Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I – Kurzbericht

ZE:	Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. Volmerstr. 3; 12489 Berlin	Förderkennzeichen: **01LY2211B**
Vorhabenbezeichnung:	KMU-innovativ – Verbundprojekt Klimaschutz: Hardwarebasiertes und mobiles bildgebendes Druckluft-Leckage-Ortungssystem für Industrieanwendungen (HarLeckIn) - Teilprojekt 2: Hochauflösende Arraysignalverarbeitungsalgorithmen im Embedded System	
Laufzeit des Vorhabens:	01.04.2023 – 31.03.2025 (24 Monate)	
Berichtszeitraum:	01.04.2023 – 31.03.2025	
Projektleiter:	Dirk Döbler	

Das wissenschaftlich-technische Ziel des Kooperationsprojektes zwischen CS Instruments und der GFaI ist der Aufbau eines mobilen Gerätes in Form eines Demonstrators, das die Produktpalette von Leckageortungsgeräten um ein Gerät erweitert, das mit hochmodernen arraybasierten Signalverarbeitungsverfahren den technischen Stand übertrifft und für den speziellen Einsatz der Druckluftleckageortung optimiert ist.

In der 24 Monate umfassenden Projektlaufzeit konnten alle geplanten Arbeitspakete erfolgreich bearbeitet werden.

Das Vorhaben gliederte sich in vier Phasen.

In der ersten Phase lag der Fokus auf der Systemkonzeption, die in enger Zusammenarbeit der Projektpartner CS Instruments und GFaI erfolgte. Die Analyse der relevanten Algorithmen und die Erweiterung des Arraysimulators wurden GFaI-intern durchgeführt, um eine fundamentale Basis zu schaffen. Darauf aufbauend wurden gemeinsam mit CS Instruments eine geräteseitige Anforderungsanalyse, die Definition zentraler Systemeigenschaften und die Festlegung der benötigten Schnittstellen erarbeitet. Abschließend erfolgte eine Vorauswahl geeigneter Hardwareplattformen zur Sicherstellung der technischen Umsetzbarkeit.

Die zweite Phase konnte in zwei Gruppen aufgeteilt werden: in den algorithmischen Teil und den der Geräteentwicklung.

Der algorithmische Teil umfasste die Portierung eines in der GFaI entwickelten erweiterten Beamformingalgorithmus, im Folgenden nur noch als Power-Beamforming (Power-BF) bezeichnet, von einer PC-Anwendung auf eine eigenständige Embedded-Zielhardware. Die besondere Herausforderung dabei war, dass die derzeitigen erweiterten Beamformingalgorithmen trotz vorhandener potenter PC-Hardware nicht einmal ansatzweise echtzeitfähig zu benutzen sind, während das Ziel des Projektes eine echtzeitfähige Anwendung auf einem mobilen Gerät mit limitierten Ressourcen war. Um dieses Ziel zu erreichen, war es erforderlich, den Power-BF-Algorithmus nicht nur in seiner Berechnungsvorschrift zu überarbeiten und damit zu vereinfachen, sondern auch alle verfügbaren Optimierungsmöglichkeiten in der programmtechnischen Umsetzung für das Embedded-System nach Möglichkeit vollständig auszuschöpfen.

Die Geräteentwicklung begann mit der Realisierung der elektronischen Hardwarekomponenten bestehend aus Array-, Adapter- und Mainboard-Platine. Die frühzeitige Entwicklung der Platinen wurde mit einer hohen Priorität bearbeitet, da nur mit diesen eine Validierung und Optimierung des Algorithmus auf der Zielhardware mit echten (Mikrofon-) Daten möglich war. Die Optimierung des Algorithmus stellte als Kernelement des Projektes ein hohes technisches Risiko dar. Somit wurde eine frühzeitige Optimierung angestrebt, um die Echtzeitfähigkeit des Algorithmus in jedem Fall sicherzustellen. Für die Platinen-Entwicklung mussten besondere Herausforderungen, wie beispielsweise die Kameraanbindung über die MIPI- (Mobile Industry Processor Interface) Schnittstelle gemeistert werden, ohne Zugriff auf deren Spezifikation zu haben. Die entwickelte Adapterplatine diente der Verbindung der Arrayplatine mit den planmäßig beschafften Development-Boards. Dadurch konnte die FPGA-Entwicklung schon begonnen werden, bevor das sehr komplexe Mainboard entwickelt und gefertigt worden war. Auf Grundlage der umfangreichen Spezifikation für das Mainboard wurde die erste Version entwickelt.

Die dritte Phase des Projektes stellte die elektronisch-mechanische Systemintegration dar. In deren Verlauf entstanden mehrere Überarbeitungen des Mainboards, um funktionale Änderungen in den Anforderungen zu erfüllen und Optimierungen umzusetzen. Der Wechsel des Leiterplattenherstellers (siehe Teil II) führte dabei zu zusätzlichen Problemen, besonders hinsichtlich der Fertigungsqualität und Lieferzuverlässigkeit. Parallel wurde ein Demonstrator aufgebaut, dessen Gehäuse anfangs aus 3D-Druck-Teilen, später aus Spritzguss-Teilen bestand, die von CS Instruments gefertigt und zur Verfügung gestellt wurden. Mit der dritten Revision des Mainboards konnten schließlich alle technischen Anforderungen erfüllt und die EMV-Prüfung erfolgreich abgeschlossen werden.

Die vierte Phase umfasste die Validierung und Optimierung der auf dem Embedded System realisierten Algorithmen an realen (Leckage-/Rausch-) Quellen. In diesem Rahmen wurden zum einen Implementierungsfehler, die zu falschen Pegelwerten in den akustischen Karten führten, gefunden und beseitigt. Zum anderen wurden umfangreiche Benchmarks durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Optimierungsparameter zu quantifizieren und so ein optimales Gleichgewicht zwischen einer möglichst hochwertigen Darstellung der Ergebnisse (Bildauflösung und Dynamikumfang) und dem erforderlichen Berechnungs- bzw. Ressourcenaufwand im Hinblick auf eine echtzeitfähige Anwendung auf dem Handheld-Gerät zu erzielen. In Zusammenarbeit mit CS Instruments, die neben der Bussiness-Logic eine benutzerfreundliche GUI entwickelten, kulminierten die Arbeiten in einem Demonstrator, der einen erweiterten Dynamikumfang von bis zu 20 dB und eine flüssige und anschauliche Darstellung der Messsituation bietet.

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

Gefördert durch:
Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil II – Eingehende Darstellung

ZE:	Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. Volmerstr. 3; 12489 Berlin	Förderkennzeichen:	**01LY2211B**
Vorhabenbezeichnung:	KMU-innovativ – Verbundprojekt Klimaschutz: Hardwarebasiertes und mobiles bildgebendes Druckluft-Leckage-Ortungssystem für Industrieanwendungen (HarLeckIn) - Teilprojekt 2: Hochauflösende Arraysignalverarbeitungsalgorithmen im Embedded System		
Laufzeit des Vorhabens:	01.04.2023 – 31.03.2025 (24 Monate)		
Berichtszeitraum:	01.04.2023 – 31.03.2025		
Projektleiter:	Dirk Döbler		

1. Darstellung der durchgeführten Arbeiten im Vergleich mit der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung.

Die in der Vorhabensbeschreibung vorgesehenen Arbeiten konnten erfolgreich und mit einem sehr guten Gesamtergebnis umgesetzt werden. Inhaltlich konnten bis auf wenige Ausnahmen die geplanten Arbeiten eins-zu-eins umgesetzt werden. Die durchgeführten Arbeiten werden im Folgenden detailliert beschrieben und Abweichungen vom ursprünglichen Arbeitsplan konkret benannt und begründet.

Im Arbeitspaket **AP G1** wurden verschiedene fortgeschrittene Beamforming-Algorithmen auf ihre Eignung für die Anforderungen des geplanten echtzeitfähigen bildgebenden Leckage-Ortungssystems hin untersucht. Zu den betrachteten Verfahren zählen unter anderem das Orthogonal-Beamforming, Adaptive-Beamforming, Asymptotic-Beamforming, Functional-Beamforming, sowie Clean-SC. Die Analyse erfolgte unter Einbeziehung eines in Arbeitspaket **AP G2** weiterentwickelten Simulators, der die akustischen Eigenschaften eines Mikrofonarrays im Ultraschall abbildet. Besonderes Augenmerk lag auf der Leistungsfähigkeit der Algorithmen in Bezug auf Echtzeitfähigkeit, Ortungsgenauigkeit, Kontrastschärfe und Robustheit gegenüber Störgeräuschen in typischen industriellen Umgebungen. Im Ergebnis dieser vergleichenden Untersuchung erwies sich das Adpative-Beamforming als der geeignetste Algorithmus für das Vorhaben. Das Adaptive-Beamforming zeichnet sich durch eine hohe räumliche Auflösung sowie eine gute Unterdrückung von Nebenkeulen aus, was für eine präzise Lokalisierung in komplexen akustischen Szenarien essentiell ist. Im Folgenden wird der Begriff Power-Beamforming als

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

Oberbegriff der folgenden erweiterten Beamforming-Algorithmen verwendet: Adaptaptiv-, Asymptotic- und Functional-Beamforming, da sie sich nur relativ gering voneinander unterscheiden. Die theoretischen Grundlagen des Algorithmus sind in der Publikation[1] von C. Puhle, 2021 ausführlich beschrieben.

Im Rahmen des Arbeitspakets **AP G3** erfolgte die Festlegung sowohl der physikalischen, elektrischen als auch der programmatischen Schnittstellen für das Gesamtsystem. Dieser Schritt war entscheidend für die nahtlose Integration der entwickelten Hard- und Softwarekomponenten in das bestehende Systemumfeld sowie für die anschließende Zusammenarbeit der verschiedenen Subsysteme. Die Schnittstellendefinition wurde in enger Abstimmung mit dem Projektpartner CS Instruments erarbeitet um sicherzustellen, dass sowohl die technischen Anforderungen an die Datenübertragung, Spannungsversorgung, Signalverarbeitung und die mechanischen Maße erfüllt werden, als auch die Kompatibilität mit bereits bestehenden Produkten und Messsystemen gewährleistet ist. Dabei wurden unter anderem Kommunikationsprotokolle evaluiert und ausgewählt, sowie definierte Steuersignale, Datenaustauschformate und Schnittstellen-Anforderungen spezifiziert.

