

## Teil II Abschlussbericht

<b>zum Teilvorhaben:</b>	<b>Sensor-Entwicklung</b>
<b>im Verbundprojekt</b>	<b>Pyroelektrischer, hafniumoxid-basierter digitaler Sensor (POLAR)</b>
<b>Zuwendungsempfänger:</b>	<b>InfraTec GmbH Infrarotsensorik und Messtechnik</b>
<b>Förderkennzeichen:</b>	<b>13N15141</b>
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b>	<b>01.05.2019 – 31.12.2023</b>
<b>Berichtszeitraum:</b>	<b>01.05.2019 - 31.12.2023</b>
<b>Projektleiter:</b>	Robin Lehmkau, InfraTec GmbH Infrarotsensorik und Messtechnik Gostritzer Str. 61 - 63 01217 Dresden
<b>Berichtersteller:</b>	Robin Lehmkau, E-Mail: <a href="mailto:r.lehmkau@infratec.de">r.lehmkau@infratec.de</a>

## Teil II: Ausführlicher Sachbericht

Dieser ausführliche Sachbericht verzichtet im Wesentlichen auf die Wiederholung der Darstellungen, die schon in den Zwischenberichten 2019 bis 2022 enthalten sind. Der Fokus liegt auf den hinzugekommenen Ergebnissen von 2023 und auf die Gesamtzusammenfassungen der Resultate sowie den Schlussfolgerungen für die weitere Verwertung.

Über die Arbeitspakete hinweg gliedern sich die Aufgaben in drei Hauptarbeitsgebiete, das Sensorelement mit der pyroelektrischen, sensitiven Fläche, der ASIC für die Signalverstärkung und die digitale Schnittstelle sowie der Detektor, welcher beide Komponenten kombiniert und in Hinblick auf deren Einflussgrößen und die Applikation bewertet wird.

### Durchführung des Vorhabens

Die Durchführung des Projektes war geprägt durch starke zeitliche Verschiebungen. Dazu gehören die COVID-19-Pandemie mit den einhergehenden Lieferengpässen bei Halbleiter-Foundries, welches sich bei der ASIC-Entwicklung ausgewirkt hat und besonders der komplette Umzug des Fraunhofer IPMS in neue Gebäude nach dem Durchlauf der ersten technologischen Iteration. Aus letzterem ergaben sich gravierende Verzögerungen resultierend in einer Gesamtprojektlaufzeitverlängerung von 1,5 Jahren. Trotzdem konnte die zweite Iteration nicht in vollem Umfang hergestellt werden, es musste aufgrund von fehlender Anlagenverfügbarkeit beim Fraunhofer IPMS auf die Oberflächenvergrößerung oder zu Silizium alternativen Dotierstoffen verzichtet werden. Die Veränderung der Übergabepunkte der ursprünglichen Planung im Vergleich zur endgültigen Zeitplanung ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gegenübergestellt.

Tabelle 1: Anpassung der Übergabepunkte im Gesamtvorhaben (Planung Oktober 2022).

Bez.	Beschreibung Übergabepunkt	ursprüngliche Planung	finale Planung
Ü 1	Spezifikation Sensor und Demonstrator	Juli 19	Juli 19
Ü 2	Erprobungsmuster Sensorelement	Juni 20	Juni 20
Ü 3	Erprobungsmuster ASIC	Oktober 20	März 21
Ü 4	Erprobungsmuster digitaler pyroelektrischer Sensor	Januar 21	Juni 21
MS	<b>Meilenstein</b>	Februar 21	September 21
Ü 5	Optimiertes Sensorelement	Juli 21	Juni 23
Ü 6	Optimierter ASIC	Oktober 21	November 22
Ü 7	Digitaler pyroelektrischer Sensor	Dezember 21	September 23
Ü 8	Optimierter Demonstrator Raumluftüberwachung	Februar 22	Dezember 23

Durch die Laufzeitverlängerung konnten alle Arbeitspakete bis zum Testen des optimierten Detektors beim Endanwender Hugo Müller im Bereich der Raumluftüberwachung durchgeführt und die vollständigen Daten zum Projektende im Dezember 2023 bewertet werden.

### Arbeitspaket 1: Konzeption, Spezifikation und Entwurf

Ausführliche Informationen zum Arbeitspaket 1 sind im Zwischenbericht 2019 zu finden. Der pyroelektrische Sensor besteht im Wesentlichen aus dem Sensorelement und der integrierten Elektronik. Wesentliche Aspekte zum Stand der Technik und Konzeption beider Komponenten werden in diesem Abschnitt vorgestellt.

#### 1.1. Literaturrecherche

Zwei Beispiele für bekannte pyroelektrische Dünnschichten zum Zeitpunkt des Projektstarts sind Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) und Aluminium-Scandium-Nitrid (AlScN), die in den folgenden Literaturquellen eine Dicke von < 1 µm aufweisen:

- A. Berenov; P. Petrov; B. Moffat; J. Phair; L. Allers; R. W. Whatmore: "Pyroelectric and photovoltaic properties of Nb-doped PZT thin films". In: APL Materials (2021), DOI: 10.1063/5.0039593
- N. Kurz; Y. Lu; L. Kirste; M. Reusch; A. Žukauskaite; V. Lebedev; O. Ambacher: „Temperature Dependence of the Pyroelectric Coefficient of AlScN Thin Films“. In: physica status solidi (a) 215.13 (2018), S. 1700831. issn: 18626300

PZT ist jedoch nur bedingt für die praktische Anwendung in Sensoren geeignet, da es nicht RHoS-konform ist. Das Schichtsystem auf Basis von AlScN hat einen pyroelektrischen Koeffizienten von circa  $p = 10 \mu\text{Cm}^{-2}\text{K}^{-1}$  sowie eine Permittivität von  $\epsilon_r = 12$ . Damit führt es zu einer deutlich geringeren Gütezahl  $p/\epsilon_r$  als einkristallines Lithiumtantalat ( $p = 170 \mu\text{Cm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ,  $\epsilon_r = 47$ ).

Hinsichtlich der Elektronik für die Verstärkung kleinster Sensorströme, beispielsweise von Dioden, mit einem integrierten Schaltkreis gibt es einige Verfahren, wovon vielversprechende Ansätze in der folgenden Literatur vorgestellt werden:

- E. Voulgari; M. Noy; F. Anghinolfi; F. Krummenacher; M. Kayal: "Utopia: A Nine Decade Femtoampere Sensitivity Current Digitizer and its Application in Ionizing Radiation Monitoring", In: IEEE Trans. Nucl. Sci. (IEEE Transactions on Nuclear Science) (2018), DOI: 10.1109/TNS.2018.2803339
- M. Crescentini; M. Bennati; M. Carminati; M. Tartagni: "Noise limits of CMOS current interfaces for biosensors: a review", In: IEEE transactions on biomedical circuits and systems (2014), DOI: 10.1109/TBCAS.2013.2262998

Die genannten Schaltungen werden jedoch nicht direkt mit (hochkapazitiven) pyroelektrischen Sensorelementen untersucht, die besondere Anforderungen an die Elektronik stellen. Deshalb sind die analysierten Schaltungstopologien nicht direkt nutzbar und es sind Erweiterungen bzw. Modifikationen notwendig. Wichtige Parameter sind unter anderem der Eingangstrombereich, der benötigte Signal-Rausch-Abstand, die Einschwingzeit und die Prozesstoleranzen bei der Fertigung eines Wafers.

## 1.2. Sensorelement

In diesem Projekt wurden pyroelektrische Infrarot-Detektoren untersucht, welche auf Hafniumoxid ( $\text{HfO}_2$ )-Dünnschichten basieren, die mittels Atomlagenabscheidung (ALD) hergestellt werden. Dieses bietet die Möglichkeit, dreidimensionale (3d), oberflächenvergrößerte Substrate zu verwenden, um die Stromempfindlichkeit pro Sensorelement zu erhöhen. Das Material ist außerdem RoHS-kompatibel und es kann mit gängigen Halbleiterprozessen auf großen Silizium-Wafern ohne Einschränkungen hergestellt werden. Die damit verbundenen Vorteile sind die kostengünstige Massenfertigung und ein reduzierter Aufwand für Aufbau- und Verbindungstechnik. Bisher genutzte, pyroelektrische Schichten sind nicht CMOS-kompatibel und müssen in hybriden Prozessen aufgebracht werden.

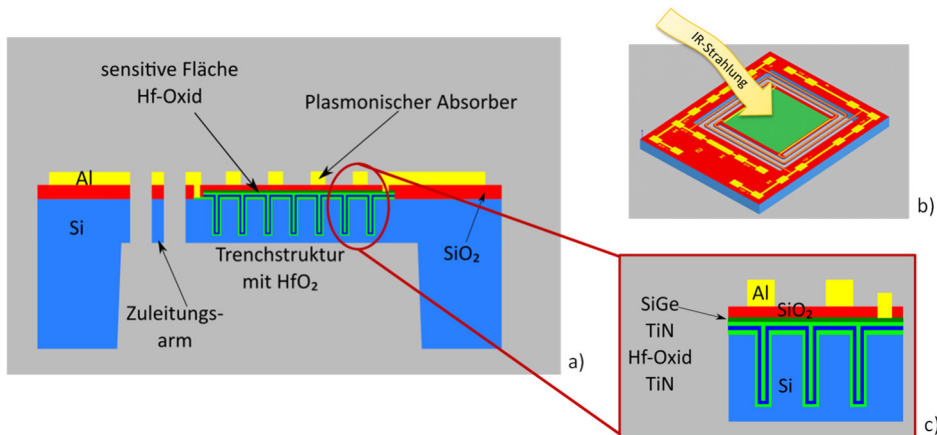


Abbildung 1: Konzept des Sensorelements mit flächenvergrößerter sensibler  $\text{HfO}_2$ -Schicht, plasmonischem Absorber sowie thermischer Isolierung durch eine an Stegen aufgehängte Si-Membranstruktur: (a) Querschnitt, (b) Schrägansicht, (c) Vergrößerung des sensitiven Bereichs.

