scia Systems GmbH | Annaberger Straße 240 | 09125 Chemnitz | Germany

# Abschlußbericht

**Vorhabenbezeichnung**

Teilvorhaben scia Systems GmbH, Chemnitz:
„Prozess- und Anlagentechnik für die Herstellung adaptiver Optiken für die 3 nm Halbleitertechnologie“

im Rahmen des Gesamtvorhabens
„Pilot-Integration für die 3 nm-Halbleiter-Technologie “

**Förderkennzeichnen:** 16ESE0384S

**Laufzeit:** 1.10.2019 – 30.4.2023

**Berichtszeitraum:** 1.10.2019 – 30.4.2023

**Kontakt:** Matthias Nestler
m.nestler@scia-systems.com, +49 371 33561 239
scia Systems GmbH, Clemens-Winkler-Str. 6c, 09116 Chemnitz

**Berichtersteller:** Patrick Bergmann
p.bergmann@scia-systems.com, +49 371 33561 252

# Inhalt


**1. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse ..... 3**

**AP1 Anforderungsanalyse in Abstimmung mit den Projektpartner Zeiss und FEP ..... 3**

**AP2 Vergleich vorhandener Anlagenkonzepte zur Beschichtung großer Substrate ..... 4**

**AP3 Bewertung der Konzepte auf Eignung für die Beschichtung ..... 9**

**AP4 Erarbeitung eines neuen Anlagenkonzeptes aufgrund des gewählten Layouts ..... 11**

**AP5 Erarbeitung des Sicherheitskonzepts ..... 16**

**AP6 3D-Modellierung der Prozessanordnung und des Kammerlayouts ..... 16**

**AP7 3D-Modellierung einer Substrataufnahme für das gewählte Konzept ..... 16**

**AP8 3D-Modellierung der Beschichtungsquellen ..... 16**

**AP9 3D-Modellierung der Substratbeladung und Manipulation während der Be-schichtung ..... 17**

**AP10 Konstruktionsverteidigung (CDR) im Konsortium ..... 17**

**AP11 Anpassung der Konstruktion nach den Ergebnissen des CDR ..... 17**

**AP12 Erstellung der Medienpläne ..... 17**

**AP13 Erstellung der Elektropläne ..... 18**

**AP14 Erstellung der Sicherheitsdokumentation ..... 18**

**AP15 Entwurf Beschichtungsanlage für große Substrate ..... 18**

**AP16 Anforderungsanalyse für die Beschichtung des Funktionsmodells ..... 18**

**AP17 Konstruktion eines Substrathalters für eine vorhandene Anlage scia Magna 200 für die Aufnahme des Funktionsmodells ..... 19**

**AP18 Fertigung des Substrathalters und Funktionstests ..... 20**

**AP19 Integration des Substrathalters in die vorhandene scia Magna 200 Anlage ..... 21**

**AP20 Beschichtungstests mit Planarkathoden, Messung und Bewertung ..... 22**

**AP21 Beschichtungstests mit DRM400, Messung und Bewertung ..... 22**

**AP22 Beschichtung des von Zeiss bereitgestellten Funktionsmodells ..... 22**

**AP23 Bewertung des Funktionsmodells, Rückführung in Anlagendesign, Darstellung der Projektergebnisse ..... 22**

**2. Vergleich des Vorhabenstands mit der Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung..** Fehler! Textmarke nicht definiert.

**3. Aussichten für Erreichen der Ziele des Vorhabens .....** Fehler! Textmarke nicht definiert.

**4. F&E Ergebnisse von dritter Seite .....** Fehler! Textmarke nicht definiert.

**5. Änderung der Zielsetzung .....** Fehler! Textmarke nicht definiert.

6. **Fortschreibung des Verwertungsplans** ..... Fehler! Textmarke nicht definiert.

# Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

## AP1 Anforderungsanalyse in Abstimmung mit den Projektpartner Zeiss und FEP

### Zeitraum 1.10.2019 – 28.4.2020

Im Rahmen der Abstimmungen mit den Projektpartner Zeiss und FEP wurde die untenstehende Tabelle seitens Zeiss generiert, welche die Anforderungen zusammenfasst. Der Verfahrweg (Amplitude der Auslenkung) ist ein Wert, welcher direkt Rückschlüsse auf das Material und die notwendige Schichtdicke zulässt. Die Notwendigkeit eines hohen piezoelektrischen Koeffizienten wird daraus generiert.

| Anforderungen | Zielwerte |
|---|---|
| Verfahrweg (PV)<br>d33 | 8-10nm, perspektivisch 10-15nm<br>200-250 pm/V ( entspr. 8nm @ 40V)<br>inkl. ausreichender Durchbruchfeldstärke |
| Einstellgenauigkeit | 20pm bis 5nm, 3% ab 5nm<br>Lastfallabhängig |
| Schichtdicke | <10µm, besser < 5µm |
| Variation d33 über Radius | < 10% (tbc) |
| Substratmaterial | ULE |
| Hysterese | 1-2%, alle Settings |
| Wunsch: Niedrige Spannung | <100V |
| Schaltgeschwindigkeit | Schnell (20ms), scanning möglich |

Für die Konzeption der Anlage bedeutet dies, dass Materialien mit möglichst hohem Piezokoeffizienten abgeschieden werden müssen. Das FEP generiert dazu eine Potentialanalyse, die zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vorliegt.

### Zeitraum 29.4.2020 – 21.6.2021

Im Rahmen der Potentialanalyse des Partners Fraunhofer FEP haben sich das piezoelektrische Material PZT als auch Sc-dotiertes AlN als Favoriten abgezeichnet. Insbesondere PZT besitzt einen besonders hohen Piezokoeffizienten, was die Hübe der Spiegeloberfläche maximiert. In der Tabelle unten sind Anforderungen an die Abscheidung beider Materialien dargestellt, welche im Rahmen eines Anlagendesigns erreicht werden müssen. Hierbei ist die Temperatur am kritischsten, da bei der großen Substratfläche entsprechende Wärmeleistung vorgehalten werden muss. Zusätzlich ist eine Erwärmung von Substrathalterung und anderen anfälligen Komponenten zu vermeiden, was bei den großen Schichtdicken und damit langen Prozesszeiten für hohen Temperaturen eine große Herausforderung darstellt.

| Parameter | PZT | ScAlN |
|---|---|---|
| Abscheidetemperatur | >= 500 °C | 300°C |
| Target | Mischtarget | Mischtarget |
| Saatschicht | Ja | Ja |

Beide Materialien benötigen ein Mischtarget, welches das Handling des Prozesses massiv vereinfacht. Die Herausforderung liegt dabei im Bezug eines qualitativ hochwertigen Targets. Die Saatschicht für beide Materialien erhöht die Kristallqualität und damit die piezoelektrischen Eigenschaften. Die genutzt Platinschicht benötigt eine Prozesswärme von circa 300 °C.

**Zeitraum 22.6.2021 – 30.4.2022**

Im Rahmen von Sc-dotierten AlN-Beschichtungen des Fraunhofer FEP wurden die piezoelektrischen Eigenschaften seitens Zeiss anhand eines Testaufbaus untersucht. Hierbei zeigte sich, dass die Auslenkung quer zur z-Richtung nicht den gewünschten Erwartungen entspricht. Es würden sich nicht beherrschbare ungewünschte Verformungen ergeben. Mit diesen Ergebnissen wurde das gewählte Schichtmaterial ScAlN als nicht geeignet deklariert.

