Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Projektpartner:
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
(PTB) – Braunschweig

Fördermaßnahme: Enabling Technologies
für die Quantentechnologien

Projektlaufzeit: 01.11.2021 - 30.04.2025

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt: qBriqs - Bausteine kryogener Quantentechnologie
Teilvorhaben: Breitbandige supraleitende Verstärker (FKZ: 13N15949)

Teil I: Kurzbericht

Ursprüngliche Aufgabenstellung und wissenschaftlich-technischer Anknüpfungspunkt

Im Rahmen des Teilvorhabens breitbandige supraleitende Verstärker war es Aufgabe der PTB einen supraleitenden parametrischen Wanderwellenverstärker (engl. „traveling-wave parameteric amplifier“, TWPA) zu entwickeln. Das Hauptziel bestand darin, ein erprobtes Funktionsmuster mit vollständig charakterisierten Rausch- und Dynamikeigenschaften für den finalen Demonstrator im Verbund bereitzustellen. Als Minimalanforderung waren mehr als 15 dB Verstärkung über mehr als 4 GHz Bandbreite, zentriert um 6 GHz definiert; im Vordergrund des Projekts standen extrem rauscharme Verstärkung und große Bandbreite.

Im Teilvorhaben sollten neuartige TWPAs auf Basis einer Serienschaltung von rf-SQUIDs untersucht werden, die durch eine abstimmbare quadratische Nichtlinearität die Nutzung der vorteilhaften Drei-Wellen-Mischung ermöglichen. Insbesondere sollten verschiedene Konzepte zur Phasenanpassung zwischen Signal- und Pumpwelle und zur Unterdrückung unerwünschter höherfrequenter Mischprodukten evaluiert und unter praktischen Bedingungen getestet werden. Ziel war es somit die wissenschaftliche-ingenieurstechnischen Grundlagen für die zukünftige Entwicklung kommerzieller supraleitender Verstärker zu erarbeiten.

Grundlegende Konzepte für rf-SQUID-basierte TWPAs und Ansätze zur Phasenanpassung waren an der PTB bereits vor Projektbeginn theoretisch entwickelt. Im EMPIR-Projekt „ParaWave“ (17FUN10, 2018–2021) wurde das Prinzip der Drei-Wellen-Mischung experimentell in einfachen Schaltungen demonstriert und die Basis für spätere numerische Simulationen gelegt; Softwareskripte für parallelisiertes Rechnen wurden entwickelt. Erste Ansätze zur maßgeschneiderten Dispersion und optimalen Phasenanpassung wurden betrachtet, um Verstärkung über große Bandbreiten zu erzielen.

Ablauf des Vorhabens

Ausgehend von den genannten Vorarbeiten wurde mittels zeitaufgelöster numerischer Simulationen das Phasenanpassungskonzept detailliert evaluiert. Für den 3-Wellen-Mischungsbetrieb (3WM) galt es insbesondere, unerwünschte Frequenzmischungsprozesse zu vermeiden, da diese die Verstärkung limitieren und Rauschen erhöhen können. Im Rahmen dieser ersten Projektphase wurde ein Phasenanpassungskonzept basierende auf einer multiperiodischen Variation der Kapazität der nichtlinearen Wellenleitung zu Masse entwickelt, das unerwünschte Prozesse unterdrückt und gleichzeitig sicherstellt, dass Verstärkung stattfinden kann. Diese Ergebnisse wurden publiziert in: V. Gaydamachenko & C. Kissling et al., *J. Appl. Phys*. 132, 154401 (2022).

Für die Herstellung im PTB-Reinraum war zunächst die Weiterentwicklung des bis dahin bestehenden Fertigungsprozesses notwendig. Erste Tests zeigten eine signifikante Streuung der im Chip realisierten Kapazitäten um die geplanten Werte, wodurch die Phasenanpassung nicht umgesetzt werden konnte. Dies wurde auf die Verwendung eines chemisch-mechanischen Polierschrittes (CMP) zurückgeführt. Das Auslassen dieses Prozessschrittes erforderte im Anschluss eine Anpassung weiterer Ätzprozesse (RIE- u. ICP-Plasmaätzprozesse), die mehrmonatige Versuchsreihen nach sich zogen. Parallel zu dieser Prozessentwicklung wurde das verfolgte Schaltkreiskonzept simulativ auf seine Robustheit gegenüber typischen Schwankungsbreiten von nanostrukturierten supraleitenden Schaltkreisen untersucht und diese demonstriert. Diese Ergebnisse wurden veröffentlicht in: C. Kissling et al., *IEEE Transact. Appl. Supercond*. 33, 1700106 (2023).