Das Sensorelementkonzept fasst Abbildung 1 zusammen. Die eingestrahlte Infrarotstrahlung wird über einen thermischen Effekt detektiert, indem sich die an Stegen aufgehängte Silizium-Membran erwärmt. Die pyroelektrische Schicht erzeugt unter Temperaturänderung elektrische Ladungen, die über die Aluminiummetallisierung zur Signalverarbeitung weitergeleitet werden. Die Siliziummembran mit einer Dicke von ca.  $20 \mu\text{m}$  ermöglicht eine Oberflächenvergrößerung, indem vor dem Aufbringen des Schichtsystems Vertiefungen (Trenches) in die Oberfläche geätzt werden. Um die Lichtabsorption zu erhöhen ist eine plasmonische Absorberstruktur, die aus der Metallisierung, die auch für die Pads gebildet wird, vorgesehen. Diese Struktur erfordert somit keine zusätzlichen Prozessschritte und ist ein besonders kostengünstiger Lösungsansatz.

Die Randbedingungen für das Sensorelement, wie die maximalen Außenabmessungen von  $\leq 4 \text{ mm}^2$ , die minimale sensitive Fläche von  $\geq 1 \text{ mm}^2$  und eine angestrebte thermische Zeitkonstante von 150 ms orientieren sich an der Größenordnung von Komponenten in kommerziellen Sensoren, die in etablierten Infrarotmesssystemen eingesetzt werden. Der Entwurf der Strukturen wurde durch umfangreiche Simulationen begleitet, wie Analysen zur mechanischen Stabilität (Schwingung, Schock) sowie die spektrale Absorption des plasmonischen Absorbers (Unterauftrag ENAS). Zum thermischen Verhalten wurden Simulationen mittels COMSOL Multiphysics<sup>TM</sup> bei InfraTec durchgeführt (siehe Abbildung 2).

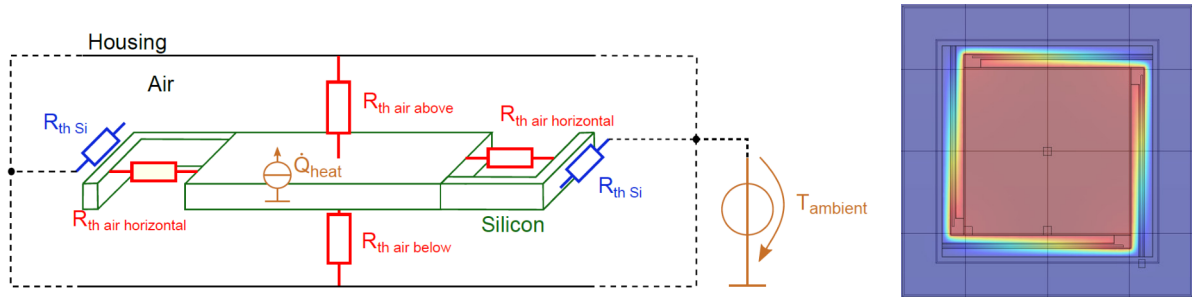


Abbildung 2: Vereinfachtes Modell zur Wärmeableitung der Siliziummembran (links) für transiente Analysen, Beispiel für Temperaturverteilung über das Sensorelement mittels Simulation mit FEM-Software COMSOL-Multiphysics (rechts).

Das übergeordnete Ziel ist die Maximierung der thermischen Isolation bzw. der Temperaturempfindlichkeit, damit sich das Sensorelement für eine auftreffende Infrarotstrahlung möglichst stark erwärmt. Es wurden vier Designvarianten (siehe Abbildung 3) für die Membranaufhängung sowie für den plasmonischen Absorber erarbeitet, so dass deren Kombination in der ersten Iteration in 16 realisierten Layoutvarianten mündeten. In der zweiten Iteration wurden die beiden thermischen Designs (MEMS 5 und MEMS 7) mit dem höchsten Temperaturhub der pyroelektrischen Schicht flächenoptimiert mit einer Absorbervariante umgesetzt.

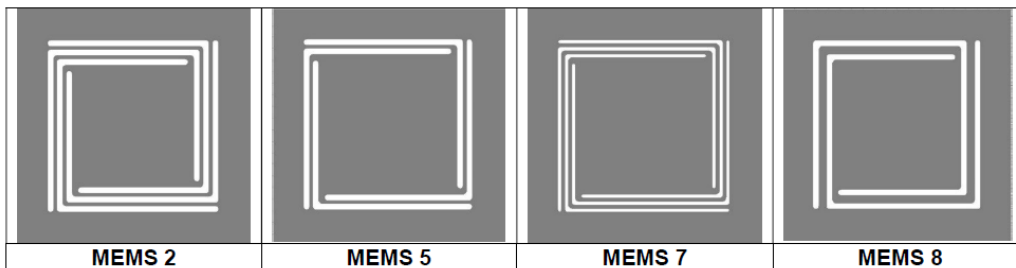


Abbildung 3: Simulierte und realisierte Strukturierungsvarianten des Sensorelements auf Basis von HfO<sub>2</sub>.

### 1.3. Plasmonischer Absorber

Die Simulationen des plasmonischen Absorbers wurden in einem Unterauftrag vom Fraunhofer ENAS durchgeführt. Das Ergebnis waren vier verschiedene Varianten entsprechend Abbildung 4. Sie wurden für ein möglichst hohes Absorptionsverhalten auf der Membran zwischen 3 und 5  $\mu\text{m}$  optimiert. Die Absorber B und C erreichen einen Absorptionskoeffizienten von  $> 80 \%$ . Für die Feinoptimierung der Strukturen erwiesen sich als kritisch, dass: (1) die optischen Eigenschaften aller Materialien im Schichtsystem inklusive der Grenzschichten nicht exakt bekannt und modellierbar waren und (2) die jeweiligen Schichtdicken und Geometrien den Toleranzen des Herstellungsprozesses unterliegen und besonders in der Metallschicht größere Abweichungen von der idealen Geometrie zeigten.

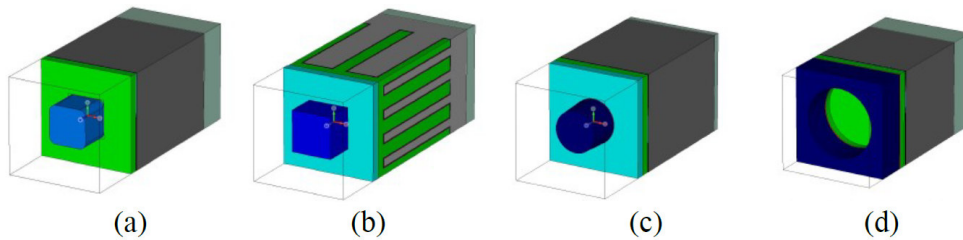


Abbildung 4: In CST-Microwave Studio modellierte Einheitszellen mit den blauen Absorberstrukturen (a) – (d) aus Aluminium, Poly-Silizium (grün), Silizium (grau) und der sehr dünnen Hafniumschicht zwischen Poly-Silizium und Silizium.

#### 1.4. ASIC

Der ASIC sollte gemeinsam mit dem Sensorelement in einem für Infrarotsensoren standardisierten Transistor Outline (TO)-Gehäuse integriert werden. Folglich mussten die Abmessungen hinreichend klein sein. Die wichtigsten Parameter des Lastenhefts für den ASIC sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Mithilfe der Schichtparameter aus Abschnitt 1.2 und den Abmessungen des Sensorelements lässt sich die erwartete Sensorkapazität von  $> 100 \text{ nF}$  für Hafniumoxid ermitteln, die an den ASIC angeschlossen wird. Die Referenzmessung für pyroelektrische Sensor erfolgt bei einer Modulationsfrequenz von  $10 \text{ Hz}$ . Um diese Frequenz mit einem Sicherheitsfaktor auswerten zu können, sollte die Abtastfrequenz  $\geq 50 \text{ Hz}$  sein. Außerdem werden in Infrarotmesssystemen häufig zwei (oder mehr) Messkanäle verwendet, um Einflüsse durch das Messsystem oder Umgebungsschwankungen zu minimieren.

Tabelle 2: Wesentliche Anforderungen an den integrierten ASIC.

Parameter	Wert
Sensorkapazität	$50 \text{ pF} \dots 250 \text{ nF}$
Abtastfrequenz	$\geq 50 \text{ Hz}$
Kanalanzahl	$\geq 2$
Abmessungen (Höhe x Grundfläche)	Maximal: $300 \text{ }\mu\text{m} \times 4 \text{ mm}^2$

#### **Arbeitspaket 2: Technologieentwicklung und Waferprozessierung**

Die Technologieentwicklung und Waferprozessierung wurden vollständig vom Fraunhofer IPMS und ZfM der TU Chemnitz durchgeführt. Während des Projekts gab es einen wöchentlichen Austausch der Projektpartner, um die Anforderungen und Wünsche für ein optimales Sensorverhalten bestmöglich mit den technologischen Randbedingungen zu vereinen und Kompromisse zu finden.

#### **Arbeitspaket 3: Charakterisierung**

Die Charakterisierung der Muster erstreckte sich über den gesamten Projektzeitraum. Dabei wurden verschiedene Eigenschaften des Sensorelements, wie unter anderem die Schichtdicke, Struktur und Dotierung des  $\text{HfO}_2$ , die Membrandicke, die Topologie des Sensorelements und der plasmonische Absorber variiert.

### 3.1 Anpassung Messplätze

Mithilfe der neuen Proberstation aus Abbildung 5, die im Rahmen des Projekts beschafft und in Betrieb genommen wurde, kann ein vollständiger Wafer automatisiert gemessen werden. Dazu zählen beispielsweise die Messung der ferroelektrischen Hysterese und die Untersuchung des Wake-up-Verhaltens der HfO<sub>2</sub>-Schichten.

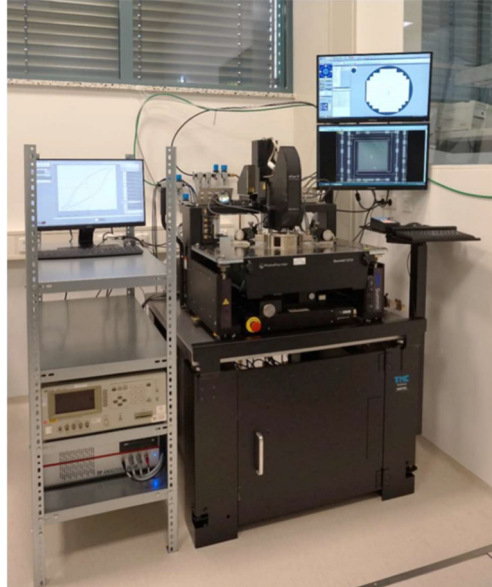


Abbildung 5: Proberstation „Summit 1200B-AP“ (FormFactor) und TF Analyzer 2000E (aixACCT).