In Folge dessen kam ein erneutes Material-Screening am Fraunhofer FEP zu dem Ziel, dass Zr-dotiertes $BaTiO_3$ eine vielversprechende Alternative ist. In weiterführenden Gesprächen wurde für das neue Schichtmaterial ein Lastenheft mit Anforderungen an eine Beschichtungsanlage erstellt und ist aktuell seitens scia Systems in Prüfung.

**Zeitraum 30.4.2022 – 30.4.2023**

Das vom Fraunhofer FEP erstellte Lastenheft mit Anforderungen an eine Beschichtungsanlage wurde seitens scia Systems ausführlich geprüft. Die aufgeführten Anforderungen sind im Allgemeinen umsetzbar, stellen zum Teil aber auch eine Herausforderung dar. Hauptsächlich der Einsatz sehr hoher Temperaturen während des Beschichtungsprozesses erweist sich als herausfordernd. Nähere Informationen dazu können aus der Beschreibung späterer Arbeitspakete entnommen werden.

## AP2 Vergleich vorhandener Anlagenkonzepte zur Beschichtung großer Substrate

**Zeitraum 1.10.2019 – 28.4.2020**

Zur Beschichtung von EUV Optiken gibt es bei scia Systems zwei vorhandene Anlagenkonzepte:

Konzept 1: In Abbildung 1 ist das Konzept mit rotierendem Arm dargestellt, welcher das Substrat über die konzentrisch angeordneten Magnetronpositionen führt. Das Substrat dreht sich zusätzlich, um eine homogene Beschichtung zu erreichen. Bei Einfahrt in das Magnetron wird die Rotation des Armes verlangsamt und bei Überfahrt entsprechend beschleunigt, um

eine optimale Beschichtungsverteilung zu erreichen. Die Nutzung des Arms hat bezüglich mechanischer Steifigkeit Limitierungen, die bei 1,5 m Substraten mit bis zu 1,5 t Gewicht überschritten werden. Das Konzept kann daher nicht verwendet werden.

Konzept 2: In Abbildung 2 ist das Konzept mit Linearbewegung des rotierenden Substrates dargestellt. Durch die im Vergleich zum Konzept 1 bessere mechanische Steifigkeit bedingt durch die Linearbewegung, können Substrate mit der geforderten Größe und Gewicht sicher und präzise transportiert werden.

Aus dem Vergleich der beiden Anlagenkonzept ergibt sich das größte Potential für Konzept 2. Zusätzliche Vorteile sind:

- Modularität des Aufbaus
- Optimaler Footprint der Anlage im Grauraum/Reinraum
- Vorhandene Erfahrungen bei der geforderten Substratgröße im Rahmen der scia Multi 1500, die als Grundlage für die Studie genutzt werden wird

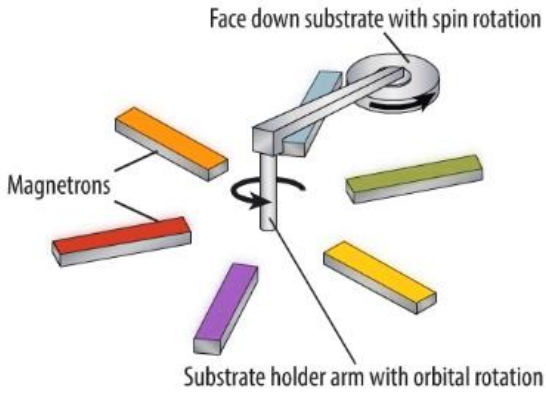


*Abbildung 1: Konzept 1 mit rotierendem Arm, welcher das rotierende Substrat über die Magnetronpositionen führt.*

