



## ForMikro - SPES3

### Erforschung hochempfindlicher, druckbarer Gassensoren für den Einsatz in der Lebensmittelüberwachung

### Teilprojekt: Funktionale Substrate mit anwendungsoptimierbaren Barrierschichten

### Abschlussbericht - Teil I: Kurzbericht

<b>Zuwendungsempfänger</b>	Technische Universität Dresden, Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik (TUD-AVT)
<b>Projektleitung</b>	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c.mult. Karlheinz Bock
<b>Förderkennzeichen</b>	16ES1068
<b>Laufzeit des Projekts</b>	01.10.2019 – 31.03.2024
<b>Datum</b>	30.09.2024
<b>Vorgelegt beim Projektträger</b>	VDI/VDE Innovation + Technik GmbH Frau Dr.-Ing. Antje Zehm Frau Sabine Wolf-Kallup Steinplatz 1 10623 Berlin <a href="http://www.vdivde-it.de">www.vdivde-it.de</a>
<b>Vorgelegt durch</b>	Technische Universität Dresden Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c.mult. Karlheinz Bock 01062 Dresden

# 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die Entwicklung von hochsensiblen Gassensoren spielt eine entscheidende Rolle in der Überwachung der Innenraumluftqualität, der Abgas- und die Lebensmittelanalyse. Dieses Projekt untersuchte die Verwendung von 2D-Halbleiter Materialien, insbesondere schwarzem Phosphor (BP), als vielversprechendes Sensormaterial für Gassensoren. BP zeichnet sich durch seine hohe Oberflächenaktivität und sein hohes Oberflächen-Volumen-Verhältnis aus, was BP zu einem ausgezeichneten Kandidaten für Gassensorenanwendungen macht. Im Gegensatz zu herkömmlichen Metalloxid-Gassensoren erfordert BP keine strengen Betriebsbedingungen wie hohe Temperaturen. Allerdings ist es empfindlich gegenüber Umwelteinflüssen, insbesondere Sauerstoff, was die Verwendung von schützenden Polymermembranen, oder weiteren Schichten notwendig macht, um die Empfindlichkeit von schwarzem Phosphor gegenüber verschiedenen Gasen entscheidend zu verbessern. Die Zielsetzung des Projektes war die Zusammenführung der neuartigen technologischen Ansätze zum Aufbau, Kontaktierung und Schutz des Sensorelementes für die Herstellung solches neuartigen Gassensors. Die Aufgabenstellung des Teilprojektes umfasste Technologieentwicklung und Charakterisierung von Polymermaterialien für Aufbau der Gehäuseumgebung für den einzubettenden Sensor für den Schutz des BP-Materials gegen Sauerstoff und einen selektiven Gastransport durch diese Membranen sowie die Integration der Sensorelemente inklusive Schutzschichte in eine an die Anwendung angepasste Gehäuse.

# 2 Planung und Struktur des Vorhabens

Das Konsortium besteht aus dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), der TU Dresden mit dem Institut für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik (TUD-IHM), der Professur für molekulare Funktionsmaterialien (TUD-fM) und dem Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik (TUD-AVT). Das Projekt wurde gefördert durch die BMBF-Maßnahme "Forschung für neue Mikroelektronik (ForMikro). Am TUD-IAVT wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern organische funktionale Substrate und semipermeable Membranen für den Aufbau von Gassensoren 2D-Halbleiter-Basis in Arbeitspaketen 13 -16 entwickelt und charakterisiert. Des Weiteren unterstützte TUD-IAVT die Projektentwicklungen in den Aufgaben der Sensorgascharakterisierung sowie in technologischen Aufgaben hinsichtlich der Integration von Transistorelementen in die Sensorgehäuse. Die nachfolgende Tabelle zeigt den zeitlichen Ablauf und die Verteilung der Aufgaben zwischen den Projektpartnern in Arbeitspaketen mit den jeweils zugewiesenen Hauptverantwortlichkeiten (farbig dargestellt).

		bewilligte Projektzeit				Verlängerung
		10/2019 - 09/2020	10/2020 - 09/2021	10/2021 - 09/2022	10/2022 - 09/2023	10/2023 - 03/2024
2d Materialien - TUD-fM	AP 1	Exfoliation von schwarzem Phosphor				
	AP 2	Entwicklung der Tinten				
	AP 3	InkJet Prozess				
	AP 4	Materialien mit InkJet				
	AP 5	MoS2-basierte Sensoren				
Transistoren- HZDR	AP 6	Transistoren mit Exfoliation				
	AP 7	verkapselte Transistoren				
	AP 8	Sensoren				
	AP 9	Sensoren mit InkJet Druck				
Kontaktierung - TUD-IHM	AP 10	Metallische Kontakte an BP				
	AP 11	Metallische Kontakte auf flexiblen Substrate				
	AP 12	Gesamtprozess für integrierte Barrieren				
funktionale mehrstufige Verkapselung - TUD-IAVT	AP 13	Semipermeable selektive Membranen				
	AP 14	Hermetische Substratbarrieren				
	AP 15	Aufbau der aktiven Membranen				
	AP 16	Transfer der Membranen				
Spezifikationen - HZDR	AP 17	Aufbau Technologie, Benchmark Material				
	AP 18	Auswertung der Ergebnisse, Adaption Spezifikation				
	AP 19	Koordination nach innen, Außenwirkung				

### **3 Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen**

Im Teilprojekt „Funktionale Substrate mit anwendungsoptimierbaren Barrierschichten“ konnten experimentelle Messumgebungen für die Charakterisierung Permeationsmessungen an Polymerfolien für Substratbarrieren und selektive Membranen (siehe Pkt. 1.1.1 im Sachbericht Teil II) sowie für die Charakterisierung der Gassensitivität von im Projekt entwickelten Sensoren (siehe Pkt. 1.1.3 im Sachbericht Teil II) entwickelt, aufgebaut und verifiziert werden. Die entwickelten Messsysteme zeichnen sich durch einen modularen Aufbau aus, der einen unkomplizierten Austausch der Messgase und der zugehörigen Sensorik, und dadurch ermöglichen den Transfer der Erkenntnisse in neue Aufgabenstellungen in dem Bereich des Gasesmesstechnik. Des Weiteren wurden Technologien zur Herstellung, Beschichtung und Funktionalisierung der Folien als semipermeablen Membranen und hermetischen Substratbarrieren erforscht (siehe Pkt. 1.1.2 im Sachbericht Teil II)

Dazu wurden polymerische und anorganische Multilagen eingesetzt, um Gase selektiv zu filtern und chemische Selektivität zu erreichen. Die Schichten schützen die Halbleiter vor Sauerstoff und bestehen aus anorganischen und polymeren Materialien. Verschiedene Membranen werden mit elektrischen Schichten kombiniert, um die Eigenschaften der Membranen anzupassen. Hierzu konnte eine neue Anlagen-Infrastruktur aus dem Projekt Dresden Center for Semiconductor Technology (DCST) aus der BMBF Fördermaßnahme „Forschungslabore Mikroelektronik Deutschland (ForLab)“ eingesetzt werden. Es handelt sich dabei um physikalische Dampfphasenbeschichtungsanlagen (E-Beam Verdampfer, Sputteranlage) eine Atomlagenabscheideanlage sowie Spin-coater-Beschichter. Alle drei Anlagen sind über ein Glovebox-Cluster mit-einander verbunden, sodass die empfindlichen BP Sensoren im SPES Projekt ohne Schaden am IAVT weiterverarbeitet werden konnten. Damit konnte dieses Prozesscluster in Synergie zum SPES3-Projekt direkt nach Inbetriebnahme am TUD-IAVT für Fertigungsverfahren von funktionalen Substraten eingesetzt und erprobt werden. In dem Bereich des Packaging von Gassensoren wurden Technologien zur Integration und elektrische Kontaktierung von mehrlagen BP-Transistorelementen auf Si-Trägersubstraten entwickelt werden. Damit sind Testpackagemodule entstanden, die für die Charakterisierung der Gassensitivität von 2D-Sensoren genutzt wurden (siehe Pkt. 1.1.3 im Sachbericht Teil II). Am TUD-IAVT wurde auch eine Technologie zur Herstellung eines Mehrlagenschichtsystem auf flexiblen PI-Substraten entwickelt, dass eine direkte Aufbringung des Sensorschichtsystems (mittels Stempeltransfer oder Inkjet-Drucken) auf vorgefertigten Source-, Drain- und Gate-Kontakten und Kontaktierung ermöglicht. Der flexible Sensor wurde so entwickelt, dass er sowohl in den bisherigen Messumgebungen, als auch als eigenständiges flexibles Substrat verwendet werden kann (siehe Pkt. 1.1.4 im Sachbericht Teil II).

