

# Sachbericht

## Teil I: Kurzbericht

|                          |  |
|--------------------------|--|
| Verbundprojekt           | Forschungslabor Mikroelektronik Aachen für 2D-Elektronik   |
| Akronym                  | ForLab 2D-ForME  |
| Förderkennzeichen:       | 16ES0940   |
| Zuwendungsempfänger      | Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen  |
| Ausführende Stelle       | Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik<br>IWE1 – Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik 1   |
| Projektleiter            | Herr Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Sven Ingebrandt   |
| Projektkoordinator       | Herr Univ.-Prof. i. R. Dr. rer. nat. Wilfried Mokwa  |
| Administration           | Herr Dr.-Ing. Birger Berghoff  |
| Beteiligte Institutionen | CST – Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Verbindungs-<br>halbleiter<br>Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andrei Vescan<br><br>ELD – Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente<br>Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Max C. Lemme<br><br>IHT – Institut für Halbleitertechnik und Lehrstuhl für Halbleitertechnik<br>Herr Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Joachim Knoch<br><br>IPH – Lehrstuhl für Integrierte Photonik,<br>Herr Univ.-Prof. Jeremy Witzenz, Ph. D.<br><br>ISEA – Lehrstuhl und Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe<br>Herr Univ.-Prof. Dr. ir. Dr. h. c. Rik.W. De Doncker<br><br>IWE1 – Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik 1<br>Herr Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Sven Ingebrandt<br>Herr Univ.-Prof. i. R. Dr. rer. nat. Wilfried Mokwa<br>Herr apl. Prof. Dr.-Ing. Uwe Schnakenberg<br><br>IWE2 – Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik<br>Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Waser<br><br>ZMNT – Zentrallabor für Mikro- und Nanotechnologie<br>Herr Dr.-Ing. Birger Berghoff |
| Bewilligungszeitraum:    | 01.01.2019 – 30.06.2023  |
| Berichtszeitraum:        | 01.01.2019 – 30.06.2023  |

## **1 Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens „ForLab 2D-ForME“ war es, die Aachener Forschung an neuen 2D-Materialien und -Bauelementkonzepten und deren Einsatz in Proof-of-Concept-Demonstratoren zu bündeln und auf einen international führenden Stand zu bringen.

Aus dieser Zielsetzung ergab sich die Notwendigkeit, Investitionen in die Geräteinfrastruktur inkl. deren Installation vorzunehmen. Konkret sollte in die folgenden sechs Geräte investiert werden: (1) ein MOVPE-System, (2) ein Nanotechnologie-Cluster, (3) ein Ionenstrahlätzer, (4) ein LPCVD-System, (5) ein automatischer Flip-Chip-Bonder und (6) ein optischer HF-Messplatz. Mit den Investitionen sollten die verfügbare apparative Ausstattung ergänzt werden, die vorhandene umfangreiche Expertise und die vielen Aktivitäten auf dem Gebiet der 2D-Materialien und ihrer Anwendungen in der Mikroelektronik sowie in der Mikro- und Nanosensorik an der RWTH Aachen zukunftsweisend aufgestellt und ein nachhaltiges und einzigartiges Netzwerk für die Erforschung und Anwendung von 2D-Materialien, 2D-Schichtstapeln und 2D/3D-Heterostrukturen etabliert werden.

Eine der größten technologischen Herausforderungen für die Realisierung von Bauelementen, Schaltungen und Systemen auf Basis von 2D-Materialien ist deren großflächige, reproduzierbare und skalierbare Herstellung. Die etablierten Methoden, die dem wissenschaftlichen und technischen Stand zum Beginn des Vorhabens entsprachen, erlaubten nur stark begrenzte Reproduzierbarkeit und Flexibilität bezüglich der Materialvariation und keine Skalierbarkeit auf relevante Waferdurchmesser, stellten also keine Materialbasis für größere Forschungs- und Entwicklungsvorhaben höherer Technologiereife dar. Im Vorhaben wurden daher mit der MOVPE und PECVD zwei komplementäre Abscheideanlagen vorgesehen, die die oben genannten Anforderungen an die Herstellung von 2D-Materialien erfüllen. Die Materialherstellung wurde durch vier weitere, speziell konfigurierte State-of-the-Art-Geräte zur großflächigen Beschichtung, Strukturierung, Passivierung, Assemblierung und elektro-optischen Charakterisierung ergänzt.

Die Aufgabenstellung im Vorhaben war es, das Geräteinvestitionskonzept umzusetzen, um das oben beschriebene Ziel zu erreichen.

## **2 Ablauf des Vorhabens**

Im Rahmen des Investitionskonzepts war für alle sechs Geräte deren Beschaffung, Installation sowie Inbetrieb- und Abnahme durchzuführen. Tabelle 1 gibt den zeitlichen Ablauf dieser Arbeitspakete für die einzelnen Geräte inkl. deren Lieferung wieder. Wenn nicht anders vermerkt stellen die angegebenen Zeitpunkte den Abschluss der Prozesse dar. Wie der Tabelle zu entnehmen ist, ist das Gerät 2 in zwei Teilsysteme und das Gerät 6 in zwei Hauptkomponenten aufgeteilt.

Für die Geräte 1, 3, 5 und 6 sowie mit geringen Einschränkungen für das Teilsystem 2 des Geräts 2 wurden alle Arbeitspakete erfolgreich abgeschlossen. Das Teilsystem 1 des Geräts 2 und das Gerät 4 wurden bereits geliefert. Ihre Installation konnte begonnen werden, jedoch steht die Inbetrieb- und Abnahme noch aus. Der Grund hierfür ist, dass das Gebäude (Modul 2 des ZMNT), in dem die beiden Geräte aufgebaut sind, Stand heute, d. h. April 2024, immer noch nicht betriebsbereit ist und daher noch nicht vom Bau- und Liegenschaftsbetrieb NRW (BLB NRW) an die RWTH Aachen übergeben wurde. Seitens des BLB NRW war die Übergabe ursprünglich für März 2021 angekündigt worden, weshalb es als vollkommen unkritisch erachtet wurde, für diese beiden Geräte eine Inbetrieb- und Abnahme innerhalb der anfangs bewilligten Laufzeit des Vorhabens (01.01.2019 bis 31.12.2021) zu erzielen. Die Einschränkungen für das Teilsystem 2 des Geräts 2 sind dadurch bedingt, dass aus (sicherheits-)technischen Gründen die Versorgung mit zwei Gaslinien aus dem Modul 2 des ZMNT erfolgt, die bisher noch nicht zur Verfügung stehen.

Da der BLB NRW den Termin für die Übergabe immer wieder verschoben und sich darüber hinaus die Lieferung des Geräts 3 seitens des Herstellers verzögert hatten, mussten zwei Anträge auf zuwendungsneutrale Verlängerung gestellt werden, einmal im Oktober 2021 für eine Verlängerung um ein Jahr (vom 01.01.2022 bis zum 31.12.2022) und ein weiteres Mal im August 2022 für eine Verlängerung

um ein halbes Jahr (vom 01.01.2023 bis zum 30.06.2023). Beiden Anträgen wurde von Seiten des Projektträgers entsprochen. Der aktuelle Bauzustand des Moduls 2 lässt die vorsichtige Schätzung zu, dass die Übergabe gegen Ende des 2. Quartals 2024 möglich erscheint und damit die Installation für das Teilsystem 1 des Geräts 2 und das Gerät 4 abgeschlossen sowie deren Inbetrieb- und Abnahme durchgeführt werden können.

Tabelle 1: Übersicht zu den Daten der Bestellung, Lieferung, Installation sowie Inbetrieb- und Abnahme der sechs Geräte, die über das Vorhaben beschafft wurden. Wenn nicht anders vermerkt, stellen die angegebenen Zeitpunkte den Abschluss der Prozesse dar.

| Gerät  | Bestellung | Lieferung | Installation     | Inbetrieb- und Abnahme |
|--|------------|-----------|------------------|------------------------|
| <b>Gerät 1<br/>(MOVPE-System)</b>            | 05/2019    | 10/2019   | 02/2021          | 02/2021                |
| <b>Gerät 2<br/>(Nanotechnologie-Cluster)</b> |            |           |                  |                        |
| - Teilsystem 1                               | 11/2019    | 03/2021   | 10/2022 begonnen | Q2/2024 (Prognose)     |
| - Teilsystem 2                               | 11/2019    | 11/2020   | 12/2020          | 02/2021                |
| <b>Gerät 3<br/>(Ionenstrahlätzer)</b>        | 10/2020    | 08/2022   | 09/2022          | 09/2022                |
| <b>Gerät 4<br/>(LPCVD-System)</b>            | 02/2021    | 12/2021   | 11/2022 begonnen | Q2/2024 (Prognose)     |
| <b>Gerät 5<br/>(Flip-Chip-Bonder)</b>        | 04/2020    | 08/2020   | 10/2020          | 10/2020                |
| <b>Geräts 6<br/>(HF-Messplatz)</b>           |            |           |                  |                        |
| - Hauptkomponente 1                          | 03/2019    | 06/2019   | 07/2019          | 07/2019                |
| - Hauptkomponente 2                          | 06/2020    | 12/2020   | 12/2020          | 12/2020                |

### 3 Wesentliche Ergebnisse sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Durch die gewährte Förderung konnte das geplante Investitionskonzept in die notwendige Geräteinfrastruktur des ZMNT umgesetzt werden. Auch wenn die Prozesskapazitäten der Geräte zur Realisierung von Bauelementen, Schaltungen und Systemen auf Basis von 2D-Materialien noch nicht vollumfänglich zur Verfügung stehen, stehen 23 abgeschlossene, laufende bzw. geplante Projekte der Mitglieder von „ForLab 2D-ForME“ in direktem Bezug zu den hier beschriebenen Geräte- und Prozesskapazitäten und dem damit erworbenen Know-how. Die Projekte werden sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene mit Partnern aus Universitäten, Großforschungseinrichtungen und der Industrie durchgeführt.

Die Ergebnisse des Vorhabens wurden bislang auf acht nationalen und internationalen Veranstaltungen präsentiert und sind bisher in sieben wissenschaftlichen Veröffentlichungen eingeflossen.

Darüber hinaus ermöglicht die neue Infrastruktur die Bereitstellung modernster Anlagentechnologie und die Ausbildung des akademischen Nachwuchses auf internationalem Spitzenniveau. Dies betrifft zum einen die wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter während Ihrer Promotionsphase, aber insbesondere auch die Studierenden in den von den Mitgliedern des „FoLab 2D-ForME“ und seinen Partnern getragenen Studiengängen (vor allem Elektrotechnik, Physik und Materialwissenschaften).