### 3.2 Charakterisierung der HfO<sub>2</sub>-Schichten

#### 3.1.2 Gesamtzusammenfassung Sensorelement

Am Projektende wurden alle untersuchten Sensorelemente miteinander verglichen, wobei sie folgende Variationen aufwiesen:

- Dotierstoffe: Al-HfO<sub>2</sub>, La-HfO<sub>2</sub>, Si-HfO<sub>2</sub>,
- Schichtdicken: 20, 50 und 80 nm,
- Strukturierung: oberflächenvergrößert (3d), planar.

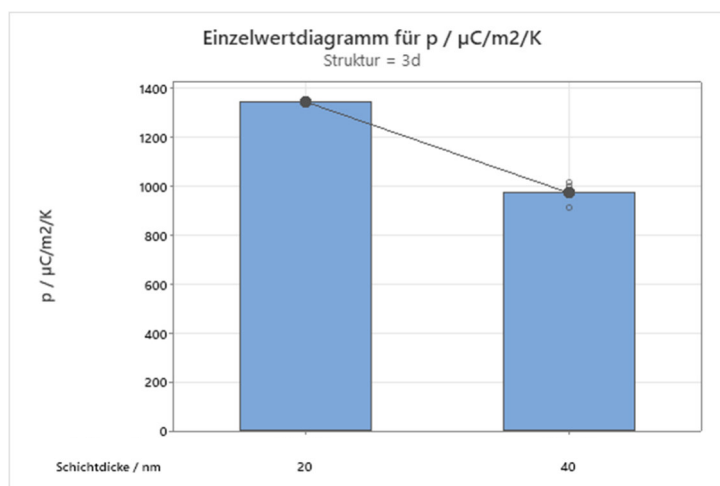


Abbildung 6: Effektiver Pyrokoeffizient für flächenvergrößerte Sensorelemente (bezogen auf den zweidimensionalen Flächenverbrauch) für 20 und 40 nm dicke Silizium-dotierte HfO<sub>2</sub>-Schichten.

Die Flächenvergrößerung hat zur gewünschten Vergrößerung des effektiven Pyrokoeffizienten (gerechnet auf planen Flächenverbrauch) mit Werten von bis zu 1300 μC/(m<sup>2</sup>K) geführt (siehe Abbildung 6). Mit größerer Schichtdicke nimmt der effektive Pyrokoeffizient ab. Die Flächen-

vergrößerung war in dieser Hinsicht ein Erfolg, jedoch der damit einhergehende Kapazitätsanstieg führt beim Detektor zu großen Nachteilen, die über die Auswerteelektronik nicht kompensiert werden konnten (siehe Folgeabschnitte).

Bei den planaren Schichten lag der Pyrokoeffizient im Bereich 32 bis 70  $\mu\text{Cm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . HSO erreichte höhere Pyrokoeffizienten als HLO oder HAO. Bei dem Verhältnis des Pyrokoeffizienten zur Schichtkapazität schnitten die dickeren Schichten besser ab (siehe Abbildung 6). Somit konnten über die Projektlaufzeit leichte Verbesserung im Verhältnis Pyrokoeffizient zu Kapazitätsbelag durch größere Schichtdicken erreicht werden.

Offene Punkte, die im Projektzeitraum nicht geklärt werden konnten, waren Lösungsansätze, um die Langzeitdegradation der Schichten zu reduzieren (ca. -5% je Dekade). Verbesserungen sind vermutlich in der Dotierstoffart und Prozessierung zu suchen. Für einen produktionsorientierten Prozess sind außerdem Verbesserungen der Defektdichte und Homogenität der Schichten über den Wafer erforderlich. Mit der Schichtzusammensetzung ändert sich auch das Polungsverhalten. Ein tieferes Verständnis der Wechselwirkung von Material und Polungsbedingungen ist vorteilhaft für eine Optimierung der Leistungsfähigkeit und einen effektiven Polungsprozess.

### 3.3 Spektrale Charakterisierung

Die spektrale Charakterisierung der verschiedenen Teststrukturen erfolgte bei InfraTec mit einem FTIR-Spektrometer (Bruker VERTEX 70). Das Reflexionsverhalten des  $\text{HfO}_2$ -Schichtsystems auf einer Membran ohne plasmonischen Absorber ist in Abbildung 7 illustriert. Dabei zeigt sich, dass die Wellenlängen der Minima und Maxima in der Simulation und Messung nahezu übereinander liegen. Die absolute Höhe des Reflexionskoeffizienten weicht jedoch lokal im zweistelligen Prozentbereich ab. In Abbildung 8 sind die gemessenen Reflexionskoeffizienten der Absorbervarianten zu sehen. Variante C erreicht gegenüber einer Membranstruktur ohne Absorber eine Verbesserung um 15%. Außerdem wird Variante C im Vergleich zu Variante B mit ähnlichem Reflexionsverhalten favorisiert, weil sich die Zylinderstruktur präziser fertigen lässt als die quaderförmige.

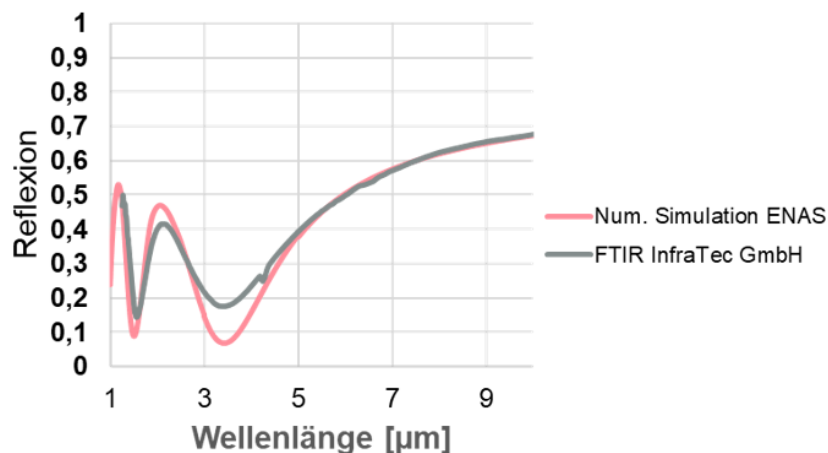


Abbildung 7: Vergleich der simulierten und gemessenen spektralen Reflexion der  $\text{HfO}_2$ -Membran ohne zusätzlichen Absorber.

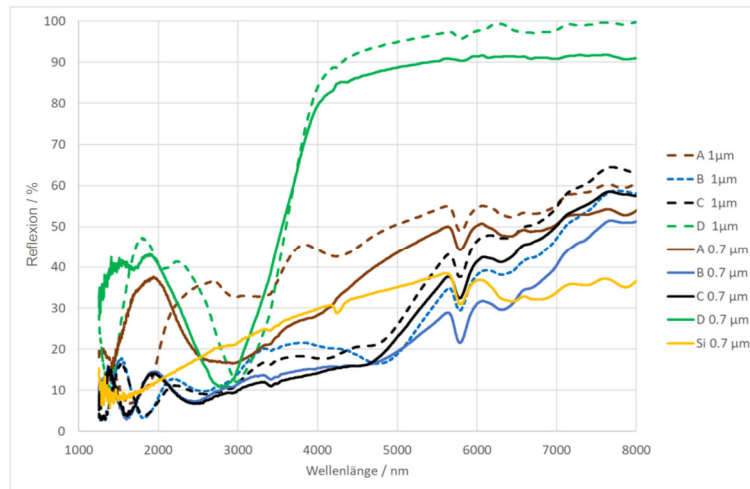


Abbildung 8: Messung der Reflexion der vier Absorbervarianten und von einer Referenzfläche ohne Absorber (Si) für verschiedene Aluminiumdicken von 0,7  $\mu\text{m}$  und 1  $\mu\text{m}$ .

## Arbeitspaket 4: Entwicklung digitaler Ausleseschaltkreis

Die Analysen der integrierten Schaltungstopologien zur Verstärkung geringer Sensorströme ohne einen Höchstohmwiderstand und anschließender Analog-Digital-Wandlung erfolgten in Kooperation mit der Firma AMAC als Projektpartner. Die AMAC erstellte das ASIC-Design für den 0,35  $\mu\text{m}$  Technologieknoten der XFab, deren Randbedingungen hinsichtlich Prozesstoleranzen, Strukturbreiten und Leckströmen beachtet werden mussten. Es wurden insgesamt zwei ASIC-Runs mit einem Multi-Level-Mask (MLM)-Run in der Foundry hergestellt. In der zweiten Version beseitigte die AMAC einige Layoutfehler und optimierte vor allem die Eingangsstufe hinsichtlich des Rauschverhaltens anhand von Vormessungen und Simulationen der Firma InfraTec. In diesem Abschnitt wird das Vorgehen zur Dimensionierung einzelner Schaltungskomponenten erläutert.

### 4.1 Entwicklung der analogen Signalverarbeitung

Die analoge Eingangsstufe des ASIC dominiert den Signal-Rausch-Abstand des gesamten Messsystems und muss speziell für pyroelektrische Sensoren angepasst sein. In Abstimmung mit der AMAC wurden mehrere Varianten wie ein Transimpedanzverstärker mit Höchstohmwiderstand, die Nutzung von p-n-Übergängen oder verschiedene Ausführungen von geschalteten Kapazitäten diskutiert und mit Simulationen sowie Berechnungen untersetzt. Die vielversprechendste Schaltungstopologie, die im Rahmen dieses Projekts verfolgt wurde, ist der Ladungsverstärker entsprechend Abbildung 9. Mit einer beispielhaften Integrationskapazität  $C_{\text{int}} = 1 \text{ pF}$  sowie einer Integrationszeit  $t_{\text{int}} = 1 \text{ ms}$  (entspricht näherungsweise der Abtastfrequenz  $f_{\text{sw}} = 1 \text{ kHz}$ ) ist vereinfacht ein wirksamer Widerstandswert von:

$$R_{\text{sw}} = \frac{U_s}{I_{\text{pyro}}} = \frac{t_{\text{int}}}{C_{\text{int}}} \approx \frac{1}{C_{\text{int}} \cdot f_{\text{sw}}} = 1,0 \text{ G}\Omega$$

realisierbar, der sich in der gewünschten Größenordnung analoger kommerzieller Sensoren befindet. Die Integrationskapazität ist zudem einstellbar, um den Dynamikbereich zu erhöhen und bei großen sowie niedrigen Eingangssignalen nutzbar zu sein.