Ohne diese Förderung wäre es nicht möglich gewesen, die umfangreichen Entwicklungen und Evaluationen der Gasesmesstechnik, die Herstellung und Evaluation der verschiedenen Sensorsubstrate und Membranen sowie die Entwicklung der verschiedenen Aspekte des Packaging-Konzeptes für die BP-Sensoren durchzuführen. Das Projekt hat vielversprechende Ergebnisse im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik für BP-Gassensoren ermöglicht, was die Überführung der BP-Sensortechnologie in eine zukünftige Anwendung entscheidend unterstützt. Das erfolgreich entwickelte Technologie-Konzept für die Verkapselung von BP-Sensoren wird mit Eigenmitteln und in Folgeprojekten weiterentwickelt werden. Damit hat die Förderung in diesem Projekt einen Grundstein und einen signifikanten Schritt der Entwicklung unterstützt, um das Konzept in den nächsten Jahren in die Nutzung bringen zu können.

## ForMikro - SPES3

### Erforschung hochempfindlicher, druckbarer Gassensoren für den Einsatz in der Lebensmittelüberwachung

### Teilprojekt: Funktionale Substrate mit anwendungsoptimierbaren Barrierschichten

### Abschlussbericht - Teil II: Eingehende Darstellung

<b>Zuwendungsempfänger</b>	Technische Universität Dresden, Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik (TUD-AVT)
<b>Projektleitung</b>	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Karlheinz Bock
<b>Förderkennzeichen</b>	16ES1068
<b>Laufzeit des Projekts</b>	01.10.2019 – 31.03.2024
<b>Datum</b>	30.09.2024
<b>Vorgelegt beim Projektträger</b>	VDI/VDE Innovation + Technik GmbH Frau Dr.-Ing. Antje Zehm Frau Sabine Wolf-Kallup Steinplatz 1 10623 Berlin <a href="http://www.vdivde-it.de">www.vdivde-it.de</a>
<b>Vorgelegt durch</b>	Technische Universität Dresden Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c.mult. Karlheinz Bock 01062 Dresden

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung</b> .....	<b>3</b>
1.1	Erzielte Ergebnisse im Einzelnen.....	3
1.1.1	Messumgebung für Permeationsuntersuchungen von polymeren Membranen und Substratbarrieren.....	3
1.1.2	Semipermeablen Membranen und hermetischen Substratbarrieren .....	5
1.1.3	Packaging von 2D-Gassensoren und Entwicklung der Messumgebung zur Charakterisierung der Gassensitivität .....	12
1.1.4	Flexible Sensorsubstrate:.....	15
1.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	16
1.3	Notwendigkeit der Zuwendung und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten.....	17
<b>2</b>	<b>Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans</b> .....	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen</b> .....	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse</b> .....	<b>18</b>

# 1 Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung

## 1.1 Erzielte Ergebnisse im Einzelnen

Am TUD-IAVT wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern organische funktionale Substrate und semipermeable Diffusionsbarrieren für den Aufbau von Gassensoren 2D-Halbleiter-Basis (BP und MoS<sub>2</sub>) in Arbeitspaketen 13 -16 entwickelt und charakterisiert (Hauptverantwortlichkeit). Des Weiteren unterstützte TUD-IAVT die Projektentwicklungen in den Aufgaben der Sensorgascharakterisierung sowie in technologischen Aufgaben hinsichtlich der Integration von Transistorelementen in die Sensorgehäuse.

Die Übersicht zeigt die Arbeitspakete mit den jeweils zugewiesenen Hauptverantwortlichkeiten (farbig dargestellt). In der letzten Spalte sind die Personenmonate aufgeführt, die auf Basis der Kooperationsmatrix ermittelt wurden und die Zusammenarbeit zwischen Projektpartnern und anderen Arbeitspaketen darstellen.

		bewilligte Projektzeit				Verlängerung	PM TUD-AVT
		10/2019 - 09/2020	10/2020 - 09/2021	10/2021 - 09/2022	10/2022 - 09/2023		
2d Materialien - TUD-fm	AP 1	Exfoliation von schwarzem Phosphor					1
	AP 2	Entwicklung der Tinten					
	AP 3		InkJet Prozess				
	AP 4		Materialien mit InkJet				
	AP 5	MoS <sub>2</sub> -basierte Sensoren					
Transistoren- HZDR	AP 6	Transistoren mit Exfoliation					4
	AP 7		verkapselte Transistoren				4
	AP 8		Sensoren				5
	AP 9		Sensoren mit InkJet Druck				6
Kontaktierung - TUD-IHM	AP 10	Metallische Kontakte an BP					
	AP 11	Metallische Kontakte auf flexiblen Substrate					2
	AP 12		Gesamtprozess für integrierte Barrieren				3
funktionale mehrstufige Verkapselung - TUD-IAVT	AP 13	Semipermeable selektive Membranen					6
	AP 14	Hermetische Substratbarrieren					6
	AP 15		Aufbau der aktiven Membranen				5
	AP 16		Transfer der Membranen				3
Spezifikationen - HZDR	AP 17	Aufbau Technologie, Benchmark Material					2
	AP 18		Auswertung der Ergebnisse, Adaption Spezifikation				1
	AP 19	Koordination nach innen, Außenwirkung					

Die Beschreibung der wichtigsten erzielten Ergebnisse im Projekt sind in nachfolgenden Abschnitten des Berichts in drei Unterpunkte gegliedert werden, die im Folgenden beschrieben sind:

1. Entwicklung der Messumgebung für Permeationsmessungen an Folienmaterialien
2. Entwicklung der Semipermeablen Membranen und hermetischen Substratbarrieren
3. Packaging von 2D-Gassensoren und Entwicklung der Messumgebung zur Charakterisierung der Gassensitivität

### 1.1.1 Messumgebung für Permeationsuntersuchungen von polymeren Membranen und Substratbarrieren

Der Ionen-Permeationsmessstand, welcher bisher am TUD-IAVT für zur Charakterisierung vom Polymeren genutzt wurde, erwies sich für dieses Projekt abweichend von ursprünglicher Planung als nicht ausreichend geeignet. Es erfolgte zunächst eine Evaluierung hinsichtlich der Adaption dieses vorhandenen Messstandes für Flüssigkeiten hin zur Messung von Gasen. Im Ergebnis erschien eine Neukonstruktion als geeignetste Lösung. Aus diesem Grund wurden im Verlauf des Projektzeitraums mehrere Permeati-

onskammern entwickelt, die verschiedene Vorteile bei der Untersuchung von Polymermaterialien bieten. Die erste entwickelte Lösung bestand aus einer Kammer mit sieben Einzelsegmenten (Abbildung 2), die parallele Permeationsmessungen an Polymermaterialien für semipermeable Membranen und hermetische Substratbarrieren ermöglichte und erste wichtige Ergebnisse zur Einschätzung der Membranen ermöglichte.

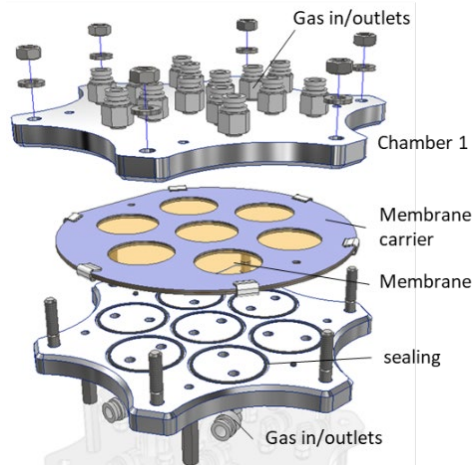


Abbildung 2: Permeationskammer mit sieben Einzelkammern zur parallel Messung mehreren Bereichen: Explosionsdarstellung Messkammer aus CAD Modell (links), und Bild nach der Fertigung (rechts)

Da jedoch Schwierigkeiten bei der Abdichtung der sieben Kammern auftraten, wurde auf eine vereinfachte Ein-Kammer-Lösung umgestellt (Abbildung 1). Diese neue Kammer verwendete dickere Dichtringe und enthielt nur noch eine zu messende Polymermembran.