Ein zentraler Aspekt im Rahmen der System-Spezifikation war außerdem die Festlegung der Mikrofonanzahl für das akustische Array. Zur Beantwortung der Frage, ob die geplanten 64 Mikrofone für die angestrebte Bildgebung ausreichen oder ob eine höhere Anzahl erforderlich wäre, wurden gezielte Simulationen mit dem in AP G2 erweiterten Simulators durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss der Mikrofonanzahl auf die Qualität der akustischen Karte sowohl für das Standard-Beamforming als auch im Vergleich zu einem der erweiterten Algorithmen des Power-Beamformings untersucht. Für die Simulation wurden sechs Quellen mit jeweils einem Unterschied von 10 dB zur jeweils nächsten verwendet. Die Ergebnisse (siehe Abbildung 1: Simulationsergebnisse von 6 Ultraschall-Quellen (von der stärksten zur schwächsten in 10 dB Schritten)Abbildung 1) zeigten, dass beim Standard-Beamforming eine Verdopplung der Mikrofonanzahl zu einer verbesserten Dynamik in der Darstellung führt. Beim Power-Beamforming hingegen konnte auch bei einer höheren Mikrofonanzahl keine signifikante Verbesserung über den bereits vorhandenen hohen Dynamikbereich hinaus festgestellt werden, wodurch sich das Systemdesign hinsichtlich Komplexität und Kosten optimieren ließ.

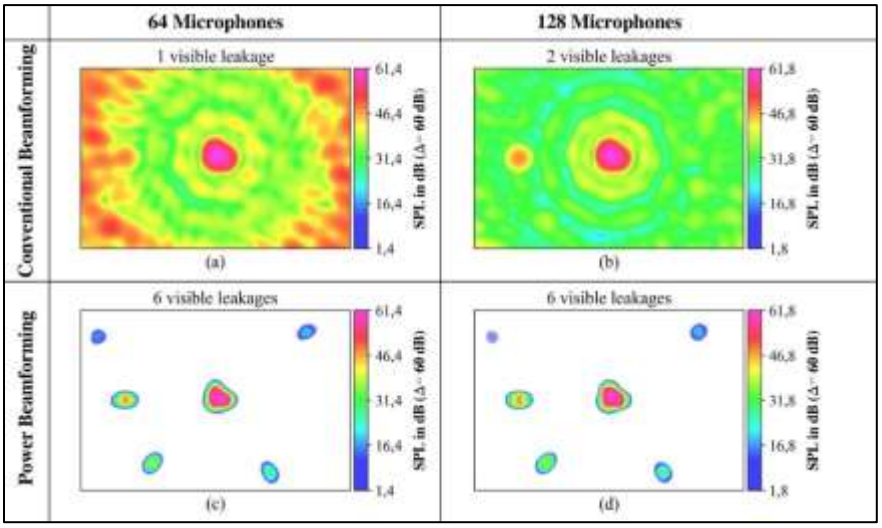

Abbildung 1: Simulationsergebnisse von 6 Ultraschall-Quellen (von der stärksten zur schwächsten in 10 dB Schritten)

[1] Christof Puhle: Demonstration of an unified approach to beamforming. Proc. of InterNoise 2021, Washington DC, USA, 2021.

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

Durch die enge Kooperation mit CS Instruments konnte gewährleistet werden, dass die Schnittstellen sowohl praxistauglich als auch zukunftssicher ausgelegt sind, was eine flexible Weiterentwicklung und die angestrebte Produktintegration in einer späteren Projektphase erleichtert hat.

Wie im Projektplan vorgesehen, erwies sich das Arbeitspaket **AP G4** als umfangreich, da hier die algorithmischen Grundlagen für die spätere Systemportierung geschaffen wurden. Die bereits vorhandene Implementierung des Power-Beamforming-Algorithmus wurde eingehend analysiert und gezielt überarbeitet, um sie für eine spätere Portierung auf die vorgesehene Embedded-Zielplattform vorzubereiten. Die Entwicklung erfolgte weiterhin auf einer PC-basierten Umgebung, wobei besonderes Augenmerk auf die Reduktion der Rechenkomplexität und die Entfernung plattformspezifischer Abhängigkeiten gelegt wurde. Ein zentraler Aspekt dieser Arbeiten war die Entkopplung der mathematischen Funktionen von der Verwendung der Intel Performance Primitives (IPP). Diese Bibliothek bildet SIMD- (Single-Instruction-Multiple-Data) Befehle auf Befehlssatzerweiterungen wie zum Beispiel AVX (Advanced Vector Execution), AVX2 und AVX-512 von x86-Architekturen ab, die hochgradig optimierte, parallele Berechnungen insbesondere im Bereich von Matrizen-Operationen ermöglichen. Da die spätere Zielplattform – ein System-on-Chip (SoC) mit ARM-basierter Quad-Core-CPU (Cortex-A53 @ 1,5 GHz) – keine vergleichbaren Befehlssatzerweiterungen bietet, war eine vollständige Entfernung der IPP-Abhängigkeiten notwendig. Die ARM-CPU stellt lediglich deutlich einfachere SIMD-Funktionalitäten über ihre Floating-Point-Unit (FPU) zur Verfügung, sodass eine direkte Übertragung der bestehenden IPP-basierten Optimierung nicht möglich war. Im Zuge der Überarbeitung wurden die mathematischen Kernfunktionen durch plattformunabhängige in Standard-C/C++ implementierte Routinen ersetzt. Gleichzeitig konnten programmtechnische Vereinfachungen wie zum Beispiel die Verwendung von Integer-Zahlen anstelle von Fließkomma-Zahlen vorgenommen werden, die den Rechenaufwand deutlich reduzierten, ohne die Qualität der Ortungsergebnisse wesentlich zu beeinträchtigen. Diese Maßnahmen bildeten die Grundlage für eine spätere effiziente Umsetzung auf der ressourcenbeschränkten Zielhardware und ermöglichten eine realistische Bewertung der Systemanforderungen in Bezug auf Rechenleistung und Energieverbrauch.

Im Arbeitspaket **AP G5** stand die Auswahl und Evaluierung der SoC-Plattform im Mittelpunkt. Hinsichtlich der Systemanforderungen gab es faktisch keine Alternative zum bereits im Vorfeld identifizierten System-on-Module (SoM) der Firma Enclustra GmbH. Zum einen bietet derzeit ausschließlich AMD (ehemals Xilinx) leistungsfähige SoC-Lösungen an, die sowohl hinsichtlich ihrer Hardwarefähigkeiten als auch bezüglich des angestrebten Preis-Leistungs-Verhältnisses den Projektanforderungen entsprechen. Zum anderen integriert Enclustra auf ausgewählten SoMs dedizierten DDR-RAM speziell für den FPGA-Teil des favorisierten AMD-SoCs – ein Alleinstellungsmerkmal, das für die effiziente Trennung und parallele Nutzung von CPU- und FPGA-Ressourcen von zentraler Bedeutung ist. Vor diesem Hintergrund konzentrierten sich die Arbeiten dieses Arbeitspaketes im Wesentlichen auf die Einarbeitung in die neue Entwicklungsplattform. Dies umfasste sowohl die Einrichtung und Nutzung der Toolchain für Hardware- und Softwareentwicklung als auch die Anpassung und Konfiguration eines Embedded-Linux-Systems für den Betrieb auf der Zielplattform. Darüber hinaus wurden grundlegende Entwicklungs- und Testprozesse etabliert, um in den folgenden Arbeitspaketen eine stabile und reproduzierte Arbeitsumgebung für die Portierung und Ausführung der Algorithmen bereitzustellen. Zu diesem Zweck wurde eine dedizierte Build-Umgebung eingerichtet, die sowohl die Synthetisierung und das Deployment der FPGA-Anteile als auch den Aufbau des angepassten Embedded-Linux-Systems umfasst. Abweichend zur ursprünglichen Vorhabensbeschreibung, in der eine geschwindigkeits-optimierte Mathematikblibliothek auszuwählen war bzw. benötigte Teilfunktionen selbst zu

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

implementieren waren, wurden diese Arbeiten als Teil von AP G6 angesehen und daher entsprechend verschoben. Vielmehr wurde begonnen, die projektseitige Firmware zu entwickeln, die mehrere funktional aufeinander abgestimmte Aufgaben übernimmt. Zunächst ermöglicht sie den hardwareseitigen Zugriff auf die FPGA-gestützten Komponenten und Daten. Anschließend führt sie zentrale Verarbeitungsschritte des Beamforming-Algorithmus auf der SoC-Plattform aus. Das Ergebnis in Form einer fertigen akustischen Karte soll anschließend über eine zuvor gemeinsam mit dem Projektpartner spezifizierte API an dessen anwendungsspezifische Software übergeben werden. Die Build-Umgebung gewährleistete dabei eine konsistente Versionierung und automatisierte Erzeugung aller Systemkomponenten einschließlich FPGA-Bitstream, Linux-Distribution und Firmware und stellte somit eine reproduzierbare, wartbare und erweiterbare Entwicklungsbasis für die verbleibenden Arbeitspakete bereit. Zur besseren Systemübersicht und zur Vorbereitung der Folgearbeiten wurde eine schematische Darstellung der konzeptionellen Struktur des SoCs erstellt (siehe Abbildung 2). Obwohl diese Visualisierung bereits die geplanten Endfunktionen im Kontext der folgenden Arbeitspakete AP G6, AP G9 und AP G10 abbildet, diente sie zugleich als Grundlage für eine frühzeitige technische Evaluierung einzelner Schlüssel-komponenten während der aktuellen Phase. Es wurde die Ansteuerung des FPGA-seitigen DDR-RAMs implementiert und mittels Benchmark-Tests die Datentransferleistung validiert. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse flossen direkt in das spätere Systemdesign ein und ermöglichten eine risikominimierte Planung der folgenden Integrations- und Implementierungsaufgaben.