# Sachbericht

## Teil II: Eingehende Darstellung

|                          |  |
|--------------------------|--|
| Verbundprojekt           | Forschungslabor Mikroelektronik Aachen für 2D-Elektronik   |
| Akronym                  | ForLab 2D-ForME  |
| Förderkennzeichen:       | 16ES0940   |
| Zuwendungsempfänger      | Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen  |
| Ausführende Stelle       | Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik<br>IWE1 – Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik 1   |
| Projektleiter            | Herr Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Sven Ingebrandt   |
| Projektkoordinator       | Herr Univ.-Prof. i. R. Dr. rer. nat. Wilfried Mokwa  |
| Administration           | Herr Dr.-Ing. Birger Berghoff  |
| Beteiligte Institutionen | CST – Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Verbindungs-<br>halbleiter<br>Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andrei Vescan<br><br>ELD – Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente<br>Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Max C. Lemme<br><br>IHT – Institut für Halbleitertechnik und Lehrstuhl für Halbleitertechn-<br>nik<br>Herr Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Joachim Knoch<br><br>IPH – Lehrstuhl für Integrierte Photonik,<br>Herr Univ.-Prof. Jeremy Witzenz, Ph. D.<br><br>ISEA – Lehrstuhl und Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe<br>Herr Univ.-Prof. Dr. ir. Dr. h. c. Rik.W. De Doncker<br><br>IWE1 – Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik 1<br>Herr Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Sven Ingebrandt<br>Herr Univ.-Prof. i. R. Dr. rer. nat. Wilfried Mokwa<br>Herr apl. Prof. Dr.-Ing. Uwe Schnakenberg<br><br>IWE2 – Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik<br>Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Waser<br><br>ZMNT – Zentrallabor für Mikro- und Nanotechnologie<br>Herr Dr.-Ing. Birger Berghoff |
| Bewilligungszeitraum:    | 01.01.2019 – 30.06.2023  |
| Berichtszeitraum:        | 01.01.2019 – 30.06.2023  |

## Inhalt

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Zielsetzung des Vorhabens .....   | 3  |
| 2     | Zusammenfassung des Investitionskonzepts .....  | 3  |
| 2.1   | Gerät 1: MOVPE-System .....   | 4  |
| 2.2   | Gerät 2: Nanotechnologie-Cluster .....  | 4  |
| 2.3   | Gerät 3: Ionenstrahlätzer .....   | 4  |
| 2.4   | Gerät 4: LPCVD-System .....   | 5  |
| 2.5   | Gerät 5: Automatischer Flip-Chip-Bonder .....   | 5  |
| 2.6   | Gerät 6: Optischer HF-Messplatz .....   | 5  |
| 3     | Durchgeführte Arbeiten .....  | 6  |
| 3.1   | Gerät 1: MOVPE-System .....   | 6  |
| 3.2   | Gerät 2: Nanotechnologie-Cluster .....  | 6  |
| 3.3   | Gerät 3: Ionenstrahlätzer .....   | 8  |
| 3.4   | Gerät 4: LPCVD-System .....   | 8  |
| 3.5   | Gerät 5: Automatischer Flip-Chip-Bonder .....   | 9  |
| 3.6   | Gerät 6: Optischer HF-Messplatz .....   | 9  |
| 4     | Vergleich des Vorhabens mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung. ....  | 9  |
| 4.1   | Arbeitsprogramm .....   | 9  |
| 4.2   | Zeitlicher Ablauf .....   | 11 |
| 4.3   | Kosten und wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....   | 11 |
| 5     | (Voraussichtlicher) Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft – im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans ..... | 12 |
| 5.1   | Schutzrechte .....  | 12 |
| 5.2   | Produkte .....  | 12 |
| 5.3   | Technologien .....  | 13 |
| 5.3.1 | Gerät 1 .....   | 13 |
| 5.3.2 | Gerät 2 .....   | 13 |
| 5.3.3 | Gerät 3 .....   | 13 |
| 5.3.4 | Gerät 4 .....   | 13 |
| 5.3.5 | Gerät 5 .....   | 13 |
| 5.3.6 | Gerät 6 .....   | 13 |
| 5.4   | Know-how-Transfer .....   | 13 |
| 5.5   | Wissenstransfer .....   | 16 |
| 6     | Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....                                | 16 |
| 7     | Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse .....  | 16 |
| 7.1   | Veröffentlichung im Rahmen von Veranstaltungen .....  | 16 |
| 7.2   | Veröffentlichen in Fachzeitschriften .....  | 18 |

## 1 Zielsetzung des Vorhabens

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens „ForLab 2D-ForME“ war es, die Aachener Forschung an neuen 2D-Materialien und -Bauelementkonzepten und deren Einsatz in Proof-of-Concept-Demonstratoren zu bündeln und auf einen international führenden Stand zu bringen.

Aus dieser Zielsetzung ergab sich die Notwendigkeit, Investitionen in die Geräteinfrastruktur inkl. deren Installation vorzunehmen. Mit den Investitionen sollten die verfügbare apparative Ausstattung ergänzt werden, die vorhandene umfangreiche Expertise und die vielen Aktivitäten auf dem Gebiet der 2D-Materialien und ihrer Anwendungen in der Mikroelektronik sowie in der Mikro- und Nanosensorik an der RWTH Aachen zukunftsweisend aufgestellt und ein nachhaltiges und einzigartiges Netzwerk für die Erforschung und Anwendung von 2D-Materialien, 2D-Schichtstapeln und 2D/3D-Heterostrukturen etabliert werden.

Die dadurch geschaffenen Möglichkeiten, die Eigenschaften von nanoskaligen Materialien exakt zu kontrollieren, erlauben More-than-Moore-Lösungen für mikro- und optoelektronische Bauelemente und Systeme sowie, den internationalen Stand der Forschung an neuen Materialien und Bauelementen für die Mikroelektronik voranzutreiben und wichtige Impulse für deren wirtschaftliche Umsetzung zu geben. Das Vorhaben fügte sich damit sehr gut in die zentralen Forschungsthemen der Hightech-Strategie der Bundesregierung ein. Anwendungsfelder erstrecken sich von Industrie 4.0, Internet der Dinge über Elektromobilität, automatisiertes & autonomes Fahren, effiziente Energieversorgung bis hin zur Gesundheits- und Medizintechnik.

## 2 Zusammenfassung des Investitionskonzepts

Eine der größten technischen Herausforderungen für die Realisierung von Bauelementen, Schaltungen und Systemen auf Basis von 2D-Materialien ist deren großflächige, reproduzierbare und skalierbare Herstellung. Die zum Beginn des Vorhabens etablierten Methoden erlaubten nur stark begrenzte Reproduzierbarkeit und Flexibilität bezüglich der Materialvariation und keine Skalierbarkeit auf relevante Waferdurchmesser. Sie stellten also keine Technologiebasis für größere Forschungs- und Entwicklungsvorhaben höherer Technologiereife dar.

In Vorhaben „ForLab 2D-ForME“ wurden daher zwei komplementäre Abscheideanlagen vorgesehen, die die oben genannten Anforderungen an die Herstellung von 2D-Materialien erfüllen: ein Gerät zur metallorganischen Gasphasen-Epitaxie (engl. Metalorganic Vapor-Phase Epitaxy (MOVPE)) und ein Gerät zur plasma-unterstützten Gasphasendeposition (engl. Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)). Wegen der sehr großen Zahl technologisch vielversprechender Verbindungen, Vorhaben und Projekte sollte mit diesen Systemen eine zweistufige Materialentwicklung durchgeführt werden. Während die PECVD zur Materialelektion und für grundlegende Studien eingesetzt wird, erlaubt die MOVPE die Entwicklung hochqualitativer Prozesse für die reproduzierbare Abscheidung von 2D-Materialien, Legierungen und Heterostrukturen mit abrupten Grenzflächen. Die Materialherstellung wurde durch vier weitere speziell konfigurierte State-of-the-Art-Geräte zur großflächigen Beschichtung, Strukturierung, Passivierung, Assemblierung und elektro-optischen Charakterisierung ergänzt. Tabelle 1 gibt eine Übersicht der sechs Geräte. In den folgenden Abschnitten werden für jedes Gerät die technologischen Zielsetzungen und die Notwendigkeit der Investition dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht der im Rahmen des Vorhabens beschafften Geräte.

| Gerät | Bezeichnung                    |
|-------|--------------------------------|
| 1     | MOVPE-System                   |
| 2     | Nanotechnologie-Cluster        |
| 3     | Ionenstrahlätzer               |
| 4     | LPCVD-System                   |
| 5     | Automatischer Flip-Chip-Bonder |
| 6     | Optischer HF-Messplatz         |

## 2.1 Gerät 1: MOVPE-System

Die Schlüsseltechnologie für einen zukünftigen erfolgreichen Einsatz von Bauelementen, Schaltungen und Systemen aus 2D-Materialien ist die großflächige Herstellung von einzelnen 2D-Schichten und komplexen (Hetero-)Schichtstrukturen. Zum Zeitpunkt der Antragstellung wurde international in der 2D-Forschung zur Demonstration neuer Konzepte überwiegend auf die Methode der mechanischen Exfolierung zurückgegriffen, also das Ablösen von Einzellagen (Flocken) aus Kristallen und deren Kontaktierung. Dieser rudimentäre technologische Ansatz weist eine stark begrenzte Reproduzierbarkeit auf und bietet keine Skalierbarkeit auf technologisch relevante Waferdurchmesser. Dies ist aber eine notwendige Voraussetzung für eine realistische industrielle Umsetzung. Die hohe Skalierbarkeit, Kontrolle, Reinheit und Reproduzierbarkeit der MOVPE-Technologie sind die Basis der extrem erfolgreichen industriellen Herstellung von Verbindungshalbleitern und werden auch die Industrialisierung von 2D- und 2D/3D-Bauelementen, -Schaltungen und -Systemen vorantreiben. Weltweit gab es nach dem Stand der Technik bei Antragstellung kein derartiges MOVPE-System, das speziell für 2D-Materialien konfiguriert wurde und in der Forschung und Entwicklung eingesetzt wird. Die hohen Kosten eines solchen MOVPE-Systems konnten nicht durch die Grundausstattung der RWTH Aachen gedeckt werden, weshalb seine Beschaffung über das Vorhaben „ForLab 2D-ForME“ realisiert werden sollte.

## 2.2 Gerät 2: Nanotechnologie-Cluster

Die atomaren Abmessungen der Bauelementtechnologie mit 2D-Materialien erfordern eine dedizierte kontaminationskontrollierte Prozessierung. Dies kann nur durch eine Clusterung von Geräten zum atomlagengenauen Abscheiden, Verkapseln und Strukturieren (Ätzen) erreicht werden. An der RWTH Aachen existierte kein derartiges Cluster, das die verschiedenen Prozesse vereint und darüber hinaus mit Wafergrößen von 200 mm kompatibel ist. Daraus ergab sich die Notwendigkeit, ein Nanotechnologie-Cluster, dessen Beschaffung auf Grund des Finanzvolumens nicht aus der Grundausstattung möglich war, als Geräte-Investition im Vorhaben „ForLab 2D-ForME“ vorzusehen.