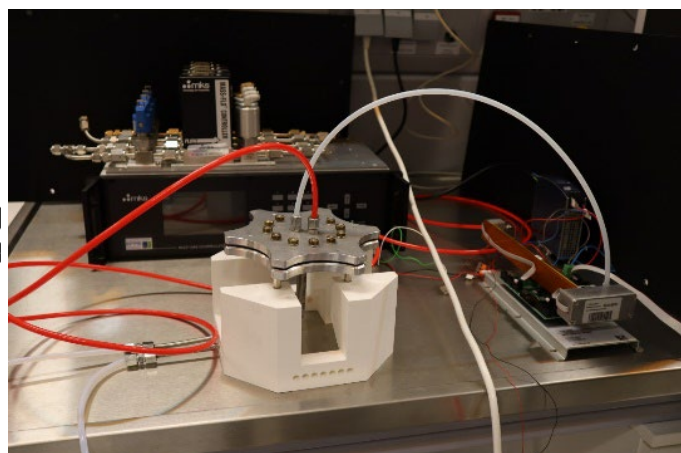
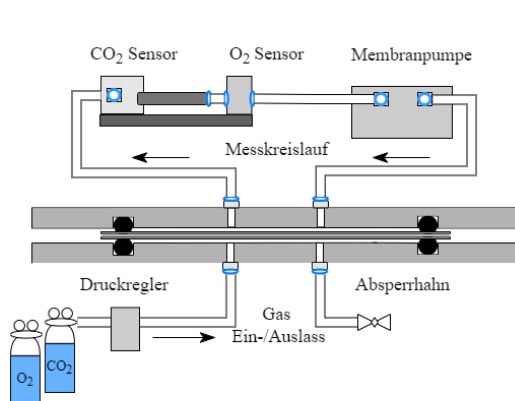


Abbildung 1: 1-Kammer-Messsystem zur Permeationsuntersuchung mit konstantem Druck und Gasfluss: Aufbauschema (links) und realisierte Labormessumgebung (rechts)

Die entwickelten Messsysteme zeichnen sich durch einen modularen Aufbau aus, der einen unkomplizierten Austausch der Messgase und der zugehörigen Sensorik ermöglicht. Die Permeationsmessstände bestehen im Wesentlichen aus einer Messkammer, die durch eine Polymermembran in eine Feed- und eine Messeite unterteilt ist. Auf der

Feedseite (unterer Teil der Messkammer) wird das Messgas unter einem definierten Druck angelegt, während auf der gegenüberliegenden Seite der Membran das durchdringene Gas analysiert wird. Für die Permeationsmessungen an Polymermembranen wurden zunächst Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) als Messgase gewählt. Durch diesen modularen Aufbau konnten die Systeme flexibel an verschiedene Messanforderungen angepasst werden, was die Untersuchung und Vergleichbarkeit der Sensoren wesentlich erleichterte.

### 1.1.2 Semipermeablen Membranen und hermetischen Substratbarrieren

#### 1. Materialauswahl

Tabelle 1 fasst eine Auswahl an Polymermaterialien zusammen, die in labortechnischen Anwendungen bereits etabliert sind sowie typische Eigenschaften und eine mögliche Verwendung dieser im Aufbau des Sensors. In dieser Arbeit wird der Fokus auf Polymermaterialien als Schutzmembranen für Sensoren gelegt. Typische Polymermaterialien, die in der Aufbau- und Verbindungstechnik Verwendung finden, wie Polyimide (PI), Polyethylenphthalate (PEN), Polyvinylidenfluoride (PVDF) und Cyclo-Olefin-Polymere (COP), werden als potenzielle Membranen betrachtet.

Tabelle 1: Auswahl verschiedener Polymere sowie Eigenschaften und Verwendung

Substratmaterialien	Eigenschaften	Mögliche Verwendung
PI 2611 (7,5 µm)	Thermisch hoch belastbar	Substrat
PI 2611 (10 µm)	Thermisch hoch belastbar	Substrat
PI + Chrom (~ 12,5 µm)	Thermisch hoch belastbar	Substrat (hermetische Barriere)
PI + Chrom + Kupfer (12,5 µm)	Thermisch hoch belastbar	Substrat (hermetische Barriere)
PI (geätzt ~12,5 µm)	Thermisch hoch belastbar	Substrat
COC (Topas – 140 µm)	Hohe chem. Beständigkeit	Substrat
COP (Zeonor – 100 µm)	Hohe H <sub>2</sub> O-Barriere	Selektive Membran
LCP (~ 100 µm)	Liquid crystal polymer	Substrat
PEN (Teonex – 50 µm)	Chem. Und UV-Beständig	Membran
PEN (25 µm)	Chem. Und UV-Beständig	Substrat
PDMS (Sylgard)	Silikonartig	Membran / zusätzl. Abdeckung
PVDF1	Porös 0,45 µm	Membran
PVDF2	Porös 0,2 µm	Membran
PVDF3	Piezoelektrisch	Membran
PVDF4	Piezoelektrisch	Aktive Membran
PVDF5	Chem. Beständigkeit	Selektive Membran
PVDF12 (~12 µm)	Chem. Beständigkeit	Membran
TPU_I	Hohe Wärmebeständigkeit	Selektive Membran
TPU_W	Hohe Wärmebeständigkeit	Selektive Membran
PEEK25 (25 µm)	Hohe mech. Festigkeit	Selektive Membran

Polyvinylidenfluorid - PVDF, Polyethylenphthalat - PEN, Cyclo-Olefin-Polymer - COP, Liquid Crystal Polymers - LCP, Polyimide - PI, thermoplastische Polyurethane - TPU, Polyetheretherketon - PEEK, Polydimethylsiloxan – PDMS

Die Polyvinylidenfluoride (PVDF) mit den Bezeichnungen 3 - 5 sind kommerziell erhältliche Membranen von verschiedenen Herstellern, während PVDF12 durch Spincoating im Labor selbst hergestellt wurde. Polyethylenphthalate (PEN) standen in zwei verschiedenen Stärken zur Verfügung, die verschiedene anwendungsspezifische Eigenschaften aufweisen. Weiterhin wurden Polymermembranen aus flüssig-kristallinem Polymer (Liquid Crystal Polymer, LCP), Cycloolefin-Polymeren (COP) und Polyimiden (PI) in verschiedenen Varianten verwendet. Eine PI-Membran, die mit Chrom und Kupfer (CrCu) beschichtet war, wurde sowohl in dieser Form als auch nach dem Ätzen der Schichten gemessen. Zusätzlich wurde das Polyimid PI2611 im Labor durch Spincoating selbst hergestellt. Unterschiede der Analyse in Oberflächenmorphologie konnte mittels REM-Untersuchung visualisiert werden – die Abbildung 3 zeigt Beispielbilder von PVDF, PEN und TPU Folienmaterialien.

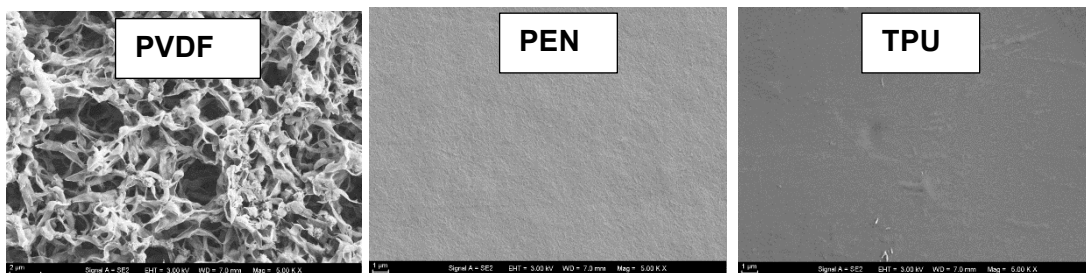


Abbildung 3: Analyse der Oberflächenmorphologie der Membranmaterialien – Beispiel REM-Bilder von PVDF, PEN und TPU Folien

Die Einteilung erfolgt hier später anhand der Permeationsuntersuchungen in den Substratmaterialien, welche eine geringe bis keine Gasdurchlässigkeit aufweisen, zu Membranmaterialien, die eine höhere CO<sub>2</sub>-Durchlässigkeit gegenüber der gemessenen O<sub>2</sub>-Durchlässigkeit.

## 2. Permeationsmessungen

Die Permeationsmessungen an verschiedenen Polymermaterialien zeigten deutliche Unterschiede in der Durchlässigkeit für CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub>. Das angewandte Messverfahren basierte auf einer konstanten Druckmessung in dem Messaufbau aus der Abbildung 1, bei der ein kontinuierlicher Druck auf der gaszuführenden Seite (Feedseite) der Polymerproben angelegt wurde, während auf der gegenüberliegenden Seite der Membran die durchdrungene Gaskonzentration in einem geschlossenen Messkreislauf gemessen wurde - siehe eine Beispielmessung der CO<sub>2</sub>-Permeation mit PEN (Polyethylenphthalat) Membran (Abbildung 4 - links).