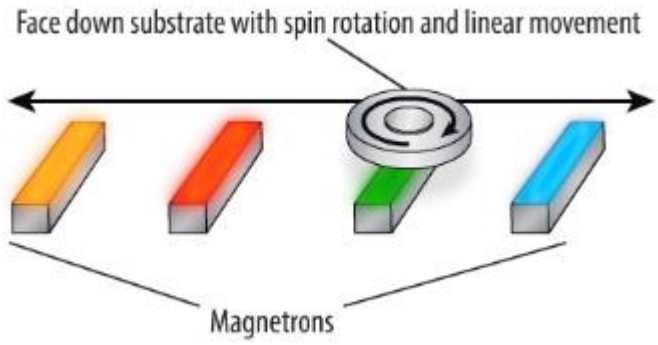


*Abbildung 2: Konzept 2 mit Linearbewegung des rotierenden Substrates über die Magnetronpositionen.*

**Zeitraum 29.4.2020 – 21.6.2021**

Im Rahmen der Substratspezifikation seitens Zeiss SMT zeigt sich, dass die Spiegelkrümmung ein kritischer Faktor ist. Konzept 1 und 2 gehen von einem Prozess aus, der nicht auf eine Änderung des Sputtertarget-Substrat-Abstands reagiert, welcher bei der Überfahrt des gekrümmten Spiegels über ein planes Magnetron entsteht. Dies ist für metallische Schichten eine Annahme, welche sich in der Praxis bestätigt hat. Für die betrachteten Materialien PZT und ScAlN kann diese Annahme nicht pauschal getroffen werden, da mit der Abstandsänderung diverse Kenngrößen wie z.B. Energieeintrag auf das Substrat geändert werden. Am Fraunhofer FEP sollen dazu Anhiebsversuche zur Abschätzung des Einflusses durchgeführt werden.

Konzept 3. Zur Kompensation der Substratkrümmung und zum Erhalten des Abstands der Beschichtungsquelle zum Substrat kann ein Magnetron auf ein sich bewegendes Achsensystem gesetzt werden. Im Rahmen von Krümmungskorrekturen wurde dies mit einer Ionenstrahlquelle bereits erfolgreich durchgeführt.

Im Detail wird ein Magnetron auf ein Achsensystem mit Kipp- und Linearbewegung montiert, wobei Schleppketten die Medienführung übernehmen. Dies ist in Abbildung 3 dargestellt. Das Substrat rotiert, wodurch bei konstanter Magnetronposition ein Ringausschnitt des Substrats beschichtet wird. Mittels Optimierung der Magnetronstellung kann rechnerisch eine sehr gute Homogenität erreicht werden, wobei der kritische Abstand zum Substrat konstant gehalten wird.

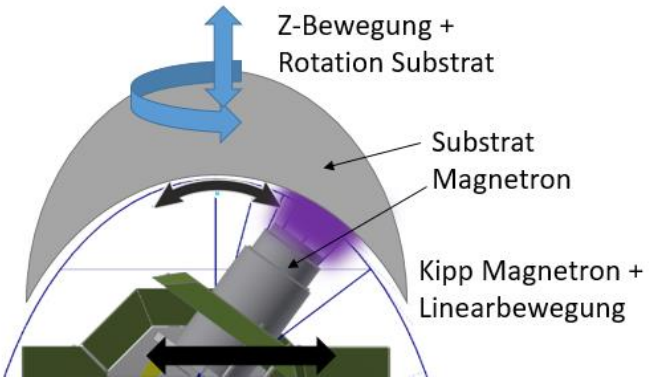


Abbildung 3: Konzept 3 mit bewegtem Magnetron, welches der Substratgeometrie folgt.

Die Größe des Magnetrontargets bestimmt bei konstanter Substratkrümmung die Abweichung des Abstands zum Substrat. Dies ist in Abbildung 4 gezeigt: Der Radius des Targets hat zur Folge, dass durch die Spiegelkrümmung der Abstand Targetrand-zu-Substrat kleiner ist als Targetmitte-zu-Substrat. Für kleine Radien bis 62,5 mm (entspricht 5“ Target), ist die Abweichung < 10%. Je weiter der Abstand zum Substrat (TSD), desto geringer ist die Abweichung, wobei Energieeintrag während der Beschichtung darunter leidet. Wie weit hier

Kompromisse möglich sind, werden im Rahmen der Sputterabstandsvariationen am Fraunhofer FEP geprüft.

