

**Schlussbericht zum Verbundprojekt
„Sicherung der Zukunftsfähigkeit in der Epitaxie von
Verbindungshalbleitern durch Anwendung von
Industrie 4.0-Prinzipien“,
Teilprojekt „Konzeption und industrielle
Bewertung“
Akronym: MOCVD4.2
FKZ: 0324237E**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Verbundpartner:

AZUR SPACE Solar Power GmbH
Theresienstr. 2, D-74072 Heilbronn

Ansprechpartner:

Dr. V. Khorenko

erstellt für:

Projekträger Jülich (PTJ)

Forschungszentrum Jülich GmbH

Wilhelm-Johnen-Straße, D-52425 Jülich

Datensicherheit: <i>Data Security</i>	Schutzvermerk gemäß DIN ISO 16016 beachten / <i>All rights reserved / copyrights per DIN ISO 16016</i>
--	---

		Name <i>Name</i>	Datum <i>Date</i>	Signatur <i>Signature</i>	
Erstellt: / <i>Prepared:</i>		M. Knoll	23.05.2023		PGR 00010616-01-00
Geprüft: / <i>Approved:</i>		Dr. V. Khorenko	28.06.2023		
Freigabe: / <i>Released:</i>		Dr. V. Khorenko	28.06.2023		
Dateiname / <i>File</i> 000xxxx-RIX_Schlussbericht_MOCVD_4_2_FKZ0324237E.docx: UA: TR: UVST: B					

Seite 1 von 21

Inhaltsverzeichnis

I ZUSAMMENFASSUNG	3
I.1 Aufgabenstellung	5
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	7
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Projekts.....	10
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
II EINGEHENDE DARSTELLUNG.....	12
II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	12
II.2 Ergebnisse	12
II.2.1 AP2.1 Prozess- und Anforderungsanalyse & AP2.2 Systemspezifikation (Lastenheft)	12
II.2.2 AP2.4 Schnittstellenspezifikation & Security-Konzept	12
II.2.3 AP2.8 Systemintegration und Erprobung.....	12
II.2.4 AP2.9 Effekte bezüglich Leistungselektronikbauelemente	16
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	19
II.4 Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse	20
II.4.1 Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen	20
II.4.2 Wissenschaftlich, technische und wirtschaftliche Erfolgsaussichten	20
II.4.3 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	21

I Zusammenfassung

Die Bedingungen in der Halbleiterbranche sind immer einem schnellen und konstanten Wandel unterworfen. Um den steigenden Bedarf an eine vielseitige, hochflexible Produktionstechnologie für häufig wechselnde Kundenanforderungen, Produkte und Materialsysteme zu erfüllen, sind die Verbesserungen der Technologie und der Effektivität der Epitaxie notwendig. Daraus ergeben sich für die AZUR SPACE Solar Power GmbH zwei Herausforderungen. Zum einen ist die Verbesserung der Reproduzierbarkeit und die Verringerung des Ausfalls in der Bauelementepitaxie nötig, um langfristig wettbewerbsfähig zu sein, zum anderen muss die Produktion flexibilisiert werden, um eine breite Auswahl an unterschiedlichen Produkten möglichst effizient fertigen zu können. Eine starre Produktion wird in Zukunft am Markt nicht mehr bestehen können. Dieser Trend betrifft sowohl den Bereich der Leistungselektronik als auch die Photovoltaik und die Optoelektronik. Für diese Anwendungen sind dabei aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften von relevanten Materialsystemen hochspezialisierte Lösungsansätze nötig.

Diese Fertigkeiten sollen durch Industrie 4.0 Ansätze erreicht werden, also mit vernetzten und automatisierten Maschinenkonzepten, intelligenter Software, Analysen am Rande der Nachweisgrenzen und präziser Prozesskontrolle. Zum Start des Projektes hatte die AZUR SPACE Solar Power GmbH zwar das Know-How bezüglich der benötigten Analysen und der darauf aufbauenden Produktionsstabilisierung, konnte die neuen Industrie 4.0 Technologien jedoch als mittelständisches Unternehmen nicht selbst implementieren. Umso wichtiger war es, die Umsetzung gemeinsam mit den Anlagen- und Messgeräteherstellern anzugehen. Dies wurde in dem Verbundvorhaben „Optimierte Produktion von Verbindungshalbleitern für erhöhte Wirkungsgrade in der Energieversorgung MOCVD4.2“ durchgeführt.

Dazu hat AZUR in der ersten Phase des Teilprojekts an der Definition der zu erarbeitenden Technologie und Sensoren mitgearbeitet. Hier war es wichtig, die Produktionserfahrung einzubringen, um sicher zu stellen, dass die neu entwickelte MOCVD 4.0 Technologie zu den aktuellen Herausforderungen der Halbleiterbranche passt. Dazu wurden konkrete Use Cases definiert, die Anforderungen und Ziele erarbeitet, die resultierende Systemspezifikation diskutiert sowie die Entwicklung der softwareseitigen Kommunikationsplattform bei Projektpartnern unterstützt.

Nach Abschluss der Umsetzung der so definierten Ziele durch die Projektpartner wurden die neuen Technologien bei AIXTRON und bei AZUR implementiert und durch AZUR erprobt. Die

erarbeiteten Lösungsansätze konnten so in einer industriellen Umgebung kritisch getestet und bewertet werden.

Da bei AZUR entgegen der ursprünglichen Planung kein GaN Reaktor installiert wurde, konnten keine Langzeiteinflüsse bei Verwendung des von AIXTRON entwickelten Smart Systems auf die Produktion von GaN Leistungselektronikbauelementen evaluiert werden. Stattdessen wurde entschieden, auf unseren Epitaxieanlagen für die Fertigung von GaAs-basierten Hochleistungssolarzellen und optoelektronischen Bauelementen auch die Evaluierung des neuen Sensorsystems des Projektpartners Laytec durchzuführen. Hierfür wurden 2 Mess-Systeme durch Laytec für Epitaxie-Anlagen des Typs Aixtron G3 Anlagen angepasst und bei AZUR installiert. Anschließend wurde die Verbesserung der Messfähigkeit im Rahmen der Fertigung und mit Hilfe speziell hierfür entwickelten Teststrukturen evaluiert.

I.1 Aufgabenstellung

Ziel dieses Teilprojektes war die Entwicklung einer Technologie zur kostenoptimierten Herstellung von Bauteilen für die Leistungselektronik, Photovoltaik und Optoelektronik aus Verbindungshalbleitern. Die Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch Verringerung von Ausfall und der Anzahl von Testwafern zum Einfahren von Produkten und Materialien durch den Einsatz von neuartigen Industrie 4.0 Konzepten stehen dabei im Vordergrund. Dies soll auch zu einem effizienteren Material- und Energieeinsatz führen.