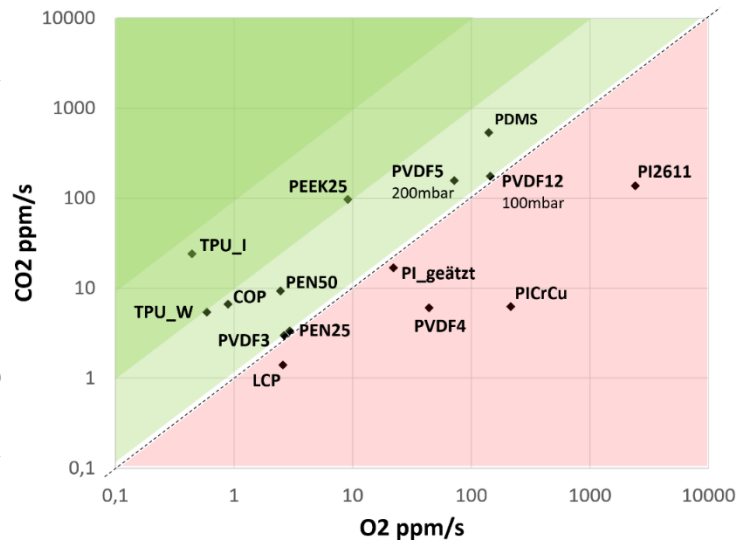
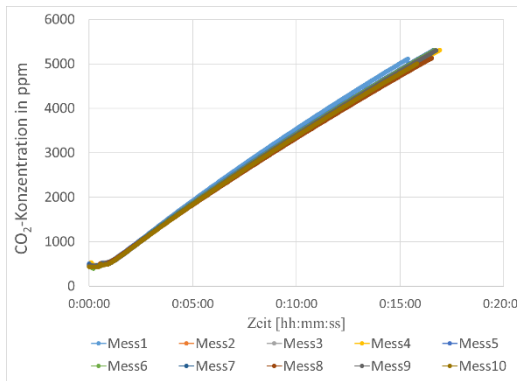


Abbildung 4: Ermittlung der Durchlässigkeitsrate (links) und Einteilung verschiedener Materialien gegenüber Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) Durchlässigkeit (rechts) Für die Auswertung der Durchlässigkeitsrate wurden die Anstiege der Gaskonzentration zwischen 4000 – 5000 ppm für die ausgewählte Folienmaterialien aus der Tabelle 1 ermittelt und für den Vergleich der Durchlässigkeit gegenüber dem Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) in der Abbildung 4 (rechts) zusammengefasst. Dabei wurde eine Normierung der Messwerte auf eine standardisierte Membrandicke vorgenommen, um den Einfluss der Membrandicke auf die Permeation zu standardisieren und somit eine fundierte Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Polymeren zu ermöglichen.

### 3. Einteilung der Materialien

Basierend auf o.g. Ergebnissen wurden die Polymermaterialien nach ihrer Durchlässigkeit für CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> klassifiziert. Eine zentrale Anforderung an das Sensormaterial ist, dass es möglichst wenig Gase oder Wasserdampf durchlässt und somit eine hermetische Barriere bildet. Im Gegensatz dazu soll die Membran eine gezielte Gasdiffusion ermöglichen, wobei sie das zu messende Gas effektiv durchlässt, während der Sauerstoffzufluss zum Sensormaterial minimiert wird. In Abbildung 4 sind die Materialien optisch gruppiert: Die Grafik hebt verschiedene Bereiche hervor, wobei der rote Bereich für eine schnellere Sauerstoffdiffusion steht, was in diesem Fall nicht gewünscht ist. Der weiße Streifen in der Mitte repräsentiert eine leicht höhere Kohlendioxid-Diffusionsgeschwindigkeit, die jedoch noch nicht ausreicht, um eine signifikante Barriere gegenüber Sauerstoff darzustellen. Die Materialien mit der geringsten Gasdurchlässigkeit wurden als potenzielle Substratmaterialien identifiziert, während die Materialien im grünen Bereich aufgrund ihrer erhöhten CO<sub>2</sub>-Durchlässigkeit als potenzielle Membranmaterialien klassifiziert wurden. Der grüne Bereich zeigt eine mindestens doppelt so hohe Kohlendioxid-Diffusionsgeschwindigkeit im Vergleich zu Sauerstoff wobei in dem dunkleren grünen Bereich zwei Materialien (TPU und PEEK) identifiziert wurden, die eine mindestens

zehnfach größere Kohlendioxiddiffusionsgeschwindigkeit besitzen, was besonders vielversprechend für den Einsatz als Membranen ist.

Tabelle 2: Permeationskoeffizienten gewählter Materialien

Material	Permeationskoeffizient $\text{CO}_2$ $\frac{\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mbar}}$	Permeationskoeffizient $\text{O}_2$ $\frac{\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mbar}}$	Material	Permeationskoeffizient $\text{CO}_2$ $\frac{\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mbar}}$	Permeationskoeffizient $\text{O}_2$ $\frac{\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mbar}}$
PVDF3	0,437	0,386	PI_2611	2,224	39,092
PVDF4	0,154	1,115	PI_geätzt	0,427	0,560
PVDF5	39,671	18,185	PICrCu	0,159	5,463
PVDF12	56,734	47,166	COP	10,722	1,450
PEN25	0,340	0,298	LCP	0,567	1,051
PEN50	3,780	1,002	TPU1	39,173	0,719
PEEK	9,793	0,922	TPU2	8,742	0,958
PDMS	54,310	14,287			

2. Iteration    
  $\text{CO}_2 < \text{O}_2$     
  $\text{CO}_2$  ähnlich  $\text{O}_2$     
  $\text{CO}_2 > \text{O}_2$     
  $\text{CO}_2 \gg \text{O}_2$

In der Tabelle 2 sind die Permeationskoeffizienten der ausgewählten Polymere zusätzlich dargestellt. Die Konzentrationsanstiege werden hierbei auf das Messvolumen, die Messdauer sowie die Querschnittsfläche der Membran und die Druckdifferenz bezogen. Hierbei lassen sich die Unterschiede, insbesondere bei den PEEK- und TPU-Membranen verdeutlichen. Diese Methode eignet sich ausschließlich für dichte Polymermaterialien, da sie präzise Durchlässigkeitswerte liefert. Poröse Materialien, wie PVDF1 & 2 (siehe Tabelle 1), konnten mit diesem Verfahren jedoch nicht getestet werden, da ihre Struktur die Genauigkeit des konstanten Druckverfahrens beeinträchtigt. Für die porösen Materialien wäre eine Messmethode mit konstantem Gasfluss besser geeignet. Diese Methode hätte jedoch die Messzeiten erheblich verlängert, was sie für eine umfassende Untersuchung aller Materialien unpraktisch machte. Daher wurde sie im Rahmen dieser Untersuchungen nicht angewendet.

#### 4. Membranbeschichtungen und aktive Strukturen

Um die Polymerfolien als aktive Membranen oder Barrieren zu nutzen, wurden verschiedene Beschichtungsansätze verfolgt.

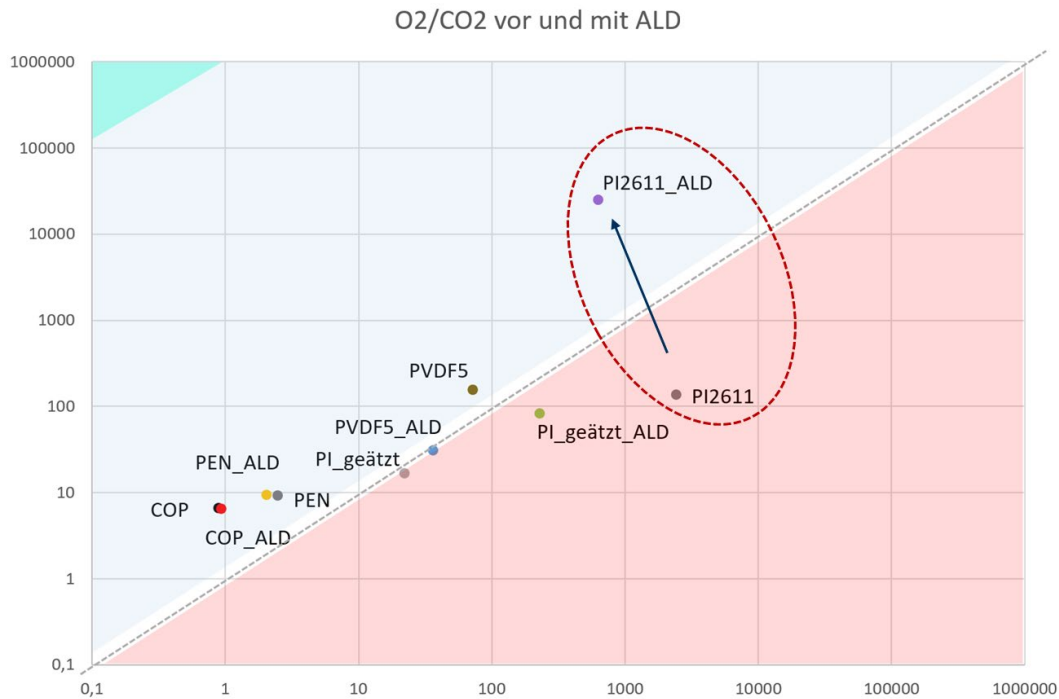


Abbildung 5: Permeationsuntersuchungen an Polymermembranen, Vergleich der Gasdurchlässigkeiten mit und ohne Aluminiumoxidbeschichtung