Mit erfolgreichem Abschluss der Entwicklung des neuen Herstellungsprozesses wurden mehrere Iterationen von Schaltkreisprototypen hergestellt und bei 4 Kelvin und 20 Milli-Kelvin untersucht. Hierzu wurden die entsprechenden experimentellen Aufbauten weiterentwickelt, u.a. durch die Verwendung von elektromechanischen Schaltern für kalibrierte Messungen an einer kryogenen Referenzebene und eine kontrollierte Rauschquelle für die Bestimmung des Verstärkerrauschens. Abschließend konnte in einem iterativen Prozess aus Design, Herstellung, Charakterisierung und Simulation ein TWPA entwickelt werden, der die Projektziele vollumfänglich erfüllte. Dieser Prototyp zeigte eine mittlere Verstärkung von 20 dB zwischen 3,5 und 8,5 GHz bei einer mittleren Sättigungsleistung von -84 dBm und einem gemessenen Gesamtrauschen von 1,8 bis 2,5 Photonen. Die Ergebnisse dieser finalen Projektphase wurden abschließend publiziert in: V. Gaydamachenko & C. Kissling, L. Grünhaupt, *Phys. Rev. Appl. 23*, 064053 (2025).

Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Das wesentliche Ergebnis des Teilvorhabens ist die Realisierung des oben beschriebenen TWPAs basierend auf supraleitenden rf-SQUIDs. Insbesondere zeichnet sich das erfolgreich realisierte Konzept durch eine hohe Sättigungsleistung von typ. -84 dBm aus, die etwa 10 – 20-fach höher liegt als bei vergleichbaren Verstärkern. Damit ist das wesentliche Projektergebnis ein supraleitender parametrischer Verstärker, der dem aktuellen Stand der internationalen Forschung entspricht. Solche Verstärker sind u.a. ein wesentlicher Bestandteil Supraleiter-basierter Quantencomputer.

Im Projektverlauf wurde insb. mit dem Projektpartner KIT zusammengearbeitet, der einen der TWPA-Prototypen der PTB im qBriqs-Demonstrator integrierte. Diese Integration wurde und wird auch über das Projektende hinaus begleitet.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Projektpartner:
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
(PTB) – Braunschweig

Fördermaßnahme: Enabling Technologies
für die Quantentechnologien

Projektlaufzeit: 01.11.2021 - 30.04.2025

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt: qBriqs - Bausteine kryogener Quantentechnologie

Teilvorhaben: Breitbandige supraleitende Verstärker (FKZ: 13N15949)

Teil II: Eingehende Darstellung

Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten

Zu Beginn des Projektes konzentrierten sich die Arbeiten zunächst auf AP2.3a (Schaltungssimulationen) und AP1 (Spezifikation der TWPA-Parameter und Schnittstellen). Ziel war die Auslegung von sog. Josephson-Traveling-Wave-Parametric-Amplifiers (JTWPAs), die im 3-Wellen-Mischungs-Modus (3-WM) betrieben werden (3WM-JTWPAs).

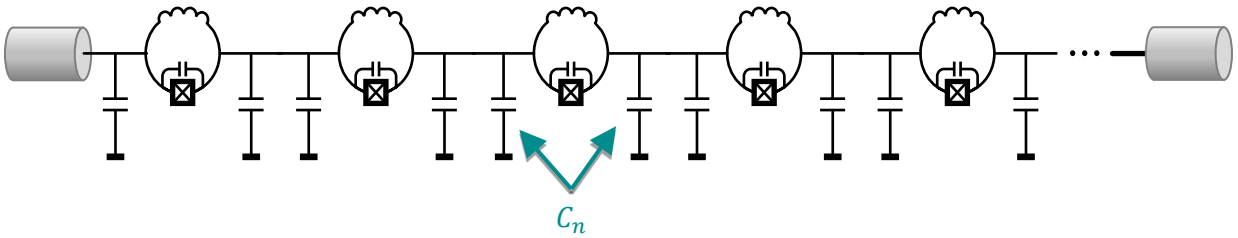

Abbildung 1: Skizziertes Ersatzschaltbild des PTB-Ansatzes für einen 3WM-JTWPA. Die nichtlineare Wellenleitung wird durch rf-SQUIDS realisiert. Zur Impedanz- und Phasenanpassung werden die Kapazitäten zu Masse C_n moduliert.

Zur Realisierung dieses Ansatzes müssen in einer Schaltung grundsätzlich die folgenden beiden Randbedingungen erfüllt werden:

1) Energieerhaltung, ausgedrückt durch die Gleichung $f_p = f_s + f_i$ wobei die Indizes *p, s, i* für *pump, signal, idler* stehen. Diese Randbedingung wird i.d.R. automatisch erfüllt, in dem ein sog. *Idler* mit Frequenz $f_i = f_p - f_s$ entsteht.
2) Phasenanpassung, ausgedrückt durch die Gleichung $k_p = k_s + k_i$ mit Wellenzahl k für *pump*, *signal*, und *idler*. Im hier verfolgten Ansatz, in dem die Nichtlinearität durch rf-SQUIDs realisiert wird und der Arbeitspunkt so eingestellt wird, dass die Nichtlinearität dritter Ordnung (Kerr-Typ) unterdrückt wird, ist auch diese Randbedingung für niedrige

GHz-Frequenzen durch die lineare Dispersionsrelation des 3-WM-JTWPA automatisch erfüllt.

