Schlussbericht

Zum BMBF-Vorhaben:

„Herstellungstechnologien und -Prozesse für hoch-performante 2nm-Elektronik “

im Rahmen des ECSEL Projekts
“Integration of processes and moDules for the 2nm node meeting Power Performance Area and Cost requirements“ (ID2PPAC)

FKZ: 16MEE0192K und 16MEE0191T (Maskenmetrologie, Standort Jena)

Laufzeit des Vorhabens
01. 07. 2021– 31. 12. 2024

Zuwendungsempfänger: Carl Zeiss SMT GmbH (hier: ZEISS)

Ansprechpartner: Dr. Christian Rüster

1. Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das Vorhaben orientierte sich an dem Gesamtziel im ECSEL Projekts ID2PPAC, welches für den 2nm-Technologie-Knoten demonstrieren sollte, dass durch die Entwicklung, Konsolidierung und Integration ausgewählter Technologielösungen "Lithographie-Equipment", "Metrologie-Equipment", "Masken-Equipment" und "Prozessentwicklung & Modul-Integration" (d.h. Patterning, CMOS-Bauteile, BEOL-Interconnect, DTCO/STCO) die Anforderungen an „Performance, Power, Area und Cost“ (PPAC[1]) für diese Generation der führenden Logiktechnologie erreicht werden können. ZEISS hat im Bereich Lithographie- und Masken-Equipment mitgewirkt, und folgende übergeordnete Ziele unterstützt:

- Die kostengünstige Strukturierung für den 2-nm-Technologieknotens durch Einführung einer einstufigen Strukturierung mit 0,55 oder high NA (hNA) EUV-Lithographie. Das umfasst die Verbesserung des Abbildungsfehlers und des Overlays um 25% bzw. 30%.
- Die durch die Einführung des 2nm-Technologieknotens entstehenden Lücken in der Masken-Herstellung und im Masken-Equipment zu schließen.

Das Teilvorhaben von ZEISS verfolgte zwei technisch-wissenschaftliche Ziele, die sich aus den Anforderungen für den EUV-Scanner für Einfachbelichtung für den 2nm-Knoten ergeben, nämlich eine integrierte Technik zur Optimierung und Qualifizierung der System-Performanz der high NA EUV-Projektionsoptiken (hNA EUV POB) zu entwickeln. Gegenüber den schon extremen Anforderungen der ersten Prototypen dieser Optik sollten die Aberrationen in der Abbildung um weitere 25% und das Overlay um weitere 30% verbessert werden, um die Anforderungen an den Lithografie-Prozess für die Einfachbelichtung von Strukturen des 2nm Knotens zu erreichen.
Im WP4 *Mask Equipment* verfolgte ZEISS das Ziel, Anlagen für die Vermessung und Feinabstimmung von hNA spezifischen Masken bis zum Demonstratoren-Status zu entwickeln und deren Leistungsfähigkeit an exemplarischen Masken zu demonstrieren.
Die in diesem Projekt zu erarbeitenden Innovationen sollten sicherstellen, dass ZEISS zusammen mit dem europäischen Halbleiterausrüstungssektor und der dazugehörigen Wertschöpfungskette an der für diesen Sektor zu erwarteten starken wirtschaftlichen Entwicklung partizipieren, nachhaltig Arbeitsplätze sichern und in Bezug auf die weltweite Technologieführerschaft dem Wettbewerb weiterhin an erster Stelle stehen wird.
Hierdurch leistet dieses Vorhaben einen entscheidenden Beitrag für die erfolgreiche wirtschaftliche Verwertung der über Jahre von ZEISS entwickelten high NA EUV Optik-Technologien und für die Schaffung und Erhaltung von hochqualifizierten Arbeitsplätzen in Deutschland - nicht nur im Hause ZEISS, sondern auch bei seinen Lieferanten und Partnern.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Nach fast 25-jähirger Entwicklungsarbeit wurde ab 2018 die EUV-Lithografie in der Herstellung führender Microchips eingesetzt und erste Produkte von Samsung und TSMC in den Massenmarkt eingeführt. Seit Beginn des Vorhabens im Jahre 2021 hat die EUV-Technologie eine enorme technische und wirtschaftliche Entwicklung gezeigt[2]. In diesem Zeitraum hat sich die Zahl der weltweit in der Massenproduktion eingesetzten 0,33 (low) NA EUV-Scanner mehr als

[1] https://www.imec-int.com/en/articles/getting-most-out-your-system

[2] Christophe Smeets, ASML Netherlands B.V. (Netherlands), SPIE 2023, 0.33 NA EUV systems for high volume manufacturing

verdoppelt und hNA wurde als nächste Generation der EUV-Lithographie in den Markt eingeführt. Zum Projektende waren drei Prototypen der hNA EUV Scanner Generation für Kunden im Einsatz, zwei direkt bei Endkunden und ein System in Europa am High NA Lab, das von ASML und imec betrieben wird und in dem weitere weltweite Endkunden entsprechende Prozess entwickeln können[3]. Die auf der SPIE-ALP 2025 gezeigten Rückmeldungen von Endkunden und die für Q2/2025 angekündigte Einführung der HVM (high-volume-manufacturing)-fähigen hNA EUV Scanner EXE5200 zeigen, dass die ambitionierten Ziele des Gesamtvorhabens erreicht wurden und gut mit der Roadmap des Systemintegrators ASML für den 2nm Knoten übereinstimmten. Daher war über die ganze Laufzeit eine sehr hohe Relevanz für die weitere Entwicklung der EUV-Technologie gegeben.

1.3 Ablauf des Vorhabens

Entsprechend den Zielen der Aufgabenstellung war das Vorhaben aus zwei Bereichen aufgebaut, die jeweils in weitere Arbeitspakete und Teilarbeitspakete untergliedert waren.
Im ersten Bereich wurden Technologien für die integrierte Optimierung und Qualifizierung der System-Performanz der **hNA EUV POB** abschließend entwickelt, wodurch die EUV-optischen Systeme von ZEISS für den Einsatz im HVM-Betrieb des hNA-Scanner qualifiziert wurden. Die Funktionalität dieser Technik wurde mittels mehrerer hNA EUV POB Demonstratoren überprüft. Darüber hinaus wurden Technologielösungen für EUV-Spiegel evaluiert, mit denen in zukünftigen Produktgenerationen die weitere Steigerung der EUV-Quellenleistung bei verbesserter optischer Leistung unterstützt werden soll.
Im zweiten Bereich wurden Technologien erarbeitet, mit denen die **Vermessung und Feinabstimmung von hNA spezifischen Masken** ermöglicht bzw. verbessert wurde. Auf Basis der bestehenden PROVE neXT Plattform (Stand der Technik) wurden zahlreiche Verbesserungen umgesetzt und ein Demonstrator entwickelt, der eine Wiederholbarkeit der Registrierungsmessung von unter 0,1 nm max3sigma erfolgreich demonstriert hat. Das Vorhaben wurde planmäßig begonnen und nach 41 Monaten abgeschlossen. Die Komplexität der Aufgabenstellung machte eine Verlängerung von 5 Monaten erforderlich. Alle Meilensteine wurden erreicht.