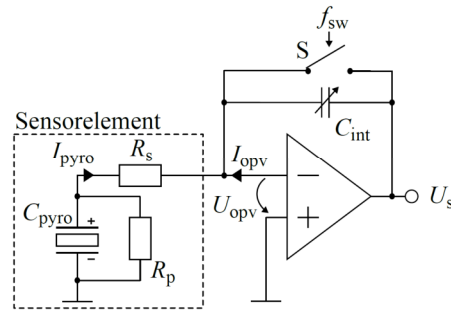


Abbildung 9: Ladungsverstärker mit dem Sensorelement (Serienwiderstand  $R_s$ , Parallelwiderstand  $R_p$ , Sensorkapazität  $C_{pyro}$ ), einem Operationsverstärker (Stromrauschen  $I_{opv}$ , Spannungsrauschen  $U_{opv}$ ) sowie einer Integrationskapazität  $C_{int}$ , die über den Schalter  $S$  mit der Frequenz  $f_{sw}$  periodisch entladen wird.

Das Ausgangsrauschen der geschalteten Kapazität mit dem Leitungswiderstand des Schalters ist effektiv:

$$N(C_{int}) = \sqrt{\frac{k \cdot T}{C_{int}}}$$

mit der Boltzmann-Konstanten  $k$  und der Temperatur  $T$  ab. Das OPV-Spannungsrauschen bildet die zweite relevante Rauschquelle entsprechend:

$$N(U_{opv}) \sim U_{opv} \cdot \left(1 + \frac{C_{pyro}}{C_{int}}\right)$$

Der Verstärkungsfaktor des Spannungsrauschens ist proportional zur Sensorkapazität, sodass dieses bei großen Sensorkapazitäten  $C_{pyro} \gg 1$  nF dominant wird und das SNR begrenzt. Die konkrete Implementierung des OPV mit den Transistoren und Kapazitäten sowie den davon abhängigen Rauschgrößen ( $U_{opv}$ ,  $I_{opv}$ ) und der Bandbreite erfolgte durch den ASIC-Dienstleister.

## 4.2 Analog-Digital-Wandlung

Der Delta-Sigma-ADC ist gut geeignet, niederfrequente Eingangssignale mit hoher Bitzahl bei gleichzeitig geringem Rauschen, Platzbedarf und Stromaufnahme zu digitalisieren. Ein ausführlicher Vergleich erfolgt im Zwischenbericht 2019. Mit der gewählten Auflösung von 16 Bit und einer Referenzspannung von circa 1 V ergibt sich ein effektives Rauschen von:

$$N_{rms}(ADC) = \frac{1V}{2^{16}-1} \cdot \frac{1}{\sqrt{12}} = 4,4 \mu V.$$

Allein der Rauschanteil der geschalteten Kapazität  $N(C_{int} = 1 \text{ pF}) = 64 \mu V$  ist größer als das ADC-Rauschen. Das verstärkte Spannungsrauschen des OPV, das Stromrauschen des OPV sowie der dielektrische Verlust der Sensorimpedanz erhöhen das Rauschen der Eingangsstufe weiter, weshalb die Auflösung von 16 Bit des ADC den Signal-Rausch-Abstand nicht signifikant verringern.

## 4.3 Digitale Signalverarbeitung und Schnittstelle

Als Kommunikationsschnittstelle wird I<sup>2</sup>C verwendet. Diese Schnittstelle besitzt eine ausreichende Geschwindigkeit von bis zu 3,4 MHz, um die 16 Bit Werte der vier Sensorkanäle zu übertragen und kann bis zu 127 Sensoren mit nur zwei Datenleitungen ansteuern.

Eine wichtige Eigenschaft des ASIC ist die Synchronisation der Abtastung des Messsignals. In IR-Messsystemen mit pyroelektrischen Sensoren, die nur für modulierte Strahlung empfindlich sind, wird häufig eine Frequenzanalyse durchgeführt, um die Messinformation an einer bestimmten Frequenzstelle mit möglichst hohem Signal-Rausch-Abstand zu ermitteln. Dazu wird beispielsweise eine Fast-Fourier-Transformation genutzt. Driftet die Abtastfrequenz mit der Zeit oder der Temperatur, ergeben sich Fehler bei der Berechnung der Signalamplitude im mehrstelligen Prozentbereich. Um diesen

sogenannten Leck-Effekt zu vermeiden und eine präzise Abtastfrequenz vorzugeben, ist eine Synchronisationsfunktion vorgesehen, die über ein externes Signal mit einem extra Anschluss gesteuert wird.

#### 4.4 Aufbau Testumgebung und ASIC-Test

Ausführliche Informationen zum ASIC-Layout und der ASIC-Beschaltung im Sensor sind im Zwischenbericht 2020 dokumentiert. Der digitale Sensor erforderte eine neue Messumgebung sowie angepasste Signalauswertung. Dafür wurde das Evaluation-Kit in Abbildung 10 entwickelt, um bis zu vier Sensoren parallel zu konfigurieren und die Daten auszulesen. Mithilfe der flexiblen Modulplatinen konnte der Sensor einfach in einem Infrarotmesssystem integriert oder für Testmessungen vor einem schwarzen Strahler platziert werden. Die Daten wurden anschließend per USB zu einem PC übertragen und mit einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) in den Frequenzbereich überführt, um damit die Empfindlichkeit und Rauschdichte auszuwerten.

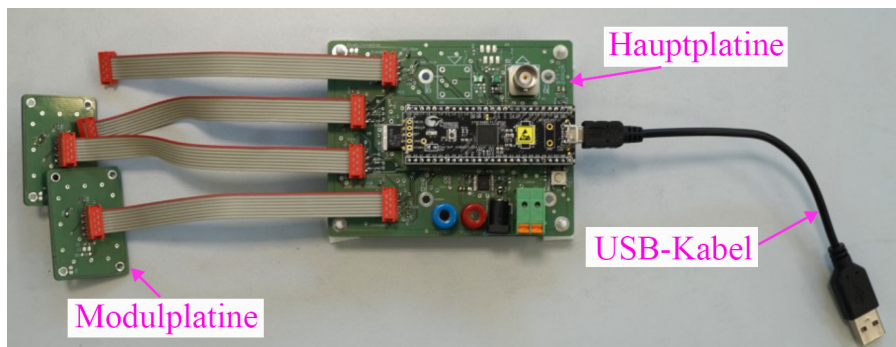


Abbildung 10: Evaluation Kit zur Kommunikation mit den digitalen Sensoren, die auf die Modulplatine gesteckt werden.

### Arbeitspaket 5: Herstellung von Erprobungs- und optimierten Mustern

#### 5.1 Anpassung AVT und Sensorentwurf

Insgesamt wurden drei Sensortypen aufgebaut: (a) im TO8-Gehäuse mit ASIC und Lithiumtantalat, (b) im TO8-Gehäuse mit ASIC und  $\text{HfO}_2$  und (c) im TO39-Gehäuse mit optimiertem analogen Verstärker und  $\text{HfO}_2$ . Die Ziele waren, das Sensorelement und den ASIC separat voneinander zu charakterisieren sowie den Sensor mit beiden neuen Komponenten.

Für die Messung der Sensorelemente wurde ein optimierter analoger Verstärker verwendet, wobei der Transimpedanzverstärker, der Spannungsfolger mit JFET und die Bootstrap-Schaltung als Schaltungstopologien betrachtet wurden, die in Abbildung 11 dargestellt sind (siehe Zwischenbericht 2020). Große Sensorkapazitäten  $C_{\text{pyro}}$  führen jedoch beim Spannungsfolger zu sehr großen Zeitkonstanten und einer sehr geringen Empfindlichkeit. Bei der Bootstrap-Schaltung liegt die Gate-Source-Spannung des JFET über dem Sensorelement an. Bei den hochkapazitiven  $\text{HfO}_2$ -Sensorelementen liegt der Parallelwiderstand nur im unteren Gigaohm-Bereich, wodurch der Leckstrom mehrere 100 fA betragen kann und zu einem hohen Spannungsoffset führt. Beide Schaltungsvarianten waren daher ungeeignet für Sensorkapazitäten  $\gg 1$  nF, da nur sehr kleine Höchstohmwiderstände  $R_g$  nutzbar sind.

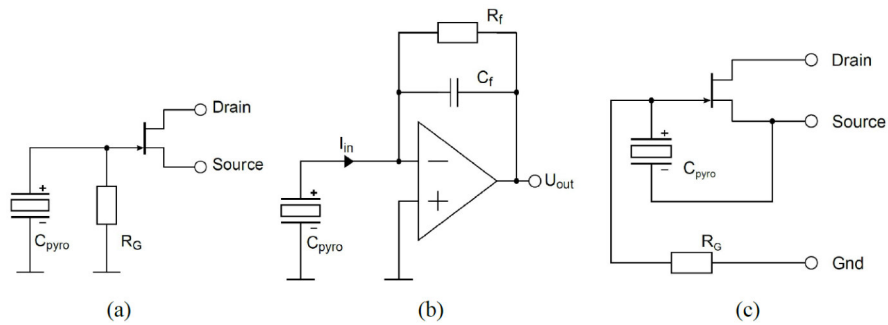


Abbildung 11: Schaltungsprototypen (Zwischenbericht 2020): (a) Spannungsfollower mit JFET, (b) Transimpedanzverstärker, (c) Bootstrap-Schaltung mit JFET.

Deshalb wurde der Transimpedanzverstärker für die Evaluierung der Sensorelemente gewählt, bei dem primär die wachsende Rauschdichte nachteilig ist für steigende Eingangskapazitäten. Der OPV soll möglichst rauscharm sein mit einer elektrischen Zeitkonstanten des Rückkoppelzweigs von  $\ll 1$  s und die Verstärkung des OPV-Offset wird vernachlässigt. Damit erreichen alle Varianten der planaren und 3d-strukturieren Sensorelemente mit der gleichen Elektronik in wenigen Sekunden einen stabilen Arbeitspunkt und sind auswertbar.