Der erste Ansatz für die Funktionalisierung der Membranmaterialien war die Beschichtung mit dünnen Oxidschichten, die als Getter- oder Barrierschichten dienen sollen. Hierfür wurden mehrere Proben hergestellt, indem Polyimid auf 4-Zoll-Wafer aufgetragen und anschließend in einer ALD-Anlage Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) in zwei verschiedenen Schichtdicken – 10 nm und 30 nm – abgeschieden wurde. Die beschichteten Folien konnten danach leicht von den Wafern abgelöst und in der Permeationskammer gemessen werden. Es zeigte sich, dass bereits eine 30 nm dünne Oxidschicht die Flexibilität der Membranen erheblich einschränkte, sodass die meisten Membranen kurz nach Beginn der Messung rissen, selbst bei einem auf 200 mbar reduzierten Differenzdruck. Bei den Membranen mit einer 10nm dicken  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schicht trat dieser Effekt nicht auf, jedoch variierten die Ergebnisse der Permeationsmessungen stark (vgl. Abbildung 5), sodass keine klare Aussage über die Auswirkungen der ALD-Beschichtung auf die Permeationseigenschaften von dünnen Polyimidfolien getroffen werden konnte. Es wurden weitere Beschichtungsversuche mit Materialien durchgeführt, die sich in den ersten Permeationsuntersuchungen (vgl. Abbildung 4) als geeignete Membranmaterialien herausgestellt hatten. Aufgrund der zuvor beobachteten negativen Effekte dickerer Aluminiumoxidschichten wurde bei diesen Versuchen nur noch mit einer Schichtdicke von 10 nm  $\text{Al}_2\text{O}_3$  gearbeitet.

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 5 zusammengefasst. Grundsätzlich wurde erwartet, dass die Beschichtung der Membranen im Vergleich zu den unbeschichteten Varianten zu einer verringerten Gasdurchlässigkeit führt. Diese Annahme beruhte

auf der Eigenschaft der aufgetragenen Oxidschichten, als Barrieren zu fungieren und damit die Permeation von Gasen zu reduzieren. Tatsächlich konnten in einigen Fällen Anzeichen für eine relative Reduzierung der O<sub>2</sub>-Durchlässigkeit festgestellt werden, was auf eine potenziell verbesserte Eignung dieser beschichteten Membranen für Anwendungen als selektive Membranen zur Verkapselung der Sensoren hindeutet, bei denen eine verringerte Sauerstoffdurchlässigkeit erforderlich ist. Diese Beobachtung unterstützt die Überlegung, dass die Verwendung der beschichteten Materialien als Membranmaterialien vorteilhaft sein könnte, insbesondere in Bereichen, in denen eine kontrollierte Gasdurchlässigkeit bei reduzierter Sauerstoffdurchlässigkeit eine entscheidende Rolle spielt.

Die Ergebnisse zeigten jedoch auch, dass die erwartete Reduzierung der Gasdurchlässigkeit nicht in allen Fällen eindeutig nachweisbar war, was auf die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen der Beschichtung und dem Basismaterial hinweist.

Ein weiterer untersuchter Ansatz bezieht sich auf die Beschichtung metallischer Strukturen, die als Elektroden zur Erzeugung elektrischer Felder dienen sollen. Hierbei wurden drei verschiedene Varianten realisiert:

1. Interdigitalelektroden (Abbildung 6, links): Diese auch als Kamm- oder Fingerelektroden bezeichneten Strukturen bestehen aus zwei ineinander greifenden Elektroden, die in einer Ebene liegen.
2. Gitterförmige Elektroden (Abbildung 6, Mitte): Bei dieser Variante sind die Elektroden in einem gitterartigen Muster angeordnet. Sie benötigen entweder eine dielektrische Zwischenschicht oder werden auf gegenüberliegenden Seiten der Membran aufgebaut. Beide Varianten wurden auf Polyimid-Membranen für Tests aufgetragen.

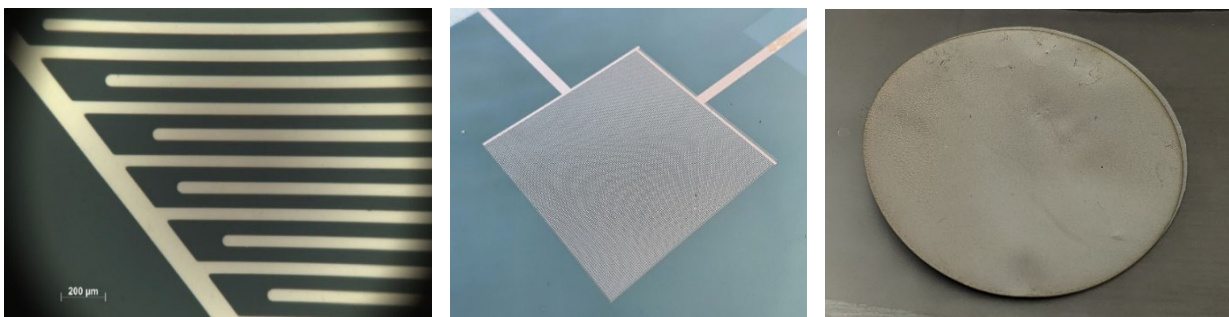


Abbildung 6: Polymermaterialien mit abgeschiedenen Elektrodenstrukturen, Interdigitalelektroden auf PI (links) Gitterelektroden auf PI und SU-8 (Mitte), beidseitig flächige Elektroden auf PVDF (rechts)

3. Flächige Elektroden (Abbildung 6, rechts): Diese dritte Variante besteht aus Elektroden, die flächendeckend und deckungsgleich auf beiden Seiten der Membran aufgetragen wurden. Hierbei wurde Polyvinylidenfluorid (PVDF) als Membranmaterial verwendet, da es piezoelektrische Eigenschaften aufweist.

Diese unterschiedlichen Ansätze sollten eine vielseitige Anwendung der Polymerfolien als funktionale Membranen ermöglichen. Die Kontaktierung der Elektroden wurde zunächst mithilfe von Leitklebstoff und/oder Kabelklemmen an den Rändern der Membran realisiert. Allerdings stellte sich die Isolation zwischen der Messkammer und dem Membranaufbau während der Permeationsmessungen als kritischer Faktor heraus.

Leider konnte deshalb im Verlauf des Projekts mit keinem dieser Ansätze eine aktive Veränderung der Permeationseigenschaften in den Membranen nachgewiesen werden.

## 5. Transfer der Membranen

Für die Integration der Membranen mit 2D-Gassensoren wurde der Transferprozess (AP 16 und AP 7) der Polymermembranen auf die exfolierten Transistoren von Projektpartner HZDR erarbeitet. Projektpartner HZDR nutzt einen Transferprozess mit der Nutzung von PDMS-Stempel für die Platzierung von dünnen Isolationsschichten aus hBN-Material als auch für Platzierung von Flakes aus exfolierten 2D-BP-Sensormaterial. Für das Testen des Stempeltransfers von Polymermembranen, wurden PI-Membranen mittels Laserschneiden in  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  große Probekörper geschnitten. Es wurde ein Kurzpuls laser (neoLASE:  $\lambda = 532 \text{ nm}$ ,  $P = 5 \text{ W}$ ,  $t_{\text{Puls}} = 10 \text{ ps}$ ,  $f_{\text{rep}} = 50 \text{ kHz}$ ) mit Laserscanner (Scanlab: Scancube14,  $f_{\text{Obj}} = 100 \text{ mm}$ ,  $A_{\text{Scan}} = 40 \times 40 \text{ mm}^2$ ) in Laseranlage der Fa. 3D-Micromac AG genutzt. Für die Ermittlung der Laserprozessparameter als auch die Eignung für den Transferprozess mit dem HZDR-Ansatz wurden PI-Membranen mit verschiedener Materialdicke ( $0,5 \mu\text{m}$ ,  $2,5 \mu\text{m}$ ,  $5 \mu\text{m}$ ) auf Si-Trägerwafern hergestellt (siehe Abbildung 4 (a)). Ziel des Laserprozesses war es, eine saubere Schnittkante mit kleinen Materialauswurf zu erreichen.