1.4 Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Neben den schon genannten Demonstratoren waren wesentliche Ergebnisse die Entwicklung und finale Qualifizierung der Prozesse zur Picometer-genauen Bearbeitung und Vermessung der Spiegeloberflächen sowie die Methoden-Entwicklung für die Qualifizierung des hNA EUV POB Systems. Dabei sind wichtige Ergebnisse eines deutschen Forschungsinstituts eingeflossen, das als Projektpartner eng mit ZEISS zusammenarbeitete. Die Systemqualifizierung wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner und System-Integrator ASML durchgeführt, der u.a. Leistungsdaten zur Verfügung stellte.
Im Bereich Masken-Equipment wurde neben den Projektpartnern insbesondere mit Masken-Kunden zusammengearbeitet, speziell in den hNA spezifischen Anwendungen, die vom den im Projekt entwickelten Demonstrator adressiert werden. Diese enge Zusammenarbeit zeigt sich gut an einer gemeinsamen Veröffentlichung im Jahre 2024 mit einem Kunden aus den USA[4].

---

[3] Herman Heijmerikx, ASML Netherlands B.V. (Netherlands), Progress in High NA EUV lithography. SPIE-ALP 2025: 13424-48

[4] R. Schmeissner et al., Mask registration for high–NA EUV lithography, Proc SPIE 12751 (2024);

https://doi.org/10.1117/12.2688259

Schlussbericht

Zum BMBF-Vorhaben:

„Herstellungstechnologien und -Prozesse für hochperformante 2nm-Elektronik“

im Rahmen des ECSEL Projekts
“**I**ntegration of processes and mo**D**ules for the **2**nm node meeting **P**ower **P**erformance **A**rea and **C**ost requirements“ (ID2PPAC)

FKZ: 16MEE0192K und 16MEE0191T (Maskenmetrologie, Standort Jena)

Laufzeit des Vorhabens
01. 07. 2021– 31. 12. 2024

Zuwendungsempfänger: Carl Zeiss SMT GmbH (hier: ZEISS)

Ansprechpartner: Dr. Christian Rüster

2. Eingehende Darstellung

2.1 Die Verwendung der Zuwendung sowie die erzielten Ergebnisse im Einzelnen

2.1.1 Spiegel-Technologien und System-Metrologie für hNA EUV POB zur Einfachbelichtung in den Lithographie-Prozessen des 2nm Knotens

In diesem Teilarbeitspaket wurde eine integrierte Technik zur Optimierung und Qualifizierung der System-Performanz der high NA EUV-Projektionsoptiken (hNA EUV POB) mit dem Ziel entwickelt, die Aberrationen in der Abbildung um weitere 25% und das Overlay um weitere 30% gegenüber den schon extremen Anforderungen der ersten Prototypen dieser Optik zu verbessern. Dies war notwendig, um die Anforderungen an den Lithografie-Prozess für die Einfachbelichtung von Strukturen des 2nm Knotens zu erreichen.
Abbildung 1 gibt einen Überblick über die Metrologie-Schritte, die bis zur Erreichung der finalen optischen Leistung des hNA EUV POB zu durchlaufen sind. Je nach Art des Fertigungsschrittes sind unterschiedliche Messgenauigkeiten in den verschiedenen räumlichen Frequenzbändern an verschiedenen Punkten entlang der Prozesskette erforderlich (*Abbildung 1* oben). Abweichungen von der Idealform werden mit unterschiedlichen Messmittel ermittelt.
Der größte Teil der Messaufgaben wird auf Komponenten-Ebene durchgeführt. Links sind das Vakuum-Interferometer und typische Messdaten dargestellt, mit dem vollständige Spiegeloberflächen vermessen werden können. Um die finale Performanz nachzuweisen, wird auf Systemebene die Verifizierung im Prozess (*Abbildung 1* rechts) durchgeführt.

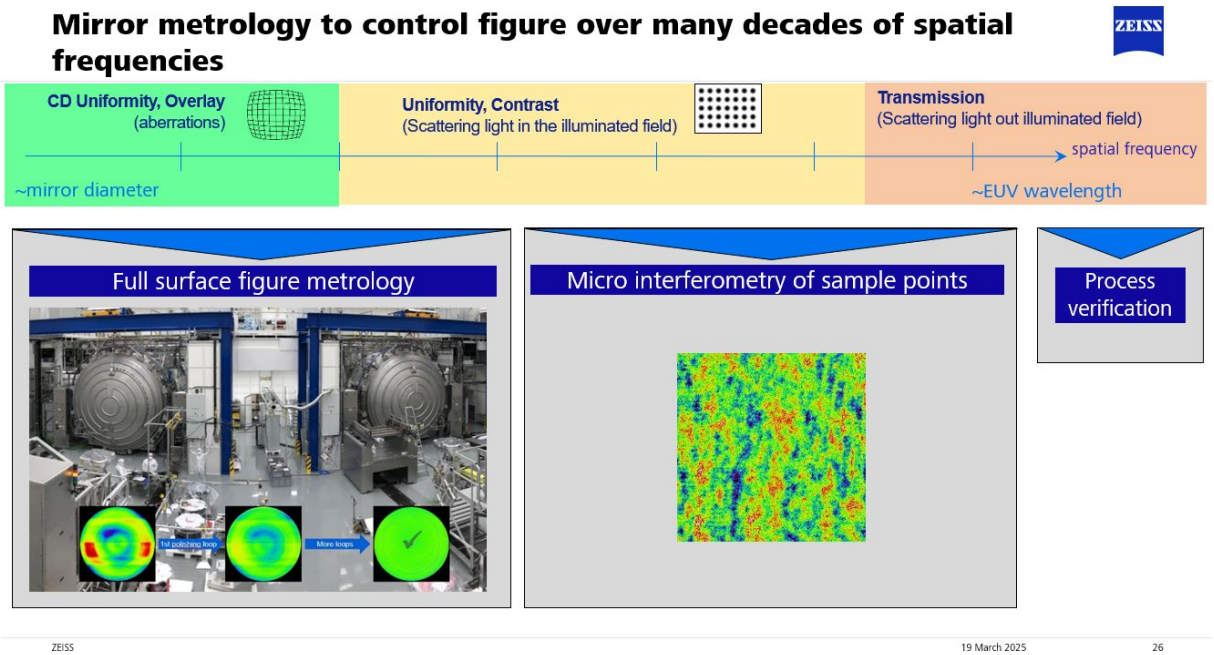

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Spiegelmetrologie-Prozesses, der sich über mehrere Dekaden der räumlichen Frequenzbänder erstreckt.