## 2.3 Gerät 3: Ionenstrahlätzer

Bei der Kontaktierung von 2D-Materialien oder bei der Realisierung (bio-)chemischer Sensoren auf Basis von 2D-Materialien werden in vielen Fällen edle und chemisch resistente Metalle verwendet. Eine Strukturierung dieser Materialien ist typischerweise nur durch nasschemisches Ätzen oder durch sogenannte Lift-off-Prozesse möglich. Diese Prozesse sind schwierig bis unmöglich bei lateralen Strukturgrößen unterhalb von 2 µm. Kleinere Strukturbreiten lassen sich nur durch Ionenstrahlätzen (engl. Ion Beam Etching (IBE)) realisieren. Das IBE stellt damit einen notwendigen alternativen und komplementären Ansatz zur Strukturierung mittels Atomlagenätzen (Teilkomponente des Geräts 2) dar.

Weitere typische Anwendungsbereiche des Ionenstrahlätzens, die die vorhandenen technologischen Möglichkeiten deutlich erweitern, sind

- die Strukturierung von Multilagenstapeln für elektronische Bauelemente und Sensoren,
- das Einstellen von definierten Seitenwandwinkeln bei MEMS und MOEMS,
- die Erstellung von dreidimensionalen opto-elektronischen Mikrostrukturen und
- das Ionenstrahlglätten zur Reduktion von Mikro-Rauheiten.

Mit einem Ionenstrahlätzer sollten die genannten Prozesse realisiert werden, die bei Antragstellung mit den im ZMNT der RWTH Aachen vorhandenen Geräten nicht möglich waren.

Zusätzlich zum reinen Ionenstrahlätzen sollte die Möglichkeit des reaktiven Ionenstrahlätzens (engl. Reactive Ion Beam Etching, RIBE) gegeben werden, um einerseits das Spektrum der zu strukturierenden Materialien deutlich zu erweitern und andererseits durch die reaktive Ätzkomponente die Struktur-tiefen zu vergrößern. Weiterhin sollten auch Substratgrößen unterhalb von 200 mm, wie Scheiben mit Durchmessern 100 mm und 150 mm, prozessiert werden können, um kompatibel zu den vorhandenen technologischen Möglichkeiten von aktuellen Industriekunden und Projektpartnern zu sein.

Wafer, die mit 2D-Materialien beschichtet sind, sind nicht mehr CMOS-kompatibel, auch wenn sie mit siliziumbasierten Materialien verkapselt sind. Nach Stand des Wissens zum Zeitpunkt der Antragstellung gab es weder in den künftigen Forschungslaboren, noch in den Forschungsfabriken Einrichtungen, bei denen Ionenstrahlätzen von nicht CMOS-kompatiblen Wafern möglich ist, was die Beschaffung des Geräts motivierte. Da das Gerät auf Grund des Finanzvolumens nicht aus der Grundausstattung beschafft werden konnte, wurde seine Beschaffung in das Investitionskonzept des Vorhabens „ForLab 2D-ForME“ aufgenommen.

#### **2.4 Gerät 4: LPCVD-System**

Das Aufbringen der im Rahmen des Vorhabens geplanten Bauelemente und Systeme auf einem Substrat einerseits und der Transfer der erlangten Forschungsergebnisse in die industrielle Nutzung andererseits bedingen die Kombination der 2D-Materialien mit der etablierten Siliziumtechnologie in Hybridsystemen. Um in der Lage zu sein, industrie-kompatible Prozesse (Prozessintegration) zu entwickeln bzw. Hybridsysteme mit geeigneten Eigenschaften zu erforschen, ist die Herstellung von vor-prozessierten Substraten basierend auf der etablierten Siliziumtechnologie unabdingbar. Zum Zeitpunkt der Antragstellung stand an der RWTH Aachen kein Gerät zur großflächigen Beschichtung mit Siliziumnitrid und Polysilizium zur Verfügung. Der hierbei favorisierte Beschichtungsprozess ist die chemische Gasphasenabscheidung bei niedrigen Drücken (engl. Low-Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD)), weil dieser Prozess konform abgeschiedene Schichten von sehr hoher Qualität liefert. Weder Qualität noch Konformität können durch plasma-basierte Depositionsprozesse (vgl. Gerät 2) erreicht werden. Darüber hinaus erlaubt die Anschaffung eines LPCVD-Systems auch den Einfluss etablierter Technologien auf die 2D-Materialien zu untersuchen. Eine variable Auslegung des LPCVD-Systems ermöglicht die Erforschung von Defektheilung der 2D-Materialien durch eine (Formiergas-)Temperung. Auch dieser Standardprozess aus der Siliziumtechnologie war an der RWTH Aachen zum Zeitpunkt der Antragstellung für 2D-Materialien nur sehr rudimentär und mit widersprüchlichen Ergebnissen untersucht worden. Die Beschaffung des LPCVD-Systems, insbesondere mit einer Kompatibilität mit 200-mm-Wafern, war aus der Grundausstattung wegen der hohen Kosten nicht möglich. Für das Gesamtprojekt stellt die Anlage eine essentielle Technologiekomponente dar, weil sie die Herstellung und Erforschung von CMOS/2D-Hybridsystemen erlaubt.

#### **2.5 Gerät 5: Automatischer Flip-Chip-Bonder**

Ziel des automatischen Flip-Chip-Bondens ist es nicht nur vereinzelt Komponenten zu Demonstrationszwecken aufzubauen, sondern auch systematisch Aufbauprozesse zu entwickeln, die einen hochperformanten, aber auch praktischen (günstigen, skalierbaren) Aufbau der entwickelten, auf 2D-Materialien basierenden Komponenten ermöglicht. Im Rahmen des Vorhabens sollte diese Aufbautechnik eine Kernkompetenz der in Aachen angesiedelten Verbundpartner werden.

Die zum Zeitpunkt der Antragstellung an der RWTH existierenden Chip-Bonder hatten eine weit geringere Platziergenauigkeit und bedienten wesentlich kleinere Substrate. Des Weiteren wurden die Prozesse auf den existierenden Anlagen manuell gesteuert und waren nicht dazu geeignet, die Tauglichkeit der entwickelten Prozesse für Serienherstellbarkeit zu demonstrieren.

Hieraus ergab sich die Notwendigkeit, einen automatischen Flip-Chip-Bonder in Aachen zu installieren, um bisher unerreichbare Möglichkeiten sowohl im Bereich des „Proof of Principle“ als auch im Bereich der Unterbeweisstellung von praktischer/industrieller Tauglichkeit zu erschließen. Die Beschaffung des Flip-Chip-Bonders war wegen der hohen Kosten aus der Grundausstattung der RWTH Aachen nicht möglich.

#### **2.6 Gerät 6: Optischer HF-Messplatz**

Ein wichtiger Vorteil von aus 2D-Materialien hergestellten Komponenten ist, nebst geringem Energieverbrauch, die Möglichkeit eines extrem schnellen Betriebs. Die äußerst hohe Beweglichkeit von Ladungsträgern, z. B. in Graphen, ist nur eine von vielen vorteilhaften Eigenschaften, die neuartige Bauelemente ermöglichen. Im Bereich der Opto-Elektronik sind 2D-Materialien und Graphen wegen ihrer extrem hohen Wechselwirkung mit Licht sehr interessant. Daraus lassen sich Komponenten entwickeln,

die trotz des sehr geringen Volumenanteils der 2D-Materialien einen sehr hohen Wirkungsgrad aufweisen. Insbesondere bei elektro-optischen Modulatoren besteht dadurch die Möglichkeit, effiziente Modulatoren mit sehr geringer Kapazität und deshalb auch sehr schnellem und energiesparendem Betrieb zu realisieren. Um die Möglichkeiten, die durch diese neuartigen Komponenten erschlossen werden, nicht nur analog auf der Komponentenebene, sondern auch auf der Systemebene zeigen zu können, ergab sich die Notwendigkeit, die Infrastruktur für elektro-optische Charakterisierung auf den neuesten Stand der Technik zu aktualisieren. Durch die Investition wurde es ermöglicht, die Infrastruktur von 32 Gbaud On-Off-Keying zum Zeitpunkt der Antragstellung auf 64 Gbaud 4-Level-Pulse-Amplitude-Modulation (PAM-4) und kohärenter Übertragung zu erweitern. So soll die Brücke zu angewandter Forschung geschlagen werden, um eine zukünftige Einbindung der Industrie in diese Forschungsfelder zu ermöglichen. Das Gerät ließ sich auf Grund des Finanzvolumens nicht aus der Grundausstattung beschaffen.

### **3 Durchgeführte Arbeiten**

Die sechs Geräte, die im Rahmen des Vorhabens angeschafft und installiert wurden, dienen als Gliederungsebene zur Darstellung der durchgeführten Arbeiten in den Abschnitten 3.1 bis 3.6. Ergänzend wird in Abschnitt 4 das Vorhaben mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung verglichen.

#### **3.1 Gerät 1: MOVPE-System**

Die Konzipierung und Konfiguration des MOVPE-Systems fanden Anfang 2019 statt. Die Beauftragung erfolgte im Mai 2019. Geliefert wurde das System im Oktober 2019. Die vorbehaltlose Abnahme und vollständige Inbetriebnahme erfolgten im Februar 2021, auch nach dem Abschluss umfangreicher Erweiterungen und Umbauten an der technischen Gebäudeausstattung des CST-2D-Labors im AIXTRON Verfügungszentrum (finanziert durch die zentrale Hochschulverwaltung (ZHV) der RWTH Aachen, zzgl. personeller Eigenbeiträge von ca. 12 PM durch CST). Damit wurde der Meilenstein (MS) 1, d. h. die Abnahme des Geräts 1, erfolgreich erreicht. Das Gerät befindet sich seitdem im intensiven Forschungsbetrieb.

#### **3.2 Gerät 2: Nanotechnologie-Cluster**

Das Nanotechnologie-Cluster ist mit der Prozessierung von 200-mm-Wafern kompatibel und besteht aus drei Modulen und einer Möglichkeit zum Vakuumtransfer.

- Das Modul A ermöglicht das Aufwachsen von 2D- und 1D-Materialien als Einzelschichten oder Schichtstapel über den Prozess der PECVD bei Substrattemperaturen von 200 °C bis 1200 °C. Die Plasmaanregung erfolgt über ein induktiv eingekoppeltes Plasma (engl. Inductively Coupled Plasma (ICP)). Damit ist das Gerät sehr vielseitig einsetzbar, und Prozesse können voraussichtlich durch Einsatz der Plasmaanregung von bekannten Hochtemperaturprozessen zu relevanten Niedertemperaturprozessen skaliert werden. Das großflächige Abscheiden von 2D-Materialien ist ein Forschungsschwerpunkt in Aachen. Mit dem Modul A des Nanotechnologie-Clusters sollen diese Prozesse zum großflächigen Abscheiden von 2D-Materialien erforscht und entwickelt werden. Derartige Prozesse sind an anderen Universitäten oder Forschungseinrichtungen nicht verfügbar.
- Das Modul B ermöglicht die plasmaunterstützte Atomlagenabscheidung (engl. Atomic Layer Deposition (ALD)) sowohl von Dielektrika zur Verkapselung von 2D-Materialien als auch von Metallen zur Kontaktierung der Materialschichtstapel bei niedrigen Temperaturen.
- Das Modul C erlaubt die Erforschung von Prozessen zum Atomlagenätzen (engl. Atomic Layer Etching (ALE)), die schädigungsarmes, atomlagengenaues Ätzen von 2D-Materialien gewährleisten.
- Der Vakuumtransfer in diesem Cluster ist die Basis für eine nahezu kontaminationsfreie Prozessführung, was für 2D-Materialien entscheidend ist.