Von diesen neuen Entwicklungen ist im Bereich der Galliumnitrid-Feldeffekttransistoren (engl: Gallium Nitride high electron mobility transistors, GaN HEMTs) ein starkes Verbesserungspotential zu erwarten. Allgemein befindet sich diese Technologie industrieweit noch in einem Stadium, das hohe Verbesserungen im Bereich der Qualität und Reproduzierbarkeit erwarten lässt. Der Einsatz von Industrie 4.0 Verfahren sollte zu einem signifikanten Sprung in der Qualitätsverbesserung der Wafer und der Wirtschaftlichkeit der Waferherstellung führen und der deutschen Industrie zu erheblichen Wettbewerbsvorteilen verhelfen. Gleichzeitig wird durch Anwendung von GaN-basierten Leistungs-Bauelementen in dezentralen Energieversorgungssystemen eine erhebliche Energieeinsparung erwartet.

Darüber hinaus sollte der Einsatz von Industrie 4.0-Verfahren auch in den Bereichen Konzentratorphotovoltaik (CPV) Technologie und Optoelektronik einen hohen Vorteil ermöglichen. Die CPV sieht sich einem enormen Kostendruck aufgrund des Wettbewerbs mit konventioneller Silizium Photovoltaik ausgesetzt, sodass die Verbesserungen der Solarzellentechnologie bei AZUR SPACE der Wettbewerbsfähigkeit der CPV wesentlich betragen wird. Im Bereich Optoelektronik produziert AZUR Hochvoltphotodioden für Optokoppler und Laserleistungsübertragungsmodule. Ersteres wird beispielsweise in Lithium-Ionen-Batteriesystemen eingesetzt, um eine galvanisch getrennte Einzelzellenüberwachung zu ermöglichen. Letztere wird vor allem in Kraftwerken oder Hochspannungsnetzen genutzt, um Messsonden galvanisch getrennt mit Strom zu versorgen. Darüber hinaus sind beide Bauelemente auch für die allgemeine Leistungselektronik interessant.

Der Projektverbund MOCVD 4.0 verfolgte die folgenden Ziele:

- die Produktionsprozesse von Leistungstransistoren, Hochleistungssolarzellen und Photodioden durch den Einsatz von eingebetteten intelligenten in-situ Sensoren und neuartigen selbstlernenden Algorithmen grundlegend zu verbessern,
- diese Prozesse zu automatisieren und Expertenaufgaben der Maschine zu übergeben um letztendlich,

- die Fertigungskosten zu reduzieren sowie
- die Flexibilität und Effizienz der Halbleiterproduktion zu erhöhen und somit
- die Effizienz elektronischer Schaltungen für die Energietechnik zu verbessern

Die angestrebten Ziele des Verbundvorhabens erforderten im Wesentlichen die Umsetzung der folgenden technischen Ziele in dem Teilprojekt von AZUR SPACE:

- Eine Spezifikation für Industrie 4.0-Komponenten (Sensoren, Schnittstellen, intelligente Algorithmen etc.) ist anhand aktueller Fertigungserfahrungen und künftiger Bedürfnisse zu erarbeiten.
- Die auf Basis dieser Spezifikation bei den Projektpartnern AIXTRON und Laytec entwickelten Sensoren, Messverfahren und Steuerungsalgorithmen zu prüfen und bei positivem Befund in Produktionsanlagen bei AZUR SPACE zu evaluieren
- Die bei AZUR SPACE eingesetzten Produktionsprozesse zur Verwendung mit den intelligenten Industrie 4.0-Steuerungsalgorithmen weiter zu entwickeln.
- Die Technologieverbesserungen an Bauelementen und Schaltungen für die Anwendung in dezentraler Energieversorgung zu verifizieren. Dazu sollten Messverfahren und Auswertelgorithmen entwickelt und durch physikalische Modelle interpretiert. Ein Rückschluss auf den MOCVD-Prozess sollte damit ermöglicht werden.
- Die technischen Entwicklungen der Verbundpartner in produktionsnaher Umgebung bei der Herstellung von HEMT-Strukturen, CPV-Solarzellen und optoelektronischen Bauteilen zu evaluieren.
- Den verbesserten Einsatz von FDC (Fault Detection and Classification).

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

AZUR SPACE ist ein mittelständisches Unternehmen, das seit mehr als 50 Jahren im Bereich der Photovoltaik für die Raumfahrt weltweit aktiv ist. Derzeit sind über 750 Satellitenmissionen aus europäischen Ländern, den USA, Indien, Russland und anderen mit Solarzellen von AZUR ausgestattet. Die in den neunziger Jahren entwickelten und auf dem Markt eingeführten GaAs-basierten gestapelte Mehrfachsolarzelle sind aktuell das Kernprodukt von AZUR SPACE. Durch kontinuierliche Entwicklung im Rahmen mehrerer nationaler und internationaler Projekte hat AZUR einen technologischen Vorsprung und damit eine sichere Position auf dem sehr anspruchsvollen und wettbewerbsstarken internationalen Raumfahrtmarkt gewonnen.

Darüber hinaus etablierte sich AZUR SPACE mit GaAs Hochleistungssolarzellen auch auf dem wachsenden CPV Markt. In den letzten Jahren hat eine stark wachsende Nachfrage nach einer Verbesserung der Zelleistung zu komplexeren Bauelementarchitekturen geführt, die auch präzisere und reproduzierbarere Herstellungsprozesse mit Möglichkeiten zur in-situ-Prozessüberwachung und -steuerung erfordern. Gleichzeitig wurden höhere Produktivität, Prozessflexibilität bei verbesserter Ausbeute und Aspekte der schlanken Fertigung zu einem weiteren wesentlichen Schwerpunkt.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Arbeitsplan des Teilprojektes orientierte sich an die Struktur, die durch den Gesamtverbundkoordinator AIXTRON erstellt wurde. Dieses Verbundvorhaben basierte auch auf einem Vorprojekt mit den Arbeitspaketen AP1.1-AP1.4, welches erste Untersuchungen, Planungen und Konstruktionen umfasste. Diese wurden durch den Projektpartner AIXTRON durchgeführt und abgeschlossen. Somit baute das Teilprojekt von AZUR auf diesen Vorarbeiten auf und umfasste die Arbeitspakete AP 2.x, welche von Januar 2019 bis Dezember 2022 bearbeitet wurden.