Ein Resultat der 2. Randbedingung ist jedoch, dass auch unerwünschte Frequenzmischungsprozesse auftreten. Dies bedeutet, dass u.a. Summenfrequenzen wie $f_{p+s} = f_p + f_s$ entstehen. Dieser Prozess konvertiert Leistung des Signals zu höheren Frequenzen und vermindert somit das effektive Signal-Rausch-Verhältnis (SNR). Zur Lösung dieser Problematik wird die Kapazität zur Massefläche der nichtlinearen Leitung (vgl. Abb. 1) zwischen drei Werten [vgl. Abb. 2(a)] variiert, sodass eine Dispersionrelation entsteht, die keine Phasenanpassung für unerwünschte Mischprozesse ermöglicht und sie somit unterdrückt, während Phasenanpassung für den Verstärkungsprozess sichergestellt wird.

Zur Auslegung wurde zunächst auf die Transfer-Matrix-Methodik (auch ABCD-Matrix genannt) zurückgegriffen und entsprechende Software entwickelt, um verschiede Parameterkombinationen der nichtlinearen Wellenleitung auf ihre Impedanzanpassung und Dispersionsrelation zu testen. Auf diese Art identifizierte Parameterkombinationen wurden anschließend in umfangreichen WRSpice-Simulationen hinsichtlich des Potentials für Signalverstärkung überprüft (AP2.3a).

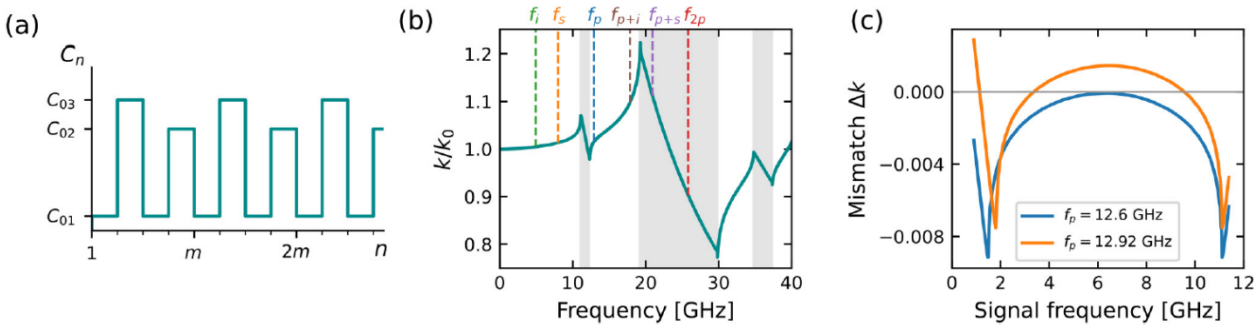

Abbildung 2: Periodische Modulierung der Kapazität zu Masse (vgl. C_n Abb. 1) zwischen drei Werten (a) und resultierende normalisierte Dispersionsrelation für verschiedene Frequenzen. Die Variation erzeugt mehrere Stoppbänder, die Phasenanpassung für den Prozess $k_p = k_i + k_s$ sicherstellen, aber Phasenanpassung unerwünschter Mischprozesse zerstören. (b) Phasenfehlanpassung für Frequenzen im geplanten Signalband. Bei Wahl der entsprechenden Pumpfrequenz kann die Fehlanpassung minimiert werden, was effiziente Verstärkung erlaubt [Abbildung aus: V. Gaydamachenko & C. Kissling et al., J. Appl. Phys. 132, 154401 (2022)].

Aus diesen Arbeiten resultierte ein erster Satz von zehn Parameterkombinationen mit exponentieller Signalverstärkung und starker Unterdrückung höherfrequenter Mischprodukte. Ergebnisse dieser Phase wurden peer-reviewed publiziert [V. Gaydamachenko & C. Kissling et al., *J. Appl. Phys. 132*, 154401 (2022)].

Auf Basis der AP2.3a-Entwürfe wurden Layouts erstellt und erste Funktionsmuster hergestellt (AP2.3b). Kryogene Charakterisierungen bei 4 K (AP2.3c) zeigten, dass die wesentlichen Spektralfeatures qualitativ durch das TMM-Modell reproduziert werden konnten; jedoch wurde ein Versatz der Stoppbandlage beobachtet (erstes Stoppband deutlich niedriger als geplant). REM- und AFM-Untersuchungen sowie zusätzliche kryogene Tests an eigenes hergestellten

Teststrukturen identifizierten eine reduzierte Isolationsschichtdicke der Massekapazitäten als Ursache, zurückzuführen auf das chemisch-mechanische Polieren des Dielektrikums (CMP-Prozessschritt). Zur Behebung dieser Problematik wurden mehrere Prozessschritte angepasst: u.a. Eliminierung des CMP, Anpassung des Plasmaätzens (isotroper Ätzvorgang) und Layout-/E-Beam-Parameteränderungen zur Kompensation des isotroperen Ätzprozesses (vgl. Abb. 3). Die Behebung dieser Fertigungsprobleme und die anschließenden Layoutanpassungen erforderten in Summe etwa 4-5 Monate Entwicklungszeit.