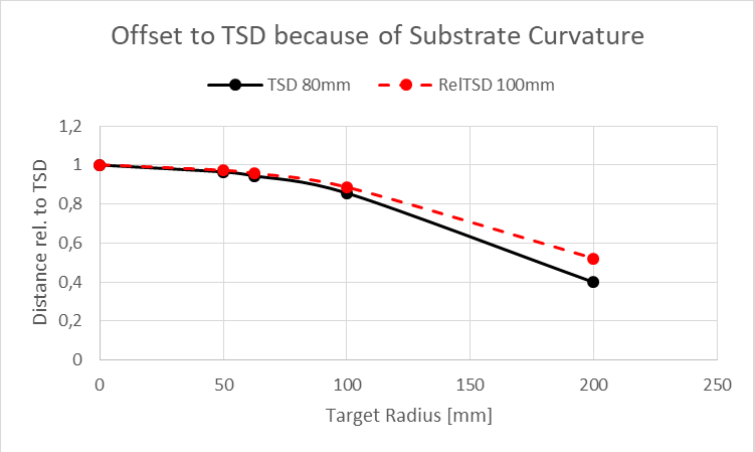


Abbildung 4: Abweichung des inneren Target-Substrat-Abstands vom äußern Abstand am Targetrand für verschiedene Targetradien und Abstände.

Konzept 3 eignet sich zur Kompensation von Spiegelkrümmung, falls der Prozess unbedingt einen konstanten Abstand zum Substrat benötigt, damit entsprechende Schichteigenschaften realisiert werden können. Nachteil ist allerdings, dass das kleine Target eine entsprechend geringe Rate auf dem großen Spiegel zur Folge hat, was die Prozesszeiten deutlich erhöht. Entsprechend ist Vakuumniveau hier von besonderer Bedeutung, sowie Heizkonzept und Prozessstabilität.

Bei manuellem Einlegen des Substrates können zusätzliche Funktionen für eine funktionelle Substrathalterung mit z.B. integriertem Heizer ermöglicht werden. Wichtig ist hierbei, dass eine Vorreinigungsfunktion des Substrates ermöglicht wird, welche der Ausgangspunkt für die ScAlN Schicht darstellt.

**Zeitraum 22.6.2021 – 30.4.2022**

Aufgrund der Auswahl eines alternativen Beschichtungsmaterials wird ein neues Anlagenkonzept benötigt. Das bisher gewählte Konzept 3 basiert auf der Nutzung eines einzelnen ScAl-Mischtargets. Für das neue Material sind mind. 2 Targets (Zr-Target und $BaTiO_3$-Target) notwendig. Den Erfahrungen des Projektpartners FEP zufolge wäre ein 3. Target (z. B. $BaO_2$) zur Einstellung der Stöchiometrie der Schichten sinnvoll.

Konzept 4. Es ist nicht möglich, Konzept 3 mit mehreren Sputterstationen (einzelne Magnetrons) zu verwenden, da dadurch Multilagen anstatt von Mischschichten entstehen würden. Stattdessen muss die Beschichtung mit den 3 Magnetrons simultan erfolgen.

scia Systems hat bereits Anlagen (scia Magna 200) an Kunden in Industrie und Forschung verkauft, welche die Simultanabscheidung mit mehreren Magnetrons in einer konfokalen Anordnung nutzen (siehe Abbildung 5). Dieser Anlagentyp ist auf ebene Si-Wafer-Substrate ausgelegt und kann nicht 1:1 übernommen werden. Aktuell wird seitens scia Systems geprüft, inwieweit die bestehende konfokale Anordnung für die Beschichtung gekrümmter Spiegel genutzt werden kann und als Erweiterung des Konzeptes 3 integriert werden kann.