Die konkreten Aufgaben des Teilprojektes von AZUR SPACE werden im Folgenden aufgeführt.

AP 2.1: Prozess- und Anforderungsanalyse in einer typischen Halbleiterfertigung für Bauelemente aus Verbindungshalbleitern

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes mussten zunächst die für die Halbleiterfertigung typischen Prozesse und deren Charakteristika im Hinblick auf Industrie 4.0 Strategien identifiziert und zusammengefasst werden. Die im Vorprojekt erarbeiteten Daten dienten dabei als Grundlage. Die spezifische Rolle von AZUR an dieser Stelle war die Produktionserfahrung aus der Herstellung von CPV-Hochleistungssolarzellen und anderen optoelektronischen Bauteilen einbringen. Dazu musste zunächst intern ein mögliches Zielbild für eine MOCVD 4.0-gestützte Fertigung erarbeitet und mit Projektpartnern Aixtron, Laytec und IMS abgestimmt. Das Ergebnis ist eine umfassende Beschreibung von Use Cases, Zieldefinitionen und Anforderungsformulierungen. Auf Basis dieser Beschreibung war eine Delta-Analyse (Identifikation fehlender Sensoren, Auswertelgorithmen, Optimierungsverfahren, etc.) durch die Projektpartner Aixtron und Laytec zusammen mit AZUR und dem IMS durchzuführen und Anforderungen an die Diversität der zu erfassenden Prozessinformationen, die Sensorik und Messelektronik selbst, die Messwertverarbeitung, Prozessoptimierung sowie Servicefunktionen zu definieren.

AP 2.2: Systemspezifikation (Sensorik, Elektronik, Funktionen, Schnittstellen, Plattform) und Modellierung [Leitung: AIXTRON]

Im Rahmen des AP2.2 wurde von den Projektpartnern unter der Leitung von Aixtron eine Systemspezifikation erarbeitet. Aufbauend auf den in AP2.1 benannten Anforderungen sollten die Architektur des Gesamtsystems und deren Komponenten definiert werden. Hierzu wurden für die Umsetzung der Anforderungen an das System die technischen Konzepte genau spezifiziert. Zusätzlich zu der direkten Analytik um die eigentlichen Wafer wurden aber auch weitere Informationen rund um die Epitaxieanlage mitberücksichtigt. Dazu gehörten neben den Waferinformationen auch Informationen aus der Anlageninfrastruktur oder Informationen, welche nicht direkt während des Runs ermittelt werden können (ex-situ Analytik). Die Menge der anfallenden Daten wurde analysiert, um die Mengengröße zu bestimmen. Anhand der Zieldefinitionen aus AP1 wurde der Bedarf an Steuerungs- und Optimierungsalgorithmen abgeleitet.

Unter Berücksichtigung aller Aspekte erfolgte dann eine Partitionierung der Gesamtfunktionalität auf in-situ-Verarbeitung in der Sensorelektronik und auf übergeordnete Verarbeitungskomponenten. AZUR stand in diesem Arbeitspaket in beratender Funktion zur Verfügung und leistete sein Beitrag bei der Abstimmung der Systemspezifikation.

AP 2.4: Schnittstellen, Datenintegration und Kommunikationsplattform für die verteilte Sensordatenverarbeitung [Leitung: RWTH]

In diesem Arbeitspaket wurde der von den Projektpartnern unter der Leitung von Aixtron. Für die in MOCVD 4.2 entwickelte Sensorelektronik wurde in AP4, unter Berücksichtigung der Mengengerüste, etablierter Lösungen am Markt sowie der identifizierten Informationsflüsse, geeignete Schnittstellen und Protokolle definiert und implementiert. Davon waren sowohl die Sensorelektronik als auch die übergeordneten Verarbeitungskomponenten betroffen. Darüber hinaus waren für die übergeordneten Verarbeitungskomponenten Schnittstellen für die Integration in Produktionsmanagementsysteme zu spezifizieren. Es erfolgte die Erarbeitung eines Self-description Modells für MOCVD-Systeme für die dynamische Einbindung von Sensoren ins Gesamtsystem; einschl. prototypischer Entwicklung und Tests. Hierfür mussten geeignete Security-Maßnahmen (Verschlüsselung, Autorisierung, Datenreduktion, ...) festgelegt werden. Tests zur Anbindung und Performance der Visualisierung der lokalen Cloud Maschinendaten kabellos auf Standardgeräten (e.g. Tablets) wurden durchgeführt und bewertet. Darauf basiert wurde ein geeignetes Gesamt-Konzept in AP 2.4 entwickelt. Die Rolle von AZUR

war es, die von der RWTH erarbeiteten Konzepte auf ihre Tauglichkeit hinsichtlich Benutzbarkeit und Überwachbarkeit gegenüber Sicherheit und Vertraulichkeit für die industrielle Produktion zu prüfen.

AP 2.8: Systemintegration und Erprobung [Leitung: AIXTRON]

Die Spezifikation, Definition und Umsetzung einer Testplattform war Gegenstand dieses Arbeitspakets. Dabei war die in AP2.2 spezifizierte Systemarchitektur exemplarisch zu realisieren. Als vielversprechend und erfolgreich ausentwickelte MOCVD 4.2 Elemente wurden in ein entwicklungsnahe System bei AIXTRON aufgebaut und unter Prozessbedingungen betrieben und analysiert.

Konkret wurde in AP AZUR 2.8.1 die Demonstration der in dem Projekt entstandenen Hard- und Software im AIXTRON Labor und eine Prüfung der Funktionalität und Nutzbarkeit entsprechend der in AP2.2 festgelegten Spezifikation durchgeführt. Basierend auf dem Ergebnis erfolgte die Entscheidung über die Integration der MOCVD 4.0-Komponenten bei AZUR (Meilenstein 2.5).

In AP AZUR 2.8.2 war eine Systemintegration bei AZUR nach positiver Bewertung in AP 2.8.1 vorgesehen. Die Integration erfolgte dabei in Zusammenarbeit mit AIXTRON und Laytec. Danach erfolgte der Test mit zunächst einfachen, später dann immer komplexeren Bauteilstrukturen. Die Erprobung musste anhand der Leistungselektronik-, CPV- und Optoelektronik-Strukturen stattfinden.