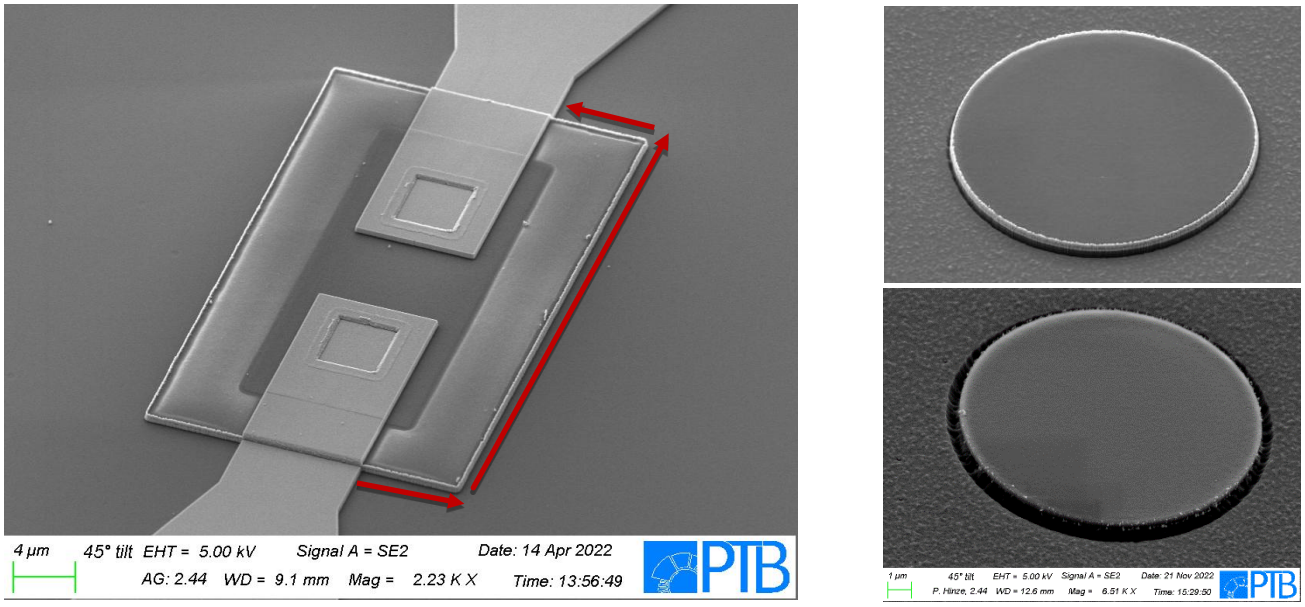

Abbildung 3: Kurzschlusspfad durch Eliminierung des CMP-Schritts. Ein neu entwickelter, isotroper Plasmaätzprozesses verhindert die Entstehung der kurzschließenden Ablagerung (vgl. oberes rechtes Bild vs. unteres rechtes Bild ohne hell leuchtenden Rand um die Teststruktur). Die höhere Isotropie des Ätzprozesses muss durch eine Anpassung des Layouts und der Elektronenstrahllithografie kompensiert werden.

Parallel zu AP2.3b/AP2.3c wurden umfangreiche Monte-Carlo-artige WRSpice-Simulationen durchgeführt, in denen die insgesamt ~1500–2000 Josephson-Kontakte, 1500–2000 Induktivitäten und 3000–4000 Kapazitäten mit parametrisierten Normalverteilungen beprobt wurden. Als Evaluationskriterium diente das Erreichen von 20 dB Verstärkung; die Auswertung zeigte, dass das in AP2.3a ausgewählte Phasenanpassungskonzept mittels periodischer Kapazitätsvariation robust gegenüber typischen Fertigungsstreuungen ist und im Gegensatz zur resonanten Phasenanpassung kein einzelnes kritisches Bauelement (dort: Resonatoren) aufweist. Diese Robustheitsanalyse wurde zunächst auf einer internationalen Konferenz (Applied Superconductivity Conference (ASC), Honolulu (Hawaii, USA) 2022) vorgestellt und im entsprechenden Konferenzband nach Begutachtung publiziert (C. Kissling et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 33, 1700106 (2023)).

Nach Prozessoptimierung und Layoutverbesserungen wurden zwei weitere Wafer gefertigt (AP2.3b) und im Rahmen von AP2.3c kryogene Messungen durchgeführt. Zur Verbesserung der experimentellen Daten und zur Erhöhung der Datenverlässlichkeit wurden im Messaufbau gezielt Maßnahmen implementiert und erprobt: mindestens 40 dB Dämpfung auf der Eingangsleitung bei 4 K sowie sog. Infrarot-Filter (in Abstimmung mit dem Verbundpartner KIT),

