This project has received funding from the Eurostars-2 joint programme with co-funding from the European Union Horizon 2020 research and innovation programme

Schlussbericht zum Vorhaben

„Entwicklung eines kompakten Sensors zur Klassifizierung von Darmpolypen“

im Rahmen des Eurostars Projekts
E! 406 MiWEndo VNA on-a-chip
„Mikrowellentechnologien für die Krebsdiagnose;“

Autor: Hans-Christian Fritsch
Ilmsens GmbH
Ehrenbergstr. 11
98693 Ilmenau

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

Förderkennzeichen: 01QE2220
Projektlaufzeit: 01.08.2022 – 31.01.2025

1. Projektübersicht und Ziele

Das Projekt hat sich zum Ziel gesetzt, die Diagnose von Darmkrebs (CRC) zu revolutionieren, indem ein neues medizinisches Gerät entwickelt wird. Dieses Gerät soll als Zubehör an herkömmlichen Koloskopen angebracht werden und nutzt die Mikrowellen-Bildgebung (MWI), um Polypen zu erkennen und zu differenzieren.
Die Hauptziele bei Projektbeginn waren:

- Leistungssteigerung durch VNA-on-a-chip: Das bestehende Prototyp-Gerät war in seiner Diagnosefähigkeit durch Frequenzbeschränkungen begrenzt. Ziel war es, einen VNA-on-a-chip (Vector Network Analyser) zu entwickeln, der die Mikrowellen direkt am Zubehörteil verarbeitet und somit höhere Frequenzen und eine deutlich bessere Diagnosegenauigkeit ermöglicht.
- Miniaturisierung und Kostenreduktion: Ein teurer Chip sollte aus der externen Einheit in das kompakte Zubehörteil verlagert werden, um die Herstellungskosten zu senken.
- Technologietransfer und Zulassung: Das Projekt sollte die technologische Reife des Geräts von TRL4 (im Labor validierte Technologie) auf TRL6 (Demonstration in relevanter Umgebung) anheben und die erforderlichen Schritte für die CE- und FDA-Zulassung einleiten.

2. Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn

Das Konsortium, bestehend aus

- MiWEndo Solutions (Spanien),
- Ilmsens GmbH (Deutschland) und
- Boston Scientific (Irland), knüpfte an intensive Vorarbeiten an.

Der Stand zu Projektbeginn war:

- MWI als neuartige Analysetechnologie: Die Technologie nutzt die dielektrischen Eigenschaften von Gewebe als Biomarker, um zwischen gesundem Gewebe, Krebs und verschiedenen Arten von Polypen zu unterscheiden. Dies unterscheidet sich von den herkömmlichen optischen Methoden der Koloskopie, die nur auf sichtbare geometrische Veränderungen reagieren.
- Funktionalität des Prototyps: Der vorhandene Prototyp kann Polypen automatisch erkennen, indem er einen Alarm auslöst, wenn er einen Polypen wahrnimmt. Er liefert quantitative anatomische und funktionelle Daten in Echtzeit und vergrößert das Sichtfeld auf 360°.
- Nachgewiesene Machbarkeit: Erste Proof-of-Concept-Studien mit menschlichen Kolongewebeproben (ex vivo) zeigten eine Sensitivität von 100 % und eine Spezifität von 95,12 % bei der Erkennung von Darmkrebs.
- Vorbereitete Kommerzialisierung: Die Technologie war bereits patentiert und MiWendo hatte über 4,3 Millionen Euro, darunter 2,8 Millionen Euro durch den EIC Accelerator, für die Entwicklung und eine klinische Pilotstudie gesichert.

3. Projektablauf und wesentliche Herausforderungen

Die Durchführung des Projekts, insbesondere das Arbeitspaket 2 unter der Leitung von Ilmsens, war von signifikanten Verzögerungen und der Notwendigkeit alternativer Lösungen geprägt.