Die Rauschzusammensetzung eines TIA ist in Abbildung 12 illustriert, wobei die Größe der Rauschanteile von der konkreten Schaltungsdimensionierung und der Sensorimpedanz abhängt. Die wesentlichen Rauschquellen sind das thermische Widerstandsrauschen  $N(R_f)$ , das zu  $\sqrt{C_{pyro}}$  proportionale  $\tan\delta$ -Rauschen und das zu  $C_{pyro}$  proportionale Spannungsrauschen  $N(U_{opv})$ , das ab circa 10 nF dominiert. Deshalb sollte die Technologie und Sensorstruktur für ein verbessertes Rauschverhalten so ausgelegt werden, dass die Sensorkapazität, der Serienwiderstand, das OPV-Spannungsrauschen und der Verlustwinkel minimal werden.

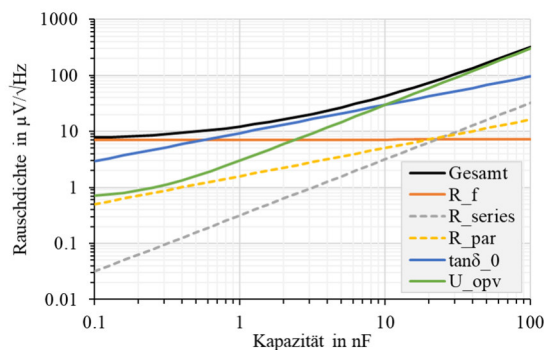


Abbildung 12: Zusammensetzung der Rauschdichte eines beispielhaften TIA in Abhängigkeit der Sensorkapazität bei 10 Hz.

Zwei Prototypen entsprechend Abbildung 13(a) und (b) dienen für die Charakterisierung des Aufbaus. Dabei wurden zunächst Sensorelemente aus einkristallinem Lithiumtantalat verwendet, die eine geringe Sensorkapazität sowie stabile und reproduzierbare Materialeigenschaften aufweisen. Anschließend erfolgte die Analyse des ASIC mit den HfO<sub>2</sub>-Sensorelementen. Beide Varianten benötigen nur drei Stützkondensatoren und ermöglichen damit einen einfachen Detektoraufbau.

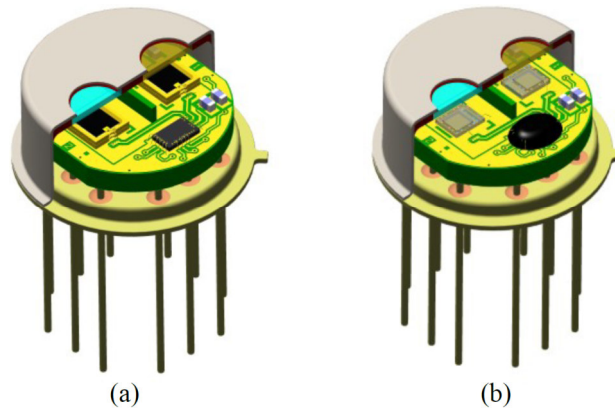


Abbildung 13: Modell der Detektorprototypen: Zweikanaliger ASIC mit (a) Lithiumtantalat und (b) Hafniumoxid (sowie angedeutetem Lichtschutz auf dem ASIC) bei halb geöffneter Kappe.

### 5.2 Aufbau von Sensormustern

Zwei Beispiele der realisierten Sensorprototypen sind in Abbildung 14 dargestellt. Sowohl beim digitalen als auch analogen Sensor erhöht sich das Rauschen für steigende  $C_{pyro}$ , unter anderem durch das verstärkte Spannungsrauschen des OPV.

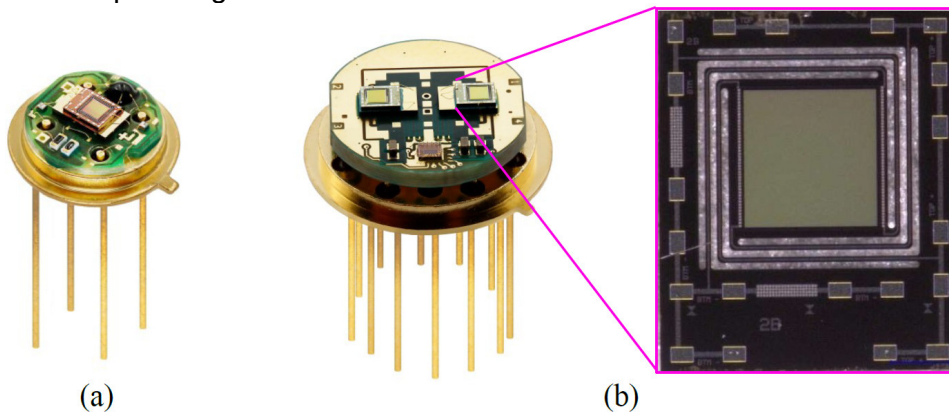


Abbildung 14: Realisierte Detektorprototypen: (a) Einkanaliger Sensor mit HfO2 im TO39-Gehäuse und (b) zweikanaliger Sensor mit HfO2 im TO8-Gehäuse sowie vergrößerter Aufnahme des Sensorelements.

Neben der Optimierung der elektrischen Parameter der Einzelkomponenten, wurde ein weiterer Ansatz zur Reduzierung der Sensorkapazität untersucht. Das Pyroelektrikum wurde mittig getrennt und die Teilelemente elektrisch in Reihe geschaltet. Entsprechend der Simulationen halbiert sich dabei der pyroelektrische Strom, während sich die Sensorkapazität gleichzeitig viertelt. Die Anteile des Spannungsrauschens des TIA und auch des Ladungsverstärkers im ASIC sind proportional zu  $C_{pyro}$ , wohingegen das  $\tan\delta$ -Rauschen nur proportional zu  $\sqrt{C_{pyro}}$  ist. Folglich ist bei dominantem Spannungsrauschen durch die Reihenschaltung ein SNR-Gewinn von maximal  $4 / 2 = 2$  erreichbar. Das Schaltungskonzept und das hergestellte Sensorelement sind in Abbildung 15 illustriert.

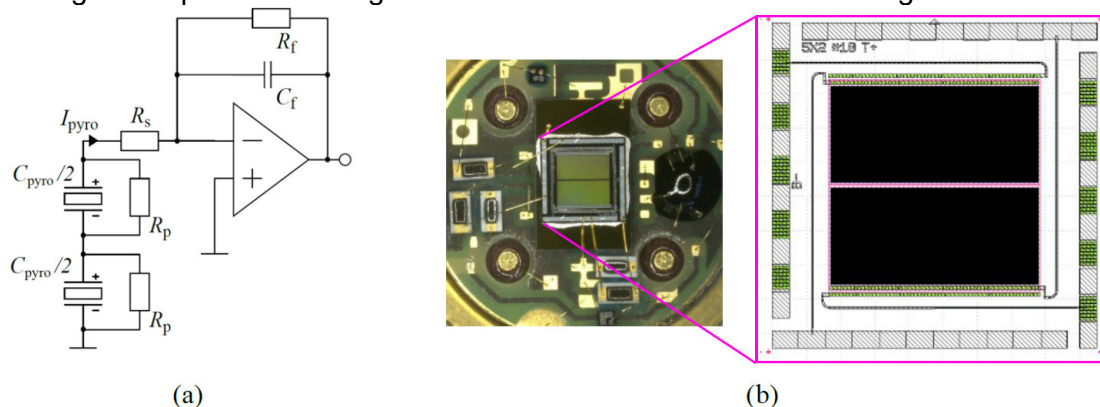


Abbildung 15: (a) Schaltungsprinzip des TIA mit Reihenschaltung der Teilelemente mit jeweils halber Grundfläche und (b) realisiertes Sensorelement in einem TO39-Sensor.

### 5.3 Sensorerprobung

Die Signal- bzw. Empfindlichkeitsmessungen wurden mit einem schwarzen Strahler bei 500 K ohne ein optisches Filter im Strahlengang durchgeführt. Ein mechanischer Chopper moduliert die emittierte IR-Strahlung mit 10 Hz. Für die Rauschmessung wurde der Sensor in einer optisch, mechanisch und thermisch geschirmten Umgebung platziert, um den Einfluss externer Störungen zu minimieren. Die Signalauswertung des TIA erfolgte mit einem Lock-in-Verstärker SR850 von Stanford Research Systems und die Signalabtastung sowie Berechnung der Rauschdichte mit einem PXI-System von National Instruments. Beim digitalen Sensor wurden die abgetasteten Daten direkt zu einem PC oder PXI-System übertragen und per FFT ausgewertet.

#### 5.3.1 Sensorelement

Für das Sensorelement wurden verschiedene Dotierungsvarianten, Schichtdicken und Strukturierungsformen betrachtet (siehe Abschnitt 3.2). Abbildung 16 zeigt die Messergebnisse und Simulationen ausgewählter Sensorelemente über der Frequenz. Dabei wird deutlich, dass eine dickere Schicht von 50 nm oder sogar 80 nm zu einem geringeren Rauschen führt. Außerdem hat eine planare pyroelektrische Schicht eine um mehr als eine Größenordnung geringeren Kapazitätsbelag, weshalb auch das Rauschen deutlich geringer ist.

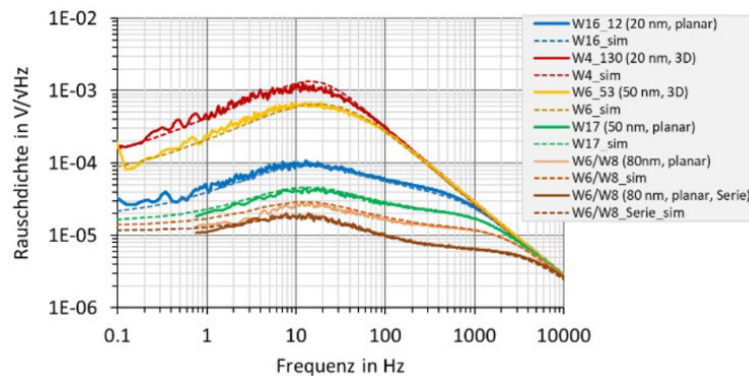


Abbildung 16: Mit LTSpice simulierte und gemessene Frequenzgänge der Rauschdichte von verschiedenen Sensorelementen.