Dementsprechend war dieses Teilarbeitspaket in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil wurde die Entwicklung und finale Qualifizierung der Prozesse zur Picometer-genauen Bearbeitung und Vermessung der der EUV-Spiegel des hNA EUV POB durchgeführt, im zweiten Teil dann die Optimierung und finale Qualifizierung der optischen Systemleistung des hNA EUV POB.

Prozesse zur Picometer-genauen Vermessung und Bearbeitung der EUV-Spiegel

Die Herstellung von hNA EUV-Spiegeln (*Abbildung 2* links) ist ein iterativer Prozess, der abwechselnde Fertigungs- und Messschritte umfasst. Einerseits können frühere Produktionsschritte, die noch große Veränderungen der Oberfläche verursachen, nicht die gleiche Präzision erreichen wie spätere Schritte, bei denen nur noch geringe Materialmengen entfernt werden. Andererseits steigt die Genauigkeit der Spiegelmetrologie, während die Qualität des Spiegels sich dem endgültigen Ziel annähert. Dieses iterative Zusammenspiel zwischen Fertigungsprozess und Spiegelmetrologie wird qualitativ in *Abbildung 2* rechts veranschaulicht.

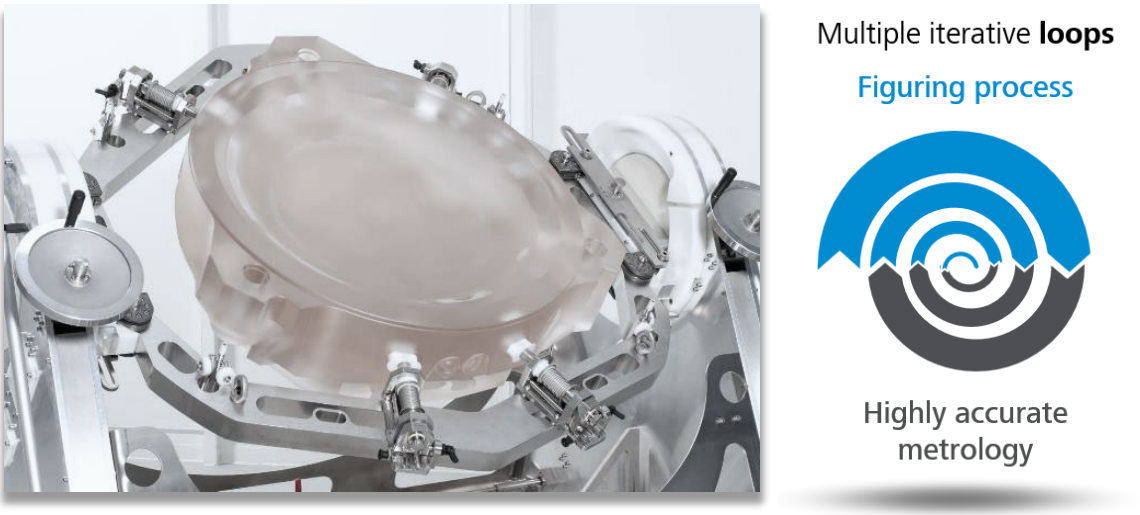

Abbildung 2: Links: EUV-Spiegel des hNA EUV POB im Montage-Rahmen. Rechts: Darstellung des iterativen Prozesses von abwechselnden Herstellungs- und Messschritten (die kontinuierlich zunehmende Präzision der Mess- und Herstellungsschritte wird durch die immer feiner werdende Spirale dargestellt, die sich der endgültigen Zielform des Spiegels annähert

Die in *Abbildung 1* links dargestellte Spiegelmetrologie liefert die erforderlichen Informationen zur Steuerung der einzelnen Fertigungsschritte. In der interferometrischen Spiegeloberflächenmetrologie wird die Oberfläche des zu testenden Spiegels mit seiner Idealform verglichen. Falls der Spiegel noch nicht perfekt ist, zeigt sich die Abweichung zur Zielform im Interferogramm und kann zur Steuerung des nächsten Fertigungsschrittes des Spiegels verwendet werden.
Insgesamt war es das Ziel, mit diesem Verfahren Spiegeloberflächen mit einer Genauigkeit im sub-Angstrom-Bereich vermessen zu können. Die gewünschte Leistungsfähigkeit wurde nachgewiesen, indem in einem Stage-Gate-Prozess für jeden Spiegel der hNA EUV POB eine Reihe von Messfähigkeitszielen mit jeweils gesteigerten Anforderungen erreicht wurden.

Neben dem Nachweis der Messfähigkeit bis zur endgültig erforderlichen Genauigkeit war ein weiterer Gegenstand des Teilarbeitspakets die Entwicklung eines Korrekturprozesses, mit dem die Spiegeloberfläche so nachbearbeitet werden kann, dass auch die finale Leistungsfähigkeit der hNA EUV POB erreicht werden kann. Zu diesem Zweck wurden entsprechende Maschinen installiert, mit denen die großen uns schweren Spiegel bearbeitet werden konnten. Zunächst wurden die Funktionalität des Korrekturprozesses an Funktionsmustern nachgewiesen. Dabei wurde gezeigt, dass der Korrekturprozess für alle relevanten Spiegel konvergiert und die angestrebte Leistungsverbesserung erreicht werden kann.

Optimierung und finale Qualifizierung der optischen Systemleistung des hNA EUV POB

In der optischen Säule des EUV-Scanners soll die hNA EUV POB, d.h. die „projection optics“ die Aufgabe erfüllen, die Strukturierungsmuster der Photomaske mit einer Auflösung von kleiner 8nm verzerrungsfrei und mit exakter Platzierung auf den Wafer zu übertragen.