Für das Nanotechnologie-Cluster – genauso wie für den Ionenstrahlätzer (Gerät 3) und das LPCVD-System (Gerät 4) – war gemäß der Vorhabenbeschreibung das Modul 1 des Zentrallabors für Mikro-

und Nanotechnologie (ZMNT) als Aufstellungsort vorgesehen. Dabei war bei Antragsstellung auf Grundlage der Gebäudepläne davon ausgegangen worden, dass derjenige Teil des Abluftsystems im Modul 1, der zum Anschluss der Geräte verwendet werden sollte, für die neu zu installierenden Gase (sicherheits-)technisch geeignet ist.

Im Zuge der Festlegung der endgültigen Spezifikationen zur Integration der Geräte in das Modul 1 des ZMNT musste überraschend festgestellt werden, dass es entgegen der ursprünglichen Baupläne sicherheitstechnisch nicht zu verantworten ist, die Geräte 2, 3 und 4 vollständig an den vorgesehenen Teil des Abluftsystems anzuschließen. Als Konsequenz wurde daher zunächst eine bauliche Erweiterung des Abluftsystems im Modul 1 diskutiert. Diese Baumaßnahme hätte einerseits die finanziellen Mittel, die für die Installation der Geräte zur Verfügung stehen, massiv überschritten und andererseits den laufenden Forschungsbetrieb im Modul 1 für die Zeit der Bauarbeiten nicht hinnehmbar eingeschränkt. Daher wurde der alternative Plan entwickelt,

1. nur einen Teil des Geräts 2 (d. h. das Modul C zum Atomlagenätzen, im weiteren als **Teilsystem 2 des Nanotechnologie-Clusters** bezeichnet) und das **Gerät 3 im Modul 1 des ZMNT zu installieren**, und
2. den Hauptteil des Geräts 2 (d. h. das Modul A zur Gasphasenabscheidung und das Modul B zum Atomlagenätzen, im weiteren als **Teilsystem 1 des Nanotechnologie-Clusters** bezeichnet) und das **Gerät 4 im Modul 2 des ZMNT** aufzubauen.

Die Gründe, die dazu geführt haben, das neue Modul 2 des ZMNT als Aufstellort für das Teilsystem 1 des Nanotechnologie-Clusters sowie für das Gerät 3 zu wählen, liegen in der dortigen Infrastruktur für Abluft und Gase. Das Abluftsystem des Moduls 2 des ZMNT ist (sicherheits-)technisch einwandfrei für die beiden Geräte geeignet. Die Infrastruktur zur Gasbereitstellung und -überwachung wurde für Gase mit einem hohen Gefährdungspotential (d. h. für toxische, lebensgefährliche, brennbare oder explosionsfähige Gase) konzipiert. Ein Großteil der Gase, die zum Betrieb der beiden Geräte benötigt werden, fallen in diese Gefährungskategorien. Die Gasinfrastruktur des Moduls 2 hat bereits einen Teil der benötigten Gase enthalten bzw. hat es erlaubt, die fehlenden gefährlichen Gase zu ergänzen. Dadurch konnte die Gasinstallation für die Geräte auch im Hinblick auf den langfristigen Betrieb im Vergleich zu einer Installation im vorhandenen Modul 1 des ZMNT deutlich kosteneffizienter gestaltet werden konnte, weil so keine zusätzliche Gasversorgung für die Gase mit hohem Gefährdungspotential aufgebaut werden musste.

Vor dem Hintergrund dieser Kosten- und Sicherheitsargumente wurde die grundsätzliche Idee gefasst, alle Gase mit hohem Gefährdungspotential aus einer einzigen Versorgung bereitzustellen, weshalb das im Modul 1 zu installierende Teilsystem 2 des Nanotechnologie-Clusters aus dem Modul 2 heraus mit Chlor und Wasserstoff versorgt wird.

Die Trennung des Nanotechnologie-Clusters in die beiden Teilsysteme wurde zusätzlich dadurch motiviert, dass bei der endgültigen Festlegung der Spezifikation des Teilsystems 2 zwingend benötigte Ätzprozesse hinzugekommen sind, bei denen die Gefahr einer Kontamination des Teilsystems 1 über die Transferkammer hinweg durch Residuen der Ätzgase aus dem Teilsystem 1 bestanden hätte. Da eine Prüfung ergab, dass der in der Vorhabenbeschreibung dargelegte Nutzungsplan für das Nanotechnologie-Cluster auch bei einer Trennung weiterhin vollumfänglich ausführbar sein wird, wurde entschieden, die Trennung umzusetzen.

Zum Zeitpunkt dieser Planentwicklung befand sich das Modul 2 des ZMNT im Bau und die Übergabe vom Bau- und Liegenschaftsbetrieb NRW (BLB NRW) an die RWTH Aachen war für März 2021 angekündigt worden. Daher wurden zu diesem Zeitpunkt die Durchführung des Arbeitsprogramms und die Erfüllung der Meilensteine innerhalb der ursprünglichen Projektlaufzeit (d. h. bis zum 31.12.2021) als vollkommen unkritisch erachtet.

Der überarbeitete Plan zur Aufstellung der Geräte 2 und 4 wurde dem Projektträger vorgestellt. Auch aus dessen Sicht sprach nichts gegen eine Umsetzung, weshalb mit der Realisierung des Plans in Absprache mit dem BLB NRW begonnen wurde.

Die endgültigen Spezifikationen des Nanotechnologie-Clusters wurden festgelegt und die Bestellung erfolgte im November 2019. Das Teilsystem 2 wurde im November 2020 geliefert, die Installation wurde im Dezember 2020 durchgeführt. Die Inbetriebnahme und Prozessabnahme erfolgte im Februar 2021 mit der Einschränkung, dass die Versorgung mit den Gasen Chlor und Wasserstoff noch nicht zur Verfügung stand. Grund dafür war, dass das Modul 2 des ZMNT und somit auch die Gasversorgung zu diesem Zeitpunkt entgegen der ursprünglichen Ankündigung nicht fertiggestellt waren. Damit wurde der MS 2, d. h. die Abnahme des Geräts 2, nur teilweise erfüllt. Das System ist durch das Reservierungssystem des ZMNT, den Facility Online Management (FOM), für die Nutzerinnen und Nutzer der beteiligten Lehrstühle buchbar und wird trotz der eingeschränkten Gasverfügbarkeit sowohl von Mitgliedern des Aachener ForLabs als auch von Partnern aus der Aachener Physik mittlerweile intensiv genutzt.

Der Zustand hinsichtlich der Fertigstellung des Moduls 2 hatte sich auch nicht geändert, als das Teilsystem 1 im März 2021 geliefert wurde, weshalb mit der Installation nicht direkt nach Lieferung begonnen werden konnte. Erst anderthalb Jahre später, d. h. im September 2022, hatte das Modul 2 einen Bauzustand erreicht, der es gestatte, mit der Installation des Teilsystems 1 zu beginnen. Im Oktober 2022 wurde das Teilsystem 1 aufgebaut und mit seiner Einbindung in die Reinraumumgebung des Moduls 2 des ZMNT begonnen.

Der Zeitpunkt der Übergabe des Moduls 2 wurde durch den BLB NRW immer wieder verschoben, weil das Gebäude weiterhin nicht betriebsbereit war. Dies war einer der Hauptgründe, warum zwei Anträge auf zuwendungsneutrale Verlängerung gestellt werden mussten, die der Projektträger bewilligte (Details siehe Abschnitt 0).

Die letzte offizielle Ankündigung des BLB NRW aus dem Dezember 2023 war, dass die Übergabe des Moduls 2 Ende Februar 2024 erfolgen sollte. Stand heute, d. h. April 2024, bleibt es der BLB NRW der RWTH Aachen weiterhin schuldig, das Modul 2 zu übergeben bzw. überhaupt einen Termin für die Übergabe in Aussicht zu stellen. Dies hat zur Folge, dass die Inbetrieb- und Abnahme des Teilsystems 1 des Nanotechnologie-Clusters sowie des Geräts 4 immer noch ausstehen und dass das Teilsystem 2 des Nanotechnologie-Clusters immer noch nicht mit allen Gasen versorgt wird. Der aktuelle Bauzustand lässt die vorsichtige Schätzung zu, dass eine Übergabe des Moduls 2 gegen Ende des 2. Quartals 2024 möglich erscheint, so dass dann die Abnahme des Teilsystems 1 des Nanotechnologie-Clusters erfolgen kann. Erst dann wird der MS 2, d. h. die vollständige Abnahme des Geräts 2, erreicht werden.

### **3.3 Gerät 3: Ionenstrahlätzer**

Der Ionenstrahlätzer ist für die Prozessierung von Wafern bis 200 mm ausgelegt. Neben reinen IBE-Prozessen können auch RIBE-Prozesse durchgeführt werden. Das Gerät wurde um ein zusätzliches Modul zur Ionenstrahldeposition (engl. Ion Beam Deposition (IBD)) erweitert, dessen Kosten hochschulseitig getragen wurden (ca. 110.000 €). Ein Massenspektrometer erlaubt eine genaue Endpunktdetektion beim Ätzen.

Der Ionenstrahlätzer wurde im Oktober 2020 über ein Ausschreibungsverfahren bestellt. Das Gesamtsystem wurde im August 2022 geliefert, wobei die Lieferung herstellerseitig mehrfach verschoben werden musste. Nach dem Aufbau und Anschluss im Modul 1 des ZMNT erfolgte seine Inbetriebnahme im September 2022. Die zusammen mit dem System eingekauften Ätz- und Depositionsbasisprozesse wurden im Oktober 2022 erfolgreich eingefahren, womit der MS 3, d. h. die Abnahme des Geräts 3, erfolgreich erreicht wurde. Danach erfolgte das weitere Einfahren der ForLab-spezifischen Prozesse, wobei das System durch das FOM-Reservierungssystem für die Nutzerinnen und Nutzer der beteiligten Lehrstühle buchbar ist. Die Auslastung des neuen und sehr vielseitigen Systems ist mittlerweile sehr hoch mit Nutzerinnen und Nutzern aus mehreren am ForLab 2D-ForME beteiligten Lehrstühlen (IWE1, IHT, ELD, IPH, CST).