- Design-Verzögerungen: Das Design des kundenspezifischen ADC-Chips (Analog-Digital-Wandler) dauerte etwa drei Monate länger als geplant. Simulationen zeigten unerwartete Linearitätsfehler, die eine Redesign erforderlich machen.
- Produktions- und Lieferverzögerungen: Die Chip-Herstellung in der Fabrik verzögerte sich stark. Der ADC-Chip wurde erst im November 2023 anstatt wie geplant im Juli geliefert. Bei den neuen RF-Chips hat die Verzögerung im ersten Durchgang insgesamt das Projekt verlangsamt.
- Technische Kompromisse: Um den Projektfortschritt nicht zu gefährden, musste das Konsortium ein alternatives Leiterplattendesign entwickeln, das ältere Chips und handelsübliche Komponenten nutzte. Dieses Backup-Design war zwar größer und weniger energieeffizient, ermöglichte aber, die Validierungsarbeiten fortzusetzen.

4. Ergebnisse und Ausblick

Trotz aller Rückschläge konnte das Projekt wichtige Meilensteine erreichen und die grundlegende Machbarkeit des Konzepts demonstrieren.

- Erfolgreiche Chip-Tests: Die Tests des RF-Chips mit dem integrierten Koppler zeigten eine akzeptable Leistung. Der ADC-Chip wurde geliefert und die ersten Tests begannen im November 2023. Obwohl ein Fehler in der Spannungsversorgung festgestellt wurde, der ein Redesign erfordert, bewiesen die Testergebnisse, dass das Konzept technisch machbar ist.
- Machbarkeitsnachweis: Das funktionierende Backup-Design, basierend auf älteren Chips, hat die grundlegende Funktionalität des Sensors bestätigt. Die finalen Testergebnisse der im Projekt entwickelten RF-ICs belegen, dass die notwendigen Maßnahmen zur Behebung technischer Probleme erfolgreich waren und das Gesamtsensordesign für die weitere Integration in der Zukunft geeignet ist.
- Zukünftige Entwicklungen: Um die weitere Miniaturisierung zu unterstützen, wurde ein stromsparender, spannungsgesteuerter Oszillator (VCO) für 22 GHz entworfen und im Dezember 2024 zur Fertigung eingereicht. Da diese Chips erst Mitte 2025 eintreffen werden, konnten sie nicht mehr im Rahmen des aktuellen Projekts getestet werden. Dies verdeutlicht jedoch, dass die technologische Entwicklung trotz des offiziellen Projektabschlusses fortgesetzt wird.
-

Das Projekt hat somit gezeigt, dass die Integration der VNA-Technologie in ein Koloskop technisch möglich ist. Die bedeutenden Verzögerungen in der Chip-Produktion verhinderten zwar die vollständige Integration und das Testen der neuesten Chip-Generation innerhalb der Projektlaufzeit, aber die Grundlagen für die zukünftige Kommerzialisierung sind gelegt.

Inhaltsverzeichnis

1. Projektstart und anfängliche Entwicklungsphase 1
2. Umgang mit Produktionsverzögerungen und alternativen Lösungen 2
3. Testphase, Problemlösungen und Projektabschluss 6
4. Projektergebnis und Ausblick 7

Im Rahmen des Projekts "VNA-on-a-Chip" (01QE2220) hat die Ilmsens GmbH in Zusammenarbeit mit Partnern an der Entwicklung hochintegrierter Halbleiterchips für einen Vektor-Netzwerkanalysator (VNA) gearbeitet, der für den Einsatz in einem Kolonoskop konzipiert ist. Das Projekt kann in drei Phasen unterteilt werden. Die Laufzeit des Projektes war vom 01.08.2022 bis 31.01.2025

1. Projektstart und anfängliche Entwicklungsphase

Die Anfangsphase des Projekts konzentrierte sich Ilmsens auf das Arbeitspaket 2, in dem grundlegende Systemkonzepte und Messaufbauten in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern MiWendo und Boston Scientific diskutiert wurden. Ilmsens brachte dabei die Hochfrequenz-Perspektive ein, MiWendo die anwendungsspezifische Sicht unter Berücksichtigung der Gesamtelektronik und Boston die Anforderungen an die Integrationsfähigkeit. Man einigte sich auf einen Aufbau, der auf einer Transmissionsmessung basiert, bei der Wellen von einer Antenne zu einer anderen übertragen werden. Parallel dazu wurde ein Konzept zur optimierten Verteilung der Systemkomponenten entwickelt, um den Energiebedarf und die Wärmeabstrahlung zu minimieren.
Im Rahmen von Aufgabe 2.3 wurde mit dem Design der integrierten Schaltungen (ICs) begonnen[5]. Dies umfasste zwei zentrale Komponenten:

- **Spezialisierter Analog-Digital-Wandler (ADC):** Der erste Entwurf eines kundenspezifischen ADCs in 180-nm-CMOS-Technologie wurde gestartet. Simulationen der ursprünglich geplanten Schaltungen offenbarten jedoch schwerwiegende Linearitätsfehler, die für VNA-Anwendungen inakzeptabel sind. Obwohl diese Probleme behoben werden konnten, führte die längere Designphase von etwa drei Monaten zu einer Verschiebung des "Tape-In" (Produktionsstart) von Januar auf April 2023. Die erfolgreiche Überarbeitung erhöhte jedoch die Wahrscheinlichkeit, dass der erste gefertigte Entwurf funktionieren würde. Im Rahmen dieser Aufgabe wurde mit dem IMMS kooperiert, die als Dienstleister für die Umsetzung des Entwurfs verantwortlich waren. Diese Zusammenarbeit war besonders in der Entwurfs- und Konzeptionierungsphase sehr eng. Die Form der Zusammenarbeit war eine Auftragsentwicklung und damit ein großer Teil der externen Kosten.
- **Hochfrequenz-ICs (HF-ICs):** Für die HF-Komponenten wurde der Übergang auf eine modernere Halbleitertechnologie mit kleinerer Strukturgröße (130 nm SiGe BiCMOS anstatt 250 nm) in Angriff genommen. Simulationen prognostizierten, dass die neuen HF-ICs einen um etwa 50 % geringeren Energiebedarf haben würden, was aus thermischer Sicht für den Einsatz im Kolonoskop als notwendig erachtet wurde. Die Entwurfsarbeiten für diese HF-ICs verzögerten sich jedoch, da sie auf die Ergebnisse von thermischen Experimenten der Partner angewiesen waren. Dies führte zur Verschiebung des ursprünglichen Tape-In-Termins von

Ende 2022 auf Juli 2023. Die Multi-Projekt-Wafer und die notwendige Entwurfssoftware für Halbleiter sind der zweite große Ausgabenträger.

Trotz der anfänglichen Verzögerungen ging man in der ersten Phase davon aus, diese in den nachfolgenden Überarbeitungs- und Testphasen teilweise kompensieren zu können.

2. Umgang mit Produktionsverzögerungen und alternativen Lösungen

Im Jahr 2023 lag der Fokus weiterhin auf dem IC-Design (Aufgabe 2.3). Der Entwurf für einen HF-Transceiver-Chip in 130-nm-SiGe-Technologie, der einen integrierten Richtkoppler zur Erfassung des Sendesignals als Referenz enthält, wurde abgeschlossen. Diese Technologie wurde gezielt gewählt, um Leistungseinsparungen und damit eine signifikante Reduzierung der Wärmeabstrahlung zu erreichen – ein entscheidender Faktor für den geplanten Einsatz im Körper. Das Tape-In für diesen Chip erfolgte im Juli 2023, mit einer erwarteten Lieferung der Siliziummuster für November 2023. Ausgewählt für die Herstellung der Hochfrequenzchips wurde IHP in Frankfurt (Oder). Bei der Entwicklung eines anwendungsspezifischen integrierten Schaltkreises (ASIC) ist die frühzeitige Auswahl des Herstellers (auch "Foundry" oder "Fab" genannt) kein optionaler, sondern ein fundamentaler und notwendiger Schritt. Das liegt daran, dass der gesamte Designprozess untrennbar mit den spezifischen Technologien, Werkzeugen und Regeln des jeweiligen Herstellers verknüpft ist. Jeder Hersteller stellt für seinen spezifischen Fertigungsprozess (z. B. 130-nm- oder 7-nm-Technologie) ein Process Design Kit (PDK) zur Verfügung. Dieses Kit ist das Fundament für den gesamten Chip-Entwurf. Ein Wechsel des Herstellers mitten im Designprozess würde so beispielsweise bedeuten, das gesamte Projekt auf einem komplett neuen Fundament (einem anderen PDK) von vorne beginnen zu müssen. Jede Foundry hat ihre eigenen, einzigartigen "Rezepte" für die Halbleiterfertigung, selbst bei derselben Technologie-Knotengröße. Diese Unterschiede haben direkte Auswirkungen auf:

- Leistung (Performance): Die Geschwindigkeit der Transistoren variiert von Hersteller zu Hersteller. Das Design muss auf die spezifischen Timing-Eigenschaften der Zieltechnologie optimiert werden.
- Stromverbrauch: Parameter wie Leckströme sind stark prozessabhängig. Ein für einen Low-Power-Prozess optimiertes Design funktioniert möglicherweise nicht effizient in einem anderen Prozess.
- Fläche: Die Dichte, mit der Transistoren gepackt werden können, und die Größe der Standardzellen sind herstellerspezifisch, was die Gesamtgröße und damit die Kosten des Chips beeinflusst.

Die Herstellung des bereits im April 2023 eingereichten ADC-Chips wurde jedoch von der Fabrik erheblich verzögert. Der Liefertermin verschob sich mehrfach von ursprünglich Juli auf September und schließlich erfolgte die Lieferung erst im November 2023. Aufgrund dieser Lieferverzögerungen bei beiden zentralen Halbleiterkomponenten begann das Team in der zweiten Jahreshälfte proaktiv mit der Umsetzung von Arbeitspaket 3. Um den Fortschritt des Gesamtprojekts nicht zu gefährden, wurde eine alternative HF-Messfrontend-Lösung entwickelt. Diese setzte die benötigte Funktionalität mithilfe bestehender, älterer HF-ICs und kommerziell verfügbarer Bauteile um. Dieser alternative Aufbau war zwangsläufig größer und energieintensiver als das geplante Design, was die Entwicklung einer zusätzlichen Kühlungslösung für das Frontend erforderlich machte. Diese Maßnahme ermöglichte es dem Konsortium, Messungen und Validierungsaufgaben durchzuführen, während man auf die neuen Chips wartete. Es wurde jedoch die Herausforderung erkannt, dass bei der verbleibenden Projektlaufzeit ein vollständiger Redesign- und Fertigungszyklus bei möglichen Problemen mit den neuen Chips nicht mehr sicher abgeschlossen werden könnte.

Das für die Durchführung dieser Messungen entwickelte System inkl. der zusätzlichen Kühlung wird im Folgenden im Detail erklärt:

Das segmentierte m:VNA-Sensorsystem von Ilmsens ist ein hochspezialisiertes Ultra-Breitband-Sensorsystem, das für die Integration in Koloskope und zur Simulation von Messungen im Darm entwickelt wurde. Es basiert auf der M-Sequence UWB-Technologie und arbeitet im ECC-Band von 6,0 bis 8,5 GHz. Die Kernarchitektur des Systems trennt die Hochfrequenzelektronik (HF-Modul) von der digitalen Verarbeitungseinheit (Backend), was den Einsatz eines sehr kompakten Sensormoduls direkt am Messort ermöglicht. Diese Trennung erlaubt realistische Simulationen von Messungen innerhalb des Darms. Das Gesamtsystem besteht aus den folgenden Hauptkomponenten:

- **IS-H12ECC-CMIW:** Ein separates, kompaktes HF-Modul.
- **IS-SH-2220CMIW:** Die Basiseinheit mit digitalem Backend und einem eingebetteten Computer.
- **IS-TRW-01 (optional):** Ein Wasserkühlungssystem mit Temperaturregulierung.