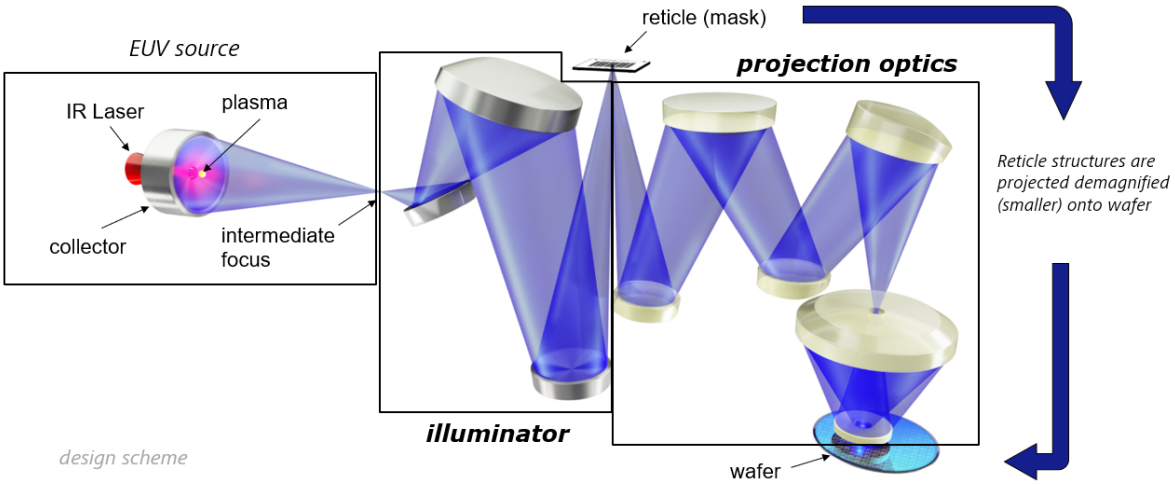

Abbildung 3: Optische Säule des hNA EUV-Scanners

Um diese extremen Anforderungen erfüllen zu können, wurde von ZEISS über Jahre ein hochkomplexes optisches System entwickelt, das aus mehr als 40.000 Komponenten besteht, die Größe eines Kleinwagens hat und mehr als 12 Tonnen wiegt.

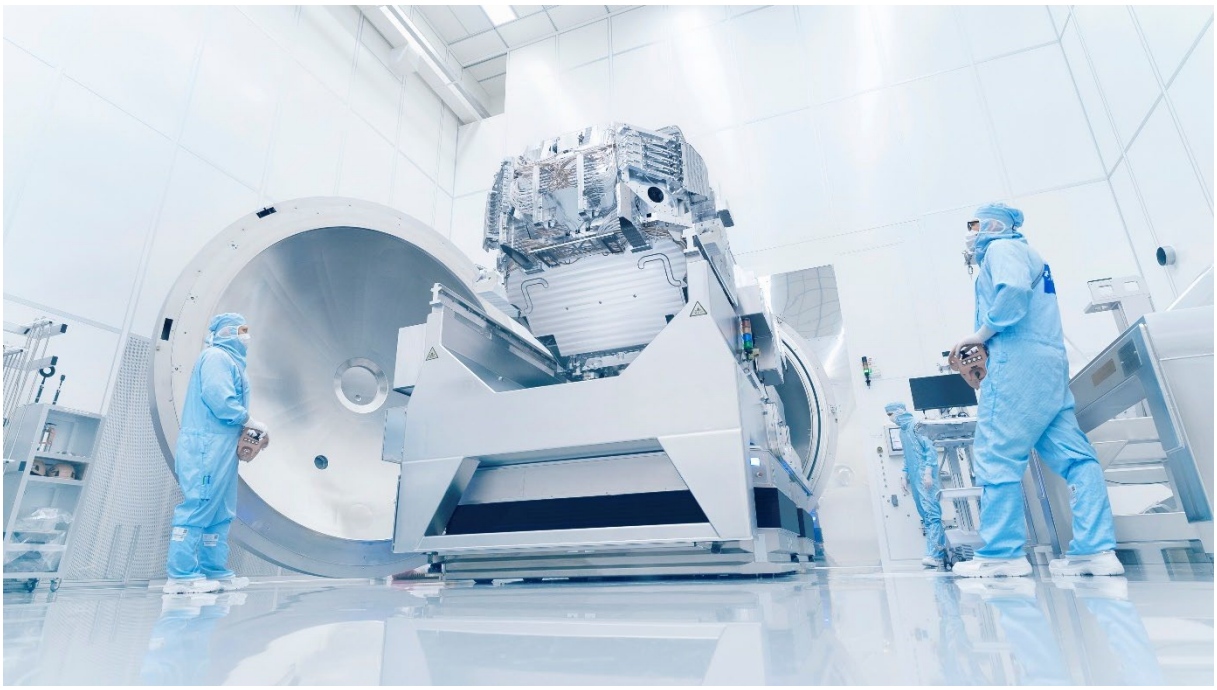

Abbildung 4: hNA EUV POB während der Systemqualifizierung.

In diesem Teil des Arbeitspakets wurde die Systemleistung der hNA EUV POB optimiert und das System final qualifiziert und damit die Fähigkeit nachgewiesen, die System-Anforderungen für Einfachbelichtungen beim 2nm Technologieknoten zu erfüllen.

Zu diesem Zweck wurden umfangreiche Systemqualifizierungsmaßnahmen bei ZEISS und ASML an der ersten hNA EUV POB durchgeführt. *Abbildung 4* zeigt das optische System in Vorbereitung für eine Kontaminationsprüfung.
Aus den gewonnenen Daten wurden Rezepte für die finale Korrektur an ausgesuchten Spiegeln abgeleitet, die mit den zuvor in diesem Vorhaben entwickelten, Mess- und Korrekturprozessen durchgeführt wurden. Die finale optische Leistungsfähigkeit wurde schließlich im Scanner verifiziert und zeigt die Erfüllung der an dieses optische System gestellten Anforderungen (siehe *Abbildung 5*).