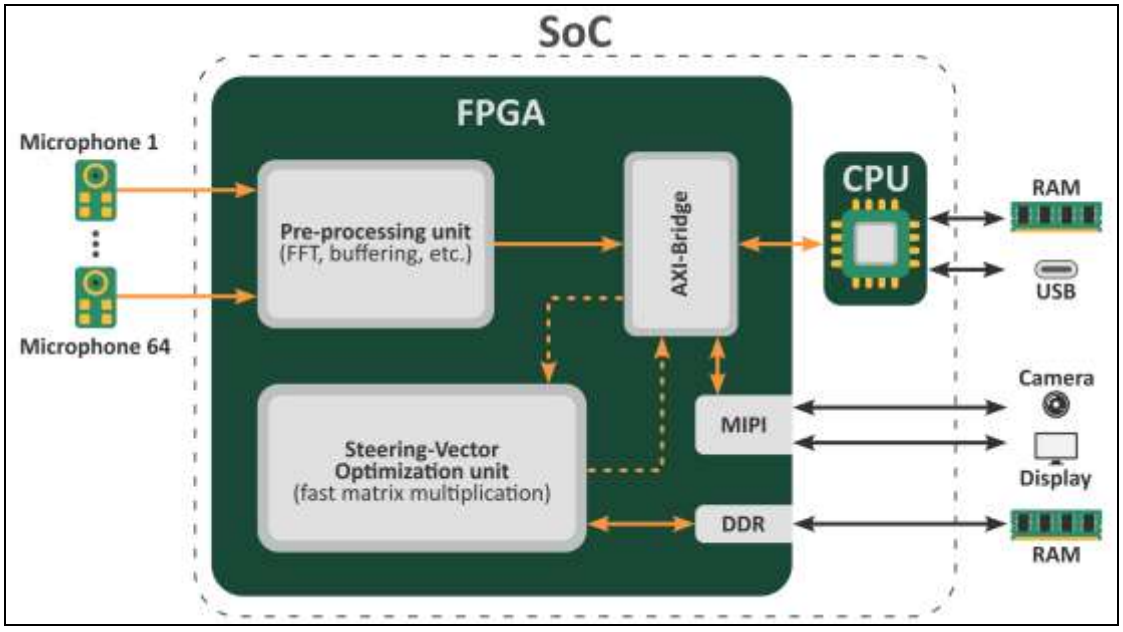

Abbildung 2: konzeptionelle Architektur des SoCs mit den Hauptkomponenten und Datenflüssen

Im Arbeitspaket **AP G6** stellte die Portierung des ausgewählten Power-Beamforming-Algorithmus auf das Embedded Eval-System, die von der Firma Enclustra erworbenen Development-Kits, einen wesentlichen Meilenstein im Projekt dar. Aufgrund der heterogenen Zielplattform bestehend aus einem ARM-CPU-Cluster (Quad-Core Cortex-A53) und einer programmierbaren Logik (FPGA) wurde die Umsetzung in zwei Hauptbestandteile unterteilt:

(1) die softwareseitige Portierung und Optimierung des Algorithmus auf die ARM-Architektur sowie
(2) die hardwareseitige Implementierung grundlegender Signalverarbeitungsfunktionen im FPGA.

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

Software-Portierung auf die ARM-Architektur:

Die Umsetzung des Beamforming-Kerns auf der ARM-Plattform erforderte nicht nur eine direkte Portierung, sondern auch eine umfassende Optimierung der Implementierung. Da für die Cortex-A53-Prozessorarchitektur keine hochoptimierten Performance-Bibliotheken wie die Intel-Performance-Primitives (IPP) zur Verfügung stehen, mussten zentrale mathematischen Funktionen insbesondere für die Matrizenmultiplikationen und Vektoroperationen komplexer Zahlen manuell angepasst werden. Dabei wurde speziell die SIMD-Funktionalität des NEON-CoProzessors der ARM-CPU genutzt, um eine parallele Verarbeitung mehrerer Datenwerte pro Taktzyklus zu ermöglichen. Neben der SIMD-Optimierung lag ein weiterer Fokus auf einer Cache-effizienten Speicherzugriffsstruktur für die Eigensysteme, die Steering-Vektoren und die akustische Karte, um die begrenzte Speicherbandbreite bestmöglich auszunutzen und eine trennbare beziehungsweise parallele Verarbeitung der Daten zu ermöglichen. Die erste Implementierung des Algorithmus erfolgte mit Float-Werten, um die numerische Stabilität und Genauigkeit der Berechnungen zu evaluieren. Es wurden verschiedene Algorithmus-Varianten in Betracht gezogen, darunter:

- Funktionales Beamforming
- Asymptotisches Beamforming
- Adaptives Beamforming.

Zur Verifizierung des Algorithmus wurden umfangreiche Tests mit synthetischen FFT-Eingangsdaten durchgeführt. Dabei kamen vordefinierte Mikrofon- und Pixel-Koordinaten der akustischen Karte zum Einsatz, um die berechneten Ergebnis-Karten mit den erwarteten Referenzwerten zu vergleichen, ohne dabei auf die FPGA-Hardware zurückzugreifen. Die Testergebnisse zeigten eine erfolgreiche Implementierung mit minimalen Abweichungen zwischen den berechneten und erwarteten Karten. Dies bestätigte die Korrektheit des Algorithmus und bildete eine solide Basis für weitere Optimierungen und die Integration in die Gesamtarchitektur.

Implementierung der Signalvorverarbeitung im FPGA:

Parallel zur Softwareportierung wurde ein FPGA-Design entwickelt, das die zeitkritischen ersten Verarbeitungsschritte der akustischen Signale übernimmt. Dieser Hardwarepfad besteht aus drei funktionalen Komponenten:

- Datenakquise: Die Rohdaten der Mikrofonarray-Sensorik werden kontinuierlich mit einer Abtastrate von ca. 195 kHz über dedizierte Eingänge im FPGA erfasst und in geeigneten Puffern bereitgestellt. Hierbei übernimmt der FPGA auch die vollständige Steuerung und Taktgenerierung für die insgesamt 64 MEMS-Mikrofone (Micro-Electro-Mechanical-Systems). Die akustischen Daten werden über 32 I²S-Datenströme zeitgleich eingelesen. Diese anspruchsvolle Multikanal-Verarbeitung erfordert eine präzise Taktkoordination sowie eine latenzarme Pufferung der Eingangssignale zur Weiterverarbeitung in den nachgelagerten FPGA-Blöcken.
- Signalvorverarbeitung: In dieser Stufe erfolgt eine frequenzselektive Vorverarbeitung der Eingangssignale. Dazu gehören Windowing-Operationen (von-Hann), die Durchführung einer schnellen Fourier-Transformation (FFT), die in einem auf Performance und Ressourceneffizienz optimierten Schaltungsblock realisiert wurde, sowie Pufferung und für einen effizienteren SW-Zugriff notwendige Umsortierung der Mikrofon-Daten. Die FFT arbeitet dabei mit einer Blocklänge von 1024 Samples. Zur Verbesserung der zeitlichen Auflösung und zur Vermeidung spektraler Artefakte durch Blockgrenzen wurde eine 50%-ige Überlappung der Datenblöcke verwendet.

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

- Datenübertragung zur CPU: Die im FPGA vorverarbeiteten Mikrofon-Daten werden über die AXI-Bridge – einen integralen Bestandteil der SoC-Architektur – an die ARM-CPU weitergeleitet. Diese standardisierte Schnittstelle verbindet die Prozessorwelt (CPU) mit der programmierbaren Logik (FPGA) und weiteren Systemkomponenten wie den MIPI-Interfaces oder dem DDR-RAM-Controller. Für die eigentliche Datenübertragung wurde ein DMA-gestützter (Direct Memeory Access) Mechanismus eingerichtet, der es ermöglicht, Daten effizient und ohne aktive Beteiligung der CPU in den Hauptspeicher zu überführen. Dies reduziert die Latenz und entlastet die CPU, sodass die verfügbaren Rechenressourcen nahezu vollständig für die Verarbeitung im Beamforming-Algorithmus genutzt werden können.

Die klare funktionale Trennung zwischen FPGA-basierter Vorverarbeitung und softwareseitiger algorithmischer Berechnung ermöglichte eine effiziente Lastverteilung und eine gute Skalierbarkeit des Systems. Darüber hinaus wurden durch die enge Verzahnung beider Komponenten wertvolle Erfahrungen für die nachfolgende Systemintegration und Echtzeitoptimierung gesammelt.

Für die Durchführung erster Funktionstests und zur Validierung der bisherigen Softwareimplentierung wurde eine geeignete Hardwareumgebung geschaffen, bestehend aus dem in Arbeitspaket **AP G7** entwickelten Mikrofon-Array sowie einer zusätzlich entworfenen Adapterplatine, welche die Verbindung zum SoC-Developmentboard herstellt. Diese Kombination ermöglichte eine frühzeitige Inbetriebnahme des Gesamtsystems in einer Laborumgebung. Abbildung 3 zeigt die provisorische Testkonfiguration bestehend aus Developmentboard, Adapter- und Arrayplatine mit angeschlossenem Display und Kamera-Evaluation-Kit.