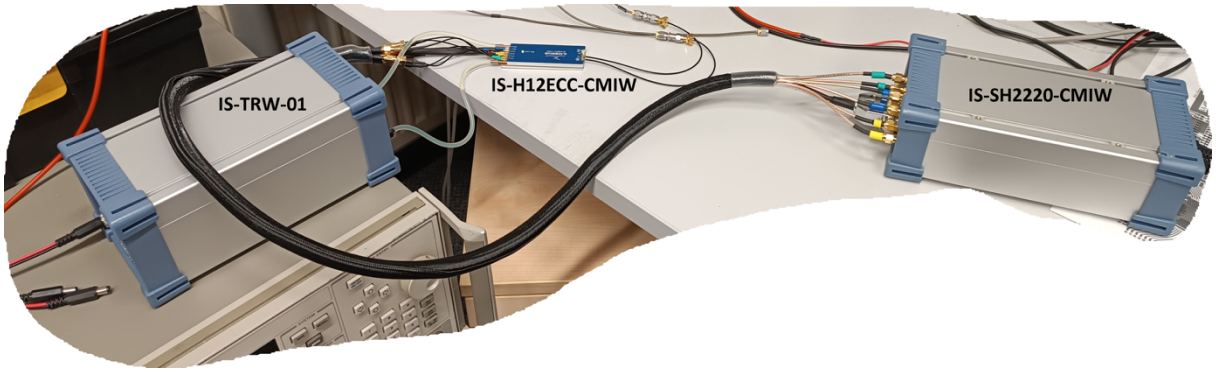

Abbildung: Überblick über das segmentierte m:VNA-Sensorsystem von Ilmsens

IS-H12ECC-CMIW – Kompaktes HF-Modul

Das IS-H12ECC-CMIW ist das Herzstück des Sensorsystems und enthält den kompletten HF-Kern der M-Sequence-Technologie. Es wurde speziell für kompakte Abmessungen und eine effektive Wärmeabfuhr entwickelt, um den direkten Kontakt mit Gewebe in medizinischen Anwendungen zu ermöglichen.

Zu den wesentlichen Merkmalen gehört ein integrierter Richtungskoppler und ein HF-Schalter, die eine automatische Kalibrierung während des Betriebs ermöglichen. Ein zentrales Element ist das integrierte Wärmerohr (Heat Pipe), das eine effiziente Kühlung mittels eines externen Wasserkühlungssystems erlaubt. Ohne diese aktive Kühlung kann das Gehäuse des Moduls Betriebstemperaturen von bis zu 70°C erreichen, da es dann als Kühlkörper fungiert. Die nominelle Verlustleistung des Moduls beträgt 4,1 W.

Abbildung 2: Das IS-H12ECC-CMIW HF-Modul

Technische Spezifikationen (Auszug):

- **UWB-Bandbreite:** 6,0 - 8,5 GHz
- **HF-Ausgangsleistung (Tx):** 7 dBm (nominell)
- **HF-Eingangsleistung (Rx):** max. -9 dBm
- **Abmessungen:** 30 mm x 7,6 mm x 80 mm (B x H x T)

IS-SH-2220CMIW – Digitale Backend- und Basiseinheit

Die IS-SH-2220CMIW Basiseinheit dient als angepasstes analog-digitales Backend für das HF-Modul und vervollständigt das Messsystem. Sie enthält alle notwendigen Komponenten für die Signalverarbeitung, Steuerung und Datenvorverarbeitung, darunter ADC, FPGA (oder digitales ASIC) und einen eingebetteten Computer. Die Verbindung zum HF-Modul erfolgt über ein mehradriges Kabel, das die Stromversorgung, Steuersignale und die relativ phasenunempfindlichen ZF-Signale überträgt.

Die Vorderseite bietet SMA-Anschlüsse für die analogen ZF-Signale (IF-A, IF-B) und das digitale Taktsignal (DCLK) sowie einen D-SUB 15-Pin Anschluss (CTRL) für die Stromversorgung und die Steuersignale.