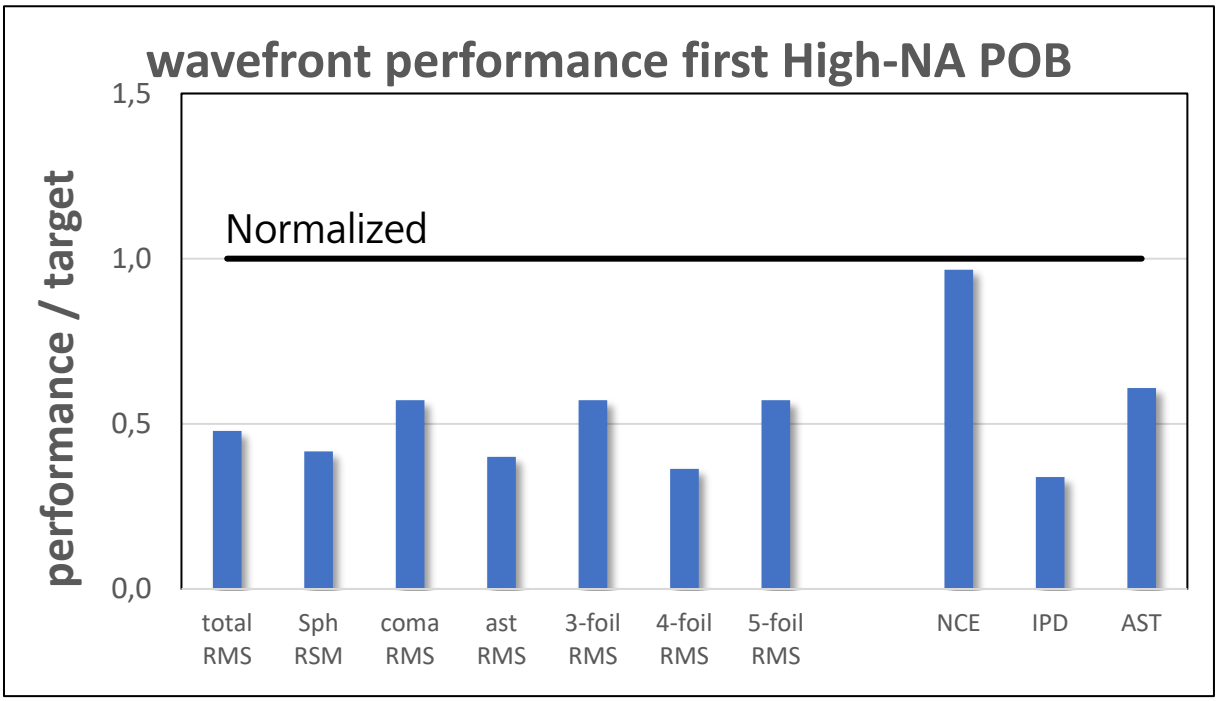

Abbildung 5: Optische Leistungsfähigkeit der hNA POB im Vergleich zu den normalisierten Anforderungen nach Abschluss der Optimierung und Qualifizierung. Typische Aberrations-KPIs wie Astigmatismus, Koma, sphärische Aberration oder n-förmige Aberration sind dargestellt. In dieser Darstellung sind alle KPIs auf ihre individuellen Zielwerte (Anforderungen) skaliert (schwarze Linie).

Die hNA EUV POB Wellenfront wurde auch im Fotolack durch die Beobachtung von Bildgebungsgrößen für kritische Merkmale verifiziert (siehe *Abbildung 6*), die sich gut innerhalb der Zielwerte befanden.
Zum Projektende konnten erstmals Strukturen von nur 8 Nanometern realisiert werden (*Abbildung 7*)[1], was ein neuer Weltrekord für Wafer-Scanner und ein bedeutender Sprung von den zuvor möglichen 13 Nanometern mit 0,33 NA EUV darstellt.
Bis zum Projektende konnte eine weitere Steigerung der optische Leistungsfähigkeit durch kontinuierliche Verbesserung erzielt und in nachfolgenden hNA EUV POB-Exemplaren nachgewiesen werden, so dass festgestellt werden darf, dass alle diesbezüglichen Ziele des Vorhabens vollumfänglich erreicht und übertroffen wurden.

[1] Claus Zahlten et. al, Carl Zeiss SMT GmbH, EUV optics portfolio extended: first high-NA systems delivered and showing excellent imaging results, SPIE-ALP 2025: 13424-50

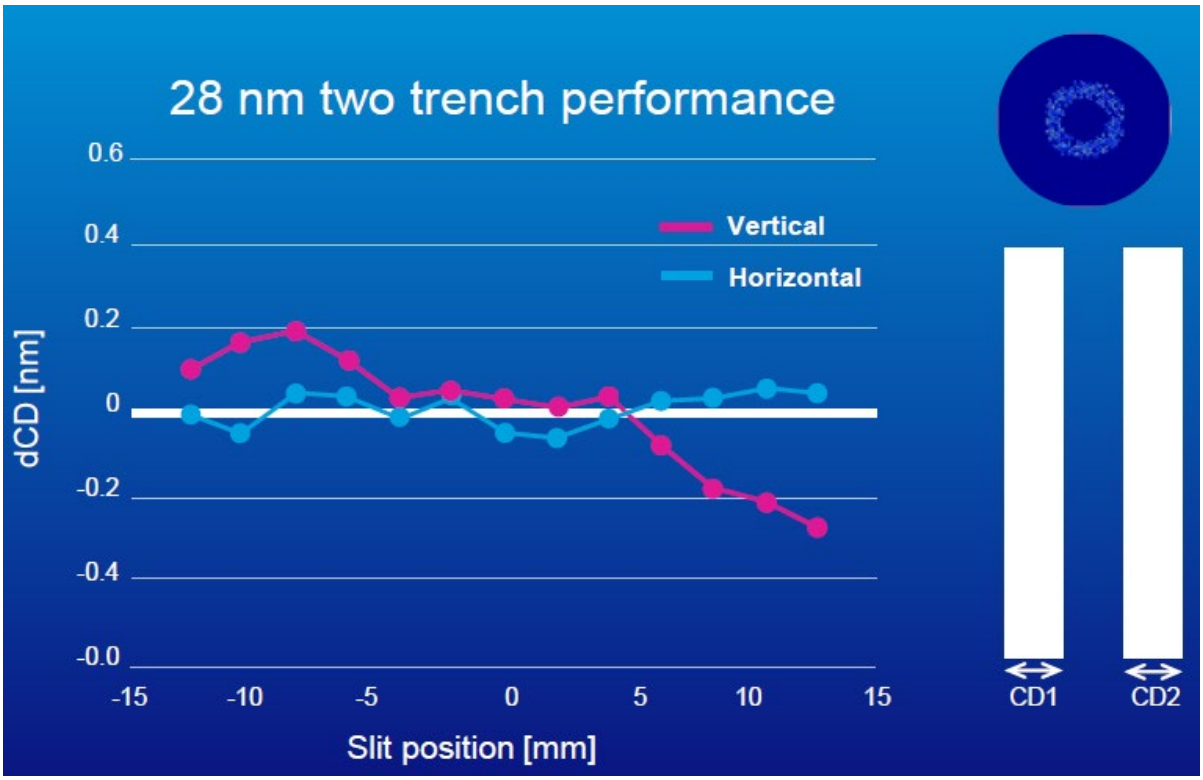

Abbildung 7: Variation der kritischen Dimension (dCD = CD1 -CD2) entlang der horizontalen und vertikalen zwei-Graben Struktur, die während der Endqualifikation von der hNA EUV POB gedruckt und mit dem Rasterelektronenmikroskop gemessen wurden. dCD liegt deutlich unter den Zielwerten von <0,6nm[2]