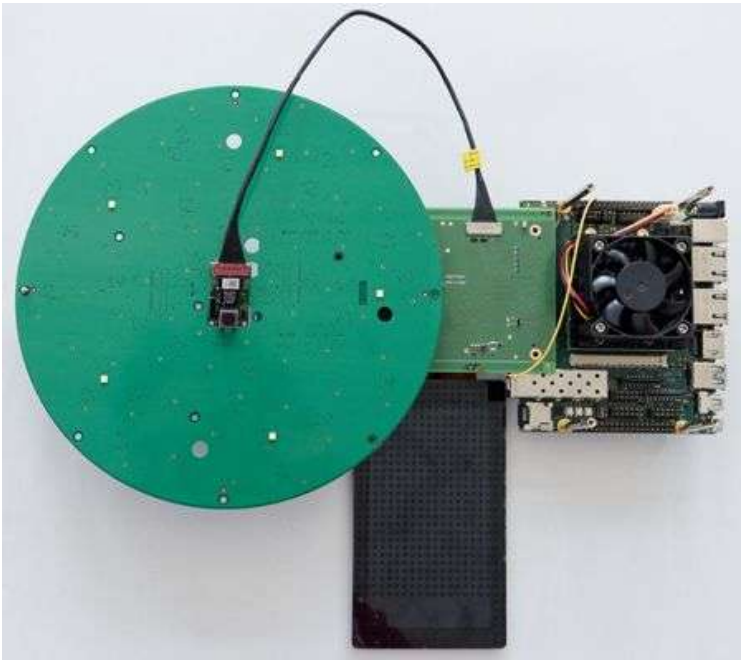

Abbildung 3: Testkonfiguration bestehend aus Developmentboard, Adapter, und Arrayplatine

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

Zur Erhebung erster Zwischenergebnisse wurde dieser vereinfachte Versuchsaufbau im Hörschallbereich gewählt, da in diesem Frequenzbereich bereits mit handelsüblichen Schallquellen (Lautsprecher / Mobiltelefone) gearbeitet werden kann. Die Implementierung beschränkte sich dabei auf die softwareseitige Berechnung des Beamformings auf der SoC-CPU. Die folgende Abbildung 4 zeigt exemplarisch die erfolgreiche Lokalisierung sowohl einer einzelnen Schallquelle als auch die Differenzierung zweier eng benachbarter Schallquellen. Als Quellen dienten Smartphones mit weißem Rauschen als Testsignal.

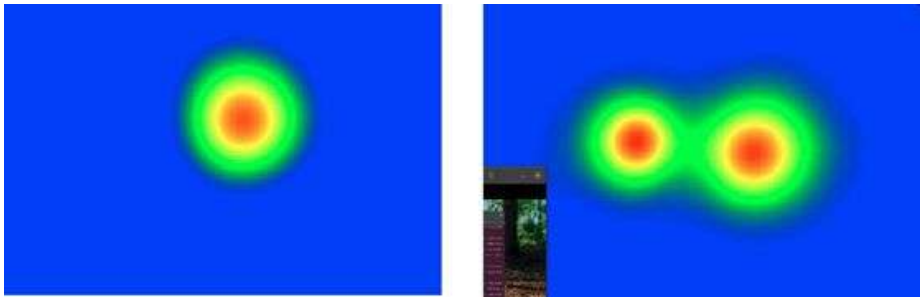

Abbildung 4: erste akustische Karten mit 150 x 100 Pixel (im Hörschallbereich) ohne Überlagerung mit dem optischen Kamerabild

Diese Implementierung des Power-Beamforming-Algorithmus lief zunächst als Single-Thread-Anwendung und konnte lediglich eine Bildrate von ca. 0,3 fps (entsprechend rund 3 Sekunden pro Bild) bei einer Auflösung von 150 x 100 Pixeln erreichen. Dabei wurde lediglich ein CPU-Kern der QuadCore-ARM-Architektur vollständig ausgelastet. Durch die gezielte Umstellung auf eine Multi-Thread-Anwendung konnte die Rechenlast effizient auf alle 4 CPU-Kerne verteilt und somit eine signifikante Steigerung der Bildwiederholrate auf etwa 1,2 fps erzielt werden.

Diese Optimierung stellt einen wichtigen Zwischenschritt dar und belegt die grundsätzliche Eignung des Systems für eine echtzeitfähige akustische Bildgebung. Ein begleitendes Benchmarking und Profiling des Algorithmus zeigte, dass ein Großteil des Rechenaufwands auf einen spezifischen Programmteil zurückzuführen ist, den wir als Steering-Vector-Projection bezeichnen. Im weiteren Projektverlauf, insbesondere im Zuge des Wechsels vom Hörschall- in den Ultraschallbereich, wurde daher die Strategie verfolgt, genau diesen rechenintensiven Funktionsblock als hardwarebeschleunigte Komponente in den FPGA auszulagern, um die Berechnungszeiten deutlich zu verkürzen.

Die Entwicklung der Arrayplatine (Arbeitspaket **AP G7**) und des Mainboards (Arbeitspaket **AP G8**) erfolgte in enger Koordination mit dem Projektpartner CS Instruments, da dieser für das Gehäusedesign und die spätere Fertigung verantwortlich war. Im Vordergrund standen dabei die mechanischen Schnittstellenanforderungen wie Abmessungen der Platinen, die Positionierung der Steckverbinder, Befestigungspunkte sowie notwendiger Cut-Outs (Aussparungen) für zusätzliche Komponenten. Beide Platinen werden über hochpolige Board-to-Board-Steckverbinder miteinander verbunden, was eine kompakte Bauweise sowie einen zuverlässigen elektrischen und mechanischen Verbund ermöglichte.

Die Arrayplatine wurde für den Einsatz im Ultraschallbereich mit einem Durchmesser von 20 cm ausgelegt – eine Größe, die sich im späteren Verlauf auch als ausreichend für eine präzise Quelllokalisierung im oberen und mittleren Hörschallbereich erwies. Insgesamt wurden 64 MEMS-Mikrofone mit PDM-Ausgang (Pulse-Density-Modulation) verbaut. Von den am Markt verfügbaren MEMS-Mikrofon-Typen konnte lediglich ein Modell gefunden werden, dessen Frequenzverlauf bis in den relevanten Ultraschallbereich im Datenblatt dokumentiert war. Die PDM-Signale von jeweils zwei Mikrofonen wurden durch insgesamt 32 PDM-zu-PCM-Wandler-ICs (Pulse-Code-Modulation)

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

zu TDM-Strömen (Time-Division-Multiplex) zusammengefasst und damit für die weitere Verarbeitung vorbereitet. Zusätzlich ist die Arrayplatine mit fünf leitungsstarken LEDs ausgestattet, die zur Ausleuchtung der Messszene dienen und über einen I²C-gesteuerten PWM-Controller (Pulse-Width-Modulation) in ihrer Helligkeit regelbar sind. Ein Umgebungslichtsensor erlaubt eine automatische Anpassung der Beleuchtungsintensität. Darüber hinaus wurden mehrere mechanische Aussparungen für externe Komponenten wie einen Laserentfernungsmesser und ein Kameramodul berücksichtigt. Im Zuge einer nachträglichen Änderung am Gehäusedesign musste eine Platinenrevision durchgeführt werden, um die Kompatibilität sicherzustellen. Abbildung 5 zeigt die Arrayplatine in Vorder- und Rückansicht.

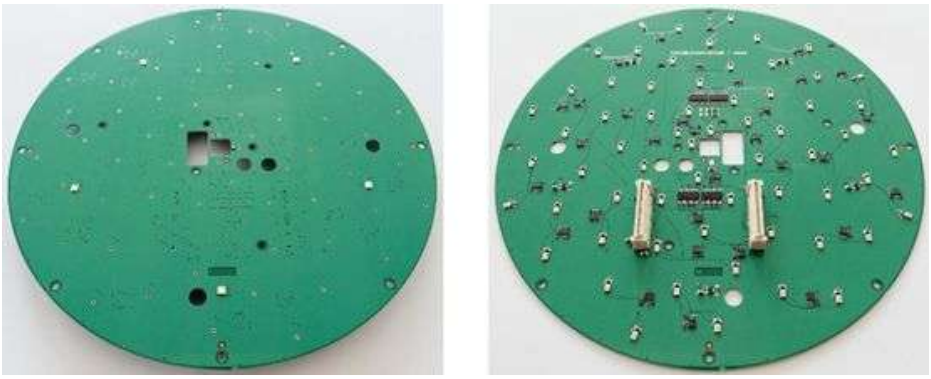

Abbildung 5: Arrayplatine in Vorder- und Rückansicht

Im ersten Schritt wurde als Zwischenlösung für die FPGA-seitige Ansteuerung der Hardware eine Adapterplatine entwickelt. In Verbindung mit dem Enclustra-Developmentboard und der fertiggestellten Arrayplatine konnten so zu einem frühen Zeitpunkt erste Tests und Evaluierungen am Gesamtsystem durchgeführt werden, noch bevor die Hauptplatine zur Verfügung stand. Die Adapterplatine ermöglichte bereits mit dem Developmentboard die frühzeitige Integration und Validierung der MIPI-Schnittstellen (Display und Kamera) im FPGA. Dies war besonders vorteilhaft, da die Integration der Kamera, wie in AP G9 näher beschrieben, ein sehr zeitintensiver Prozess war. Eine Revision der Leiterplatte war erforderlich, da die initiale MIPI-Pinbelegung der Kameraschnittstelle für ein einfacheres Layout fehlerhaft konfiguriert war. Abbildung 6 zeigt die Adapterplatine in Vorder- und Rückansicht.

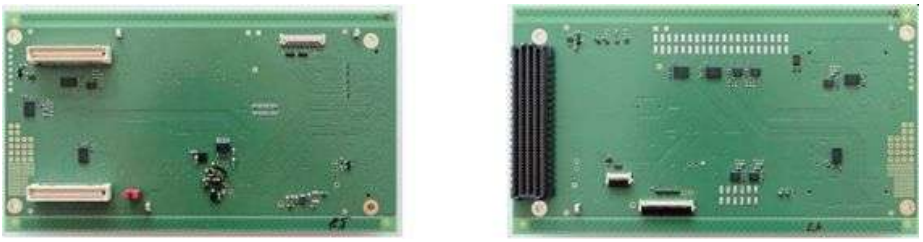

Abbildung 6: Adapterplatine in Vorder- und Rückansicht

Die entwickelte Hauptplatine wurde auf die Anforderungen des mobilen Betriebs und der systemseitigen Integration abgestimmt. Sie enthält mehrere Schaltnetzteile, die die Versorgungsspannung des Geräte-Akkus auf die benötigten Systemspannungen für das SoM und die Peripherie umsetzen. Ein integrierter USB-3.0-Switch ermöglicht die Auswahl zwischen verschiedenen USB-Schnittstellen (intern: 1x USB-A, extern: 1x USB-A und 1x USB-C), um eine maximale Anschlussflexibilität bei gleichzeitig begrenztem Platzangebot zu gewährleisten. Die interne USB-A-Schnittstelle eröffnet Möglichkeiten für weitere Anwendungsfälle, etwa zur dauerhaften Erweiterung des Systemspeichers über handelsübliche USB-Sticks oder zur Integration drahtloser Kommunikationsoptionen mittels Bluetooth- bzw. WLAN-Dongles.