### **3.4 Gerät 4: LPCVD-System**

Das LPCVD-System wurde als Doppel-Stock-Anlage ausgelegt, bei dem zwei Prozessrohre übereinander angeordnet sind. Das obere Rohr ist für die (Formiergas-)Temperprozesse ausgelegt, während das untere Rohr die LPCVD-Prozesse für Siliziumnitrid und Polysilizium erlaubt.

Im Rahmen der Festlegung der Spezifikationen des LPCVD-Systems wurde das Modul 2 des ZMNT als Aufstellungsort festgelegt. Die Gründe hierfür werden in Abschnitt 3.2 in den Darstellungen zum Teilsystem 1 des Nanotechnologie-Clusters erörtert.

Für die Beschaffung des LPCVD-Systems wurde eine Ausschreibung im Dezember 2020 veröffentlicht. Die Vergabe erfolgte im Februar 2021. Im Dezember 2021 wurde das LPCVD-System geliefert. Wie ebenfalls bereits in Abschnitt 3.2 beschrieben haben die andauernden Verzögerungen in der Fertigstellung und Übergabe des Moduls 2 des ZMNT dazu geführt, dass das LPCVD-System im November 2022 zwar aufgebaut und in der Folge mit der Einbindung in die Reinraumumgebung begonnen wurde, der Abschluss seiner Installation und seine Inbetriebnahme bis zum heutigen Zeitpunkt jedoch nicht möglich waren. Eine vorsichtige Schätzung lässt auf eine Übergabe gegen Ende des 2. Quartals 2024 und damit auf eine Erfüllung des MS 4 (die Abnahme des Geräts 4) hoffen.

### **3.5 Gerät 5: Automatischer Flip-Chip-Bonder**

Der automatische Flip-Chip-Bonder wurde mit Funktionalitäten zum Die- und Flip-Chip-Bonden auf Substraten von 300 mm x 300 mm Größe mit einer Platzier-Genauigkeit von unter 1 µm (nominell unter 0,5 µm pre-attach) ausgelegt. Er unterstützt eutektisches (Laser-)Löten, thermokompressives Bonden (Druck bis 2 kg und Temperatur bis 350 °C) und Fügen mittels eines Epoxidharzes.

Der automatische Flip-Chip-Bonder wurde im April 2020 bestellt. Seine Lieferung erfolgte im Oktober 2020. Die Installation und Inbetriebnahme fanden im November 2020 statt. Der MS 5 (die Abnahme des Geräts 5) wurde damit erfüllt. Seitdem befindet sich das Gerät in intensiver Nutzung.

### **3.6 Gerät 6: Optischer HF-Messplatz**

Der HF-Messplatz besteht aus zwei Hauptkomponenten:

- dem Bit-Error-Raten-Testsystems (BERT-System), um reale Datenübertragungsszenarien testen und Bit-Pattern für Modulations- und Demodulationstests generieren zu können, und
- dem optischen Modulationsanalysators (OMA-System), um komplexe Modulationsformate zu charakterisieren.

Das OMA-System und das BERT-System sind hier zwei komplementäre Geräte, die einem einheitlichen Messplatz zuzuordnen sind, weil das BERT-System zur Signalerzeugung (OOK, PAM-4 und kohärent) und zur Detektion von OOK und PAM-4-Signalen und das OMA-System zur Detektion von kohärenten Signalen dienen.

Das BERT-System wurde so ausgelegt, dass es entweder einzelkanalig mit 64 Gbaud PAM-4 oder zweikanalig mit 2x64 Gbaud OOK betrieben werden kann, letzteres z. B., um ein 64 Gbaud QPSK-Signal zusammen mit einem eigens entwickelten elektro-optischen IQ-Modulator zu erzeugen. Das OMA-System kann bis zu 63 GHz messen und somit die erzeugten optischen Signale präzise auslesen.

Das BERT-System wurde im März 2019 beauftragt, im Juni 2019 geliefert und im Juli 2019 installiert und in Betrieb genommen. Die Beauftragung des OMA-System erfolgte im Juni 2020, die Lieferung, Installation und Inbetriebnahme im Dezember 2020. Die Beschaffung von Ergänzungskomponenten wurde im ersten Quartal 2021 abgeschlossen. Damit wurde der MS 6 (die Abnahme des Geräts 6) erfüllt. Der optische Messplatz ist seitdem stark in Nutzung.

## **4 Vergleich des Vorhabens mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung.**

### **4.1 Arbeitsprogramm**

Das Arbeitsprogramm setzte sich aus den folgenden acht Arbeitspaketen zusammen, wobei die ersten sechs Arbeitspakete für alle sechs Geräte anfielen:

- AP 1: Festlegung der endgültigen Spezifikationen zur Vorbereitung der Ausschreibung.
- AP 2: Ausschreibung.
- AP 3: Bewertung der Angebote, Beauftragung.

- AP 4: Vorbereitung der Installationen.
- AP 5: Installation der Geräte.
- AP 6: Inbetriebnahme, Abnahme und Einfahren verschiedener Prozesse.
- AP 7: Koordination des Projekts.
- AP 8: Übergreifende Zusammenarbeit der Forschungslabore.

Tabelle 2 fasst den Stand der einzelnen Arbeitspakete zum Ende der Projektlaufzeit zusammen. Wie der detaillierten Darstellung der durchgeführten Arbeiten in Abschnitt 3 zu entnehmen ist, wurden AP 1 bis 4 für alle sechs Geräte abgeschlossen, wobei AP 2 für die Geräte 1, 2, 5 und 6 obsolet war, weil sich im Rahmen der Marktrecherche zur Festlegung der endgültigen Spezifikationen dieser Geräte herausgestellt hatte, dass jeweils nur ein Anbieter für die Beauftragung der einzelnen Geräte infrage kam. Daher wurden diese Beschaffungen nicht über Ausschreibungen, sondern über Ausschließlichkeitserklärungen getätigt.

Für die Geräte 1, 3, 4 und 6 wurden AP 5 und AP 6 ebenfalls abgeschlossen, so dass für diese vier Geräte alle Arbeitspakete erledigt wurden. Bei den Geräten 2 und 4 sei daran erinnert, dass

- das Teilsystem 1 des Geräts 2 und das Gerät 4 im Modul 2 des ZMNT verortet sind und
- die Gasversorgung des Teilsystems 2 des Geräts 2 zum Teil aus dem Modul 2 erfolgt.

Da es, Stand heute (d. h. April 2024), der BLB NRW der RWTH Aachen seit über drei Jahren schuldig bleibt, das Modul 2 des ZMNT zu übergeben, konnte für das Teilsystem 1 des Geräts 2 und für das Gerät 4 mit AP 5 lediglich begonnen und AP 6 noch nicht bearbeitet werden. Für das Teilsystem 2 des Geräts 2 konnten AP 5 und AP 6 mit Ausnahme des Funktionsumfangs, der auf die Gasversorgung aus dem Modul 2 des ZMNT angewiesen ist, abgeschlossen werden.

AP 7 und AP 8 wurden erfolgreich abgeschlossen.

Die Geräteabnahmen waren Bestandteil von AP 6 und bildeten die sechs Meilensteine (MS 1 bis 6), wobei die Meilensteinnummer der Gerätenummer entspricht (vgl. Tabelle 2). Aus diesem Zusammenhang ergibt sich, dass MS 1, 3, 5 und 6 erfüllt, MS 2 nur teilweise und MS 4 nicht erfüllt wurden.

Tabelle 2: Stand der einzelnen Arbeitspakete und Meilensteine am Ende der Projektlaufzeit.  
 „+“: AP ist abgeschlossen, „(+“: AP ist obsolet, „o“: AP ist begonnen, „-“: AP konnte nicht abgeschlossen werden.  
 „MS n: +“: MS ist erfüllt, „MS n: o“: MS ist teilweise erfüllt, „MS n: -“: MS ist nicht erfüllt.

| Gerät  | AP 1 | AP 2 | AP 3 | AP 4 | AP 5 | AP 6 | MS             | AP 7 | AP 8 |
|--|------|------|------|------|------|------|----------------|------|------|
| <b>Gerät 1<br/>(MOVPE-System)</b>            | +    | (+)  | +    | +    | +    | +    | <b>MS 1: +</b> |      |      |
| <b>Gerät 2<br/>(Nanotechnologie-Cluster)</b> |      |      |      |      |      |      | <b>MS 2: o</b> |      |      |
| - Teilsystem 1                               | +    | (+)  | +    | +    | o    | -    |                |      |      |
| - Teilsystem 2                               | +    | (+)  | +    | +    | +/o  | +/-  |                |      |      |
| <b>Gerät 3<br/>(Ionenstrahlätzer)</b>        | +    | +    | +    | +    | +    | +    | <b>MS 3: +</b> |      |      |
| <b>Gerät 4<br/>(LPCVD-System)</b>            | +    | +    | +    | +    | O    | -    | <b>MS 4: -</b> |      |      |
| <b>Gerät 5<br/>(Flip-Chip-Bonder)</b>        | +    | (+)  | +    | +    | +    | +    | <b>MS 5: +</b> |      |      |
| <b>Geräts 6<br/>(HF-Messplatz)</b>           |      |      |      |      |      |      | <b>MS 6: +</b> |      |      |
| - Hauptkomponente 1                          | +    | (+)  | +    | +    | +    | +    |                |      |      |
| - Hauptkomponente 2                          | +    | (+)  | +    | +    | +    | +    |                |      |      |

## 4.2 Zeitlicher Ablauf

Für das Vorhaben war ursprünglich eine Laufzeit von drei Jahren (01.01.2019 bis 31.12.2021) vorgesehen. Auf Grund der von Seiten des BLB NRW immer wieder verschobenen Übergabe des Moduls 2 des ZMNT sowie der seitens des Herstellers verzögerten Lieferung des Geräts 3 mussten zwei Anträge auf zuwendungsneutrale Verlängerung gestellt werden,

- einmal im Oktober 2021 für eine Verlängerung um ein Jahr (vom 01.01.2022 bis zum 31.12.2022) und
- ein weiteres Mal im August 2022 für eine Verlängerung um ein halbes Jahr (vom 01.01.2023 bis zum 30.06.2023).

Beiden Anträgen wurde von Seiten des Projektträgers entsprochen. Tabelle 3 gibt eine Übersicht, wann jeweils die Bestellung, Lieferung, Installation sowie Inbetrieb- und Abnahme der Geräte erfolgt sind, wann für das Teilsystems 1 des Geräts 2 und für das Gerät 4 mit der Installation begonnen wurde und wann deren finale Inbetrieb- und Abnahme prognostiziert ist. Um den Bezug zum Arbeitsprogramm herzustellen, werden in dieser Tabelle die Bestellung, Lieferung, Installation sowie Inbetrieb- und Abnahme mit den jeweiligen Arbeitspaketen und Meilensteinen korreliert.