AP 2.9: Analyse und Bewertung der Effekte bezüglich Bauelemente für die Leistungselektronik [IMS, AZUR]

Zur Analyse und Bewertung der Optimierung im MOCVD-Prozess mussten Bauelemente und Schaltungen hergestellt und analysiert werden. Bei der Leistungselektronik dienen Bauelementparameter wie z.B. der On-Widerstand und die Homogenität der Schwellenspannung von normally-off Bauelementen dabei exemplarisch als Messgrößen. Dafür wird ein Bewertungsprozess der Bauelemente für die dezentrale Energieversorgung entwickelt und auf Aussagekraft hin getestet. Die Analyse basiert auf dem industriellen Anforderungskatalog von AZUR und den Erfahrungen in einer industrienahen Fertigungsumgebung. Eine stetige Anpassung der Anforderungen im Projekt an den Fortschritt der Technologie für Leistungsbauelemente in der dezentralen Energieversorgung stellt die führende Position auf dem Weltmarkt der Projektteilnehmer sicher. Im Bereich der Solarzellen und Optoelektronik werden die in AP 2.8 hergestellten Bauteile von AZUR geprüft und ebenfalls auf ihre spezifischen Bauelementeigenschaften hin getestet. Um die Vorteile der MOCVD 4.0 Technologie zu verifizieren, gilt es

die Ergebnisse mit und ohne 4.0 Konzepte zu vergleichen und zu bewerten. Neben technischen Parametern dienen Cost of Ownership Betrachtungen und wirtschaftliche Aspekte als Bewertungsmaßstab.

AP AZUR 2.9.1

In diesem AP sollten HEMT-Strukturen mit dem zu diesem Zeitpunkt genutzten Produktionsprozess hergestellt werden. Hierzu wird der Produktionsprozess um die MOCVD 4.0 Technologie erweitert und somit die Prozesssteuerung auf automatische Stabilisation umgestellt. Zum Vergleich werden auch HEMT-Wafer mit herkömmlicher Produktionsmethode als Referenz hergestellt. Beide werden bei IMS zu fertigen Bauelementen prozessiert und vermessen. Es erfolgt der Vergleich mit physikalischen Modellen des Bauteilverhaltens zur Interpretation der Ergebnisse.

AP AZUR 2.9.2

In diesem AP sollten CPV-Wafern und optoelektronischen Bauteilen mit dem Produktionsprozess von AZUR hergestellt werden. Ähnlich wie in AP2.9.1 wird auch hier eine Umstellung auf die MOCVD 4.0-Technologie vorgenommen. Die Wafer sind gemeinsam mit herkömmlich hergestellten Wafern bei AZUR zu prozessiert und zu vermessen. Die Ergebnisse werden anhand physikalischer Modelle der Bauteile bewertet.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Projekts

Der auch zum Startpunkt des Projektes noch dominierende Ansatz in der Halbleiterindustrie bestand in einer Segmentierung von Prozess(en), Datenerfassung und -nutzung. Dabei werden zwar in-situ Informationen in Echtzeit, also parallel zum laufenden Prozess, erfasst, es sind jedoch separate Metrology Stationen nötig, um eine möglichst umfassende Kontrolle des Prozesses zu erhalten und die Gesamtprozesskette zu stabilisieren. Zudem wurden die Daten manuell von Prozessingenieuren auf ihre Konsistenz hin überprüft und mit spezifizierten Prozessfenstern verglichen, um eine Prozessstabilität und Prozessabsicherung zu erreichen. Diese Segmentierung der einzelnen Schritte hat unterschiedliche Ursachen, die im technischen Stand liegen:

- Die Datenerfassung einzelner Messgeräte erfolgte jeweils einzeln, wobei ein Gerät immer für eine Messung zuständig ist.
- Die Erfassung der Messdaten erfolgte jeweils durch spezielle proprietäre Messsoftware, eine zentrale Softwareinfrastruktur fehlt im Allgemeinen.

- Eine Konsistenzprüfung, insbesondere bei mehreren Messungen, ist jeweils nicht vorgesehen.
- Viele Messungen sind bislang ausschließlich ex-situ möglich und ggf. nur zerstörend durchführbar.
- Die Messungen mussten immer vor dem Hintergrund der vermessenen Schichtstruktur bewertet werden, in der Regel anhand eines physikalischen Modells.

Es ergaben sich jedoch neue Möglichkeiten sowohl durch neu geschaffene Softwareinfrastrukturen als auch durch die gestiegene Hardwarekapazität (höhere Prozessorleistungsfähigkeit und mehr Speicher ermöglichen künstliche Intelligenz). Dies ermöglichte die vernetzte Datenauswertung zur Kontrolle und Steuerung von modernen Fertigungsprozessen. Dennoch wurden bislang folgende Punkte in der Forschung und Entwicklung nicht adressiert:

- Die Modellierung des Systemverhaltens und des gesamten Epitaxie-Prozesses, beginnend von den Eigenschaften der Eingangswafer bis zur roboter-gestützten, sensor-überwachten Entnahme der fertig prozessierten Wafer und die Korrelation aller Prozessdaten mit den finalen Device-Parametern.
- Automatische und flexible Anpassung der Epitaxierezepte an veränderte Umgebungs- oder Anlagebedingungen (z.B. Schwankungen der Waferdicke oder Substrat-Struktur oder des Temperaturverhaltens von Verbrauchsmaterial wie Waferträgern)
- Reduktion des Materialverbrauchs mittels Prozessoptimierung, Fehlervorhersage und -vorbeugung.
- Flexible Fertigung unterschiedlicher Halbleiterstrukturen mit extrem kurzer Prozess-Wechselzeit, wie dies z.B. in Wafer-Foundries unverzichtbar ist.
- Stetige Verbesserung der Produkte durch eingebettete in-situ sensorgestützte Übertragung der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse in das Produktionsumfeld
- Wartungsoptimierung durch Sensor gestützte Verschleißüberwachung für vorausschauende Instandhaltung (engl.: „Predictive Maintenance“) der Abscheidungsanlagen

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeiten in Rahmen des Teilprojektes wurden direkt von AZUR SPACE durchgeführt. Zur Abstimmung der Schnittstellenspezifikationen fand ein enger Austausch mit der Projektpartnern Aixtron, Laytec, RWTH Aachen und IMS Stuttgart statt.

II Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die Verwendung der eingeplanten Mittel erfolgte anhand der aufgestellten Planung. Damit konnten auch die geplanten Ergebnisse und Meilensteine im Wesentlichen entlang der Planung erreicht werden. Im Folgenden werden die Hauptergebnisse detailliert dargestellt.