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

Im Gegensatz zur externen USB-A-Buchse bietet sie dabei den Vorteil, dass die Funktionalität unauffällig in das Gerät integriert werden kann – ohne sichtbares Zubehör, das stören, verloren gehen oder versehentlich entfernt werden könnte. Auf diese Weise lassen sich zusätzliche Use-Cases realisieren, ohne das äußere Erscheinungsbild oder die Handhabung des Gerätes zu beeinträchtigen. Ergänzend steht eine moderne USB-C-Schnittstelle zur Verfügung, die auf dem USB-3.0-Standard basiert und damit eine zukunftsorientierte Konnektivität ermöglicht. Um die Systemkomplexität gering zu halten, wurde aus Designgründen bewusst auf die Unterstützung des Power-Delivery-Standards verzichtet – sowohl im Host- als auch im Device-Modus. Während der Entwicklung wurde ein ECM-Treiber (Ethernet Control Model) in das Embedded-Linux-System integriert, der über die USB-C-Schnittstelle eine virtuelle Ethernet-Schnittstelle bereitstellt. Diese ermöglichte eine einfache und stabile Remote-Verbindung zum Entwicklungs-PC – etwa zum Kopieren von Daten, für das Remote-Debugging oder zur komfortablen Fernkonfiguration des Systems. Um die Wartung und Entwicklung zu erleichtern, wurde ergänzend zum fest verbauten eMMC-Speicher des SoMs ein Micro-SD-Kartenslot auf dem Mainboard integriert. Dieser erlaubt den einfachen Zugriff auf das Linux-Bootsystem – insbesondere im Fehlerfall ein großer Vorteil, da das Boot-Image unkompliziert getauscht oder aktualisiert werden kann. Darüber hinaus wurde auf Wunsch des Projektpartners ein ModBus-Interface vorgesehen, um eine spätere Integration des Gerätes in industrielle Steuerungs- und Kommunikationsstrukturen zu ermöglichen. Abbildung 7 zeigt das Mainboard in Vorder- und Rückansicht.

Abbildung 7: Mainboard in Vorder- und Rückansicht

Im Verlauf der Entwicklung waren insgesamt drei Design-Revisionen der Hauptplatine erforderlich. Die erste Revision diente der Korrektur anfänglicher funktionaler und Layout bedingter Fehler. Die zweite Revision wurde erforderlich, nachdem der Projektpartner den Leiterplattenhersteller aufgrund örtlicher Nähe und preislichen Vorzügen wechselte und dadurch neue Designvorgaben einflossen. Insbesondere wich der Lagenaufbau der Leiterplatte von den bisherigen Parametern ab, sodass die Impedanzanpassung differentieller High-Speed-Leitungen, wie sie für das MIPI-Interface von Kamera und Display erforderlich sind, überarbeitet werden musste. Die dritte und letzte Revision hatte das Ziel die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) des Systems zu verbessern. Da der Projektpartner eine CE-Konformität des Gesamtsystems anstrebte, war eine erfolgreiche EMV-Prüfung unerlässlich. Diese wurde vom Projektpartner veranlasst und konnte mit positivem Ergebnis abgeschlossen werden und bestätigt damit die Eignung der entwickelten Elektronik für den industriellen Einsatz.

Ziel des Arbeitspakets **AP G9** war die Entwicklung der Module zur durchgängigen, echtzeitfähigen Erfassung und Übertragung der Mikrofondaten und Videobilder. Dazu gehörten die Integration des Kameramoduls, des Displays, ein Rekorder-Modul für die Mikrofondaten sowie die Schnittstellen zum Nutzer-Interface. Die Übertragungsprotokolle sollten in Abstimmung mit dem Projektpartner definiert und hinsichtlich ihrer Echtzeitfähigkeit und Datenraten umgesetzt werden. Ziel war es, alle relevanten Datenströme (Akustik, Video, Zusatzsignale) im Streamingmodus verfügbar zu machen und für die Leckageortung in Echtzeit nutzbar zu machen.

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

Die Umsetzung erfolgte in mehreren aufeinander aufbauenden Schritten:

- Mit der Verfügbarkeit der Adapterplatine konnten zunächst das Touch-Display und die Kamera erstmals in Betrieb genommen werden. Während die Integration des Displays samt Touch-Funktion vergleichsweise reibungslos verlief und eine flüssige Darstellung mit bis zu 60 Bildern pro Sekunde erlaubte, stellte sich die Einbindung der Kamera als deutlich komplexer heraus. Insbesondere die vollständige Inbetriebnahme der MIPI-Kamera erforderte einen intensiven und langwierigen Support-Prozess mit dem indischen Hersteller Econ Systems. Herausforderungen ergaben sich durch unzureichend dokumentierte Initialisierungs-sequenzen und Inkompatibilitäten bei der Schnittstellenkonfiguration. Erst nach mehreren Firmware- und Treiberanpassungen durch den Kamerahersteller konnte die Kamera erfolgreich eingebunden und im System nutzbar gemacht werden.
- Mit der Fertigstellung der Arrayplatine konnte anschließend auch die Ansteuerung der 64 MEMS-Mikrofone sowie die FPGA-basierte Vorverarbeitung der akustischen Signale integriert und validiert werden (siehe Abbildung 4). Damit waren alle wesentlichen Einzelkomponenten erstmals betriebsfähig und konnten über eine definierte API dem Projektpartner zur Weiterverarbeitung bereitgestellt werden. Die Zusammenführung der Teilfunktionen – insbesondere die Überlagerung der akustischen Lokalisierungsergebnisse mit dem Videobild und deren Ausgabe auf dem Display – wurde in der Folge durch den Projektpartner eigenverantwortlich umgesetzt.
- Nach Verfügbarkeit der Hauptplatine konnte das System mit minimalem Anpassungsaufwand (im Wesentlichen eine geänderte Pin-Zuordnung des SoM) vom prototypischen Aufbau mit Adapterplatine auf die finale Hardwarekonfiguration überführt werden. Mit dem Aufbau eines mechanisch stabileren, prototypischen Halterahmens (siehe Abbildung 8) konnten erstmals praxisnahe Funktionstests unter realitätsnahen Bedingungen durchgeführt werden. Der vorherige Testaufbau – bestehend aus Developmentboard mit Adapter- und Arrayplatine – war lediglich lose zusammengesteckt und mechanisch instabil, wodurch ein zuverlässiger Betrieb nur im stationären Laboreinsatz möglich war. Der neue Aufbau hingegen erlaubte eine sichere Fixierung der Komponenten und damit auch erste mobile Erprobungen. Als künstliche Leckagequelle kam eine handelsübliche Druckluft-Spraydose zum Einsatz, die im relevanten Frequenzbereich ein charakteristisches akustisches Spektrum erzeugt. Dies ermöglichte es, den zuvor implementierten Lokalisierungsalgorithmus im Rahmen praxisnaher Tests mit dem prototypischen Aufbau gezielt zu evaluieren und hinsichtlich Performance und Robustheit weiter zu verbessern.

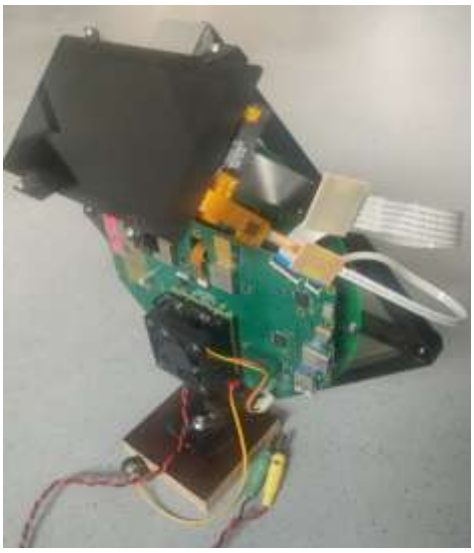

Abbildung 8: Protypischer Aufbau mit einem stabilen Halterahmen

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

Im Rahmen des Arbeitspaketes **AP G10** wurde der in AP G6 identifizierte rechenintensive Verarbeitungsschritt – die sogenannte Steering-Vector-Projection – für eine Hardware-Beschleunigung in den FPGA ausgelagert. Ziel war es, durch eine gezielte Aufgabenteilung zwischen FPGA und CPU eine deutliche Steigerung der Verarbeitungseffizienz und damit eine Steigerung der Bildwiederholrate für ein flüssiges echtzeitfähiges Gesamterlebnis zu erzielen. Die notwendigen Steering-Vektoren wurden vorab berechnet und in einen dedizierten RAM-Bereich übertragen, der ausschließlich an den FPGA-Teil des SoCs angebunden ist. Dieser Speicher ist für den CPU-Teil nicht direkt zugänglich, wodurch die Daten ausschließlich innerhalb des FPGA verarbeitet werden. Durch diese Architektur konnte ein latenzarmer, performanter und störungsfreier Zugriff während der Laufzeit sichergestellt werden. Die aktuellen Eigenvektoren aus den jeweiligen Eigensystemen werden für jeden Frequenzkoeffizienten über AXI-Transfers an den FPGA-Kern übertragen. Im FPGA erfolgt daraufhin die Berechnung des Teilergebnisses der Projection, welches anschließend von der Firmware ausgelesen wird. Die Firmware übernimmt daraufhin die Weiterverarbeitung dieser Teilresultate und berechnet aus ihnen die zugehörigen Anteile zur akustischen Karte für den jeweiligen Frequenzkoeffizienten. Die finalen Beamforming-Ergebnisse entstehen durch die frequenzweise Akkumulation aller Teilbeiträge. Diese Architektur führte zu einer signifikanten Reduktion des Rechenaufwands im CPU-Bereich und trug mit einer bis zu 10-fachen Erhöhung der Bildrate (FPS) wesentlich zur Erfüllung der Echtzeitanforderungen bei.