Die Übersicht der Daten belegt eindeutig, dass von Seiten der RWTH Aachen die zeitlichen Planungen so vorgenommen wurden, dass die Installation sowie Inbetrieb- und Abnahme alle Geräte im Rahmen der (verlängerten) Projektlaufzeit möglich gewesen wären.

Tabelle 3: Übersicht zu den Daten der Bestellung, Lieferung, Installation sowie Inbetrieb- und Abnahme der sechs Geräte, die über das Vorhaben beschafft wurden. Wenn nicht anders vermerkt, stellen die angegebenen Zeitpunkte den Abschluss der Prozesse dar.

| Gerät  | Bestellung<br>(AP 1-3) | Lieferung | Installation<br>(AP 4, 5) | Inbetrieb- und Abnahme<br>(AP 6 und MS 1-6) |
|--|------------------------|-----------|---------------------------|---|
| <b>Gerät 1<br/>(MOVPE-System)</b>            | 05/2019                | 10/2019   | 02/2021                   | 02/2021                                     |
| <b>Gerät 2<br/>(Nanotechnologie-Cluster)</b> |                        |           |                           |   |
| - Teilsystem 1                               | 11/2019                | 03/2021   | 10/2022 begonnen          | Q2/2024 (Prognose)                          |
| - Teilsystem 2                               | 11/2019                | 11/2020   | 12/2020                   | 02/2021                                     |
| <b>Gerät 3<br/>(Ionenstrahlätzer)</b>        | 10/2020                | 08/2022   | 09/2022                   | 09/2022                                     |
| <b>Gerät 4<br/>(LPCVD-System)</b>            | 02/2021                | 12/2021   | 11/2022 begonnen          | Q2/2024 (Prognose)                          |
| <b>Gerät 5<br/>(Flip-Chip-Bonder)</b>        | 04/2020                | 08/2020   | 10/2020                   | 10/2020                                     |
| <b>Geräts 6<br/>(HF-Messplatz)</b>           |                        |           |                           |   |
| - Hauptkomponente 1                          | 03/2019                | 06/2019   | 07/2019                   | 07/2019                                     |
| - Hauptkomponente 2                          | 06/2020                | 12/2020   | 12/2020                   | 12/2020                                     |

## 4.3 Kosten und wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Auf Grundlage der Finanzdaten aus dem Verwendungsnachweis vom 11.04.2024 werden in Tabelle 4 die im Vorhaben insgesamt entstandenen Ausgaben (Spalte (2)) mit dem Gesamtfinanzierungsplan (Spalte (3)) verglichen. Hierbei sind die Beträge nach den einzelnen Positionen gemäß dem Gesamtfinanzierungsplan (Spalte (1)) aufgeschlüsselt. Der Vergleich erfolgt sowohl absolut (Spalte (4)) als auch relativ (Spalte (5)). Ein positives Vorzeichen in den Spalten (4) bzw. (5) bedeutet Mehrausgaben, ein negatives Vorzeichen entsprechend Minderausgaben.

Tabelle 4: Vergleich der insgesamt entstandenen Ausgaben mit dem Gesamtfinanzierungsplan.

| (1)                              | (2)                            | (3)                     | (4)<br>= (2)-(3)   | (5)<br>= [(2)-(3)]/(3) |
|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------|
| Position Gesamtfinanzierungsplan | Entstandene Ausgaben insgesamt | Gesamtfinanzierungsplan | Differenz          | Prozentuale Abweichung |
| 812                              | 64.905,86 €                    | 102.338,00 €            | - 37.432,14 €      | - 36,58 %              |
| 817                              | 32.160,95 €                    | 57.239,00 €             | - 25.078,05 €      | - 43,81 %              |
| 820                              | 0,00 €                         | 0,00 €                  | 0,00 €             | --                     |
| 822                              | 5.108,52 €                     | 11.324,00 €             | - 6.215,48 €       | - 54,89 %              |
| 831                              | 0,00 €                         | 0,00 €                  | 0,00 €             | --                     |
| 834                              | 0,00 €                         | 0,00 €                  | 0,00 €             | --                     |
| 835                              | 542.044,28 €                   | 542.138,00 €            | - 93,72 €          | - 0,02 %               |
| 843                              | 107.646,31 €                   | 100.800,00 €            | 6.846,31 €         | 6,79 %                 |
| 846                              | 3.444,24 €                     | 15.000,00 €             | - 11.555,76 €      | - 77,04 %              |
| 850                              | 8.510.610,08 €                 | 8.439.444,00 €          | 71.166,08 €        | 0,84 %                 |
| <b>Summe:</b>                    | <b>9.265.920,24 €</b>          | <b>9.268.283,00 €</b>   | <b>-2.362,76 €</b> | <b>- 0,03 %</b>        |

In den Positionen 843 (Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben) und 850 (Gegenstände und andere Investitionen von mehr als 410 / 400 EUR im Einzelfall) sind gegenüber dem Gesamtfinanzierungsplan prozentual geringfügige Mehrausgaben entstanden, die jedoch deutlich unter 20 % liegen. Die Mehrausgaben wurden durch Minderausgaben in den übrigen Positionen kompensiert. Dadurch entspricht die Summe der insgesamt entstandenen Ausgaben fast genau dem Gesamtfinanzierungsplan (es bleiben marginale Minderausgabe in Höhe von 0,03 %).

Die Minderausgaben im Bereich der Personalausgaben (Positionen 812, 817 und 822) wurden durch Eigenleistungen kompensiert. Die Minderausgaben für Dienstreisen (Position 846) ergaben sich durch die Reiseeinschränken während der Corona-Pandemie. Die Minderausgaben für die Vergabe von Aufträgen (Position 835) sind marginal und entsprechen fast genau dem bewilligten Budget.

Neben den Eigenleistungen im Bereich der Personalausgaben hat die RWTH Aachen weitere Eigenmittel in einer Gesamthöhe von 414.634,11 € in das Vorhaben eingebracht. Diese Eigenmittel erlaubten

- die Erweiterung des Geräts 3 um ein zusätzliches Modul zur Ionenstrahldeposition (111.027,00 €),
- die Installationsarbeiten im Modul 1 des ZMNT, die es erlaubt haben, das Teilsystem 2 des Geräts 2 sowie das Gerät 3 einzubringen, und für die keine Zuwendung erfolgt ist (101.107,11 €),
- die Installationsarbeiten im CST-2D-Labor im AIXTRON Verfügungszentrum für die Einbringung des Geräts 1, für die ebenfalls keine Zuwendung erfolgt ist (100.000,00 €),
- die Gasinstallation im Modul 2 des ZMNT für die Geräte 2 und 4 (102.500,00 €).

## 5 (Voraussichtlicher) Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft – im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

### 5.1 Schutzrechte

Es wurden bisher keine Schutzrechte für z. B. Patente o. ä. gesichert.

### 5.2 Produkte

Innerhalb der nächsten zwei Jahre wird die Entwicklung von durchstimmbaren Lasern (ECL) bei kurzen (sichtbaren) Wellenlängen für die Quantentechnologien weiter vorangetrieben (IPH).

### 5.3 Technologien

#### 5.3.1 Gerät 1

Es konnten Basisprozesse für das 2D-Material  $WS_2$  erarbeitet werden, begleitet von umfangreichen Studien zur 2D-MOCVD in einem Shower-Head-Reaktor. Dank der Ausstattung mit In-situ-Monitoring für Abscheidung und Oberflächentemperatur gelang es, die Schichtabscheidung deutlich besser zu verstehen und auf dieser Basis einen Zwei-Stufen-Prozess und das sogenannte Migration Enhancement zu etablieren. Aktuell fokussieren sich die Arbeiten auf die Herstellung von optimierten Schichten für die Bauelementanwendung sowie auf die Abscheidung von 2D-2D-Heterostrukturen.

#### 5.3.2 Gerät 2

Sobald die Inbetrieb- und Abnahme des Geräts vollständig abgeschlossen sein wird, wird innerhalb der nächsten zwei Jahre erwartet, dass Prozesse

- zur großflächigen Abscheidung von 2D-Materialien wie Graphen, hexagonalem Bornitrid, Wolframsulfid und Molybdänsulfid,
- zu deren Kapselung mit Aluminiumoxid, Hafniumoxid und Titanitrid sowie
- zu deren Strukturierung mittels ALE

zur Verfügung stehen.

#### 5.3.3 Gerät 3

Aktuell stehen stabil eingefahrene Prozesse zur Abscheidung der folgenden Materialien zur Verfügung:

$SiO_2$ ,  $TiO_x$ ,  $AlO_x$ , Ti, Al,  $MgF_2$ ,  $Si_3N_4$

Es wurden zudem die zugehörigen Ätzprozesse für die oben genannten Materialien sowie für Silizium-Wafer eingefahren, wobei die Endpunktbestimmung durch das integrierte Massenspektroskop sich als sehr wertvoll herausgestellt hat.

#### 5.3.4 Gerät 4

Nach der vollständigen Inbetrieb- und Abnahme des Geräts wird innerhalb der nächsten zwei Jahre erwartet, dass LPCVD-Prozesse für Siliziumnitrid und Polysilizium sowie für das (Formiergas-)Tempern von 2D-Materialien zur Verfügung stehen werden.

#### 5.3.5 Gerät 5

Durch das Gerät 5 stehen nun Flip-Chip-Prozesse für die hybride Integration von Materialien auf der Silizium-Photonik-Plattform zur Verfügung.

#### 5.3.6 Gerät 6

Es stehen ein Bit-Error-Raten-Testsystem zum Test realer Datenübertragungsszenarien zur Generation von Bit-Pattern für Modulations- und Demodulationstests sowie ein optischer Modulationsanalysator zur Charakterisierung komplexer Modulationsformate zur Verfügung.

### 5.4 Know-how-Transfer

Im Rahmen der BMBF-Ausschreibung ForMikro wurden das Projekt **NobleNEMS** (FKZ: 16ES1121; Laufzeit: 10/2019-09/2023) durch die Arbeitsgruppe (AG) Lemme und das Projekt **SiGeSn-NanoFETs** (FKZ: 16ES1073K; Laufzeit: 10/2019-09/2023) durch die AG Knoch eingeworben.

Ziel von **NobleNEMS** war die Demonstration von hochsensitiven nanoelektromechanischen Sensoren (NEMS) aus edelmetall-basierten zweidimensionalen (2D) Materialien, die mit halbleiterfertigungskompatiblen Prozessen großflächig hergestellt werden können. Die in ForLab 2D-ForME beschafften Geräte wurden in diesem Projekt umfangreich genutzt (Partner: RWTH Aachen University, TU Dresden, Uni BW München, Infineon, Witec GmbH, ATV Technologies, AMO GmbH).

Ziel von **SiGeSn-NanoFETs** war die Erforschung integrierbarer, SiGeSn-basierter Transistorstrukturen und die Etablierung einer CMOS-integrierbaren SiGeSn-Bauelementtechnologieplattform durch Optimierung der Materialherstellung und die Entwicklung einer geeigneten Bauelementprozesstechnologie (Partner: RWTH Aachen University, Forschungszentrum Jülich, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Universität Stuttgart, Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik, Frankfurt/Oder).