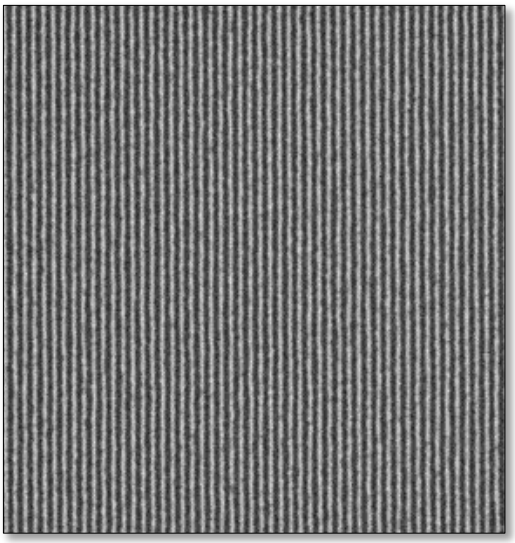

Abbildung 6: Durch Einfachbelichtung realisierte 8 Nanometer half-pitch Struktur

2.1.2 Entwicklung einer Technologieplattform für direktes Thermalmanagement von EUV-Spiegeln

In diesem Teilarbeitspaket wurden Technologien für ein aktives thermisches Management untersucht, das bei den Spiegeln zukünftiger Generationen des hNA EUV POB zur Anwendung gebracht werden soll, um die durch absorbierte EUV-Strahlung hervorgerufene nachteilige Auswirkungen auf das Abbildungsvermögen des Objektivs zu mindern. Die Erwärmung von

[2] Jan van Schoot –"Beams & More", 2024, Stuttgart, Germany (measured @ Intel)

Bauteilen führt zu Verformungen, die entweder zu Aberrationen (durch parasitäre Heizung der Spiegel) oder strukturellen Verformungen (durch parasitäre Heizung der Strukturteile) führen, die ebenfalls zu Aberrationen führen können.
Als Grundlage für das aktive Thermomanagement der Spiegel des EUV-Projektionsobjektivs wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das beschreibt, wie die thermischen Lasten der EUV-Spiegel und Objektiv-Struktur nach Anwendung aller verfügbaren Korrekturmaßnahmen das Abbildungsverhalten des Objektivs, d.h. die Wellenfront des EUV-Lichts am Wafer, beeinflussen. Mit anderen Worten: Das Modell prognostiziert das wärmelastinduzierte Verhalten der Wellenfront der 0,55NA-EUV-Projektionsobjektive unter Berücksichtigung von Maßnahmen der aktiven Steuerung durch das Thermalmanagement. Basierend auf diesem Modell wurden geeignete Regelalgorithmen für die thermischen Managementmaßnahmen der EUV-Spiegel entwickelt. Das Modell berücksichtigt: a) das optische und mechanische Design des Projektionsobjektivs, b) die verwendeten Materialien, c) die thermische Architektur mit allen Wärmequellen und -senken, einschließlich Maßnahmen zur aktiven Temperaturregelung, sowie die Beleuchtungseinstellungen und Geometrie der Strukturen auf der Maske, die von der Kundenanwendung abhängen. Das Modell simuliert auch, wie sich die Spiegeloberflächen unter dem Einfluss von zeitlich wechselnden Wärmelasten mit der Zeit verändern. Nach weiteren Nachbearbeitungen sagt das Modell auch voraus, wie sich diese Veränderung auf das Abbildungsverhalten des Projektionsobjektivs auswirkt. Da die Einstellung der Beleuchtungswinkel, d.h. die Lichtverteilung in der Pupille, in der Regel inhomogen und stark von den kundenspezifischen Anwendungsfällen abhängig ist, wird die inhomogene Verteilung der applizierten EUV-Quellenleistung auf den Spiegelflächen berücksichtigt.
Um den Einfluss der inhomogenen EUV-Last auf die Spiegeloberflächen zu reduzieren wurden verschiedene Verfahren untersucht und aufgrund von umfangreichen experimentellen und simulatorischen Untersuchungen wurde der vielversprechendste Ansatz zur Reduzierung der durch die Spiegelheizung induzierten Aberrationen ausgewählt.
Für die Umsetzung des aktiven Steuermechanismus wurden detaillierte FEM-Simulationen durchgeführt, um die optimale Auslegung der entsprechenden Manipulatoren zu bestimmen, wobei auch die Ergebnisse des o.g. Simulationsmodells und der Einsatz einer geeigneten Sensorik berücksichtigt wurden.
Die einzelnen Manipulatoren wurden spezifiziert, konstruiert und es wurden umfangreiche Testroutinen implementiert, um die Funktion der Komponenten abzusichern. Entsprechende Versuchsmuster wurden gebaut und getestet.

2.1.3 Entwicklung von Systemen der Masken-Infrastruktur des 2nm Technologieknoten

In diesem Teilarbeitspaket war es das übergreifende Ziel, die Wiederholmessgenauigkeit um den Faktor ~2 gegenüber dem Stand der Technik der Maskenmetrologie zu verbessern. Die einzelnen dieser Aktivität am Projektende waren:

- die Entwicklung eines Demonstrators für das Registrierungs-Messverfahren für die Anforderungen an hNA-EUV-Masken (2-nm-Knoten)

- Demonstration der Wiederholbarkeit der Registrierungsmessung von 0,1 nm mit dem im Rahmen dieses Projekts erstellten Demonstrators

- die Entwicklung und Auswertung von Methoden und Algorithmen für hNA-Anwendungen, zum Beispiel Large Local Area Measurements und In-Die-Registration

Auf Basis der bestehenden PROVE neXT Plattform (Stand der Technik) wurden zahlreiche Verbesserungen umgesetzt. Als Ergebnis wurde für zwei Testfälle eine Wiederholbarkeit der Registrierungsmessung von unter 0,1 nm max3sigma mit einer Sicherheitsmarge von 10 % nachgewiesen. Im Hinblick auf Anwendungsfälle von Logik- und Speicherchipherstellern wurde die Anwendbarkeit von PROVE auf Registrierungsmessungen von 80x80um dichten Kontakten und krummlinigen In-Die-Strukturen entwickelt.
Der Entwicklungsstand bis Ende 2023 wurde auf der SPIE BACUS Conference 2023 veröffentlicht.

Die Demonstrationsplattform für das Registrierungs-Messsystem wurde erfolgreich aufgebaut und ihre Leistungsperformance nach der Feinabstimmung überprüft. Es wurde eine langfristige automatisierte Leistungsüberwachung mit hoher Empfindlichkeit entwickelt, um jede Beeinträchtigung durch Hochleistungsbetrieb zu überwachen. Seit dem 1. Quartal 2023 wird der Demonstrator kontinuierlich für F&E-Zwecke genutzt. Abbildung 8 unten zeigt die PROVE neXT-Plattform, die für den Demonstrator verwendet wird.