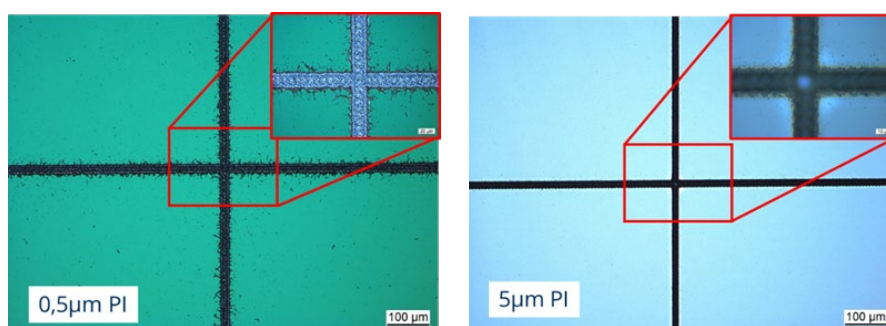


Abbildung 7: Laserpräparation von PI-Membranen für Transfertests an 2D-Sensoren: (a) Si-Probekörper mit  $10 \times 10$  Gitterschnitt und (b) Qualität der Schnittkanten für verschiedene PI-Dicke

Abbildung 4 (b) zeigt die Qualität der Schnittkanten für Membranen mit einer Dicke von  $0,5 \mu\text{m}$  und  $5 \mu\text{m}$ . Für den Transferprozess ist eine defektfreie Ablösung der Probekörper von dem Si-Trägersubstrat und eine mechanische Übertragung auf die Transistorsubstrate notwendig. Das Laserschneiden führt bei verschiedenen Polymermaterialien jedoch nicht immer zu scharfkantigen Strukturen, weshalb auch alternative Methoden für

den Aufbau der Sensoren in Betracht gezogen wurden. Eine dieser Alternativen ist der vollständig additive Aufbau des Sensors, zum Beispiel durch Spincoating des Membranmaterials, um eine gleichmäßige und präzise Schicht auf dem Sensormaterial zu erzeugen.

Diese Kombination aus präziser Materialauswahl und fortschrittlichen Fertigungstechniken soll sicherstellen, dass die entwickelten Sensoren sowohl in Bezug auf Barriere-Eigenschaften als auch auf selektive Gasdurchlässigkeit optimal funktionieren.

### 1.1.3 Packaging von 2D-Gassensoren und Entwicklung der Messumgebung zur Charakterisierung der Gassensitivität

#### 1. Packaging von 2D-Gassensoren

Für die Charakterisierung der Gassensitivität von 2D-Sensoren wurden am TUD-IAVT Testpackagemodule für eine Integration in die Gasmessumgebung entwickelt. Der Aufbau des BP-Transistors erfolgte beim Projektpartner HZDR auf einem Si-Trägersubstrat mit elektrischer Umverdrahtung zur Kontaktierung der Transistoranschlüsse (Source, Gate und Drain). Für die elektrische Kontaktierung der Si-Sensorsubstrate wurden drei verschiedene Aufbauvarianten entwickelt:

1. flexibler Aufbau auf einer PI-Folie als Umverdrahtungsträger
2. wechselbare Testleiterplatte mit Sensor in einem keramischen CLCC Gehäuse
3. Integration in ein TO-8 Gehäuse

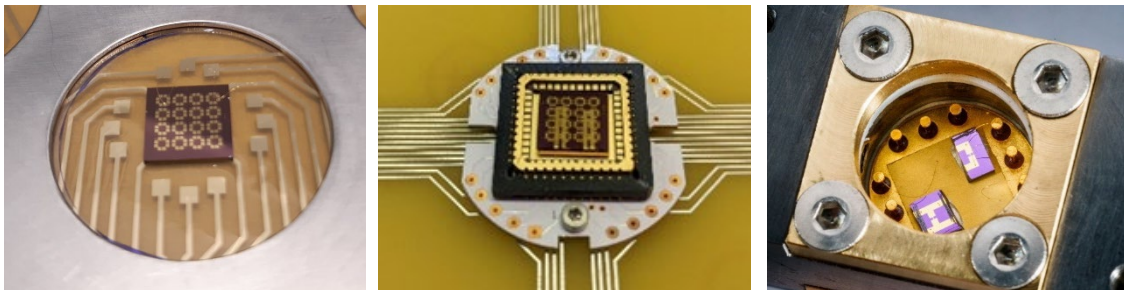


Abbildung 8 Testmodule für die Charakterisierung der Gassensitivität von 2D-Sensoren auf Si-Substraten: flexibler Aufbau auf PI-Folien (links), und starren (rechts) Umverdrahtungsträger

Für die erste Variante (siehe Abbildung 8 (links)) wurde eine kupferbeschichtete Polyimidfolie als Umverdrahtungsträger verwendet, welche durch Lithografie- und Ätzprozesse strukturiert wurde. Der zweite Aufbau wurde durch eine starre Leiterplatte realisiert. Das Sensorsubstrat wird hierbei in einem keramischen Chip Carrier (CLCC) leitfähig eingeklebt, der anschließend im Chip Carrier Halter (weiße Halterung siehe Abbildung 8 (mitte)) eingeklemmt und damit kontaktiert wurde. Dabei kann der zu untersuchende Sensor im CLCC-Gehäuse vereinfacht ausgewechselt werden, ohne den Umverdrahtungsträger neu zu fertigen. Die dritte Variante nutzt ein TO-8 Gehäuse für die Montage und Verdrahtung der Sensoren (siehe Abbildung 8 (rechts)). Auch in diesem

Fall kann die Schnittstelle zum elektrischen Messsystem einfach durch eine Steckverbindung zum Wechseln des Sensors genutzt werden.

Der Aufbau der Gassensoren erfolgt in allen Varianten zuerst durch Einkleben der Transistor-Si-Substrate auf dem Substratträger bzw. in die Gehäuse mit anschließender Kontaktierung mittels einer Drahtbond-Verbindung.

## 2. Messumgebung zur Charakterisierung der Gassensitivität von 2D-Sensoren

Entsprechend der drei Varianten für die Integration der Sensoren wurden auch drei verschiedene Ansätze für die Messumgebung zur Charakterisierung der Gassensitivität von 2D-Sensoren entwickelt. Die flexible Integrationsvariante wurde konzipiert für die Messung in 7-Kammervariante (siehe Abbildung 9 (links)), die jedoch aufgrund bereits erwähnter Schwierigkeiten bei der Abdichtung nicht weiterentwickelt und betrachtet wurde. Für die Charakterisierung der Gassensitivität von 2D-Sensoren in CLCC-Gehäuse wurde zusätzlich zur Charakterisierung der Membranen eine zweite Messkammer (zusätzlich zu Messkammer aus Abbildung 1) überarbeitet - siehe Abbildung 9 (rechts).

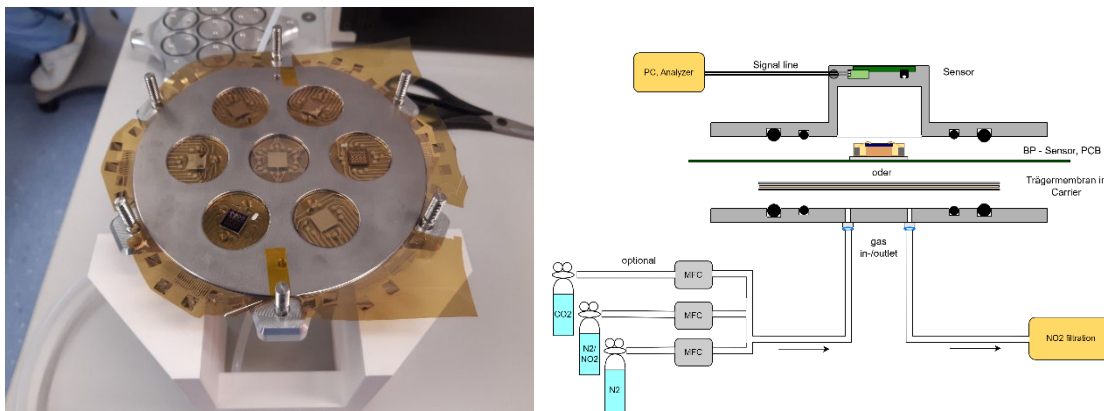


Abbildung 9: Integration von Sensormodulen in die Gasmesskammer

In diesem Aufbau wurden die Sensoren direkt in den Kammeraufbau integriert, um Messgase (CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub>) direkt (in-situ) in der Kammer messen zu können. Damit kann der Aufbau, sowohl für die Gaskonzentrationsmessung der durch die Membran diffundierten Gase, als auch für die gezielte Einstellung der Gasatmosphäre in der Kammer für die Messung der im Projekt entwickelten Gassensoren genutzt werden. Der in Abbildung 9 (rechts) dargestellte Aufbau bietet sowohl die Möglichkeit für das Einbringen von in die Trägersubstrate (Edelstahlrahmen) aufgespannten Polymerfolien (unten), als auch von Verdrahtungssubstraten (z.B. Leiterplatte) mit nach außen geführten elektrischer Umverdrahtung zur Evaluation der 2D-Sensoren.