Die AGs Knoch, Lemme, Vescan und Waser haben das BMBF-Projekt **NEUROTEC II** eingeworben (FKZ: 16ME0399, Laufzeit: 11/2021-11/2026). Ziel des Vorhabens ist es, abstrahierte Prinzipien aus den computergestützten Neurowissenschaften mit Hilfe der memristiven Bauelementen aus der Materialforschung in die Technologie für Endnutzerprodukte der künstlichen Intelligenz (KI) und Höchstleistungsrechenzentren von morgen einzubringen. 2D-Materialien und damit die für ihre Herstellung benötigten Anlagen kommen vor allem in den **NEUROTEC-II**-Arbeitspaketen AP 1 „Materialentwicklung für memristive Zellen“ und AP 2 „Bauteilintegration und 3D-Studien“ zum Einsatz (Partner: RWTH Aachen University, FZ Jülich, AMO, Aixtron, Surface, AixACCT, Amotronics).

Die AGs Waser, Vescan, Witzens und Lemme haben die BMBF-Projekte A und B im Rahmen des **NeuroSys-Clusters**, Teil der Initiative Clusters4Future, eingeworben (FKZ: 03ZU1106AA, 03ZU1106BA; Laufzeit: 01/2022-12/2024). In den Projekten A und B des **NeuroSys-Clusters** werden insbesondere neuromorphe Bauelemente auf Basis neuartiger (u. a. 2D-) Materialien für Anwendungen des neuromorphen Rechnens optimiert. Diese sollen dann in enger Zusammenarbeit mit weiteren **NeuroSys**-Projekten C-E (FKZ: 03ZU1106CA, 03ZU1106DA, 03ZU1106EA) in den kommenden Förderphasen (bis zu 9 Jahre) zu neuromorphen Schaltungen und Systemen zusammengesetzt und für Anwendungen im Bereich der KI eingesetzt werden. Die über das Vorhaben „ForLab 2D-ForME“ beschafften Anlagen sind für die Optimierung des großflächigen Materialwachstums und der Strukturierung in Bauelementen von äußerster Bedeutung. Zusätzlich wird der Flip-Chip-Bonder eingesetzt, um die in dem ForLab 2D-ForME-Antrag antizipierte Elektronik-Photonik-Integration in neuromorphen Systemen umzusetzen. (Partner: FZ Jülich, RWTH Aachen University, diverse Partner aus der Industrie).

Die AGs Lemme und Stampfer haben in der **FLAG-ERA** Ausschreibung das DFG-Projekt **2DNEMS** eingeworben (FKZ: 665087; Laufzeit: 10/2020-09/2023). Ziel ist es, die grundlegenden physikalischen Prinzipien von neuartigen NEMS-Systemen auf Basis von 2D-Heterostrukturen zu erforschen und einen mindestens 10-fach erhöhten Dehnungsfaktor im Vergleich zu existierenden NEMS-Wandlern zu demonstrieren. Die in ForLab 2D-ForME beschafften Geräte wurden in dem Projekt umfangreich genutzt (Partner: RWTH Aachen University, KTH – Schweden, Graphenea - Spanien).

Die AGs Lemme und Stampfer haben im EU **Graphene-Flagship** das Project **Core3** eingeworben (FKZ: 881603; Laufzeit: 04/2020-03/2023). Auch hier fand eine umfangreiche Nutzung der Geräte aus dem ForLab 2D-ForME statt (Partner: ca. 150 aus der EU).

Die AG Lemme hat das EU-Projekt **FreeHydroCells** eingeworben (FKZ: 101084261; Laufzeit: 11/2022-02/2026). Zu den Hauptzielen des Projekts gehören einerseits die Entwicklung bahnbrechender Methoden zur Überwindung der Probleme und Grenzen des derzeitigen Stands der Technik bei der photoelektrochemischen Energiegewinnung und der molekularen Wasserstofferzeugung. Andererseits werden die Identifizierung neuartiger, reichlich vorhandener, nachhaltiger und aufstrebender alternativer Halbleitermaterialkombinationen, zu denen auch 2D-Materialien gehören, und die in neuen fertigungskompatiblen und kostengünstigen Prozessen eingesetzt werden können, in Verbindung mit neuen wissenschaftlich-technischen Methoden zur Maximierung der Energieabsorption und Minimierung der Umwandlungsverluste erforscht.

Gemeinsam mit der WET der Universität Duisburg-Essen gelang der AG Vescan die Einwerbung des DFG-Projekts (Projektnummer: 414268710; Laufzeit: seit 2018) „Entwicklung und Untersuchung von MOCVD-Wachstumsprozessen für binäre und ternäre 2D-Übergangsmetall-Dichalkogenide (TMDC)“.

Die AG Ingebrandt hat ein bi-laterales DFG-Indien-Projekt **MOFSense** eingeworben, (FKZ: 672180; Laufzeit: 01/2021-12/2023). Ziel ist hierbei, neuartige Polymer-Metall-Kompositmaterialien (Metal-Organic Frameworks (MOFs)) für die Biosensorik einzusetzen. Als Sensorplattform kommen 2D-Materialien

wie Graphen und Molybdändisulfid zum Einsatz, auf denen die MOFs als sensitive Schichten abgedruckt werden. Zur Herstellung und Strukturierung der 2D-Material-Sensoren kommen mehrere Geräte (Gerät 2, 3 und 4) zum Einsatz und werden intensiv genutzt.

Zusätzlich hat die AG Ingebrandt ein neues Projekt **GESTech4U** „The Use of Rapid Non-invasive Technologies and Nanosensor Development to Study and Model Gestational Health and Stillbirth“, gefördert durch das Wellcome Leap Program, eingeworben. Dieses Projekt, mit einer Laufzeit von vier Jahren, (10/2022-09/2026) nutzt ebenfalls das Gerät 3 zur großformatigen Herstellung elektrischer Sensorstrukturen.

Die AGs Knoch, Ingebrandt und Witzens sind involviert in dem von der DFG geförderten Graduiertenkolleg GRK 2610 **InnoRetVision** (FKZ: 424556709; Laufzeit der ersten Förderperiode: 04/2021-08/2025), in dem neue Materialien und neue Materialkombinationen für innovative Neuroimplantate zur medizinischen Anwendung, insbesondere am Auge, entwickelt werden. Die Materialkombinationen bestehen teilweise aus 2D-Materialien. Insbesondere sind hier Passivierungsschichten für die empfindliche Elektronik der Implantate wichtig. Es werden mehrere Anlagen intensiv genutzt, wobei die zusätzliche Depositionsoption von qualitativ hochwertigen Passivierungsschichten für Gerät 3, die die RWTH Aachen aus Eigenmitteln beschafft hat, eine wichtige Zusatzfunktion erfüllt.

Die AG Ingebrandt hat das DFG-Projekt **BioNanoLock** im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Nano Security: Von Nanoelektronik zu sicheren Systemen“ (FKZ: 667937; Laufzeit: 10/2020-09/2023) eingeworben. Hier werden biologische Sensoren auf CMOS-basierten ASICs genutzt, um eine personalisierte Sicherheitsfreigabe wichtiger Funktionen des Chips zu entwickeln. Viele der Geräte aus ForLab kommen hier zur Post-Prozessierung von CMOS-Chips zum Einsatz.

Die AG Ingebrandt hat im Rahmen des BMBF-Forschungsverbunds „Modellregion Bioökonomie im Rheinischen Revier“ zwei weitere Projekte eingeworben. Das Projekt **ProtLab** „Maßgeschneiderte Proteinprodukte und -systeme für ressourceneffiziente Innovationen in der Agrarwirtschaft und Lebensmittelindustrie“ (FKZ: 031B1134C, Laufzeit: 01/2022-12/2025) nutzt ebenfalls die neuen Gerätschaften (vornehmlich Geräte 1 und 3) zur Herstellung von Biosensoren. Das Projekt **Pep4Sense** „Kostengünstige peptidmodifizierte flexible Oberflächenplasmonenresonanz (SPR)-Sensorchips für die In-vitro-Diagnostik“ (FKZ: 031B1152, Laufzeit: 06/2022-5/2025) nutzt ebenfalls das Gerät 3 zur Herstellung optischer Sensorstrukturen.

Die AG Ingebrandt hat ein AiF/IGF-Projekt zusammen mit dem Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen zur Industrie-nahen Entwicklung und Herstellung von On-Skin Wearables und Smart Textiles eingeworben. Das Projekt **Hybrid E-Tattoo**: eine Plattform zur Sensorfusion von Smart Textiles und Hautklebern für die nächste Generation von Smart Wearables (FZK: 351 EN, Laufzeit 01/2023-12/2024) nutzt vor allem die großformatigen Herstellungsmöglichkeiten durch das Gerät 3.

Die AG Witzens hat den Einsatz des HF-Messplatzes im DFG-Forschungsvorhaben **PACE** (FKZ: WI 4137/10-1; Laufzeit 01/2019-/2023) fortgeführt und im DFG-Forschungsvorhaben **NLFT** (FKZ: WI 4137/9-1 und WI 4137/9-2; Laufzeit 01/2019-12/2024) zur Charakterisierung eines komplexen optischen Codierungs-Verfahrens eingesetzt.

Darüber hinaus nutzt die AG Witzens den HF-Messplatz im BMBF-Projekt **EfficientLight** (FKZ: 13N14964, Laufzeit 02/2019-07/2022) für die Untersuchung neuartiger elektro-optischer Datenwandler. Dies ermöglichte dem IPH neue Kooperationen mit der AG von Prof. Christian Koos am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), der AG von Prof. Christoph Scheytt an der Universität Paderborn und der AG von Stephan Pachnicke an der Christian-Albrechts-Universität Kiel aufzubauen.

Des Weiteren hat die AG Witzens den automatischen Flip-Chip-Bonder eingesetzt, um in einem Flip-Chip-Verfahren im Rahmen des EU-Projekts **PIX4Life** (FKZ: 688519; Laufzeit: 01/2021-09/2020) Reflective Semiconductor Optical Amplifier (RSOAs) auf einem Siliziumnitrid-basierten photonisch integrierten Schaltkreis (Photonic Integrated Circuit (PIC)) zu platzieren und so einen External Cavity Laser (ECL) zu realisieren. Dafür wurde zunächst über mehrere Wochen ein durch Bilderverarbeitung automatisierter Prozess auf dem Gerät entwickelt, welcher es in Zukunft ermöglicht, die Chips voll automa-

tisch auf den Submounts zu platzieren und zu verlöten. Die so platzierten RSOAs wurden mittels leitfähigen Lots und den im Flip-Chip-Bonder integrierten Dispenser- und Laserlöteinheiten elektrisch mit dem PIC verbunden. Eine möglichst verlustarme optische Kopplung zwischen RSOA und PIC über Multi-Mode Edge Coupler wird durch die hohe Platziergenauigkeit des Flip-Chip-Bonders von unter 0,3 µm gewährleistet und konnte bereits durch erste Messungen verifiziert werden.