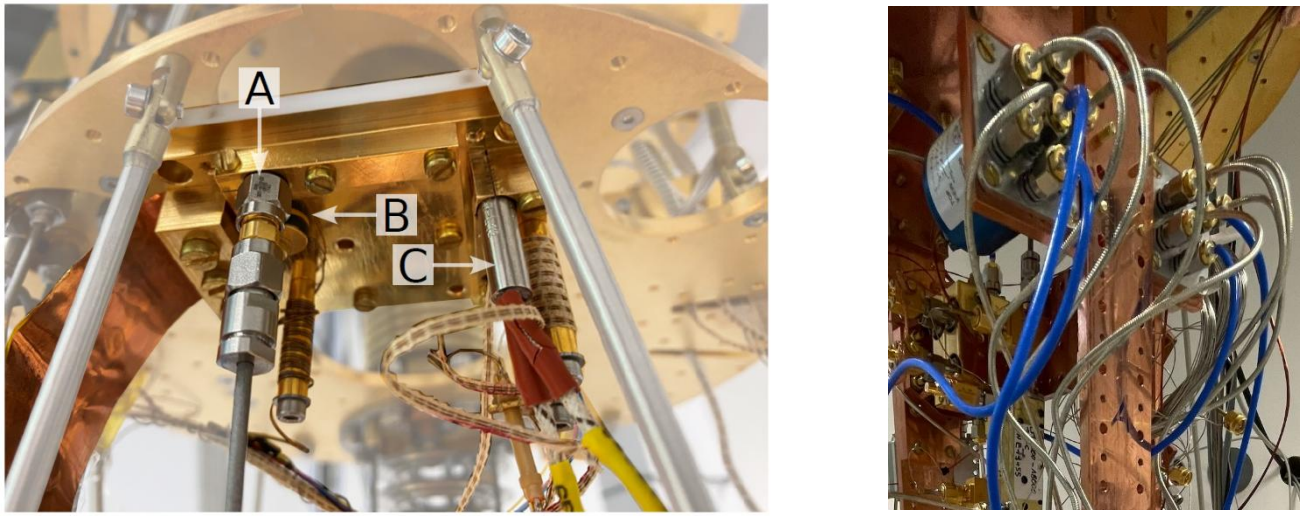

Abbildung 4: Rauschquelle zur Bestimmung des Verstärkerrauschens montiert im Kryostaten (linkes Bild). Die Rauschquelle besteht aus einem 50 Ω Abschluss (A), einem Heizelement (B) und einem Temperatursensor (C). Rechtes Bild: Elektromechanische Schalter zur kalibrierten Messung von S-Parametern montiert im Kryostaten. Durch die verwendeten sechsfach-Schalter können bis zu fünf TWPAs pro Messkampagne im Kryostaten charakterisiert werden.

um Photonen mit Energie oberhalb der doppelten supraleitenden Energielücke von Niob zu unterdrücken, die Cooper-Paare spalten und zu erhöhten Verlusten führen. Diese Maßnahmen verringerten gemessene Verluste deutlich (z. B. von ≈−15 dB auf ≈2–3 dB bei 5 GHz) und ermöglichten die verlässliche Charakterisierung der Verstärkereigenschaften.

Im Jahr 2023 erfolgten im Rahmen von AP2.3c und AP3.3a detaillierte Messungen an Chips des zweiten Parametersatzes. Der experimentelle Messaufbau wurde um eine variable Rauschquelle erweitert, wodurch das hinzugefügte Rauschen quantitativ bestimmbar wurde (s. Abb. 4, linkes Bild). Das erfolgversprechendste Design zeigte eine Leistungsverstärkung von etwa 18 dB im Bereich 3–6 GHz und erfüllte damit den Halbzeitmeilenstein (AP2.3c: Verstärkung >10 dB, Bandbreite >2 GHz). Das hinzugefügte Rauschen lag bei ca. 2–3 Photonen über dem Standardquantenlimit; die Sättigungsleistung wurde mit (−86,5 ± 4) dBm bestimmt. Aus den Messergebnissen wurden Optimierungen abgeleitet und in die Auslegung eines dritten Parametersatzes (AP3.3a) überführt; hierzu wurden zusätzliche Schaltungs- und FEM-Simulationen durchgeführt sowie ein in-situ kalibrierter S-Parameter-Messplatz aufgebaut (s. Abb. 4, rechtes Bild). Mehrmonatige Ausfälle kritischer Anlagen im Reinraum erforderten dabei die Entwicklung von alternativen Prozessrouten (AP2.3b). Die Nichtverfügbarkeit einer Argon-Ionen-Ätzanlage führte u.a. dazu, dass der Prozess zur Strukturierung der Al-Lage des Nb-

Trilayers auf ein chemisches Nassätzverfahren umgestellt werden musste. Hierdurch und durch weitere Engpässe an anderen Anlagen im Reinraum verlangsamte sich die Herstellung neuer Schaltungen im zweiten Projektjahr.