II.2 Ergebnisse

II.2.1 AP2.1 Prozess- und Anforderungsanalyse & AP2.2 Systemspezifikation (Lastenheft)

Bei AZUR wurden intern mögliche Use Cases erstellt. Dies umfasste zum einen die mögliche zukünftige Nutzung des zu entwickelnden Systems, zum anderen auch wie diese in zukünftige Workflows eingebettet werden können. Ebenso wurde die Nutzung möglicher neuer Sensoren in Erwägung gezogen. Die Ergebnisse dieser Analysen wurden in einem gemeinsamen Workshop mit Aixtron kommuniziert und diskutiert. Der Teilnehmerkreis seitens AZUR bestand aus Technologen, Technikern und Produktionsingenieuren um ein möglichst vollständiges Zielbild vermitteln zu können. Auf zukünftige Anwendbarkeit in der Produktion wurde dabei höchsten Wert gelegt.

Auf der Basis der von AZUR erstellten Use Cases wurde eine Systemspezifikation erstellt. Dazu wurde eine Gesamtarchitektur des Systems entworfen und die zuvor erarbeiteten Anforderungen auf die Gesamtarchitektur strukturiert. AZUR stand bei diesen Arbeiten beratend zur Verfügung. Abschließend wurde die Spezifikation von AZUR und AIXTRON geprüft und eingefroren. Damit konnten die Arbeitspakete 2.1 und 2.2 erfolgreich abgeschlossen werden.

II.2.2 AP2.4 Schnittstellenspezifikation & Security-Konzept

In diesem Arbeitspaket wurde die Vernetzungsebene einzelner Systemkomponenten gemäß der Systemspezifikation erarbeitet. AZUR stand hierbei den Projektpartnern und insbesondere dem Arbeitspaketleiter RWTH Aachen beratend zur Verfügung.

II.2.3 AP2.8 Systemintegration und Erprobung

In diesem AP lag der Schwerpunkt des Teilprojekts auf der Begutachtung der Funktionalität und Nutzbarkeit der von Partnern Aixtron und Laytec entwickelten Hard- und Software.

Die zu bewertenden Aspekte waren:

1. Systemdiagnose hinsichtlich des aktuellen Zustands des Reaktors.

Bewertungsergebnis: Eine wesentliche Neuerung der Software bestand darin, dass nach der Wartung ein definierter Satz an Reaktorbedingungen abgefahren und aufgezeichnet wird. Somit wird von der Software die Abweichung vom letzten Zustand detektiert, aufgezeichnet und kann nachfolgend in die Prozessrezepte übernommen werden. Sind die Abweichungen zu groß, wird dies gemeldet und ein Fehlschlag der Wartung wird erkannt. Durch die Erkennung der Abweichungen bei einer gelungenen Wartung lässt sich deutlich schneller wieder ein reproduzierbares Ergebnis erreichen. Zudem können nun auch wichtige Peripherieparameter überwacht werden. Prominent sind hier z.B. die Kühlwassertemperaturen und Kühlwasserflüsse sowie der Druckabfall über die Filter, da diese einen Einfluss auf den Prozess haben können. Die neu entwickelte Software ermöglicht es, die Parameter auf praktische Art und Weise abzurufen und schnell zu korrelieren.

Eine weitere wichtige Verbesserung betrifft die Benutzerfreundlichkeit der Software: durch die Darstellung allen wichtigen Statistiken über ein Dashboard wird eine gute Übersicht über den aktuellen Zustand der Anlage und somit eine schnelle Visualisierung der aufgetretenen Probleme im Betrieb ermöglicht. Vergleicht man die hier vorgestellten Verbesserungen mit der anfangs gemeinsam erarbeiteten Spezifikation, so ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Umsetzung mit der gemeinsamen Spezifikation.

2. Wartungsplanung.

Bewertungsergebnis: Durch die Neuerungen in dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Diagnostikmodul wird es nun möglich, die nötigen Wartungsereignisse automatisiert zu erkennen und einzuplanen. Auch für diesen Teil ist eine sehr hohe Übereinstimmung mit der gemeinsam erarbeiteten Spezifikation zu erkennen.

3. Prozessplanung.

Bewertungsergebnis: Die Prozessplanung erfolgte bisher über einen Rezepteditor mit dem Nachteil, dass es sehr leicht ist, dabei die Übersicht zu verlieren, welcher Zustand genau zu welchem Prozessschritt vorliegt und was mit diesem Rezept nun genau hergestellt wird.

In der neuen Software findet eine intensive Rezeptanalyse statt, so dass die Software erkennt, was für ein Schichtstapel abgeschieden wird. Dies wird übersichtlich dargestellt und der Pro-

zessingenieur kann leichter prüfen, ob dies dem gewünschten Schichtstapel entspricht. Darüber hinaus kann in Verknüpfung mit den vorher aufgezeichneten Reaktorbedingungen überprüft werden, ob ein bestimmter Satz an Parametern (z.B. die Oberflächentemperatur in Abhängigkeit von einer bestimmten Vorgabe für Suszeptortemperatur und Ceilingtemperatur) in der aktuellen Konfiguration erreicht werden kann. Dies betrifft neben der Temperatursituation auch das Gasmischsystem, das ebenfalls in einer nicht sinnvollen oder nicht erreichbaren Konfiguration gefahren werden könnte. Hier unterstützt die Software die Prozessentwicklung, indem die Flüsse und Gasmischungen automatisiert zusammengestellt werden und die Flusssituation im Reaktor berechnet wird. Der Prozessingenieur wird dann dabei unterstützt, eine stabile Flussverteilung zu finden und in das Rezept zu übernehmen.

Eine weitere Integrationsstufe wurde mit der in-situ Analytik vorgenommen. Über ein Messinstrument auf dem Reaktor werden die Wafer beim Wachstum analysiert und die aktuelle Wachstumsrate und die Waferverkrümmung können aufgenommen werden. Durch Vernetzung der Komponenten, können nun die Prozessparameter und Analyseparameter im selben Rezepttext abgelegt sind und damit automatisch synchron laufen. Damit können Auswertungsfehler vermieden werden.

4. Prozessanalyse

Bewertungsergebnis: Nach einem Prozesslauf steht die zentrale Frage im Raum, ob die erreichten Prozessbedingungen den geplanten Prozessbedingungen entsprochen haben. In der alten Softwareversion waren Vergleiche von Prozesslauf zu Prozesslauf oder Wafer zu Wafer sowie Korrelation mit den Wartungsereignissen nur manuell und mit hohem Zeitaufwand möglich. In der vorgestellten Software konnten dies deutlich vereinfacht werden. Durch die Integration der Analyserezepte in die Prozessrezepte und die Zusammenführung der Daten mit den Wartungsereignissen können die oben genannten Korrelationen schnell abgerufen werden. Bei Auffälligkeiten kann auch innerhalb eines Prozesslaufes die Korrelation schichtweise erfolgen, so dass eine Anomalie zu ihrem zeitlichen Ursprung zurückverfolgt werden kann. Dies führt in der Regel zu der Ursache. Durch eine einfache Korrelation mit allen Anlagenparametern können diese ein- oder ausgeschlossen werden. Bei Hinterlegung eines Referenz-Prozesses mit seinen Toleranzen kann so auch schnell und automatisch überprüft werden, ob das Ergebnis des Prozesslaufes den gewünschten Prozessbedingungen entsprochen hat und fehlerhafte Wafer können markiert werden.