Im Laufe des Projekts musste sich aufgrund der verzögerten Inbetriebnahme der Ätzanlage für 3d-Strukturen nach dem Umzug des Fraunhofer IPMS auf das planare Design beschränkt werden. Ziel war es dann im Rahmen der Technologie möglichst dicke Schichten abzuschneiden. Dabei sind jedoch die Nachteile, dass sich die Abscheidezeit deutlich erhöht und der pyroelektrische Koeffizient mit der Schichtdicke sinkt, wodurch kein signifikanter SNR-Gewinn erzielt werden konnte.

Die Reihenschaltung von zwei Teilelementen (W6/W8\_serie) auf einer Sensormembran reduzierte das Rauschen wie erwartete, aber nur um den Faktor zwei und nicht um das theoretische Maximum von Faktor vier. Der Grund dafür ist, dass bei Sensorkapazitäten  $< 10$  nF das  $\tan\delta$ -Rauschen einen dominanten Anteil am Gesamtrauschen bildet. Dieses verringert sich wie beschrieben weniger als das Spannungsrauschen, weshalb die Serienschaltung nur bei hochkapazitiven dreidimensionalen Strukturen das SNR erhöht.

Zusammenfassend ist die Detektivität von Sensoren mit  $\text{HfO}_2$  mit bis zu  $1,8 \cdot 10^7 \text{ cm}\sqrt{\text{HzW}^{-1}}$  circa eine Größenordnung unterhalb von Lithiumtantalat (LT). Das gilt sowohl für planar als auch dreidimensional strukturierte Sensorelemente. Ein Vergleich der Parameter ist in Tabelle 3 zu finden. Dabei ist zu betonen, dass die Temperaturempfindlichkeit der  $\text{HfO}_2$ -Sensorelemente aufgrund des optimierten mechanischen Designs sogar höher ist als bei Lithiumtantalat mit einem Chiphalter. Dadurch erzielt planares  $\text{HfO}_2$  mit einem geringeren pyroelektrischen Koeffizienten eine nahezu identische Empfindlichkeit  $R_v$ . Dennoch ist der Kapazitätsbelag selbst des planaren Designs aufgrund der geringen Schichtdicke deutlich höher als von LT, wodurch das Verhältnis von Empfindlichkeit zur Rauschdichte sowie die resultierende spezifische Detektivität:

$$D^* = \frac{R_v}{N} \cdot \sqrt{A}$$

niedriger ist. Beim 3d-Design führt die Oberflächenvergrößerung zu einer Vervielfachung der Empfindlichkeit, aber auch der Sensorkapazität, wodurch das SNR und die spezifische Detektivität nicht signifikant steigen. Bei den vorgestellten Messergebnissen muss die Membrandicke berücksichtigt werden, die über einen Wafer und zwischen verschiedenen Wafern um mehrere 10 % streut und damit den Vergleich einzelner Sensorelemente erschwert.

Tabelle 3: Übersicht der Leistungsfähigkeit von planarem und dreidimensional strukturierten HfO<sub>2</sub> im Vergleich zu LT.

	C <sub>A</sub> in nF/mm <sup>2</sup>	p in μC/m <sup>2</sup> /K	R <sub>v</sub> @ 10 Hz in V/W	N @ 10 Hz in μV/√Hz	D* @ 10 Hz in cmVHz/W
3D, 50 nm	174	911	87.000	550	1,6 · 10 <sup>7</sup>
planar, 50 nm	8	60	11.000	63	1,8 · 10 <sup>7</sup>
Lithiumtantalat	0,1	176	11.500	8	2,9 · 10 <sup>8</sup>

Mithilfe der Messergebnisse und optimierten Simulationsmodelle für hochkapazitive pyroelektrische Sensoren wurden neue Gütezahlen für das Sensorelement eingeführt. Für planare Designs mit Sensorkapazitäten im Bereich von C<sub>pyro</sub> = 0,1 ... 10 nF gilt:

$$F_{\text{planar}} = \frac{p}{\sqrt{\tan\delta \cdot C_{\text{pyro}}}} \cdot \frac{p}{\sqrt{\tan\delta \cdot \epsilon \cdot d^{-1}}}$$

Mittels Schichtdicke d und dielektrischem Verlust kann das D\* optimiert werden. Für C<sub>pyro</sub> >> 10 nF gilt die Gütezahl:

$$F_{3D} = \frac{p}{C_{\text{pyro}}} \cdot \frac{p}{\epsilon \cdot d^{-1}}$$

Die Kapazitätsgrenzwerte sind abhängig von der Dimensionierung der Verstärkerelektronik (OPV-Spannungsrauschen, Höchstohmwidstand) und müssen entsprechend angepasst werden, wenn stark abweichende Komponenten benutzt werden.

### 5.3.2 Digitaler Sensor

Die Messergebnisse des digitalen Sensors aus Abbildung 14(b) mit LT und HfO<sub>2</sub> sind in Abbildung 17 dargestellt. Das relative Verhalten der Empfindlichkeit folgt der Funktion:

$$V_{\text{out}} = \frac{1}{C_{\text{int}}} \int I_{\text{pyro}}(t) dt.$$

Die Rauschdichte fällt wie erwartet mit steigender Integrationskapazität (siehe Funktionen aus Abschnitt 4.1). Die Empfindlichkeit befindet sich mit über 40.000 VW<sup>-1</sup> in der gewünschten Größenordnung von kommerziellen Sensoren mit TIA. Das Problem ist aber, dass die Rauschdichte des digitalen Sensors sowohl mit LT als auch HfO<sub>2</sub> mehrere Größenordnung über kommerziellen Sensoren liegt. Die zwei Hauptursachen sind: (1) die gefalteten Rauschanteile durch die geschaltete Kapazität und (2) das höhere Rauschen des OPV der analogen Eingangsstufe.

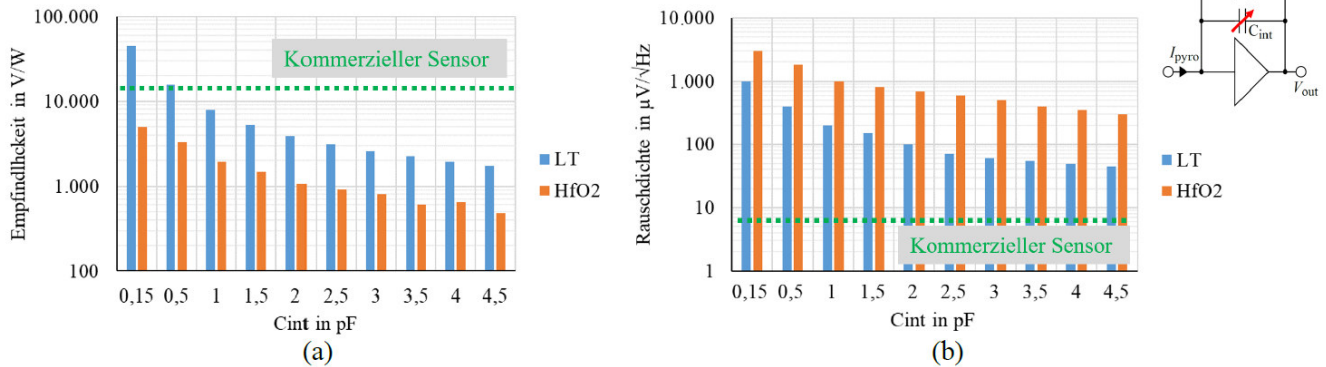


Abbildung 17: Messergebnisse (a) der Empfindlichkeit und (b) der Rauschdichte des digitalen Sensors mit ASIC sowie Lithiumtantalat (LT) bzw. Hafniumoxid (HfO<sub>2</sub>) für verschiedene Integrationskapazitäten  $C_{int}$  der analogen Eingangsstufe.

Die resultierende spezifische Detektivität des ASIC mit HfO<sub>2</sub> befindet sich in der Größenordnung von  $2 \cdot 10^5 \text{cm}\sqrt{\text{Hz}/\text{W}}$  und ist in der aktuellen Form nicht wettbewerbsfähig.

Der ASIC mit LT kann für niedrig auflösende Systeme verwendet werden, die aber nicht dem Zielmarkt von InfraTec entsprechen. Hugo Müller konnte die Funktionsfähigkeit anhand der CO<sub>2</sub>-Messung in einer Messkammer über der Zeit demonstrieren (siehe Abbildung 18). Dabei erfolgte die Messung parallel zu analogen Standarddetektoren. Die Kurven (rot, hellgrün und blau) der neuen Sensoren sind von starkem Rauschen überlagert und ermöglichen keine präzise Bestimmung der Gasanteile in einem Serienprodukt.

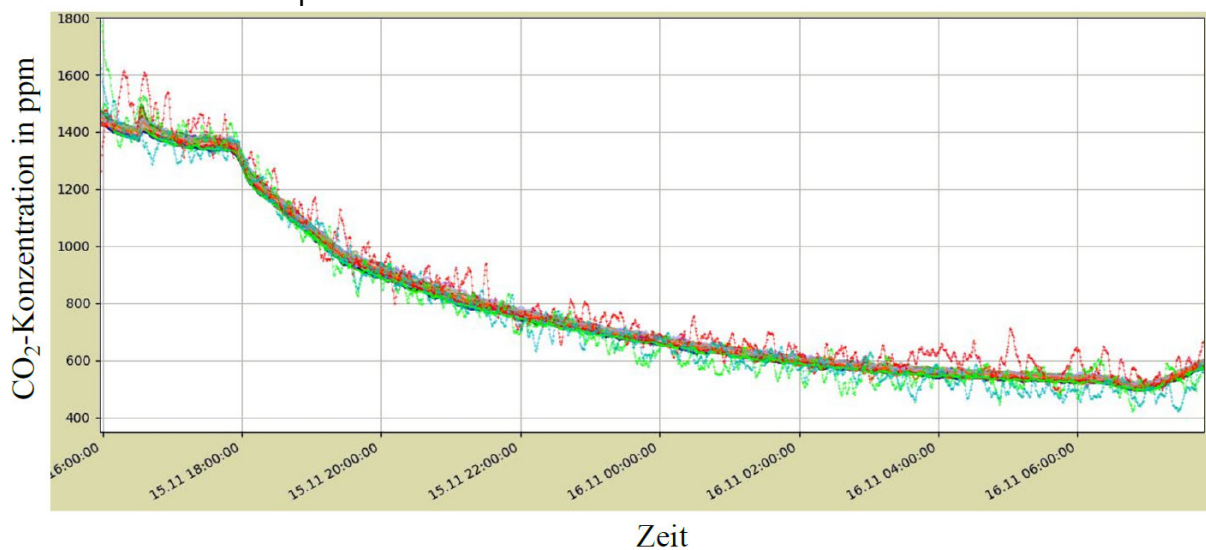


Abbildung 18: Messung des CO<sub>2</sub>-Anteils in einer Gasmesskammer mit mehreren Sensoren über 24 Stunden. Die verrauschten Kurven sind die Messergebnisse der digitalen Sensoren im Vergleich zu den weniger streuenden Verläufen kommerzieller analoger Sensoren.