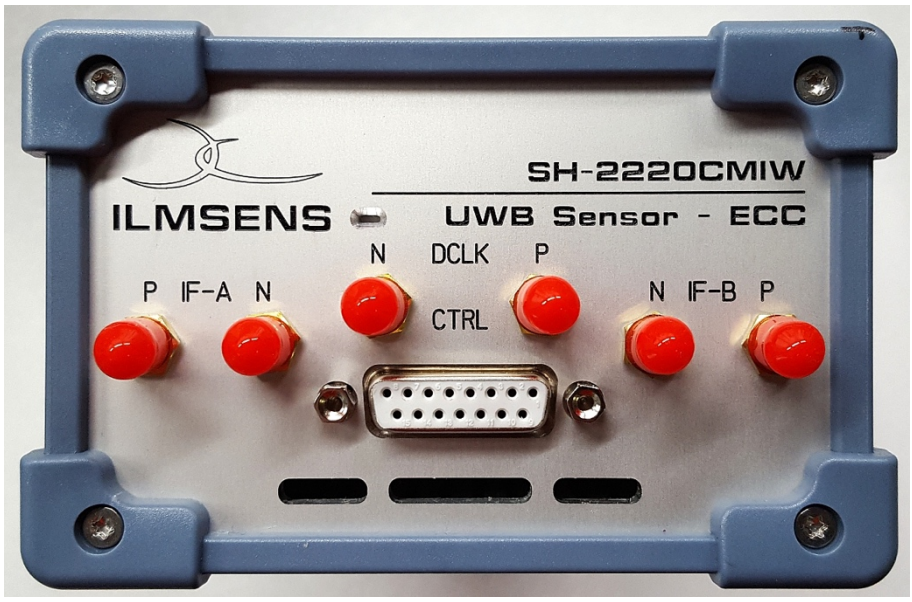

Abbildung: Die Vorderansicht des IS-SH-2220-CMIW

Technische Spezifikationen (Auszug):

- **Stromversorgung:** DC +12 V, 2,0 A
- **Betriebstemperatur:** 0 - 25 °C
- **Abmessungen:** 115 mm x 75 mm x 230 mm (B x H x T)

IS-TRW-01 – Wasserkühlungssystem

Das IS-TRW-01 ist ein kompaktes Wasserkühlungssystem, das für die Kühlung von Geräten mit einer Verlustleistung von bis zu 10 W bei einer Temperaturdifferenz von ca. 10 K ausgelegt ist. Es zirkuliert kontinuierlich eine Kühlflüssigkeit durch das Wärmerohr des HF-Moduls und sorgt so für eine stabile Betriebstemperatur, die für die Anwendung geeignet ist (z. B. 30-36°C).

Das System reguliert die Temperatur der Kühlflüssigkeit automatisch über die Lüfterdrehzahl. Die Bedienung ist denkbar einfach: Sobald das Gerät mit Strom versorgt wird, beginnen Pumpe und Temperaturregelung zu arbeiten. Die werkseitig eingestellte Solltemperatur kann vom Benutzer nicht geändert werden.

Abbildung: Die Vorderansicht des IS-TRW-01 Wasserkühlungssystems

Technische Spezifikationen (Auszug):

- **Maximale Verlustleistung:** 10 W bei 10 K Temperaturdifferenz
- **Kühlmittel-Solltemperatur:** 30°C
- **Abmessungen:** 115 mm x 95 mm x 220 mm (B x H x T)

3. Testphase, Problemlösungen und Projektabschluss

Anfang 2024 standen die Tests der endlich gelieferten Halbleiter im Mittelpunkt.

- **ADC-Testergebnisse:** Die im Dezember 2023 erhaltenen ADC-Chips wurden in Gehäuse gebondet und auf Evaluierungsleiterkarten getestet. Die Tests zeigten grundsätzlich positive Ergebnisse; insbesondere die wichtigen Linearitätskriterien (INL/DNL) und die erforderlichen Taktraten wurden erfüllt. Es wurde jedoch ein gravierendes Problem mit der chip-internen Stromversorgung entdeckt, welches eine deutlich erhöhte Versorgungsspannung und somit einen höheren Stromverbrauch für den Betrieb notwendig machte. Obwohl das Problem in einem Redesign als lösbar eingestuft wurde, entschied das Konsortium, die begrenzten Ressourcen auf den HF-Transceiver-Chip zu konzentrieren, da dieser kritischer für die Gesamtleistung im Koloskop war und mit einem kommerziellen ADC evaluiert werden konnte. Ein Redesign des ADCs wurde daher nicht begonnen.
- **HF-Transceiver-Testergebnisse:** Die lange erwarteten 130-nm-HF-Transceiver-Chips trafen im ersten Halbjahr 2024 ein. Die Tests konnten die in den Simulationen vorhergesagte Reduktion des Stromverbrauchs um 40 % im

Vergleich zur älteren 250-nm-Technologie grundsätzlich bestätigen. Allerdings traten auch hier unvorhergesehene Probleme auf:

- Der Sendeteil des Transceivers arbeitete bei nominaler Versorgungsspannung nicht zuverlässig.
- Eine Chip-interne Verbindung verursachte leichte Leistungseinbußen im Empfangspfad.
- Der neu integrierte Richtkoppler funktionierte hingegen mit zufriedenstellender Leistungsfähigkeit.