Für die Charakterisierung der Gassensitivität der Gassensoren in TO-8-Gehäuse wurde eine dritte Messumgebung genutzt und weiterentwickelt mit Unterstützung des Lehrstuhls für Messtechnik der Universität des Saarlandes, Saarbrücken. Die Messkammer ist sehr kompakt und zeichnet sich im Vergleich zu der zweiten Variante durch sehr

kleine Kammervolumen und die Möglichkeit des Einbaus eines zweiten gegenüberliegenden TO-8-Sensor als Referenz für die Gassensitivitätsmessung. Das TO-8 Gehäuse kann dabei direkt in die Messkammer (Abbildung 10) integriert werden.

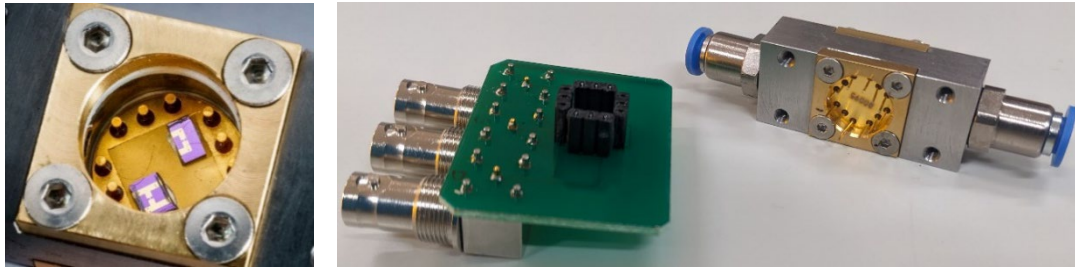


Abbildung 10: Integration des Sensors in TO-8 Gehäuse (links) und zugehörige Messkammer (rechts) mit PCB für Anschlusskontaktierung

Zur Kontaktierung und zum Auslesen der Sensorcharakteristik wurde eine selbstentwickelte Leiterplatte mit Stiftleisten auf die TO-8 Beine gesteckt, die anschließend eine Kontaktierung von BNC-Kabeln ermöglicht, welche aufgrund der guten Schirmung zur Messung der Sensorsignale genutzt wurde. Damit können die Daten sowohl mit einem Device Analyzer als auch mit dem Renesas Evaluation Kit ausgelesen werden. In Abbildung 11 ist der Messaufbau zur Charakterisierung von BP-Sensoren dargestellt. Dieser besteht aus mehreren Massenflussreglern (Mass Flow Controllern), mit denen eine bestimmte Gaskonzentration eingestellt werden kann. Weiterhin befinden sich der BP-Sensor (Abbildung 11 rot markiert) und ein kommerzieller Gassensor (Abbildung 11 grün markiert) im Messsystem, durch welches das Gasgemisch geführt wird.

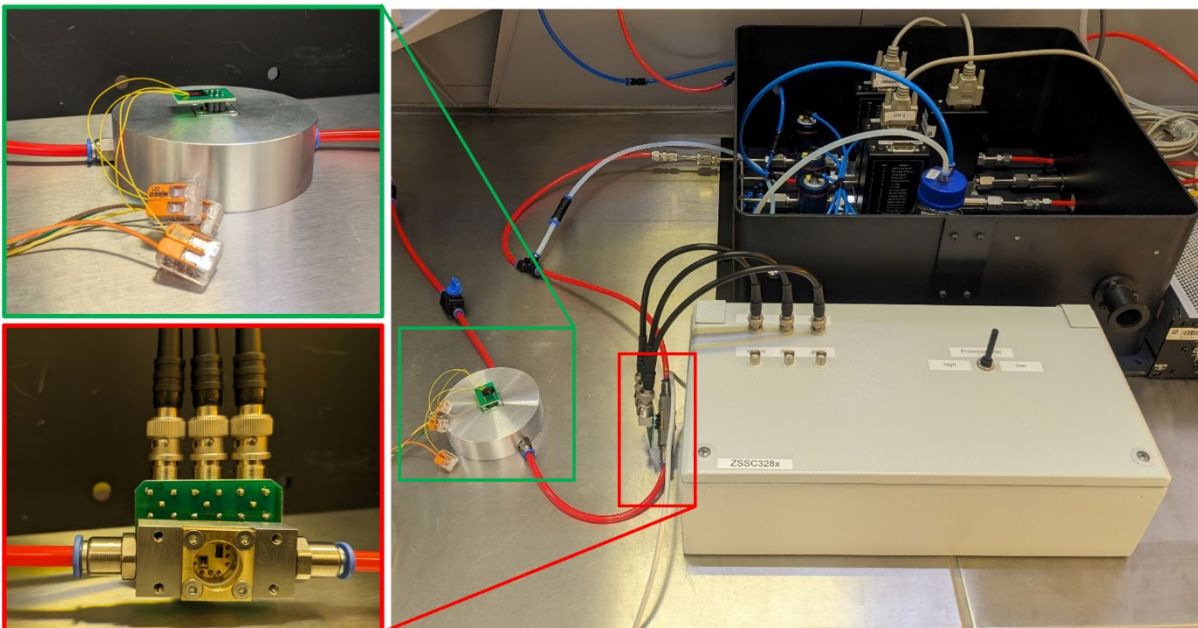


Abbildung 11: Messaufbau zur Charakterisierung der BP-Sensoren

Zur Auswertung der BP-Sensoren können zwei verschiedene Auswertungsmethoden genutzt werden. Der Device Analyzer bietet eine weitreichende Analyse der Sensoren hinsichtlich verschiedener selbstgewählter Arbeitspunkte. Die zweite Variante ist das

Renesas Evaluation Kit, bei dem technisch bedingt bereits ein Arbeitspunkt festgelegt ist. Zur vergleichenden Gascharakterisierung befindet sich ein kommerzieller CO<sub>2</sub>-Sensor im Messsystem, der durch ein selbstgeschriebenes Python-Skript ausgelesen wird.

#### 1.1.4 Flexible Sensorsubstrate:

Für Anwendungen im Bereich der Lebensmittelüberwachung oder tragbaren Elektronik ist es wünschenswert die 2D-Mehrlagensensor- und Kontaktierungsschichten direkt auf flexiblen Substraten aufzubauen. Der flexible Sensor wurde so entwickelt, dass er sowohl in den bisherigen Messumgebungen, als auch als eigenständiges flexibles Substrat verwendet werden kann. Es wurden zwei unterschiedliche Transistorstrukturen konzipiert: Eine ist für den Transfer von Schwarzem Phosphor in Form von Flakes ausgelegt, während die andere für das Drucken mit, im Projektverbund, hergestellter Tinte vorgesehen ist.

Die Prozessierung der Sensoren findet auf einem temporären 4-Zoll-Si-Wafer statt, der zunächst durch Spincoating mit Polyimid beschichtet wurde, das als flexibles Substratmaterial dient. Anschließend wurde ein photostrukturierbarer Lack aufgetragen, um mithilfe einer Maske die Gatestruktur zu erzeugen. Die Elektroden wurden aus einer dünnen Goldschicht (120 nm) gefertigt, wobei eine Chromschicht als Haftvermittler fungierte. Daraufhin wurde eine dielektrische Schicht aus SiO<sub>2</sub> mittels Magnetron-Sputtern durch eine Schattenmaske aufgebracht. Diese Schicht wurde in zwei Varianten aufgetragen: mit und ohne zusätzliche Barrierschicht, wie in Tabelle 3 dargestellt.

Die Schichtdicken wurden mit einem Ellipsometer gemessen, während die Oberflächenrauheit mithilfe eines Oberflächenprofilometers (Dektak) überprüft wurde, um eine gleichmäßige und zuverlässige Sensorstruktur zu gewährleisten.

Tabelle 3: Schichtvariationen dielektrischer Materialien

ohne zusätzliche Barrierschicht	Siliziumnitrit Barriere
500 nm SiO <sub>2</sub>	500 nm SiO <sub>2</sub> + 50 nm Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
750 nm SiO <sub>2</sub>	750 nm SiO <sub>2</sub> + 50 nm Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>

Zur finalen Fertigstellung des Transistoraufbaus wurden die oberen Elektroden für die Source- und Drain-Kontakte ebenfalls durch das Auftragen eines photostrukturierbaren Lacks und das Abscheiden einer dünnen Goldschicht hergestellt.