Gegen Ende des Projekts, ab 2024, lag der Schwerpunkt v.a. auf Prozessstabilisierung (AP2.3b) und der Reduktion der Streuung der kritischen Ströme der Josephson-Kontakte. Nach der standardmäßigen Implementierung von Teststrukturen für die Josephson-Kontakte wurde eine Streuung von >40 % der kritischen Ströme um den geplanten Wert gefunden. Als mögliche Ursache wurde die Dicke der Aluminiumschicht im Niob-Trilayer identifiziert, u.a. durch Diskussionen bei nationalen und internationalen Konferenzen. Zu Beginn des Projekts war eine Dicke von 10 nm gewählt worden, konsistent mit dem bestehenden Herstellungsprozess. In mehreren A/B-Testrunden wurde eine Dicke von 18 nm erprobt, die schließlich zu einer Streuung von nur etwa 5 % der kritischen Ströme führte. Basierend auf diesem verbesserten Herstellungsprozess wurden mehrere Fertigungszyklen von zwei weiteren Parametersätzen abgeschlossen. Ausgewählte Chips wurden bei 4 K und 20 mK umfassend charakterisiert (AP2.3c, AP3.3b), wobei auf die im Projektverlauf erarbeitete Expertise und Hardware zurückgegriffen werden konnte. Die Messreihen umfassten dabei jeweils Bandbreitenbestimmung, Verstärkungsprofil, hinzugefügtes Rauschen und Bestimmung der Sättigungsleistung, den sog. 1-dB Kompressionspunkt. Parallel wurden Messaufbau und Automatisierungssoftware weiter verfeinert (AP2.3c), was die Auslastung des Kryostaten deutlich erhöhte und so die effektive Zeit z. B. für Rauschbestimmungen signifikant verkürzte. Im September 2024 konnten schließlich drei potenzielle Chips für den finalen Demonstrator identifiziert werden und die Eigenschaften mit dem Verbundpartner KIT diskutiert werden; der ausgewählte Prototyp wurde im Oktober 2024 an das KIT übergeben (AP3.3b, AP4) und die Integration in den Demonstrator begleitet. Die Nachlieferungen eines weiteren Verstärkers erfolgten, nachdem der ursprünglich gelieferte Prototyp einen Defekt erlitt.

Im Juni 2025 wurden die kumulierten Projektergebnisse schließlich in einem Fachartikel veröffentlicht [V. Gaydamachenko & C. Kissling, L. Grünhaupt, *Phys. Rev. Appl. 23*, 064053 (2025)], nachdem der entsprechende Preprint [abrufbar unter: www.arxiv.org/abs/2503.02489] bereits im März 2025 erschienen war und beim APS Global Physics Summit, der weltweit wichtigsten Konferenz des Fachgebiets, einer breiten Fachöffentlichkeit präsentiert worden war.

Im entsprechenden Artikel konnte basierend auf einer ausführlichen Charakterisierung der gefertigten Schaltungen folgendes gezeigt werden:

- die Wirksamkeit des in AP2.3a entwickelten Phasenanpassungskonzepts zur Unterdrückung unerwünschter Frequenzmischungsprozesse in 3-WM JTWPAs bei gleichzeitiger Sicherstellung der Verstärkung mittels periodischer Kapazitätsvariation und dessen Robustheit gegenüber Fertigungsstreuungen (AP3.3a);

- Leistungsverstärkung von 20 dB zwischen 3,5 und 8,5 GHz (AP2.3c, AP3.3b);
- hinzugefügtes Rauschen von 0.8 – 1.5 Photonen über dem Quantengrenzwert
- um einen Faktor 10 – 20 verbesserte Sättigungsleistung von –84 dBm gegenüber vergleichbaren JTWPA-Konzepten (AP2.3c, AP3.3b).

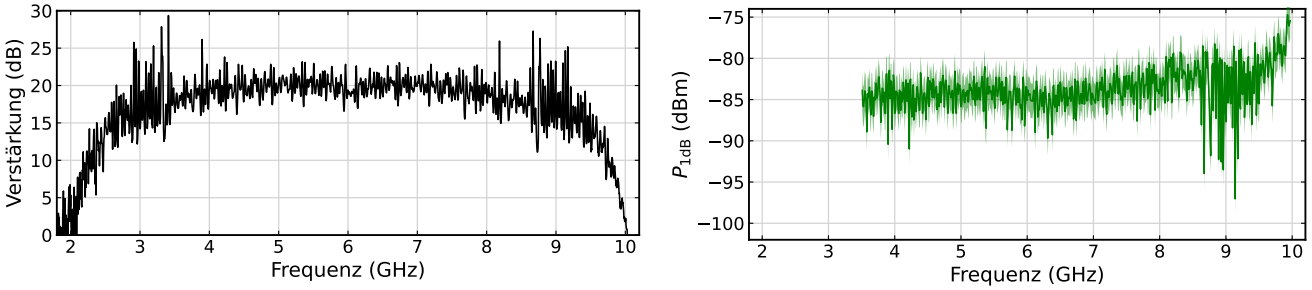

Abbildung 5: Die durchschnittliche Verstärkung eines typischen TWPA-Prototyps liegt bei 20 dB für Frequenzen zwischen 4 und 8 GHz (linkes Schaubild), während die typische, durchschnittliche Sättigungsleistung P_{1dB} bei -85 dBm liegt (rechtes Schaubild).

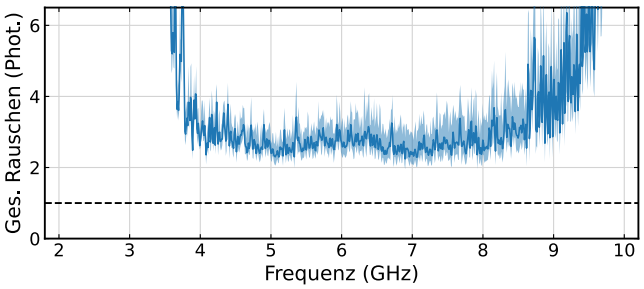

Abbildung 6: Bei Verwendung des PTB-TWPA-Prototyps kann ein Gesamtrauschen von 2 – 3 Photonen für eine typische Verstärkerkette in supraleitenden Quantencomputern erreicht werden. Die Differenz zum Standardquantenlimit (gestrichelte schwarze Linie) wird gegenwärtig auf Verluste im TWPA zurückgeführt.