## Arbeitspaket 6: Demonstrator und Erprobung

Wesentliche Aspekte zur Entwicklung des Demonstrators sind im Zwischenbericht 2022 zusammengefasst.

### 6.1 Entwicklung und Aufbau Demonstrator

Das Design des Demonstrators erfordert nur wenige zusätzliche Komponenten, aufgrund der bereits im digitalen Sensor integrierten Signalkonditionierung und Digitalisierung. Die Ansteuerung des Sensors sowie Auslesen der Daten basiert auf einer I<sup>2</sup>C-Kommunikationsschnittstelle. Dieses Standard-Protokoll ist in sehr vielen Mikrocontrollern implementiert. Das Mikrocontroller Board *Arduino Uno* ist preisgünstig, leistungsfähig und verfügt über eine große Nutzer-Gemeinschaft. Deshalb wurde dieses als Basis für den Demonstrator ausgewählt. Für die *Arduino*-Plattform gibt es zahlreiche PC-

Softwarepakete sowie eine umfangreiche Entwicklungsumgebung. Das standardisierte Layout ermöglicht zudem einen einfachen Wechsel verschiedener *Arduino*-Boards.

Für den Demonstrator wurde, wie beim Evaluation-Kit, ein modularer Ansatz gewählt, bei dem die gegenüberliegende Detektor- und Strahlerplatine auf einer Hauptplatine montiert werden (siehe Abbildung 19) **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Die Hauptplatine ist wiederum auf das *Arduino* Board aufgesteckt, ähnlich wie ein *Arduino* Shield. Mit einem USB-Kabel kann der *Arduino* an einen PC angeschlossen werden. Die Haupt- und Detektorplatine ist grundsätzlich nur eine Umverdrahtung der Leitungen des *Arduinos* zum Detektor-Pin mit einigen Sicherungselementen wie Strombegrenzungswiderständen. Bei der Strahlerplatine wird ein LED-Treiber verwendet, mit dem der Strom durch den IR-Strahler in Frequenz und Amplitude reguliert werden kann.

Die Designs der einzelnen Platinen wurden mit der Software *Pulsonix* erstellt und anschließend bei einem externen Leiterplattenhersteller gefertigt. Die Bestückung und Inbetriebnahme erfolgte dann wieder bei InfraTec. Das *Arduino*-Board wurde zuletzt auf einer Plexiglas-Platte montiert.

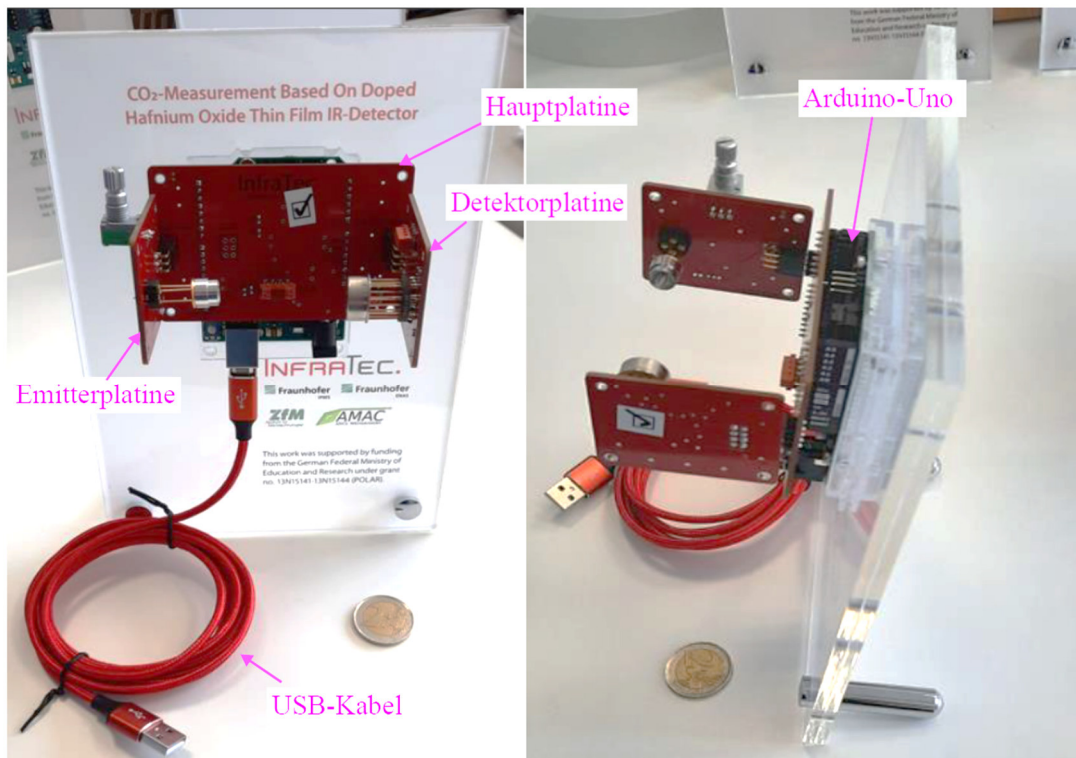


Abbildung 19: Frontal- und Seitenansicht des realisierten Demonstrators mit den neuentwickelten Platinen (Emitterplatine, Hauptplatine, Detektorplatine), die auf einem *Arduino*-Board und einer Plexiglas-Halterung montiert sind.

## 6.2 Erprobung Demonstrator

Der Demonstrator wurde erfolgreich in Betrieb genommen. Eine neu entwickelte Software mit grafischer Benutzeroberfläche (GUI) ermöglicht die einfache Konfiguration des Strahlers und Detektors. Die Messdaten werden dann wie in Abbildung 20 im Zeit- und Frequenzbereich (an der Stelle der Modulationsfrequenz) in Echtzeit angezeigt.

Der Strahler kann beispielsweise ein- und ausgeschaltet, sowie die Strahlungsleistung modifiziert werden. Dies ermöglicht es, mithilfe von Handbewegungen das Detektorsignal zu modulieren oder die Strahlungsintensität um mehr als eine Größenordnung zu variieren. Eine typische Messsituation ist, dass der Strahler elektrisch mit z.B. 5 Hz moduliert wird. Ein Kanal des Detektors misst mithilfe eines Schmalbandfilters genau die optische Leistung mit der Wellenlänge der  $\text{CO}_2$ -Absorptionsbande bei  $4,27 \mu\text{m}$ . Der zweite Kanal misst einen Referenzpunkt des Spektrums ohne Absorption bei typischerweise  $3,95 \mu\text{m}$ . Der Quotient beider Signale lässt dann auf eine Änderung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration schließen.

Für eine einfache Demonstration kann man mit der menschlichen Atemluft die  $\text{CO}_2$ -Konzentration zwischen Strahler und Detektor verändern. Im unteren rechten Diagramm von Abbildung 20 ist die

Änderung des Signalverhältnisses beider Sensorkanäle deutlich erkennbar, wenn man vor dem Detektor für einige Sekunden ausatmet.

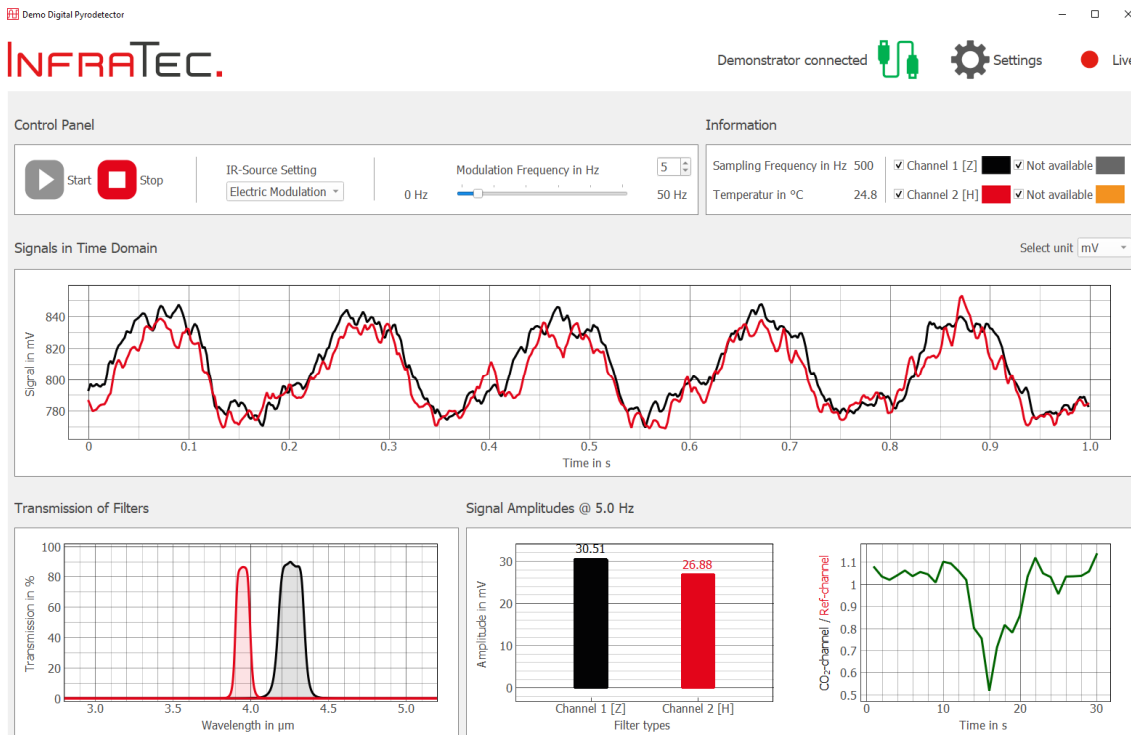


Abbildung 20: Graphische Benutzeroberfläche des Demonstrators mit Zeitsignal von zwei Kanälen, Transmissionskoeffizienten der optischen Filter, Effektivwert der Sensorsignale bei 5 Hz sowie Quotient der Effektivwerte.

## Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeit

Das Ziel des Förderprojekts POLAR war die Entwicklung eines pyroelektrischen Sensors mit einem neuartigen Sensorelement und integrierter, digitaler Verstärkerelektronik. InfraTec konnte aufgrund der langjährigen Erfahrung bezüglich der Funktionsfähigkeit, Herstellung und Anwendung von pyroelektrischen Sensoren wesentliche Impulse zum Design, den vorliegenden Randbedingungen und die Dimensionierung von Sensorelement und Elektronik geben. Dazu gehören eine Analyse des Marktes von Systemen auf Basis pyroelektrischer Sensoren sowie deren Aufbau, Signal-konditionierung und -auswertung. Darüber hinaus hat das Know-how und die Fertigungskapazitäten von InfraTec dazu beigetragen, die Sensorprototypen in kurzer Zeit und hoher Qualität vor Ort in Dresden herzustellen. Auch die Charakterisierung der Sensoren hinsichtlich des Signal-Rausch-Abstands und der spezifischen Detektivität wurde nach den gleichen Standards wie bei kommerziellen analogen Sensoren durchgeführt. Mithilfe der erweiterten Sensormodelle und theoretischen Betrachtungen konnten die einzelnen Komponenten im Laufe des Projekts weiter optimiert werden. Des Weiteren hat InfraTec das Gesamtprojekt koordiniert, sodass die Schnittstellen und Ziele für die einzelnen Projektpartner konkret definiert waren und in den regelmäßigen Diskussionsrunden Fortschritte im Projekt bis zum finalen CO<sub>2</sub>-Demonstrator erzielt werden konnten.

## Nutzen, Verwertbarkeit und Fortschritt und Verwertbarkeit

Das Forschungsprojekt POLAR hat den wissenschaftlichen Stand zur Herstellung pyroelektrischer Sensoren auf Basis eines CMOS-kompatiblen HfO<sub>2</sub>-Schichtsystems erweitert und neue Erkenntnisse bei der Sensormodellierung und dem Sensorverhalten hervorgebracht. Die einzelnen Fortschritte und gewonnenen Erkenntnisse sind konkret:

- Das neu entwickelte pyroelektrische Sensormodell ermöglicht die Analyse des thermischen und elektrischen Verhaltens verschiedener Topologien des Sensorelements und Ausführungen der Sensorelektronik, um neue Sensortypen aufzubauen oder bestehende Sensoren zu optimieren. Das beinhaltet sowohl 3d-strukturierte Sensorelemente als auch die

Rauschanalyse von geschalteten Kapazitäten, die unter anderem für den Ladungsverstärker relevant wird.

- Die HfO<sub>2</sub>-Schicht wurde bestmöglich an die Anforderungen pyroelektrischer Sensoren in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern angepasst, indem der Serienwiderstand und die Sensorkapazität reduziert und der Parallelwiderstand vergrößert wurde. Mithilfe der abgeleiteten Gütezahlen sind in Zukunft die Leistungsfähigkeit neuer Materialien frühzeitig im Entwicklungsprozess bewertbar.
- Erstmals wurde die Funktionsfähigkeit eines pyroelektrischen Sensors mit dem neuen HfO<sub>2</sub>-Materialsystem für eine CO<sub>2</sub>-Messung demonstriert.
- Mithilfe des ebenfalls CMOS-kompatiblen ASIC wurde gezeigt, dass sich der Umfang der Aufbau- und Verbindungstechnik im Sensor auf ein Minimum reduziert und sich durch die digitale Schnittstelle auch das übergeordnete Messsystem vereinfacht.
- Über die Schnittstelle ist der Sensor flexibel konfigurierbar und kann beispielsweise in Abhängigkeit der auftreffenden Strahlungsleistung angepasst werden. Das war bisher bei analogen Sensoren mit diskreten Bauelementen nicht möglich.
- Bestehende Messtechnik und Algorithmen wurden für digitale Sensoren erweitert und Erfahrungen im Umgang mit digitalen Signalen mit steilen Taktflanken und hoher Frequenz hinsichtlich der Störfestigkeit und Ansteuerung gesammelt.
- Eine Sensorkapazität < 1 nF für pyroelektrische Sensoren sollte zukünftig angestrebt werden, um die Dimensionierung des Transimpedanzverstärkers bzw. der Verstärkerelektronik nicht einzuschränken.
- Höchstohmwiderstände sind aufgrund des massiven Platzbedarfs nicht sinnvoll in einem ASIC integrierbar. Durch deren Ersatz mit geschalteten Kapazitäten ergibt sich aber ein höheres Rauschen der analogen Eingangsstufe. Folglich sind analoge Sensoren den digitalen Sensoren hinsichtlich des Signal-Rausch-Abstands bei äquivalentem Widerstandswert immer überlegen.

Die folgenden Erkenntnisse sind kurzfristig wirtschaftlich verwertbar:

- Mithilfe des entwickelten Sensormodells sind Anpassungen an kommerziellen Sensoren mit geringem Aufwand analysier- und optimierbar:
  - Die Aufbau- und Verbindungstechnik kann für verschiedene Produktfamilien bei gleichbleibender Leistungsfähigkeit vereinfacht werden, um die Fertigungskosten zu reduzieren.
  - Das thermomechanische Design sowie die Sensorelektronik sind präzise aufeinander abstimmbare und optimierbar, um das SNR sowie die spezifische Detektivität zu erhöhen und einen technischen Wettbewerbsvorsprung aufzubauen.
- Die Erfahrungen der zwei realisierten ASIC-Iterationen fließen in die Entwicklung der kommenden ASIC-Generation ein, um daraus einen kommerziellen digitalen Sensor mit Lithiumtantalat aufzubauen. Das beinhaltet:
  - die Dimensionierung der analogen Eingangsstufe für eine rauscharme Signalverstärkung mit einem hohen Dynamikbereich,
  - die Umsetzung der digitalen Logik für die Frequenzsynchronisation und eine möglichst universelle Anwendbarkeit des neuen Sensors in Infrarotmesssystemen,
  - der effiziente Aufbau der Hardware und Software der notwendigen Messtechnik sowie
  - den aufgebauten Demonstrator, der zu einem Evaluation-Kit weiterentwickelt wird und künftigen Kunden einen niederschweligen Einstieg zum Test der neuen digitalen Sensoren ermöglicht.

In Hinblick auf die Schichtoptimierung verbleiben aber ungelöste Fragestellungen, die eine kurz- oder mittelfristige Kommerzialisierung des Sensorelements in der aktuellen Form verhindern. Diese sind insbesondere:

- Das Kapazitätsziel < 1 nF bei ausreichend großer sensitiver Fläche (1 mm<sup>2</sup>) wurde im Projekt klar überschritten. Für weitere Kapazitätsoptimierungen ist der genutzte Atomic-Layer Deposition (ALD)-Prozess nicht geeignet, weil dickere Schichten im Mikrometer-Bereich in wirtschaftlicher Form nicht abgeschieden werden können. Alternative Abscheidemethoden, wie

Sputtern, würden eine komplette Schicht-Neuentwicklung erfordern. Außerdem fehlt ein vielversprechender technologischer Ansatz in der wissenschaftlichen Literatur, eine pyroelektrisch aktive Materialphase bei HfO<sub>2</sub> an dicken Schichten herzustellen.

- Der pyroelektrische Koeffizient degradiert mit der Zeit mit ca. 5 % pro Dekade. Auch nach mehreren Monaten ist kein stabiler Zustand erreicht. Die spezifischen physikalischen Effekte, die in den untersuchten HfO<sub>2</sub>-Schichten dazu beitragen, sind bisher nicht verstanden. Der Weg für Verbesserungen ist in dieser Hinsicht komplett offen.

## **Veröffentlichungen**

[1] R. Lehmkau, M. Ebermann, D. Mutschall, N. Neumann, J. Lienig: „Thermal-electrical Design Improvements of a New CMOS Compatible Pyroelectric Infrared Sensor Based on HfO<sub>2</sub>“. In: *Proceedings Sensor and Measurement Science International (2020)*. <https://www.ama-science.org/proceedings/details/3683> (besucht am 02. 02. 2024).

[2] D. Mutschall, A. Kaiser, R. Lehmkau, M. Ebermann, C. Mart, S. Eßlinger, M. Neuber, W. Weinreich, K. Hiller, J. Seiler, T. Großmann, W. Günther: „Mikromechanisch strukturierter, CMOS-kompatibler pyroelektrischer Detektor auf der Basis von dotiertem HfO<sub>2</sub> in Trenchzellen “. In: *MikroSystemTechnik Kongress (2021)*. <https://www.vde-verlag.de/proceedings-de/455656035.html> (besucht am 02. 02. 2024).

[3] R. Lehmkau; D. Mutschall; A. Kaiser; M. Ebermann; N. Neumann; M. Czernohorsky; M. Neuber; K. Hiller; J. Seiler; T. D. Großmann: „Fully CMOS-compatible pyroelectric infrared detector based on doped HfO<sub>2</sub> thin film in 3D-integration“. In: *Proc. SPIE Volume 12002 (2022)* [doi:10.1117/12.2607271]

[4] R. Lehmkau; D. Mutschall; A. Kaiser; M. Ebermann; N. Neumann; M. Czernohorsky; M. Neuber; K. Hiller; J. Seiler; T. D. Großmann: „Design and characterization of a pyroelectric detector based on three-dimensional structured hafnium oxide thin films“. *Optical Engineering, Vol. 61, Issue 12, 127102 (December 2022)* [doi: 10.1117/1.OE.61.12.127102]

## **Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Insgesamt sind Gesamtkosten in Höhe von 1.029.457,82 € entstanden. Die geplanten Gesamtkosten von 954.014,00 € wurden um 8 % überschritten.

Die Ausgaben- und Kostenplanung wurde in Summe um rund 75.000 € überschritten. Die Kostenüberschreitung ist überwiegend auf erhöhte Abschreibungskosten (längere Nutzung der angeschafften Gegenstände während der verlängerten Projektlaufzeit) zurückzuführen.