Wie in den vorangegangenen Abschnitten stimmt hier die Umsetzung mit der Spezifikation überein und übertrifft diese teilweise.

5. Vernetzung

Bewertungsergebnis: Ein wichtiges Merkmal ist, dass dieses System autonom bleibt, insbesondere sind keine Dienste dritter wie z.B. Clouddienste zum Betrieb nötig. Dies ist von sehr hoher Wichtigkeit, da die Vertraulichkeit der verarbeiteten Daten gewährleistet sein muss. Außerdem wurde die Vernetzung mit der nicht von Aixtron stammenden in-situ-Software vom Projektpartner Laytec verbessert.

Da bei AZUR keine Anlage zur Abscheidung von GaN installiert wurde, erfolgte die Erprobung im Applikationslabor bei Aixtron mit AZUR eigenen GaN Prozessen für leistungselektronische Bauelementstrukturen. In der Erprobung konnte die Praxistauglichkeit der verschiedenen Module des AIXpert Systems bestätigt werden. Die Module zeigen ein erhebliches Potential, die Prozess- und Anlagenplanung zu vereinfachen bei gleichzeitiger Senkung der Fehleranfälligkeit. Insgesamt erfüllt das AIXpert System die Erwartungen vollständig. Die Arbeitspakete konnten erfolgreich abgeschlossen werden.

Gegenstand des Meilenstein MS 2.5 ist die Entscheidung zur Integration neuer MOCVD 4.0 Komponenten bei AZUR in den Bereichen GaN Leistungselektronik, CPV und Optoelektronik. Die Ziele, die in der Konzeptphase gemeinsam zwischen AIXTRON und AZUR erarbeitet wurden, sind umgesetzt worden. Die vorgestellte Software zeigt ein hohes Potential zur Steigerung der Produktivität in der Halbleiterherstellung. Einer tiefergehenden Testung durch AZUR steht somit nichts im Wege und der Meilenstein MS 2.5 ist erfolgreich erreicht.

In Kooperation mit Laytec wurde die Software weiterentwickelt und an mehreren Anlagen bei AZUR im Produktionsumfeld erprobt. Die Software konnte erfolgreich in die Produktionsabläufe integriert werden. Durch die Vernetzbarkeit der Systeme wird die zentrale Darstellung aller relevanten laufenden Prozesse möglich. Vor allem durch die Integration eines Webinterfaces zur zeitnahen Bereitstellung von Prozessanalysen wird die automatisierte Prozesskontrolle im Produktionsbetrieb ermöglicht.

Mit der neuen Softwareversion sind erweiterte Auswertelgorithmen hinzugekommen. Diese ermöglichen vor allem die Prozesskontrolle periodisch abgeschiedener dünner Schichtsys-

teme, welche z.B. zur Herstellung von Halbleiter-Bragg-Spiegeln (DBR) genutzt werden, welche bisher nur nach dem Prozess mit ex-situ Messmethoden charakterisierbar waren. Dadurch wurde sowohl die Messfähigkeit auf eine 100% Kontrolle der Produktion erhöht als auch der Informationsgehalt der Messung signifikant erweitert.

II.2.4 AP2.9 Effekte bezüglich Leistungselektronikbauelemente

Da bei AZUR entgegen der ursprünglichen Planung kein GaN Reaktor installiert wurde, konnten keine Langzeiteinflüsse bei Verwendung des von AIXTRON entwickelten Smart Systems auf die Produktion von Leistungselektronikbauelementen evaluiert werden. Stattdessen wurde entschieden auf unseren Epitaxieanlagen für die Solarzellenfertigung auch die Evaluierung des neuen Sensorsystems des Projektpartners Laytec durchzuführen.

Mit Hilfe der von Laytec entwickelten Systeme ist es möglich während des Prozesses (In-Situ) Messungen auf der Waferoberfläche durchzuführen. Möglich sind die pyrometrische Temperatur-Messung, die Messung der Reflektivität bei mehreren Wellenlängen und die Messung der Verbiegung der Waferoberfläche. Diese Messwerte lassen unter anderem Rückschlüsse auf die abgeschiedenen Material-Stärken und -Kompositionen zu und sind somit wichtig für die schnelle Prozessüberwachung ohne aufwändige und oft mit der Zerstörung von epitaxierten Wafern verbundene nachgelagerten Messungen. Die Messungen unterliegen allerdings einigen Einschränkungen, die aus den Limitierungen durch die Reaktorgeometrie folgen. Zum Beispiel müssen die Messungen immer mit einem großen Abstand zur Waferoberfläche erfolgen, was den optischen Weg sehr empfindlich für Ablenkungen macht.

Dieses System wurde von Laytec für unseren Reaktortyp speziell modifiziert und anschließend auf 2 Anlagen installiert. Ziel der Modifikationen war die Messung im Randbereich stark verkrümmter Wafer zu verbessern. Bisher bestand das Problem, dass die Lichtstrahlen der Lichtquelle durch Deflektion auf dem verkrümmten Wafer nicht mehr vollständig auf dem Detektor ankamen. Hierdurch wurde die Temperatur- und Reflektivitätsmessung verfälscht und die Verkrümmungsmessung unmöglich gemacht.

Laytec hat den Messkopf nun folgendermaßen modifiziert:

1. Der Arbeitsabstand zwischen Wafer und Detektor wurde minimiert.
2. Es wurde eine größere Kamera zur Verkrümmungsmessung verbaut.

3. Die Verkrümmungsmesseinrichtung wurde so justiert, dass die Laserspots auf ebenen Wafern nicht mehr symmetrisch im Zentrum der Kamera ankommt umso mehr Platz für Deflektion zu erhalten.