Abbildung 8: Aktuelles PROVE neXT Maskenmetrologietool

Der neu entwickelte Demonstrator selbst ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Maskenloadport-Schnittstelle ist in der Bildmitte sichtbar. Er befindet sich aktuell in der Reinraum-Produktionsumgebung der Carl Zeiss SMT am Standort Jena, um realistische Betriebsbedingungen im Maskenshop nachzuahmen: Nutzeraktivitäten, Geräuschumgebung sowie sofortige und tägliche Veränderungen in der Reinraumdruckumgebung, die alle einen Einfluss auf die Messgenauigkeit haben.

Abbildung 9: PROVE hNA-Demonstrator – aufgebaut und entwickelt im ID2PPAC-Projekt

Ein Zwischenergebnis zur Messwiederholbarkeit ist in Abbildung 10 dargestellt. Obwohl immer noch Korrekturen niedriger Ordnung auf das Registrierungsergebnis angewendet werden und mit einem Messkonzept mit niedrigem Durchsatz gearbeitet wurde, zeigten diese ersten Daten die Machbarkeit von unter 0,1 nm max3sigma globaler Wiederholbarkeit.

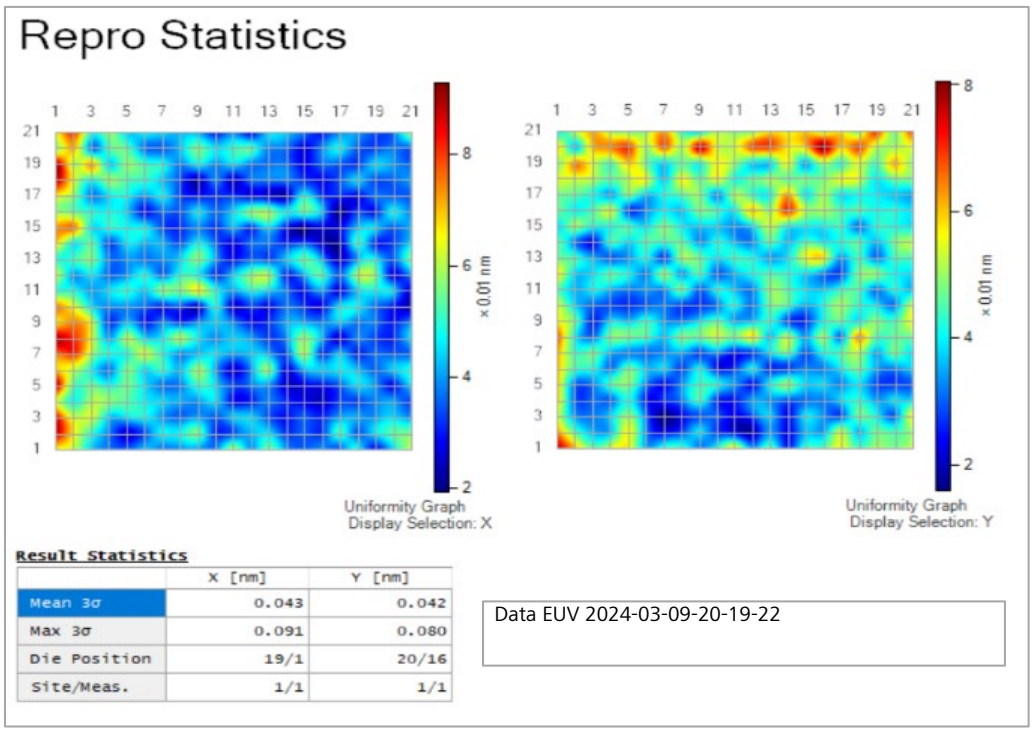

Abbildung 10: Zwischenergebnis der Leistungsperformance auf einer EUV-Maske

Nach erfolgreicher Umsetzung der finalen Verbesserungen des Demonstrators wurde das Ziel einer max-3-Sigma-Wiederholbarkeit unter 0,1 nm erreicht. Die Daten wurden in einer Standard-Abnahmemesskonfiguration unter Verwendung eines Standard-Registrierungs-Markers bei nominalem Durchsatz erfasst und mit einem Standard-Kundenprozess ausgewertet (akzeptable Korrekturen). Die erreichte Leistung ist reproduzierbar und entspricht mehr als einem Faktor von 2 der aktuell am Markt verfügbaren PROVE neXT-Plattformleistung (Stand der Technik). Die finale Messleistung ist in Abbildung 11 dargestellt.