Neben der FPGA-Auslagerung wurden weitere algorithmische Optimierungen implementiert:

- Im adaptiven Beamforming wurde ein exponentieller Rechenschritt durch eine Lookup-Table-Approximation ersetzt. Dadurch konnte der Rechenaufwand drastisch reduziert werden, ohne die Ergebnisqualität merklich zu beeinträchtigen.
- Zur Vermeidung von Überläufen und zur gleichzeitigen Verbesserung der Pegelgenauigkeit wurde eine dynamische Skalierung der Integer-Werte realisiert. Diese ermöglicht es, die verfügbaren Bitbreiten effizient zu nutzen – auch bei stark unterschiedlichen Signalpegeln. So konnte sowohl die numerische Stabilität als auch die Genauigkeit bei der Amplitudenverarbeitung verbessert werden.
- Eine zusätzliche Pegelkorrektur basierend auf der Frequenzgang-Charakteristik der Mikrofone stellt sicher, dass die berechnete akustische Intensität über den gesamten Frequenzbereich hinweg normiert und vergleichbar dargestellt wird. Damit wird eine konsistente Auswertung der Leckagesignale unabhängig von frequenzabhängigen Empfindlichkeitsverläufen der eingesetzten Mikrofone ermöglicht.

Die für die Echtzeitfähigkeit des Systems ausschlaggebende Aktualisierungsrate der akustischen Karten wird maßgeblich durch verschiedene Systemparameter beeinflusst, die direkt den Berechnungsaufwand bestimmen. Dazu gehören unter anderem:

- Anzahl der Frequenzkoeffizienten
  (spektrale Bandbreite bzw. spektrale Auflösung)
  → Skaliert umgekehrt proportional zur Bildwiederholrate
- Anzahl der Map-Punkte
  (räumliche Auflösung der akustischen Karte)
  → Skaliert umgekehrt proportional zur Bildwiederholrate
- Anzahl der Eigensysteme
  (bei adaptiven Verfahren)
  → vergleichsweise geringen Einfluss auf die Bildwiederholrate

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

Für die Umsetzung eines echtzeitfähigen Systems mit flüssiger Visualierung ist daher ein sorgfältig austarierter Kompromiss zwischen spektraler Auflösung, Bandbreite, räumlicher Detailtiefe und Berechnungsaufwand erforderlich. Nur durch ein abgestimmtes Verhältnis dieser Parameter lässt sich eine robuste Balance zwischen akustischer Präzision und Systemperformance erzielen.

Wie im Projektplan vorgesehen, erfolgte die Bearbeitung der Arbeitspakete **AP G11** und **AP G13** (Aufbau der Demonstratoren der Revisionen I und II) in enger Abstimmung mit dem Projektpartner, parallel zu den zugehörigen Arbeitspaketen AP CS9 und AP CS 12 auf dessen Seite. Ein vom Projektpartner bereitgestelltes 3D-gedrucktes Prototypengehäuse (siehe Abbildung 9) ermöglichte die vollständige mechanische Integration sämtlicher Systemkomponenten. Im Gegensatz zu den zuvor ausschließlich im Labor nutzbaren Entwicklungsaufbauten stellt der Demonstrator I ein vollständig integriertes, mobil einsetzbares System dar, mit dem erstmals Erfahrungen bei der Durchführung praxisnaher Messungen gesammelt werden konnten.

Während der Integration der Leiterplatten in die Gehäuseteile des Demonstrators I zeigten sich einzelne Aspekte, die noch nachgebessert werden mussten, was wertvolle Erkenntnisse für das Gehäuse-Finaldesign lieferte.

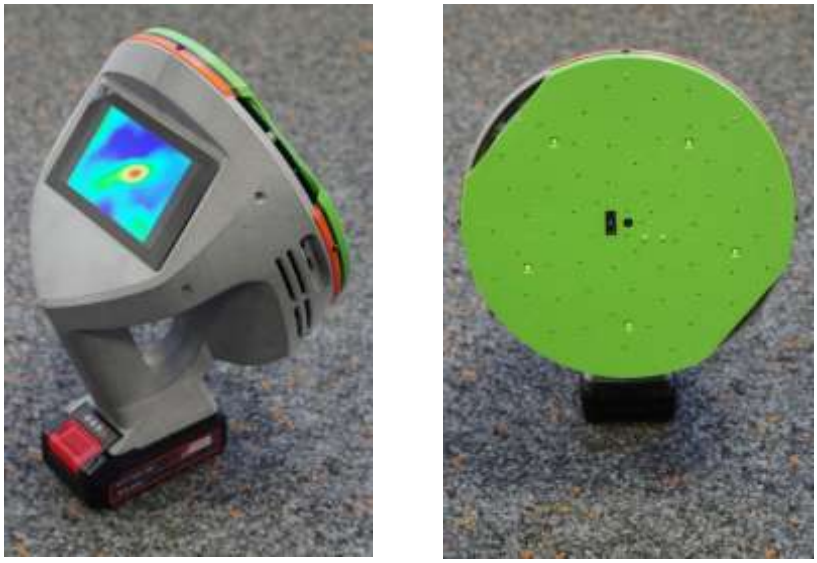

Abbildung 9: Demonstrator I in zwei Ansichten

In Folge der Nachbesserung dieser Punkte entstand der Demonstrator II (siehe Abbildung 10), der als Grundlage für die später durch das KMU umzusetzende Serienfertigung im Spritzguss-Verfahren diente.

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

Alle Gehäusevarianten wurden vom Projektpartner zur Verfügung gestellt, der im Projekt für Konzeption, Design und Fertigung der mechanischen Komponenten verantwortlich war. Für eine reibungslose Integration der Elektronik sowie für ausgiebige Tests unter realen Einsatzbedingungen war das Projektteam auf die Verfügbarkeit eines mobilen Aufbaus angewiesen. Entsprechend war die zeitnahe Bereitstellung geeigneter Gehäuseteile ein wesentlicher Beitrag für die technisch-funktionale Weiterentwicklung des Gesamtsystems.

Abbildung 10: Demonstrator II in 3D-Druck und Null-Serie im Spritzguss-Verfahren

Im Rahmen des Arbeitspakets **AP G12** war vorgesehen, das bestehende Gesamtsystem dahingehend zu erweitern, dass zusätzlich zur laufenden Signalverarbeitung auch eine kontinuierliche Aufzeichnung der Mikrofon-Rohdaten erfolgen sollte. Diese parallele Datenaufzeichnung sollte insbesondere zur nachgelagerten Analyse oder Validierung herangezogen werden können. Die Umsetzung dieser Funktionalität wurde jedoch nicht weiterverfolgt, da sich im Verlauf der Systementwicklung mehrere technische und konzeptionelle Hürden abzeichneten:

- Begrenzte Ressourcenverfügbarkeit:
  Es bestanden erhebliche Zweifel darüber, ob die verfügbaren Ressourcen im FPGA ausreichen würden, um zusätzliche Datenpfade zur Erfassung und Weiterleitung der Mikrofon-Rohdaten in Echtzeit zu implementieren. Auch auf Systemebene wäre mit einer signifikant höheren Datenlast zu rechnen gewesen, was im besten Fall nur eine Reduktion der Bildwiederholrate und damit eine Einschränkung der Echtzeitfähigkeit zur Folge gehabt hätte. Im ungünstigsten Fall hätte die Pipeline der Signalvorverarbeitung überlaufen können – also nicht mehr in der Lage sein können, die Daten rechtzeitig an die Firmware weiterzugeben, bevor neue Mikrofondaten anliegen. Um in einem solchen Fehlerfall eine Weiterverarbeitung zu verhindern, hätte ein geeigneter Synchronisierungsmechanismus zwischen FPGA und Firmware implementiert werden müssen. Der hierfür zu erwartende Entwicklungsaufwand stand jedoch in keinem sinnvollen Verhältnis zum potentiellen Nutzen.
- Fehlender Anwendungsnutzen im Produktivbetrieb:
  Aus Sicht des vorgesehenen Einsatzzweckes eines mobilen Messgerätes ergab sich zum damaligen Zeitpunkt kein klarer Mehrwert für die kontinuierliche Rohdatenaufzeichnung, die eine nachträgliche (und eventuell auch zeitintensive) Analyse der Messsituation ermöglicht hätte. Ein entsprechender Use-Case war für einen potentiellen Kunden nicht erkennbar, der den zusätzlichen Aufwand gerechtfertigt hätte.

Stattdessen wurde ein Alternativsystem entwickelt, dass ausschließlich der Erfassung von Mikrofonrohdaten diente. Dieses Alternativsystem bestand aus einer minimalistischen Kombination aus FPGA und Firmware, welche die Rohdaten in einem speziell aufbereiteten Format exportiert. Die erzeugten Daten konnten über einen vorhandenen Geräte-Emulator an die

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

etablierte Auswertesoftware NoiseImage4 übergeben werden und diente so der Validierung und qualitativen Beurteilung der Messergebnisse des Live-Systems.

Eine ursprünglich bereits vorgesehene, aber im Projektverlauf bewusst niedrig priorisierte Funktionalität – die Anzeige des vollständigen Spektrums eines Mikrofonkanals – wurde in dieser späten Entwicklungsphase implementiert. Hintergrund war der konkrete Bedarf seitens des Projektpartners, der diese Darstellung auf dem Systemdisplay für diagnostische Zwecke nutzen möchte. Die dazu erforderliche Erweiterung wurde sowohl im FPGA (zur kontinuierlichen Spektrumsberechnung) als auch in der Firmware (zur Übergabe an die Business-Logic) realisiert und ermöglicht die Darstellung des Kanalspektrums innerhalb der bestehenden Anzeigeumgebung. Abbildung 11 zeigt die grafische Benutzeroberfläche in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium mit erweiterter Funktionalität, einschließlich der Darstellung der akustischen Karte und der neu integrierten Spektrumsanzeige.