Abweichungen vom ursprünglichen Arbeitsplan traten primär in AP2.3b auf (Fertigungsprobleme, Prozessumstellungen, Anlagen-Ausfälle), wodurch Verzögerungen in den Fertigungszyklen entstanden. Diese Verzögerungen wurden durch gezielte Prozessanpassungen und zusätzliche Iterationen in AP2.3b und AP3.3a teilweise kompensiert; die technisch-inhaltlichen Ziele des Projekts blieben in den iterativen Zyklen von Simulation, Fertigung, Charakterisierung und Optimierung dauerhaft im Fokus. Insgesamt wurden die Arbeitspakete AP1, AP2.3a, AP2.3b, AP2.3c, AP3.3a, AP3.3b und AP4 gemäß dem geplanten Lösungsweg bearbeitet, wobei Simulationen (AP2.3a), Fertigung/Prozessentwicklung (AP2.3b), kryogene Charakterisierung (AP2.3c) und systemnahe Integrationstests (AP4) in aufeinanderfolgenden Iterationen ineinandergriffen und final zur Erfüllung des technischen Endziels im Projekt führten.

Beschreibung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wesentlichen Ausgaben des Teilvorhabens verteilen sich auf drei Hauptrubriken. Den größten Anteil stellen die Personalmittel (Pos. 0812) mit rund 191 k€, die die Finanzierung einer Promotionsstelle abdecken; dieser Doktorand hat die zentralen experimentellen und analytischen Arbeiten des Projekts durchgeführt und trug maßgeblich zu Design, Fabrikation, Messung und Auswertung bei.

Unter Pos. 0843 (Verbrauchsmaterial und weitere Sachausgaben, etwa 2 k€) sind spezifische Verbrauchs- und Kleinteile zusammengefasst, namentlich Halbzeug für Probenaufnehmer, konfektionierte HF-Kabel, Chipträger (PCBs) sowie HF-Konnektoren für die PCBs, die für Aufbau und Vermessung der Prototypen erforderlich waren.

Dienstreisen (Pos. 0846, etwa 4 k€) umfassen inländische und internationale Reisen zu Projekttreffen sowie die Teilnahme am APS March Meeting 2024 (siehe Reisebericht) zur Präsentation von Zwischenergebnissen und zum fachlichen Austausch mit Kooperationspartnern.

Begründung zur Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten waren in Umfang und Tiefe notwendig und in ihrer Ausgestaltung angemessen, um die Zielvorgaben (breitbandige, rauscharme 3WM-TWPAs, Demonstratorintegration) zu erreichen. Insbesondere waren umfangreiche Entwicklungsarbeiten für neue Fertigungsprozesse im Reinraum erforderlich, da erstmals mehrlagige Niob-Dünnschicht-Layouts mit genau kontrollierten Isolationsschichtstärken und niedrigen HF-Verlusten realisiert werden mussten; die initial identifizierten Abweichungen (z. B. durch CMP-Einfluss) machten Prozessneuentwicklungen und -validierungen unabdingbar, um reproduzierbare Schaltungseigenschaften zu gewährleisten. Auf dieser Grundlage waren gezielte Prozessoptimierungen im Reinraum technisch notwendig, da sie die Streuung von Schaltungsparametern (z. B. der kritischen Ströme) deutlich reduzierten und damit die Ausbeute funktionsfähiger Chips erhöhten.

Parallel dazu war die Weiterentwicklung der experimentellen Aufbauten inklusive der Entwicklung von Mess- und Auswertungsskripten notwendig, um präzise, reproduzierbare und zeiteffiziente Messungen bei 4 K und mK-Temperaturen zu ermöglichen (z. B. kalibrierte Rauschquellen, automatisierte S-Parameter-Messungen, Protokolle zur Rauschbestimmung).

Schließlich waren Auswertung, peer-reviewte Publikation und Präsentation der Ergebnisse im Rahmen der Projektarbeiten notwendig: Sie dokumentieren den Erkenntnisfortschritt, sichern Transparenz gegenüber Fördergeber und Fachgemeinschaft und erhöhen die Verwertungs- und Transferchancen der entwickelten TWPA-Konzepte. Insgesamt wurden die verwendeten Projektmittel damit zielgerichtet zur Erreichung der geplanten Projektziele eingesetzt.

Voraussichtlicher Nutzen, insb. Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die erzielten Projektergebnisse bilden eine solide technisch-wissenschaftliche Basis für weiterführende Entwicklungs- und Verwertungsaktivitäten im Rahmen eines fortgeschriebenen Verwertungsplans. Kurz- und mittelfristig dienen die Prototypen und die dokumentierten Fertigungs- und Messprozesse als Ausgangspunkt für das Projekt HIQWa (Fördermaßnahme Enabling Technologies für resiliente F&E-Lieferketten in den Quantentechnologien) mit Infineon Technologies AG und Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG, in dem TWPAs hinsichtlich erhöhter Integrationsdichte und neuer Funktionalitäten weiterentwickelt werden sollen; Ziel ist die Vorentwicklung technologischer Grundlagen für hochinnovative Produktangebote der Industriepartner in der Quantenindustrie.