Um diese Probleme zu beheben und gleichzeitig den Projektzeitplan einzuhalten, wurden mehrere Maßnahmen ergriffen:

1. **Redesign:** Ein Redesign des HF-Transceivers zur Verbesserung der internen Verbindung und Optimierung des HF-Takteingangs wurde gestartet und im Juli 2024 zum Tape-In gegeben. Aufgrund erneuter massiver Auslieferungsverzögerungen trafen diese verbesserten Chips jedoch erst im Februar 2025 ein – nach dem offiziellen Projektende.
2. **Workarounds:** Um die Integration der ersten Chip-Version dennoch zu ermöglichen, wurde der Bondplan optimiert, um die Zuführung des externen 21,72-GHz-Taktes zu verbessern. Zudem musste die Versorgungsspannung der Chips um 15 % erhöht werden, um den Sendeteil zu stabilisieren, was den Stromverbrauch wieder erhöhte und die Notwendigkeit einer Kühllösung aufrechterhielt.
3. **Alternative Integrationsstrategie:** Um den Partnern Tests des segmentierten Ansatzes zu ermöglichen, wurde ein zweites Systemsegment zunächst mit älteren 250-nm-Transceivern und einem externen Richtkoppler aufgebaut und ausgeliefert. Dies ermöglichte den prinzipiellen Nachweis der Funktionalität der Technologie und des Kalibrierverfahrens. Gegen Ende 2024 wurde, nach Findung der Workarounds, ein neues zweites Segment mit den 130-nm-Transceivern und deren integriertem Richtkoppler entworfen und getestet.

4. Projektergebnis und Ausblick

Obwohl die finale Integrationsstufe voll funktionsfähiger und verbrauchsreduzierter Transceiver und Custom-ADCs in die Koloskopsegmente aufgrund der extremen und wiederholten Lieferverzögerungen seitens der Halbleiterhersteller nicht erreicht wurde, konnten die grundsätzlichen Projektziele dennoch erfüllt werden. Die Funktionsfähigkeit der Technologie für die Messaufgabe im Darm sowie der Ansatz der VNA-Integration auf einem Chip wurden erfolgreich nachgewiesen.
Die Projektergebnisse bilden eine solide Basis für zukünftige Entwicklungen. Die notwendigen technologischen Schritte zur Fertigstellung der Integration sind klar erarbeitet. Die folgenden Schritte sind notwendig:

- Redesign des Custom-ADCs zur Behebung des Versorgungsfehlers und zur Optimierung des Stromverbrauchs.
- Testen des optimierten 130-nm-HF-Transceivers, der nach Projektende geliefert wurde.
- Integration einer energieeffizienten Oszillatorlösung für den HF-Takt.
- Finale Integration aller Komponenten (HF-Transceiver, Oszillator, ADC) in ein gemeinsames "System-in-Package" für den Einsatz im Koloskop.

Der Zeithorizont für diese nächsten Schritte wird auf etwa zwei Jahre geschätzt, abhängig vom Zugang zu Halbleitertechnologien und einer fortgesetzten Kooperation mit den Projektpartnern4.

Hinsichtlich der Verwendbarkeit der Ergebnisse lässt sich festhalten, dass diese im Sinne des Erkenntnisgewinns positiv zu bewerten sind, jedoch nicht in Form eines fertigen Produkts. Die entwickelten ASICs (anwendungsspezifische integrierte Schaltungen) bedürfen eines Redesigns, bevor sie einsatzbar sind. Eine parallel verfolgte alternative Entwicklung wird obsolet, sobald dieses Redesign erfolgreich umgesetzt ist und der damit einhergehende Bedarf nach einer umfangreichen Kühlung nicht mehr existiert.