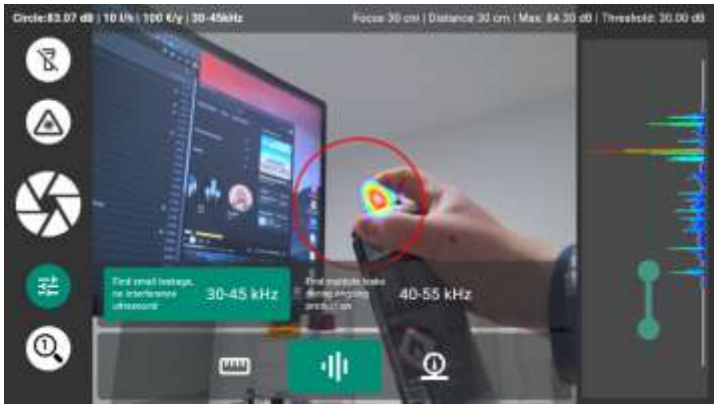

Abbildung 11: Darstellung der GUI auf dem Geräte-Display

Das Arbeitspaket **AP G14** diente der praxisnahen Validierung sowie der gezielten Optimierung des entwickelten Gesamtsystems unter realitätsnahen Bedingungen. Zu diesem Zweck stellte uns der Projektpartner einen Leckage-Teststand zur Verfügung (siehe Abbildung 12**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dieser Teststand simulierte unterschiedliche Druckluftleckagen und ermöglichte reproduzierbare Testszenarien zur Beurteilung der Ortungsleistung. Der Teststand umfasste sieben verschiedene Leckagequellen (L1 bis L7) sowie einen Durchflussmengenzähler (S0) zur Erfassung der Gesamtleckage:

- L1 – defekte Schnellkupplung
- L2 – Leckage an einer Flanschverbindung
- L3 – zwei undichte Leitungsverschraubungen
- L4 – defekte Endkappe an einer T-Verbindung
- L5 – mehrfach beschädigter Leitungsabschnitt (teilweise notdürftig mit Isolierband „repariert“)
- L6 – Anschlussblock mit sechs kurzen Schläuchen (undicht oder unvollständig verbunden)

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

- L7 – 10-fach Ventilverteilerblock mit individuell ansteuerbaren Schläuchen, die jeweils unterschiedlich stark perforiert waren

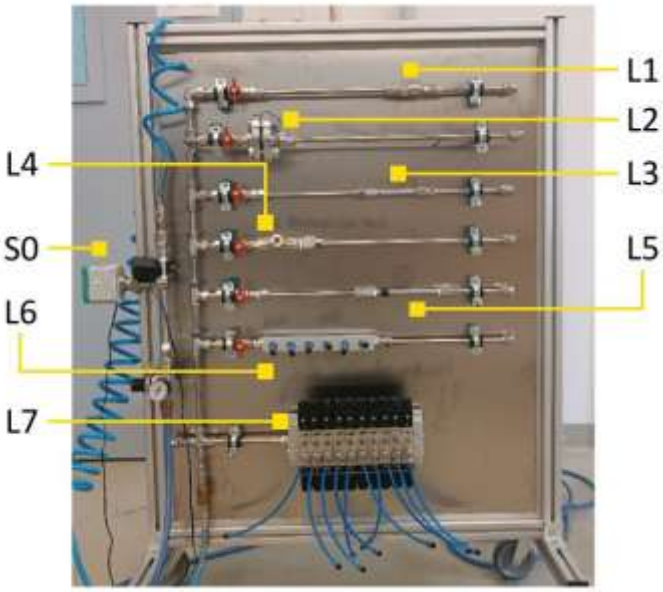

Abbildung 12: Druckluft-Leckage-Teststand mit multiplen simulierten Leckage-Arten

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

Nicht alle Leckagen eigneten sich gleichermaßen als Referenz für Ortungstests. Die Leckagen L2 und L4 erzeugten nur sehr schwache akustische Signale und lagen damit unterhalb der zuverlässigen Detektionsgrenze. Die Quelle L5 war dagegen so laut, dass sie die übrigen Leckagen überlagerte und so eine gezielte Quelltrennung erschwerte. Bei L6 war mindestens 1 Teilquelle ebenfalls zu leise für eine eindeutige Identifikation.

Bereits zu Beginn der Tests zeigten sich L1 und L3 als besonders geeignete Referenzquellen. Beide Leckagen erzeugten gut detektierbare, voneinander trennbare Schallsignaturen und ermöglichten damit eine effiziente Evaluierung der Quellseparation und Lokalisierungsgenauigkeit des Systems.

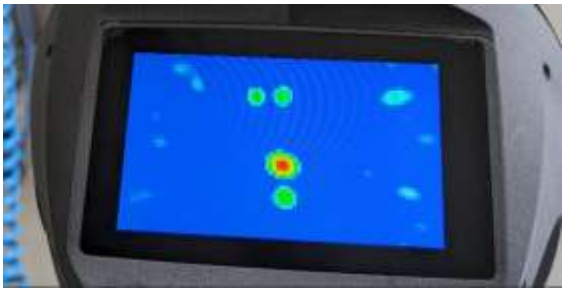

Abbildung 13: Messung L1 & L3 - Juni 2024

In Abbildung 13 ist eine an der horizontalen-Achse gespiegelte akustische Karte der Leckage-Quellen L1 und L3 zu sehen. Deutlich erkennbar ist eine Reflexion an der oberen Kante der Leckagewand.

Abbildung 14: Messung L1 & L3 - September 2024

Abbildung 15: Kartierung von L7

In den Abbildungen Abbildung 14 und Abbildung 15 konnte die akustische Karte bereits dem Kamerabild überlagert werden. Ein optisch-akustischer Abgleich war zu diesem Zeitpunkt jedoch noch nicht möglich, sodass die detektierten Quellen nicht exakt auf die realen Quellenpositionen projiziert werden konnten.

Für die Validierung der Messergebnisse wurde das alternative Geräteimage verwendet, das die Rohdaten der Mikrofone aufzeichnet und exportiert. Die Analyse dieser Daten erfolgte im Postprocessing mit der etablierten Auswertesoftware NoiseImage4. Wie beim finalen Endgerät wurde die Auswertung im Frequenzbereich von 35kHz bis 50 kHz durchgeführt.

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

Abbildung 16 zeigt eine Gegenüberstellung der Messsituation mit zwei unterschiedlichen Parametersätzen.

- Links – mit einem optimalen Parametersatz für maximale Genauigkeit:
  hohe Auflösung (1000 x 750 Bildpunkte), Adaptive-Beamforming, Integrationszeit von 4 s
- Rechts – mit einem reduzierten Parametersatz für Echtzeitanforderung:
  reduzierte Auflösung (150 x 100 Bildpunkte), Adaptive-Beamforming mit lediglich 8 Eigensystemen, Integrationszeit von 42 ms

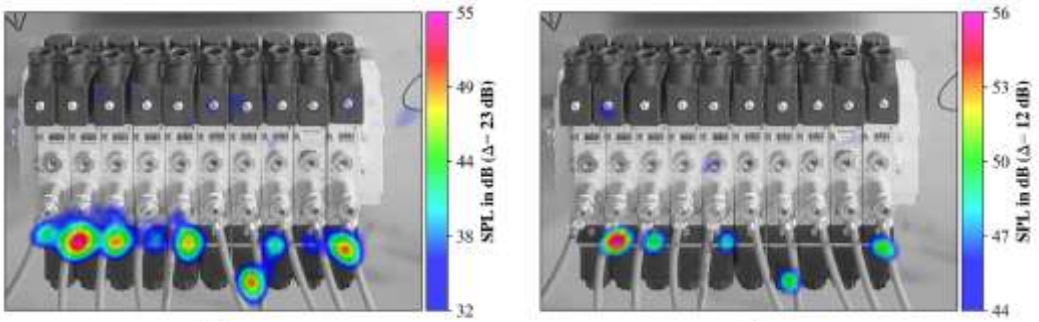

Abbildung 16: Gegenüberstellung in NoiseImage4 mit einem optimalen (links) und dem real (rechts) verwendeten Parametersatz gerechneter akustischer Karten

Die linke Darstellung in Abbildung 16 zeigt eine hochaufgelöste akustische Karte mit einem weichen Farbverlauf. Die hohe Integrationszeit von 4 Sekunden ermöglichte es dem adaptiven Algorithmus die Schallquellen gegenüber dem Umgebungsrauschen deutlich hervorzuheben. Der Dynamikumfang wurde sukzessive erhöht, bis die ersten Sidelobes sichtbar wurden, da diese Scheinquellen darstellen und in der Praxis nicht mehr von realen Quellen zu unterscheiden sind. Der abgebildete Dynamikumfang beträgt 23dB. Unter diesen Bedingungen konnten nahezu alle simulierten Leackage-Quellen des Teststandes detektiert und visualisiert werden.