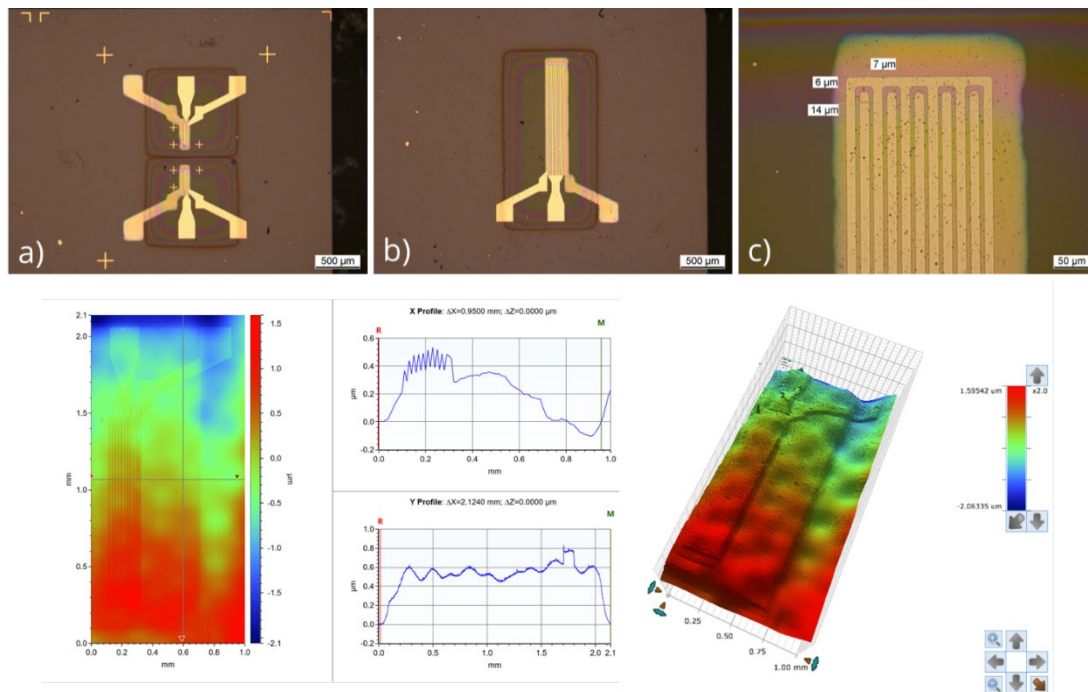


Abbildung 12: Charakterisierung des Schichtaufbaus und der Linienbreiten (oben), Rauheitsbestimmungen der Oxidschicht sowie der Elektroden Strukturen (unten)

An den fertigen Strukturen wurden weitere Untersuchungen zu Linienbreiten, Kurzschlüssen sowie zur Oberflächenrauheit durchgeführt. Zudem konnte die Durchschlagsfestigkeit der dielektrischen Schichten an den hergestellten Substraten getestet werden. Für den vollständigen Aufbau eines Sensors wurden die Substrate separiert und an das HZDR übergeben, um das Sensormaterial auf den erzeugten Fingerelektroden abzulegen. Leider konnten im Projektzeitraum keine vollständig aufgebaute 2D-Sensoren auf flexiblen Substraten vom HZDR realisiert werden, jedoch wird diese vielversprechende Technologie in einem Nachfolgerprojekt GasSens gemeinsam mit HZDR weiterentwickelt.

## 1.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Ausgaben im Projekt wurden gemäß der Planung getätigt. Lediglich die Ausgaben für die Position „846 Dienstreisen“ wurden aufgrund der Coronapandemie und damit Beschränkungen in der Teilnahme an Konferenzen nur zu 32%-gen Anteil im Vergleich zur Planung verausgabt. Des Weiteren wurde eine Änderung in der Finanzierung für Aufbau von Messständen nötig, die abweichend von der Planung neu entwickelt werden mussten (siehe inhaltliche Beschreibung im Abs. 1.1.1). Daher wurden Mittel zur Umrüstung des Messstandes von Mitteln der Position „0843 Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben“ zu „0850 Gegenstände und andere Investitionen von mehr als 800 EUR im Einzelfall“ zu „0831 Gegenstände von bis zu 800 EUR“ und zu „0835 Vergabe von Aufträgen“ insgesamt von 24.750,- EUR beantragt und am 31.10.2020 umgewidmet.

### **1.3 Notwendigkeit der Zuwendung und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten**

Ohne die Förderung wäre es nicht möglich gewesen, die umfangreichen Entwicklungen und Evaluationen der Gasmesstechnik, die Herstellung und Evaluation der verschiedenen Sensorsubstrate und Membranen sowie die Entwicklung der verschiedenen Aspekte des Packaging-Konzeptes für die BP-Sensoren durchzuführen. Das Projekt hat vielversprechende Ergebnisse im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik für BP-Gassensoren ermöglicht, was die Überführung der BP-Sensortechnologie in eine zukünftige Anwendung entscheidend unterstützt. Das erfolgreich entwickelte Technologie-Konzept für die Verkapselung von BP-Sensoren wird mit Eigenmitteln und in Folgeprojekten weiterentwickelt werden. Damit hat die Förderung in diesem Projekt einen Grundstein und einen signifikanten Schritt der Entwicklung unterstützt, um das Konzept in den nächsten Jahren in die Nutzung bringen zu können.

## **2 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Die Entwicklung der selektiven Membranmaterialien wird auch für zahlreiche andere elektronische Anwendungen nutzbar sein. Insbesondere die selektiven Membranen sowie deren Kombinationen mit hermetischen Barrieren sind für die industriellen Partner von großem Interesse. Beispielsweise wird der Schutz von Elektronik vor harschen oder feuchten Umgebungsbedingungen häufig von den Partnern im Bereich der Elektroniktechnologie des IAVT gefordert.

Die Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) in dem Gebiet der Sensorintegration und -charakterisierung mündete in einem neuen Projekt „GasSens - Messelektronikvalidierung für neuartiges Gas-Sensorkonzept (aktuell CO<sub>2</sub>) auf einer 2D-Material-Basis“ (Förderzeichen: KA-TVP-39) finanziert aus dem BMBF-Förderprogramm Impuls- und Vernetzungsfonds. Des Weiteren ist ausgehend von gemeinsam mit HZDR im Projekt erzielten Ergebnissen eine Patenanmeldung zur aktiven Steuerung der Membranen entstanden (siehe Pkt. 4 des Berichtes).

Durch die im Projekt entwickelte Verkapselungs- und Membrantransfertechnologie können das IAVT und das Zentrum für Mikrotechnologien (Z<sub>μ</sub>P) diese Technologie im Rahmen des Verbunds nanoeva (Centre for Non-Destructive Nano Evaluation) anbieten, um Industriepartner bei ihren spezifischen Anforderungen zu unterstützen. Zudem werden die erweiterten Gaspermeabilitätsmessstände, zusätzlich zu den bestehenden fluidischen Messständen, vom Werner-Hartmann-Zentrum genutzt, das unter anderem mit den Laboren des IAVT gebildet wurde.

### **3 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Es ist während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger kein Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen bekannt geworden, der die Änderung in Zielsetzung des Teilprojektes bewirken würden.

### **4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Veröffentlichungen, die während der Projektlaufzeit entstanden sind, gelistet folgend als:

#### *1. Konferenzbeiträge:*

- [1] M. Schubert, Z. Fekri, T. Ackstaller, Y. Vekariya, K. Nieweglowski, A. Erbe, and K. Bock: "Characterisation of gas permeability of polymer membranes for encapsulation of 2D-material sensors", in Proc. of IEEE International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 2021; DOI:10.1109/ISSE51996.2021.9467627
- [2] V. C. Köst, Z. Fekri, J. Zscharchuch, K. Nieweglowski, A. Erbe, and K. Bock, "Polymer Membrane for Characterisation of Gas Permeability and Encapsulation of a Black Phosphorous Sensor," in Proc. of IEEE International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 2023, pp. 1–4. doi: 10.1109/ISSE57496.2023.10168504
- [3] Z. Fekri, V. C. Köst, J. Zscharchuch, K. Nieweglowski, N. T. Lambeva, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Bock and A. Erbe: "Field-effect transistor CO2 detector based on few layers of black phosphorus," in Proc. of IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC), 2023, pp. 331–334. doi: 10.1109/nmdc57951.2023.10344220
- [4] V. C. Köst, Z. Fekri, J. Zscharchuch, A. G. Valenzuela, K. Nieweglowski, A. Erbe, and K. Bock: "Evaluation und Weiterentwicklung eines Permeationssetups zur Charakterisierung von Polymermembranen", in Tagungsband von 12. DVS/GMM-Fachtagung EBL - Elektronische Baugruppen und Leiterplatten, 2024, pp. 184–189, ISBN 978-3-8007-6266-8, ISSN 1432-3419,

#### *2. Patentanmeldung:*

- [5] Patentanmeldung: 10 2024 202 112.1  
Titel: „Bauteil, Vorrichtung und Verfahren zur gesteuerten Permeation“,  
Erfinder: Bock, K., Erbe, A., Köst, V., Nieweglowski, K.,  
Anmelder: Technische Universität Dresden, Helmholtz-Zentrum,  
Anmeldetag: 6. März 2024