Ebenfalls mittelfristig flankieren die Arbeiten der PTB den Aufbau von Dienstleistungsangeboten zur Unterstützung des deutschen Quantenökosystems (Metrologie, Verifizierungs- und Qualifizierungsservices für kryogene HF-Bauteile), wodurch Teile der Projektresultate unmittelbar in anwendungsorientierte Services überführt werden sollen. Parallel dazu ergeben sich Synergien mit laufenden europäischen Forschungsinitiativen, die eine Anbindung an internationale Spitzenforschung ermöglichen und die Zusammenarbeit mit EU-weiten Konsortien erleichtern. Auf europäischer Ebene wurde die Normung für TWPAs vorangetrieben in dem unter Leitung der PTB ein sog. „new work item proposal“ zur Erstellung einer Europäischen Norm mit dem Titel: „Quantentechnologien — Parameter und Prüfverfahren für Quantentechnologien — Wanderwellenverstärker (TWPA)“ eingebracht und angenommen wurde. Im Rahmen der WG2 des JTC22 von CEN/CENELEC erfolgte dann unter Koordinierung der PTB die Erstellung des Entwurfs der entsprechenden europäischen Norm, der kürzlich eingebracht wurde.

Die Frage der Kommerzialisierung wurde mit der Technologietransferstelle und dem Quantentechnologiezentrum der PTB geprüft: Zwar besteht grundsätzlich Patentierbarkeit für ausgewählte technische Neuerungen, nach interner Abwägung erscheint jedoch ein pragmatischer Verwertungsweg über industrienahe Dienstleistungsangebote, Lizenzierung von Know-how und gezielten Technologietransfer als nachhaltigster und schnell realisierbarer Pfad. Ein konzentrierter Fokus auf Kooperationen mit etablierten Industriepartnern sowie auf den Aufbau von Dienstleistungs- und Transferleistungen bietet nach Einschätzung aller Beteiligten die größten Erfolgsaussichten zur kurz- und mittelfristigen Marktnutzung der Projektergebnisse.

Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Während des Projektverlaufs wurden mehrere für das Feld relevante Fortschritte andere Institutionen bekannt: Innerhalb Deutschlands bildet die PTB eine der wenigen Institution mit umfassendem Know-how und den technischen Voraussetzungen zur Herstellung von TWPAs

auf dem Stand der Technik, einer Schlüsseltechnologie für supraleitendes Quantencomputing; diese Stellung unterstreicht die Bedeutung der in qBriqs entwickelten Ergebnisse und Prozesse.

International sind v.a. Konzepte zur Realisierung nicht-reziproker TWPA-Schaltungen (insbesondere von Gruppen in den USA und Frankreich) publiziert worden. Solche Konzepte ermöglichen potenziell die weitere Integration von TWPAs mit anderen supraleitenden Bauelementen und erhöhen damit das Skalierungspotential; auf Basis der in qBriqs gewonnenen Vorarbeiten wird die PTB im Anschlussprojekt HIQWa (s.o.) versuchen, zu diesen international führenden Gruppen aufzuschließen und komplementäre Entwicklungen zu integrieren. Zudem wurde ein Durchbruch einer japanischen Arbeitsgruppe bekannt, die ein Herstellungsverfahren und Design berichtet, das voraussichtlich breitbandige Verstärkung nahe dem Quantenlimit ermöglicht; auch hier bilden die qBriqs-Ergebnisse die Grundlage für Weiterentwicklungen an der PTB, um verbleibende Lücken zu schließen.

Die neuere Fachliteratur adressiert v.a. neue Phasenanpassungskonzepte sowie Fortschritte in Fertigungsmethoden für verlustarme supraleitende Schaltkreise; diese externen Entwicklungen sind für die weitere Optimierung der PTB-Designs und für die strategische Ausrichtung der Anschlussarbeiten relevant und wurden in die Planung der Folgeaktivitäten einbezogen.

Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Begutachtete Veröffentlichungen in Fachzeitschriften:

1. V. Gaydamachenko & C. Kissling et al., „Numerical analysis of a three-wave-mixing Josephson traveling-wave parametric amplifier with engineered dispersion loadings“, *Journal of Applied Physics* **132**, 154401 (2022)

2. C. Kissling et al., „Vulnerability to Parameter Spread in Josephson Traveling-Wave Parametric Amplifiers“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **33**, 1-6 (2023)

3. V. Gaydamachenko & C. Kissling, and L. Grünhaupt, „rf-SQUID-based traveling-wave parametric amplifier with -84 dBm input saturation power across more than one octave bandwidth“, *Physical Review Applied* **23**, 064053 (2025)

Neben den genannten Veröffentlichungen wurden die Projektergebnisse in Summe bei 19 Gelegenheiten präsentiert (sechs Posterbeiträge und 13 Vorträge im wissenschaftlichen Tagungsprogramm). Die Posterbeiträge verteilen sich hierbei auf zwei nationale und vier internationale Konferenzen. Sieben Vorträge wurden bei nationalen Fachkonferenzen gehalten, ergänzt durch weitere sechs bei internationalen Konferenzen.