Im Gegensatz dazu zeigt die rechte Darstellung das Ergebnis unter Verwendung des reduzierten Parametersatzes, wie er im Echtzeitbetrieb des finalen Gerätes Anwendung findet. Wie zuvor bereits erläutert, führt eine Verringerung der Anzahl an Bildpunkten direkt zu einer höheren Bildwiederholrate. Die gewählte akustische Bildauflösung von 150 x 100 Punkten stellt dabei einen sinnvollen Kompromiss dar. Sie ist hinreichend hoch, um auf einem 5,0 Zoll-Display eine klar strukturierte Darstellung zu ermöglichen, ohne dass die Visualisierung blockartig oder grob erscheint. Um Bewegungen oder sich verändernde Quellen ohne Verzerrungen oder Nachzieheffekte darstellen zu können, sind kurze Integrationszeiten unerlässlich. Die Integrationszeit von 42 ms wurde gewählt, da sie eine ausreichend kurze zeitliche Mittelung erlaubt und prinzipiell die Grundlage für eine Bildwiederholrate von bis zu 24 fps schafft. Dieses Potential konnte im Gesamtsystem jedoch nicht vollständig ausgeschöpft werden, denn weitere rechenintensive Verarbeitungsschritte des adaptiven Beamforming-Verfahrens ließen sich aufgrund begrenzter FPGA-Ressourcen nicht mehr in die Hardware auslagern und mussten stattdessen auf der CPU firmwareseitig verarbeitet werden. Dies führte zu einer deutlich erhöhten Systemlast und begrenzte die tatsächlich erreichbare Bildwiederholrate auf ca. 12 fps, wodurch die angestrebte Echtzeitfähigkeit nicht vollumfänglich erreicht wurde. Trotz der begrenzten Bildwiederholrate gelang eine flüssige Darstellung auch bei bewegten oder sich ändernden Schallquellen ohne erkennbare Artefakte wie Verzerrungen oder Nachzieheffekte. Der analysierte Dynamikumfang beträgt 12 dB bevor Sidelobes auftreten. Leisere Quellen wurden dabei systembedingt unterdrückt. Die resultierende akustische Karte zeigt eine sehr gute

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Abbildung 15 (dort noch ohne optisch-akustische Korrektur), womit die korrekte Funktion der Embedded-Implementierung bestätigt werden konnte.

2. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Personalausgaben und Abschreibungen verliefen planmäßig.

Der Sachmitteleinsatz je Position verlief planmäßig.

Die geplanten Mittel für Dienstreisen reduzierten sich auf nur einen Termin für vor-Ort-Testmessungen beim Projektpartner *CS Instruments* und einem seiner Kunden *Ganter Norm*. Weitere vor-Ort-Termine zu Abstimmungszwecken in Hard- und Softwareentwicklung erübrigten sich aufgrund der intensiven Nutzung elektronischer Mittel wie e-Mail, Telefon und kollaborativer Tools wie MS Teams und Git-Lab.

3. Bewertung der Ergebnisse in Bezug auf Nachhaltigkeit / Energieeffizienz / Klimaschutz

Das im Projekt entwickelte Leckage-Ortungssystem adressiert unmittelbar die in der Vorhabensbeschreibung genannten förderpolitischen Ziele im Bereich Nachhaltigkeit, Energieeffizienz und Klimaschutz. Wie dort dargestellt, entstehen in industriellen Druckluftsystemen erhebliche Energieverluste durch Leckagen, die eine wesentliche Quelle vermeidbarer Treibhausgasemissionen darstellen. Das in diesem Vorhaben entwickelte mobile Einhand-Leckage-Suchgerät ermöglicht eine im Vergleich zu bisherigen Systemen deutlich effizientere Leckageortung. Die vom Projektpartner implementierte benutzerfreundliche und einfache Handhabung unterstützt eine zügige Lokalisierung und Dokumentation von Leckagen und gestattet somit kürzere Wartungsintervalle. Das System leistet damit einen nachweisbaren Beitrag zur Reduktion druckluftbedingter Verluste.

Das in der Vorhabensbeschreibung unter Punkt I.2 abgeschätzte Potenzial zur Reduktion von Druckluftverlusten und damit verbundenen Energie- und CO_2-Einsparungen wird durch das im Projekt entwickelte mobile Leckageortungsgerät als technisch umsetzbar unterstützt. Das System kann als praxisgerechte Lösung einen direkten Beitrag zur Umsetzung dieser Einsparziele leisten.

Die nachstehende Tabelle gibt einen aktualisierten Überblick über die Verlustanteile und die damit verbundenen CO_2-Emissionen.

Jahr	**Industrieller Strom-verbrauch (El. Energie) / TWh**	**14 % Anteil für Druckluft-erzeugung / TWh**	**Energieverlust durch Leckagen (typ. 30 %) / TWh**	**Äquiv. CO_2-Emissionsfaktor inkl. Vorkettenemissionen in kg CO_2/kWh**	**zusätzliche CO_2-Belastung durch die Verluste / Mio. t**
2019	229	32,06	9,62	0,473	4,55
2020	217	30,38	9,11	0,429	3,91
2021	225	31,50	9,45	0,473	4,47
2022	212	29,68	8,90	0,498	4,43
2023	201	28,14	8,44	0,445	3,76
5-Jahres-Mittel	**217**	**30,38**	**9,11**	**0,464**	**4,23**

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

Tabelle 1: Energieverluste und CO2-Belastung in Deutschland durch Druckluftleckagen. Daten zu elektrischem Energieverbrauch und Emissionsfaktoren nach [BDEW 24][2] und [UBA 24][3].

In der Praxis sind Energieverluste durch Leckagen im Bereich von 10% bis 15% als ein realistisch erreichbarer Wert anzusehen. Bereits eine Reduktion der durchschnittlichen Leckageraten um die Hälfte (von 30% auf 15%) kann somit ein Einsparpotential von über 4,5 TWh elektrischer Energie und von über 2,1 Mio. Tonnen CO_2 jährlich aufweisen.

Basierend auf den in Abschnitt I.2 der Vorhabensbeschreibung dargelegten Berechnungen wird davon ausgegangen, dass sich durch den Einsatz der im Vorhaben entwickelten Technologie über eine Gerätelebensdauer von mindestens fünf Jahren Einsparpotenziale von insgesamt über 1.540 GWh elektrischer Energie und mehr als 747.000 Tonnen CO_2-Emissionen je Gerät realisieren lassen. Dies entspricht im Mittel einem CO_2-Einsparpotenzial von etwa 150.000 Tonnen pro Jahr pro Gerät. Diese Werte berücksichtigen ausschließlich die direkten Effekte der projektspezifischen Technologieentwicklung. Mögliche zusätzliche Einsparungen durch externe Skaleneffekte oder den Markteintritt weiterer Anbieter vergleichbarer Systeme sind hierin noch nicht enthalten.

In Summe kann durch die Projektergebnisse ein substanzieller Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz in der Industrie und zur Reduktion industrieller Treibhausgasemissionen geleistet werden, was wiederum als direkter Indikator für einen verbesserten Klimaschutz gewertet werden kann.

4. Bewertung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die geleisteten Arbeiten waren zur Erreichung des Projektzieles sinnvoll und notwendig und vom Umfang her der Aufgabe angemessen.

[2] BDEW / Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: Nettostromverbrauch nach Verbrauchergruppen. Online: https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/nettostromverbrauch-nach-verbrauchergruppen/

[3] Umweltbundesamt: Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen. Wie viel CO_2 verursacht eine Kilowattstunde Strom im deutschen Strommix? Online: https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Strommix

Edited with the trial version of
FlexiPDF
To remove this notice, visit
www.flexipdf.com

5. Voraussichtlicher Nutzen sowie Planungen für die nähere Zukunft

Die im Rahmen dieses Vorhabens gewonnenen Erfahrungen und technischen Erkenntnisse aus der Entwicklung eines mobilen Leckage-Suchgerätes werden bereits in laufende Nachfolgeprojekte überführt. Dazu zählt insbesondere das Projekt „EmBeam: Akustisches Embedded-Beamforming“ (EURONORM Förderkennzeichen: 49MF230014, Laufzeit: 01.03.2024 – 31.12.2025), das sich auf die Verarbeitung von Signalen im Hörschallbereich konzentriert. Aufgrund der niedrigeren Frequenzen im Vergleich zur Ultraschall-Anwendung des aktuellen Systems ist der Einsatz größerer Mikrofon-Arrays erforderlich, da die erreichbare untere Grenzfrequenz durch die Apertur des Arrays begrenzt wird.

Ein weiteres Entwicklungsprojekt ist ein stationäres System zur akustischen Überwachung in industriellen Fertigungsumgebungen: „Industrielle Akustische Kamera“. Hierbei handelt es sich um eine festinstallierte akustische Kamera, deren Ziel die kontinuierliche Zustandsüberwachung und Qualitätssicherung auf Basis akustischer Bildgebung ist.

Die Fertigstellung beider Systeme ist innerhalb der nächsten ein bis zwei Jahre vorgesehen. Aufbauend auf diesen Entwicklungen sollen in einem Zeitraum von zwei bis fünf Jahren Methoden des Embedded Machine Learning untersucht werden. Ziel soll es sein, eine automatisierte Analyse der akustischen Karten direkt auf den Embedded-Geräten zu ermöglichen, um Abweichungen oder Fehler in industriellen Prozessen automatisiert zu erkennen, zu klassifizieren, zu dokumentieren und zu melden.

6. Fortschritte bei anderen Stellen

Während des Vorhabenszeitraums sind zwar weitere Produkte (meist chinesischer Hersteller) auf dem Markt erschienen. Diese bieten jedoch, soweit von den Datenblättern herauszulesen ist, keine technischen Innovationen, sondern sind darauf ausgelegt, Marktanteile im unteren Preissegment zu gewinnen.

Weitere technische Innovationen in diesem Bereich sind uns nicht bekannt geworden.

7. Veröffentlichungen (erfolgt / geplant) nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Das im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte Gerät, das vom Projektpartner unter den Namen *LeakCam 600* vermarktet werden soll, wurde im Mai 2025 im Rahmen des BuildAir-Symposiums in Hannover im Kontext eines Fachvortrages zur akustischen Lokalisierung von Gebäudeundichtigkeiten erstmals erwähnt und kurz vorgestellt.

Das Ergebnis dieses Vorhabens wurde in einem Paper „SoC-based ultrasound system for real-time detection of pressurized gas leaks“ zusammengefasst. Es wurde für die InterNoise 2025 Konferenz im Mai 2025 eingereicht, etwas später akzeptiert und wird im August 2025 präsentiert.

Weitere Veröffentlichungen z.B. BeBeC 2026 oder auf GFaI eigenen Seminaren sind geplant.