. Dies liegt in erster Linie an den außerordentlich hohen Anforderungen infolge der formulierten Zielspezifikationen. Bei den im Verlauf des Projektes durchgeführten Entwicklungen mussten daher einige Herausforderungen überwunden und technisch/ wissenschaftliches Neuland betreten werden, um die Projektziele zu erreichen. Die Entwicklungen bewegten sich im Grenzbereich des heute technisch machbaren. Insbesondere für ein kleines mittelständisches Unternehmen wie die GloMic GmbH waren damit erhebliche technisch/ wirtschaftliche Risiken verbunden. Zum einen konnte nicht sichergestellt werden, dass die Zielspezifikationen in jedem Fall erreicht werden. Zum zweiten war nicht sicher, in wieweit die Aufwandsabschätzung realistisch war und der formulierte Zeitplan eingehalten werden kann. Zum dritten war fragwürdig, inwieweit die existierenden CAE-Modelle für die erst seit kurzer Zeit am Markt verfügbaren und hier eingesetzten GaN-Leistungstransistoren das Kurzpulsverhalten des Verstärkers mit hinreichender Genauigkeit wiedergeben können. Aufgrund der Erfahrungen mit ansatzweise vergleichbaren, früher durchgeführten Projekten waren hier Zweifel angebracht. Eine derart komplexe Entwicklung ist nur unter Bündelung der unterschiedlichsten Knowhow Bereiche aller beteiligten Partner möglich.

Aufgrund des genannten, hohen Risikopotentials, wäre die Entwicklung ohne öffentliche Finanzierung für ein kleines KMU wie die GloMic GmbH nicht tragbar, aber auch nicht sinnvoll gewesen. Der Beitrag der öffentlichen Finanzierung zur geleisteten Arbeit war deshalb notwendig und zweckmäßig. Nachdem im Verlauf des Projektes nicht nur alle ursprünglich formulierten Ziele erreicht, sondern übertroffen wurden, hat sich das Projekt für beide Seiten gelohnt - Finanzierung und geleistete Arbeit standen in einem sehr angemessenen Verhältnis zueinander. Seitens der GloMic GmbH lieferte das Projekt einen wesentlichen Innovationsbeitrag zu dem globalen F&E-Bereich der Realisierung von Kurzpulsverstärkern hoher Leistung mit Teilbeiträgen auf folgenden Gebieten:

Modellierung,
Schaltungsentwurf,
Signaloptimierung und Monitoring,
Charakterisierung.

4. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse

Kurzpulsverstärker mit einer Pulsleistung von >100 W und einer Pulsdauer im 10 ns Bereich sind bis heute am Markt nicht verfügbar. Durch das Projekt TRIPLE-FRS, Teilprojekt Pulsverstärker, konnte die GloMic GmbH erhebliches Knowhow auf diesem Gebiet aufbauen. Auf Basis dieser breiten Fachkompetenz verspricht sich die GloMic – nach entsprechender Weiterentwicklung - große Marktchancen. Solche Produkte können mit ausgeprägten Alleinstellungsmerkmalen aufwarten. Mit Blick auf das gesamte GloMic-Portfolio sollte das zu einer erheblichen Belebung des Umsatzes und zu einer Vergrößerung des Kundenkreises beitragen. Die Ergebnisse sind nicht auf das Projekt beschränkt, sondern nach entsprechender Weiterentwicklung zu Produkten innerhalb des Marktumfeldes „Hochfrequenz-Pulsverstärker“ auf breiter Ebene verwertbar. Beispiele dafür sind:

- **Radarsysteme**

Durch die extreme Kurzpulstauglichkeit sollten auf dem Radarbereich Produkte mit herausragenden Alleinstellungsmerkmalen realisierbar werden.

- **Terrestrische- und Satellitenkommunikationssysteme**

Der mit dem Projekt erworbene wissenschaftlich/ technologische Fortschritt ermöglicht es der GloMic GmbH, ihre Position im Wettbewerb nachhaltig zu verbessern und abzusichern, infolge einer erheblichen Beschleunigung und Qualitätssteigerung innerhalb des Produktentwicklungsprozesses.

- **Industrie 4.0, IoT, Sensor-Netzwerke**

Hier werden Verstärker mit sehr kleinem Duty Cycle besonders häufig eingesetzt. Die im Vorhaben gesammelten Erfahrungen sind auch sehr wertvoll für diese Produktart.