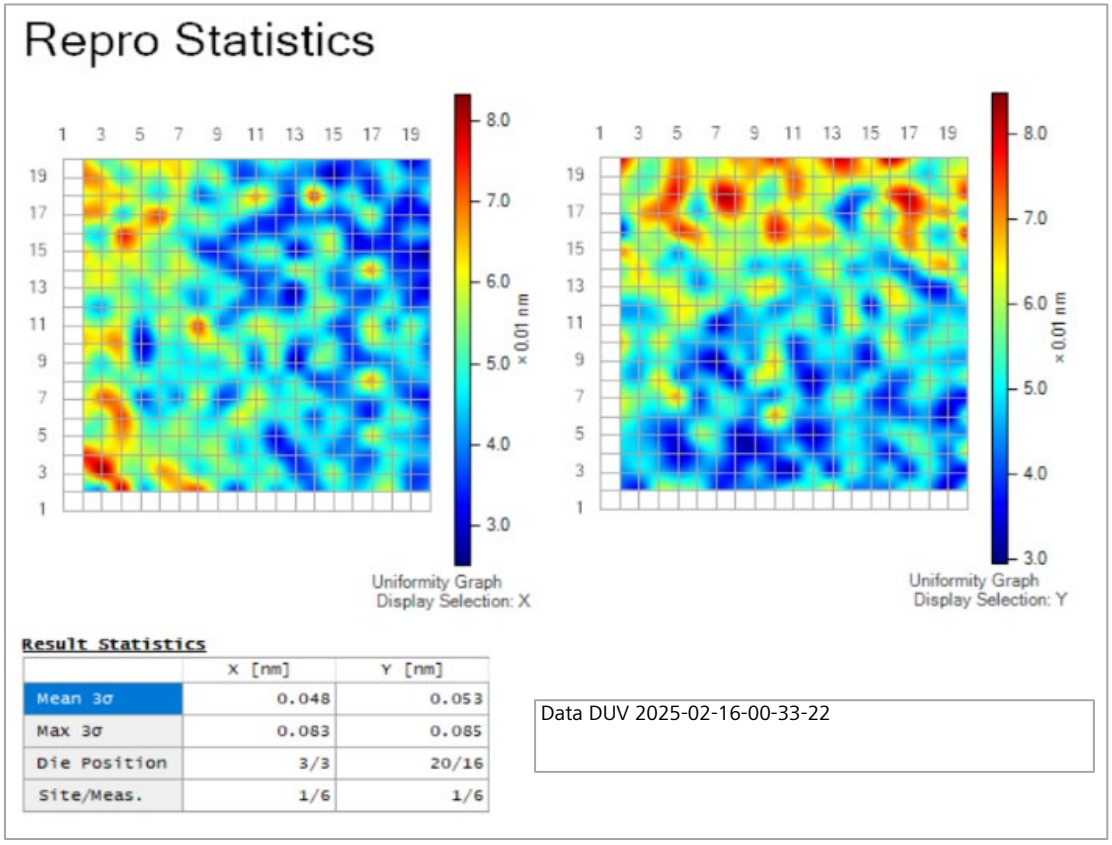

Abbildung 11: Endergebnis der Messung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sämtliche Projektziele in Hinblick auf Leistungsperformanz und Anwendung erreicht wurden. Die Erweiterungen der PROVE neXT-Plattform ist angesichts des Einsatzes und der Anforderungen von hNA EUV Masken ausreichend nachgewiesen worden. Wesentliche Ergebnisse, der nicht unter das geistige Eigentum fallen, wurden bereits veröffentlicht.

2.2. Vergleich zur ursprünglichen Vorhabensbeschreibung - Planung und Ablauf des Vorhabens

Im ursprünglichen Antrag des Vorhabens (ECSEL und nationaler Antrag) war eine Laufzeit von 36 Monaten vorgesehen. Dieser Zeitplan konnte nicht eingehalten werden und das Vorhaben wurden um fünf Monate verlängert. Alle Projektziele und Meilensteine wurden erreicht. Untenstehende Tabelle zeigt eine Übersicht über den Erfüllungsgrad der final abgestimmten Meilensteine:

MS Nr.	Meilenstein	Status	Projekt-monat*
1	hNA-Spiegelmetrologie qualifiziert und erfüllt Spezifikationen für alle Spiegeltypen	Erreicht	14
2	Herstellung eines ersten Spiegels mit Thermal-Manipulator	Erreicht	14
3	Evaluierung von Konzepten für EUV-Masken-Ebenheitsmessungen und Auswirkungen auf das Overlay	Erreicht	18
4	Fein-Korrekturverfahren für hNA-Spiegel qualifiziert	Erreicht	27
5	Daten der System-Messtechnik erreichen eine für den Start der Korrekturschleifen ausreichende Genauigkeit	Erreicht	36
6	Mask Positionsmessung Demonstrator-System fertig gestellt	Erreicht	30
7	Erstes hNA POB System qualifiziert	Erreicht	40

Tabelle 1: Übersicht Status Projektmeilensteine zum Projektende. Angegeben ist der Projektmonat, in dem der Meilenstein bzw. der Liefergegenstanderfüllt wurde.

2.3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises und Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 0813 Material- und 0837 Personalkosten. Die zum Projektabschluss nachgewiesenen Kosten lagen über den Plankosten. Die Mehrkosten sind dadurch begründet, dass im Verlauf des Vorhabens insbesondere viele technisch besonders herausfordernde Fragestellungen zu bearbeiten waren, die zum Beginn des Vorhabens nicht oder nur unvollständig absehbar waren.

2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Wirtschaftliche Verwertung

Die Verwertung der erzielten Projektergebnisse soll ab 2025 durch den zukünftigen Verkauf des 0.55 NA EUV-Projektionsobjektivs und des komplementären 0.55 NA EUV-Beleuchtungssystems an den Kunden und strategischen Partner ASML, sowie durch Verkäufe des Systems zur Maskenpositionsmessung an weltweite High-End Kunden, die in den 2nm Technologieknoten investieren. In einer Markt-basierten Umsatzsimulation, erwartet ASML[3] für 2030 jährliche Umsätze mit EUV-Ausrüstung (0.33NA und 0.55NA) im Bereich zwischen 22 und 32 Mrd.

[3] https://edge.sitecorecloud.io/asmlnetherlaaea-asmlcom-prd-5369/media/project/asmlcom/asml-com/asml/files/investors/investor-days/2024/07_business-model-and-capital-allocation-strategy---roger-dassen.pdf

Euro, was ca. 50% des Gesamtumsatzes ausmachen würde. Die in diesem Vorhaben für die EUV-Optiken von ZEISS erzielten Ergebnisse tragen wesentlich zu dieser Wertschöpfung bei.

Die Verwertung der erzielten Projektergebnisse im Bereich Maskenmetrologie soll frühestens ab der zweiten Jahreshälfte 2026 durch den Verkauf einer hNA spezifischen Toolgeneration erfolgen. Der Übergang der bereits auf dem Demonstrator gezeigten Leistungsfähigkeit in eine Hauptentwicklung und Serienproduktion läuft bereits an. Ziel von ZEISS ist es seinen aktuellen Marktanteil von 50-60% im Bereich Positionsmessung auf Fotomasken sowie die Technologieführerschaft weiter ausbauen zu können. Die zu erwartenden Systemverkäufe an High-End Kunden, die für den 2nm Technologieknoten investieren, liegen bei ca. 2-3 Systemen pro Jahr und entsprechen einem Umsatz von mehr als 30 Millionen Euro pro Jahr.

Anschlussfähigkeit

ZEISS erwartet weitere wissenschaftlich-technische Fragestellungen im Anschluss an dieses Vorhaben, die direkt auf die Ergebnisse aus ID2PPAC aufbauen werden. Es ist absehbar, dass solche Themen in zukünftigen Verbundprojekten im Rahmen „Chips Joint Undertaking“ durchgeführt werden, wenn dafür ausreichend Budgetmittel zur Verfügung stehen. Darüber hinaus erfordert die Bereitstellung der Herstellungskapazität für die EUV-Optiken weitere Investitionen in innovative Fertigungseinrichtungen, die Gegenstand weiterer Projekte im Rahmen des European Chips Act sein können.

Fortschritt bei anderen Stellen

ZEISS beobachtet und bewertet kontinuierlich mögliche Alternativ-Technologien, inkl. die Nano-Imprint-Lithographie, bezüglich Ihrer Bedeutung für die zukünftige Halbleiterfertigung. Diese Analyse zeigt gegenwärtig keine Technologie mit ausreichender Reife, die die Rolle der Lithographie und insbesondere der EUV-Lithographie für die Herstellung von Logik- und Speicherbausteinen in absehbarer Zukunft wesentlich einträchtigen würde.