Aufbauend auf diese Arbeiten wird durch die AG Witzens das BMBF-Projekt „Highly in-tegrated PIC-based ECDLs for quantum technologies“ **HiPEQ** (FKZ: 13N15965; Laufzeit: 11/2021-04/2025) durchgeführt, in dem mit dieser Aufbautechnologie durchstimmbare Laser im sichtbaren Wellenlängenbereich für die Quantentechnologien entwickelt werden. Durch das ForLab 2D-ForME-Projekt konnte somit eine starke außeruniversitäre Kooperation mit der Toptica AG im Rahmen hoheitlich geförderter Forschung aufgebaut werden.

Weiterführende Arbeiten zur hybriden Flip-Chip-Integration werden durch die AG Witzens im Projektantrag **StarLight** geplant, der im Rahmen des Chips Joint Undertaking (CHIPS JU) der Europäischen Kommission erfolgt ist und eine Kooperation mit den Firmen Mellanox Technologies (NVIDIA), Almae Technologies, Scintil Photonics und ST-Microelectronics umfasst.

## 5.5 Wissenstransfer

Die Bereitstellung modernster Anlagentechnologie ermöglicht die Ausbildung des akademischen Nachwuchses auf Spitzenniveau. Dies betrifft zum einen die wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter während Ihrer Promotionsphase, aber insbesondere auch die Studierenden in den von den Mitgliedern des FoLab 2D-ForME und seinen Partnern bedienten Studiengängen (vor allem Elektrotechnik, Physik und Materialwissenschaften).

## 6 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Laufzeit von ForLab 2D-ForME ist mit der **Black Semiconductor GmbH** ein Start-Up zur Graphen-Photonik im Umfeld der RWTH Aachen ausgegründet worden. Ein weiteres, konkurrierendes Start-up in diesem Gebiet ist die Firma **CamGraPhIC**, die aus dem CNIT (Italien) und der Universität Cambridge entstanden ist. Großen Fortschritt bei der Herstellbarkeit von elektro-optischen Systemen mit Hilfe von Flip-Chip-Integration hat auch die Firma **PHOTON IP**, eine Ausgründung der Universität Eindhoven, erreicht.

## 7 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

### 7.1 Veröffentlichung im Rahmen von Veranstaltungen

#### 1. Eröffnungsveranstaltung „Forschungslabore Mikroelektronik Deutschland“

05.02.2019 | Aachen | [Link](#)

An der Eröffnungsveranstaltung der „Forschungslabore Mikroelektronik Deutschland“, die an der RWTH Aachen stattfand, nahmen 93 Personen teil, davon 18 aus der einschlägigen Industrie und fünf aus der „Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland“. Parallel zu den Vorträgen gab es eine Posterpräsentation der Forschungslabore.

#### 2. Halbzeit-Statusworkshop „Forschungslabore Mikroelektronik Deutschland“

15.-16.09.2020 | Online | [Link](#)

Zielsetzung des Online-Workshops war es, einen umfassenden Einblick in die zwölf Forschungslabore zu erlauben und Raum für die individuelle Vernetzung mit den Forschungslaboren zu bieten. Der Statusworkshop wurde gemeinsam mit dem 8. GMM-Workshop der VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik (GMM) zum übergeordneten Thema „Mikro-Nano-Integration“ veranstaltet. Die Veranstaltung wurde während der Corona-Pandemie in einem Online-Format durchgeführt. Neben den Vorträgen gab es auch eine virtuelle Postersession.

3. **9. NRW Nano-Konferenz**

**21.-23.04.2021 | Online | [Link](#)**

Das ForLab 2D-ForME war auf der 9. NRW Nano-Konferenz mit einem virtuellen Stand vertreten. Zusätzlich hielt Herr Prof. Dr. Michael Heuken vom Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Verbindungshalbleiter (CST) einen Vortrag zum Thema „Recent progress and future trends in MOCVD growth technology for solid state lighting“.

4. **Workshop „Abscheide- und Prozesstechnologien für neue elektronische Materialien“**

**27.10.2021 | Online | [Link](#)**

Der Online-Workshop wurde durch das ForLab 2D-ForME, namentlich durch Herrn Prof. Dr. Andrei Vescan (CST), organisiert. Neben Vorträgen aus mehreren ForLabs gab es Beiträge aus dem Forschungszentrum Jülich und der Industrie (AMO, AIXTRON und Black Semiconductor).

5. **Fachtagung „Mikroelektronik-Forschung in Deutschland: von den Grundlagen zur Anwendung“**

**29.-30.03.2022 | Online | [Link](#)**

Im Rahmen der Fachtagung fand die Abschlussveranstaltung „Forschungslabore Mikroelektronik Deutschland (ForLab)“ statt, in der die neuen Möglichkeiten und bisher erzielten Ergebnisse zum Abschluss der Aufbauphase der zwölf Forschungslabore präsentiert wurden. Dies geschah u. a. in Form eines Überblickvortrags der Ergebnisse aus allen Forschungslaboren durch Herrn Prof. Dr. Thomas Mikolajick (Technische Universität Dresden), einer digitalen Postersession, in der sich jedes Forschungslabor separat präsentierte, sowie von drei Workshops zu den Themen,

- Atomlagenabscheidung und -ätzen (ALD/ALE),
- Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) und
- Integrierte Photonik,

die alle thematisch mit dem ForLab 2D-ForME verknüpft waren.

6. **GMM-Fachtagung „Mikro-Nano-Integration (MNI) 2022“**

**21.-22.11.2022 | Aachen | [Link](#)**

Bei der GMM-Fachtagung „Mikro-Nano-Integration (MNI)“, die in Aachen stattfand und durch das IWE1 der RWTH Aachen organisiert wurde, wurden den Kolleginnen und Kollegen des Fachpublikums durch Herrn Prof. Dr. Ingebrandt in Form einer Reinraumführung die neuen Geräte und Möglichkeiten an der RWTH Aachen vorgestellt. Sprecher des Fachausschusses MNI im VDE ist Herr Prof. Martin Hoffmann von der Ruhr-Universität Bochum, der ebenfalls ein Mitglied des ForLab-Verbundes ist. Auch im Rahmen dieser Präsenzveranstaltung hielt Herr Prof. Thomas Mikolajick (Technische Universität Dresden) einen Überblickvortrag zu den Fortschritten und der zukünftig geplanten Zusammenarbeiten aller Forschungslabore Deutschlands.

7. **Internationale Konferenz „Impedance based cellular assays (IBCA 2023)“**

**04.-06.09.2023 | Aachen | [Link](#)**

Im Rahmen der vom IWE1 veranstalteten Konferenz, bei der es unter anderem auch um die Wafer-skalige Herstellung von Mikroelektroden-Arrays ging, wurde beim Eröffnungsvortrag von Prof. Ingebrandt das ForLab vorgestellt und insbesondere auf die neuen Möglichkeiten zur Prozessierung solcher Arrays durch das über ForLab angeschaffte Ionenstrahlätz- und Ionenstrahldepositionssystem informiert. Dabei ging es um:

- Ionenstrahlätzen (IBE) von dünnen Metallfilmen und
- Ionenstrahldeposition (IBD) von metallischen Dünnschichten sowie Dielektrika

Beides ist thematisch mit dem ForLab 2D-ForME verknüpft.

8. **Nationale Konferenz „Mikrosystemtechnik Kongress 2023, Dresden“**

**23.-25.10.2023 | Dresden | [Link](#)**

Wissenschaftler des IWE1 waren auf dem Mikrosystemtechnik Kongress 2023 aktiv und das Aachener ForLab 2D-ForME beteiligte sich an der Ausstellung der ForLabs im Rahmen eines Messestandes.

## 7.2 Veröffentlichen in Fachzeitschriften

1. Songyao Tang, Annika Grundmann, Hleb Fiadziushkin, Zhaodong Wang, Susanne Hoffmann-Eifert, Amir Ghiami, Arne Debald, Michael Heuken, Andrei Vescan, and Holger Kalisch. Migration-Enhanced Metal–Organic Chemical Vapor Deposition of Wafer-Scale Fully Coalesced WS<sub>2</sub> and WSe<sub>2</sub> Monolayers. *Crystal Growth & Design* 23 (3), 1547-1558 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.2c01134>
2. Songyao Tang, Annika Grundmann, Hleb Fiadziushkin, Amir Ghiami, Michael Heuken, Andrei Vescan, Holger Kalisch. Detailed study on MOCVD of wafer-scale MoS<sub>2</sub> monolayers: From nucleation to coalescence. *MRS Advances* 7, 751–756 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1557/s43580-022-00312-4>
3. Moscoso-Mártir, J. Koch, O. Schulz, J. Müller, A. Tabatabaei Mashayekh, A. D. Das, F. Merget, S. Pachnicke, J. Witzens. Silicon Photonic Integrated Circuits for Soliton Based Long Haul Optical Communication. *J. Lightwave Technol.*, vol. 40, no. 10, pp. 3210–3222, 2022.
4. D. Fang, A. Zazzi, J. Müller, D. Drayss, C. Füllner, P. Marin-Palomo, A. Tabatabaei Mashayekh, A. D. Das, M. Weizel, S. Gudyriev, W. Freude, S. Randel, J. C. Scheytt, J. Witzens, C. Koos. Optical Arbitrary Waveform Measurement (OAWM) Using Silicon Photonic Slicing Filters. *J. Lightwave Technol.*, vol. 40, no. 6, pp. 1705–1717, 2022.
5. Zazzi, J. Müller, M. Weizel, J. Koch, D. Fang, A. Moscoso-Mártir, A. Tabatabaei Mashayekh, A. D. Das, D. Drayß, F. Merget, F. X. Kärtner, S. Pachnicke, C. Koos, J. C. Scheytt, J. Witzens. Optically Enabled ADCs and Application to Optical Communications. *IEEE Op.-Acc. J. Sol.-Stat. Soc.*, vol. 1, 209–221, 2021.
6. I. Kluge, M. Schulten, A. Tabatabaei Mashayekh, R. Rodrigo, M. Ackermann, I. Ghannam, A. Stassen, F. Merget, P. Leisching, J. Witzens. Flip-chip-integrated silicon nitride ECL at 640 nm with relaxed alignment tolerances. *Proc. Silicon Photonics XVII, Photonics West, Proc. of the SPIE 12006, 120060E*, 2022.
7. G. Sinatkas, A. Misra, F. Merget, J. Witzens. External Cavity 637-nm Laser with Increased RSOA-to-PIC Alignment Tolerance and a Filtered Sagnac-Loop Reflector with Single Output Waveguide. Accepted at the 25<sup>th</sup> Europ. Conf. on Int. Optics, 2024.

Aachen 29.04.2024