Entsprechend wurde die Software angepasst, sodass diese mit der größeren Kamera kompatibel ist und die Auswertung von asymmetrisch eingerichteten Krümmungsmesseinrichtungen vereinfacht. Bei AZUR wurden die Messsysteme anhand von Messungen der laufenden Produktion von Hochleistungstandemsolarzellen auf der GaAs Basis evaluiert. Zusätzlich wurde eine spezielle Teststruktur entwickelt mit dem Ziel, Wafer mit über die Epitaxie langsam steigender Durchbiegung zu erzeugen. Hierzu wurden Einzelschichten aus Indium-Gallium-Arsenid auf Germanium Substraten abgeschieden mit über das Schichtwachstum langsam steigenden Indium-Anteil. Hierdurch steigt die Gitterkonstante des Materials, was zu einer tensilen Verspannung des Schichtmaterials gegenüber dem Substrat führt und so den Wafer convex aufbiegt.

Zunächst wurde anhand der entwickelten Teststruktur der neue Messbereich bewertet. Hierzu wurde aus den kompletten Messungen über den Waferradius jeweils die größte gemessene convexe Curvature bestimmt (Convex wird nach Konvention als negative Curvature dargestellt). Hieraus ergibt sich eine Überlagerung aus der realen maximalen Curvature der Wafer und dem Messbereich. Diese Methode unterschätzt also tendenziell den realen Messbereich. Die Ergebnisse sind in *Abbildung 1* dargestellt. Die Einschränkung des Messbereichs im Randbereich des alten Messsystems sind an dem nach oben abknickenden Verlauf deutlich erkennbar, während mit dem modifizierten Messsystem keine Einschränkung sichtbar ist. Somit wurde die angestrebte Messbereichserweiterung nachgewiesen.

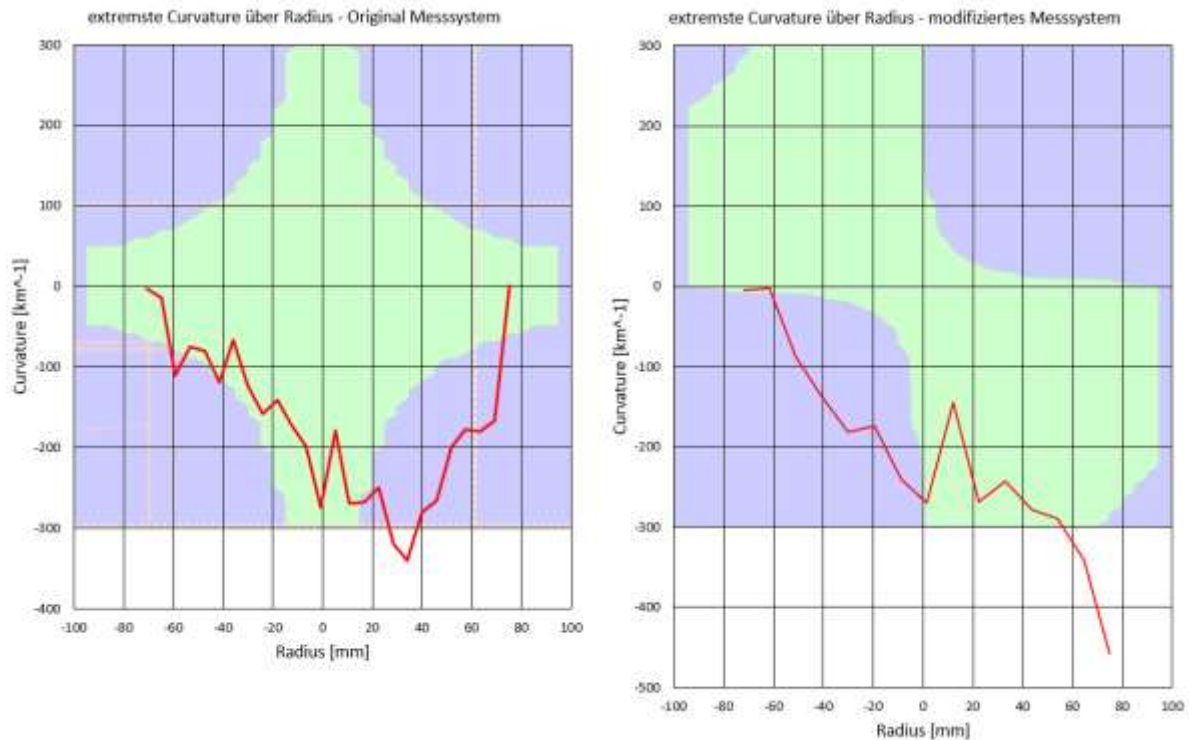


Abbildung 1 Messergebnisse aus Teststruktur. Vergleich original Messsystem (links) gegen modifiziertes System (rechts). Im Hintergrund jeweils die durch Laytec konservativ simulierte erwarteten Werte (Grün = Messbar, Blau = nicht messbarer Bereich).

Wie in *Abbildung 2* ersichtlich hat sich auch der in der laufenden Produktion messbare Bereich auf dem Wafer deutlich erhöht. Die Abbildung zeigt den Anteil der gültigen Messwerte an den maximal möglichen Messwerten über den Waferdurchmesser während einer Produktionsfahrt. Während mit der Originalkonfiguration ein Bereich von max. 35 mm des Waferdurchmessers messbar war, hat sich dieser Bereich mit dem modifizierten System auf 70 mm verdoppelt.