- **Nahrungsmittelverarbeitung, industrielle Prozesse**

Es ist derzeit zu beobachten, dass immer mehr Leistungsröhren durch GaN basierte Hochleistungs- Verstärker, -Sender und -Generatoren, z.B. Haushaltsmikrowelle, ersetzt werden. Durch das im Rahmen des Projektes erworbene Knowhow hat die GloMic GmbH exzellente Chancen daran teilzuhaben.

- **Halbleiterfertigungsanlagen**

In dem sehr schnell wachsenden Markt für Halbleiterfertigungsanlagen und Plasmaprozesse ist eine zunehmende Diversifizierung zu beobachten. Diese Tendenz eröffnet gerade auch kleineren Unternehmen die Möglichkeit, zunehmend an diesem Markt teilzuhaben.

Als weitere Säule der Verwertung beabsichtigt die GloMic GmbH, das erworbene Knowhow für neue F&E-Projekte mit universitären und industriellen Partnern einzusetzen. Diesbezüglich wurde zusammen mit dem TRIPLE-FRS Konsortium das Anschlussprojekt TRIPLE-FRS-2 bei der DLR beantragt. Das Projekt wurde mittlerweile genehmigt und am 1.7.2023 gestartet. Es dient der lückenlosen Fortführung der in TRIPLE-FRS durchgeführten

Arbeiten und gestattet auf hervorragende Weise die Weiterentwicklung und Vertiefung des bisher erworbenen Knowhows.

Der Marktzugang für die Pulsverstärker-Produkte soll durch

- direkte Kundenkontakt in Form von Telefonaten und Rundschreiben
- Internet Werbung und Verkauf
- Präsenz auf internationalen Messen und Ausstellungen
- Vorträge/ Veröffentlichungen auf wissenschaftlichen Konferenzen/ in Zeitschriften

erreicht werden. Denkbar ist auch die Vermarktung einzelner Module in Form von Zulieferverträgen oder durch Lizenzierung.

5. Während des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens

Keine.

6. Veröffentlichungen

6.1 Patente

Keine.

6.2 Publikationsliste

[1] IPPW 2021

J. Audehm, F. Becker, B. Burgmann, P. Friend, N. Haberberger, D. Heinen, C. T. Nghe and M. Stelzig. TRIPLE-FRS – A Forefield Reconnaissance System for Melting Probes to Explore Icy Worlds, IPPW 2021.

[2] EGU 2021

Stelzig, M., Audehm, J., Burgman, B., Becker, F., Deriks, L., Espe, C., Feldmann, M., Francke, G., Friend, P., Haberberger, N., Heinen, D., Nghe, C. T., Schickendanz, L., Zierke, S., Wiebusch, C., Helbing, K., Böck, G., and Vossiek, M.: Melting and forefield reconnaissance technologies within TRIPLE - accessing subglacial water reservoirs for future missions to Ocean Worlds, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-15333, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-15333>.

[3] DGG 2021

Boxberg, Marc & Audehm, Jan & Becker, Fabian & Boledi, Leonardo & Burgmann, Ben & Chen, Qian & Friend, Pia & Haberberger, Niklas & Heinen, Dirk & Nghe, Chi & Simson, Anna & Stelzig, Michael & Kowalski, Julia. (2021). TRIPLE – Ice Data Hub, Model-based Mission Support and Forefield Reconnaissance System. 10.23689/fidgeo-3968.

[4] Oceans 2021

D. Heinen *et al.*, "The TRIPLE Melting Probe - an Electro-Thermal Drill with a Forefield Reconnaissance System to Access Subglacial Lakes and Oceans," *OCEANS 2021: San Diego – Porto*, San Diego, CA, USA, 2021, pp. 1-7, doi: 10.23919/OCEANS44145.2021.9705999.

[5] **EGU 2023**

Becker, F., Stelzig, M., Audehm, J., Haberberger, N., Heinen, D., Zierke, S., Helbing, K., Wiebusch, C., Vossiek, M., and Böck, G.: Hybrid concept for a forefield reconnaissance system for melting probes capable of moving through terrestrial and extraterrestrial cryospheres, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-14989, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-14989>.