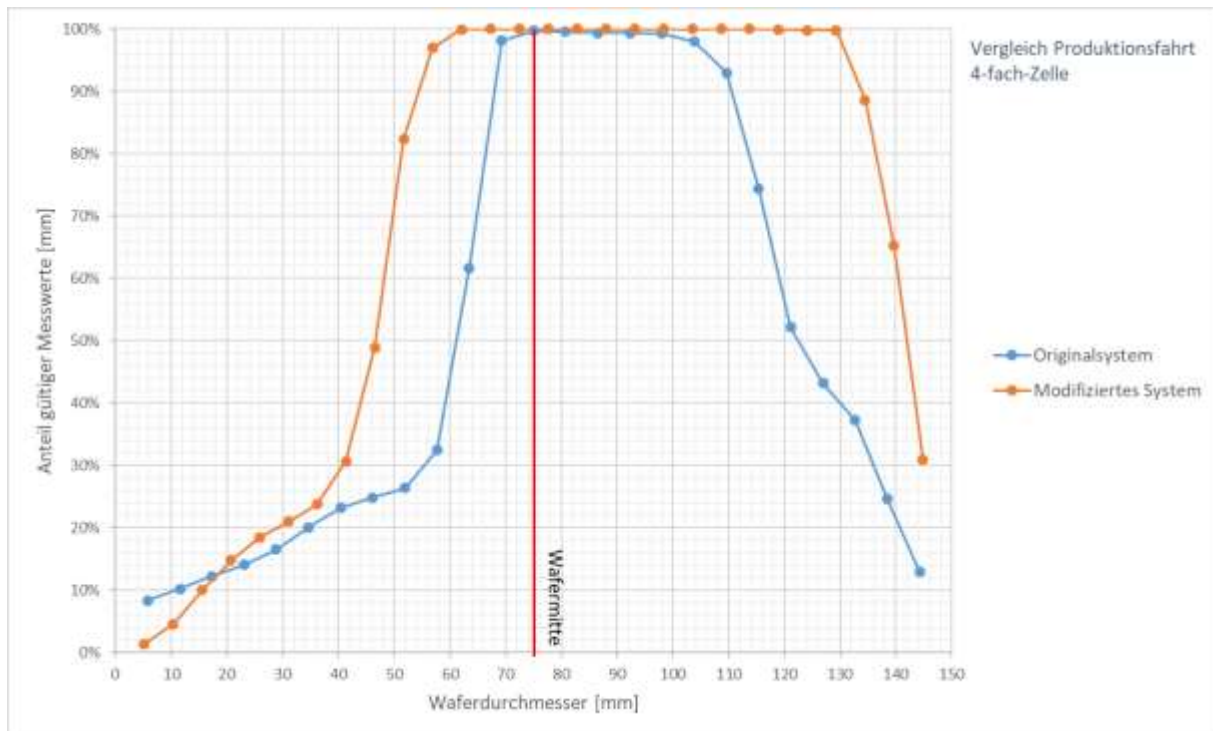


Abbildung 2 Vergleich des Anteils gültiger Wafer über Waferdurchmesser zweier Produktionsruns mit original Messsystem und mit modifiziertem System

Somit ist eine deutlich detailliertere Messung im Randbereich möglich, was auch die Prozessüberwachung entsprechend verbessert. Somit konnte nachgewiesen werden, dass das von Laytec weiterentwickelte System das Potential hat in einer modernen Halbleiterfabrikation die zerstörungsfreie in-situ Prozessüberwachung signifikant zu verbessern und somit die Produktqualität bei gleichzeitig verringerten laufenden Kosten durch eine Reduktion von zerstörerischen Ex-Situ Messungen zu verbessern.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Projekt wurde ein neuer Ansatz für die Fertigungskontrolle von Halbleitermaterialien im MOCVD-Verfahren erprobt und evaluiert. Eine solche Entwicklung mit dem Fokus auf Hochtechnologieproduktionsanlagen stellt eine enorme Herausforderung dar, da vernetzte Entwicklungen bei mehreren Industriepartnern erfordert, die ineinandergreifen müssen. Die nötigen Entwicklungen bei den einzelnen Partnern sind dabei recht umfangreich. Daher war das Projekt mit einem großen Risiko verbunden. Das Risiko bestand insbesondere darin, dass ein grundsätzlich neuartiges Fertigungskonzept erarbeitet werden musste. Um dies zu erreichen, mussten aufwändige Methoden zur Qualitätssicherung und Charakterisierung entwickelt und

mit ausreichender Datenbasis validiert werden. Technische Umsetzbarkeit des Ansatzes konnte erst im Laufe des Projektes bestätigt werden. Ein Entwicklungsprogramm dieser Größenordnung war aus den eigenen Mitteln von AZUR SPACE nicht finanzierbar. Durch das große wirtschaftliche Potenzial der angestrebten wirtschaftlichen Verwertung wurde allerdings eine Förderung von 50% als angemessen betrachtet.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse

II.4.1 Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen

Von Seiten AZUR SPACE wurden im Rahmen des Teilprojektes weder Erfindungen noch Schutzrechtsanmeldungen vorangetrieben oder geltend gemacht.

II.4.2 Wissenschaftlich, technische und wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die Erfolgsaussichten für die Verwertung der Projektergebnisse aus Sicht des Endanwenders sind sehr gut. Bereits im Projekt fand eine erfolgreiche Erprobung der neu entwickelten Industrie 4.0-Ansätze sehr produktionsnah statt, womit eine Umsetzung in der MOCVD Produktion von AZUR kurzfristig nach Projektende realisiert werden kann. Nach einer erfolgreichen ersten Validierung des Produktionsmodells in der industriellen Fertigungsumgebung bietet sich an, die Nutzung von Laytec in-situ Sensoren auf weitere Halbleiterprodukte der AZUR SPACE zu erweitern.

AZUR ist der weltweit führende Lieferant von III-V basierten Solarzellen und steigt in spezielle Nischenmärkte für opto- und leistungselektronische Chips ein. Diese Position wird jedoch von Konkurrenten (aktuell hauptsächlich aus den USA, aber auch aus China) ebenfalls angestrebt. Entscheidungspunkte für die Kunden sind dabei zum einen die Langzeitleistungsfähigkeit der Solarzelle im Vergleich zu den Fertigungskosten. Durch erfolgreiche Umsetzung der hier entwickelten und validierten Verfahren wird AZUR somit die Wettbewerbsfähigkeit ihrer epitaxie-basierenden Fertigungsprozesse deutlich steigern und somit durch eine kostengünstigere und flexiblere Fertigung Marktanteile verteidigen und neue Marktanteile hinzugewinnen. Zudem werden deutlich komplexere Produkte möglich.

In den Bereichen Leistungselektronik und Optoelektronik ist AZUR vor allem daran interessiert, den Markt an spezialisierten und technologisch hochwertigen Bauteilen zu bedienen. Mit einer Verbesserung der Fertigungstechnologie wird hier ein Ausbau dieser Marktposition erwartet, was zu einer langfristigen Sicherung der bestehenden Arbeitsplätze und Schaffung weiterer Arbeitsplätze führen wird.

II.4.3 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Eine erfolgreich demonstrierte, produktionsgebundene Modellbildung für hochkomplexe Epiaxiefertigung, die Prozessplanung, Prozessmonitoring und Wartungsereignisse umfasst, kann voraussichtlich mittelfristig auf weitere komplexe Halbleiterstrukturen und MOCVD-Reaktortypen erweitert werden. Des Weiteren ist die Entwicklung von selbstlernenden KI-Algorithmen denkbar, die eine Prozessnachführung auf der Basis der Messdaten von vollprozessierten Bauelementen ermöglichen. Dabei soll unter anderem ein besonderes Merkmal auf Sicherheitsaspekte hinsichtlich Prozesskontrolle und Fertigungspersonalsicherheit gelegt werden. Dies kann am Besten im Rahmen von weiteren F&E Projekten mit akademischen und industriellen Partnern umgesetzt werden.