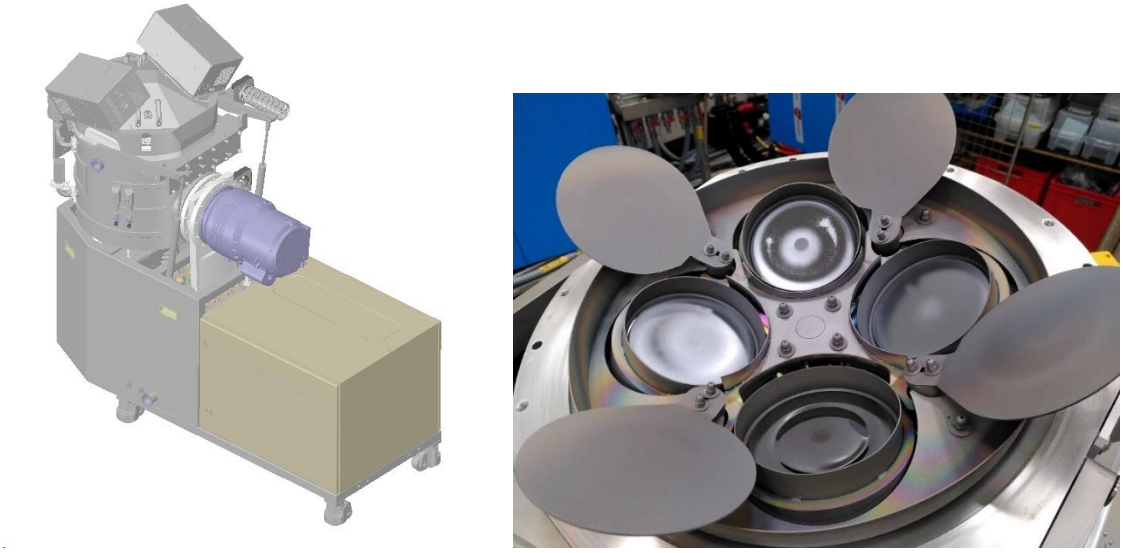

Abbildung 5: links: scia Magna 200 zur konfokalen Co-Abscheidung auf Wafer-Substrate. rechts: Geöffneter Kammerdeckel der scia Magna 200 mit 4 Magnetrons und ihren Blenden

**Zeitraum 30.4.2022 – 30.4.2023**

Die konfokale Anordnung mehrerer Sputtermagnetrons wurde in diesem Berichtszeitraum weiter optimiert und für die Beschichtung gekrümmter Substrate ausgelegt. Wie bereits erläutert, soll mit dieser Anordnung ein nahezu konstanter Target-Substrat-Abstand gewährleistet werden. Die Zielvorgabe dafür geht aus dem Lastenheft hervor, welches durch das Fraunhofer FEP erstellt wurde und liegt bei 100-120 mm.

Zusammen mit den Projektpartnern wurden verschiedene Designvarianten (bspw. mit integrierter Plasmamesstechnik) vorgestellt und diskutiert. Aus rein geometrischer Sicht erfüllt allerdings nur eine einzige Anordnung die Anforderung an den Target-Substrat-Abstand (siehe Abbildung 6). Wie in der Darstellung zu sehen ist gibt es nur einen definierten Bereich, in welchem sich die Plasmaverteilungen aller Quellen überlagern. Die anderen Bereiche müssten weiterhin über geeignete Blenden abgeschattet werden, um eine Beschichtung mit homogenen Schichteigenschaften zu gewährleisten.

Unter Verwendung dieser Sputteranordnung und der Vorgabe einer Schichtdicke durch das Lastenheft des Fraunhofer FEP wurde eine Prozessdauer abgeschätzt. Mit >40h stellt diese weitere Anforderungen an die Anlagentechnik. Vakuumkondition, Temperatur, Sputterleistung, etc. müssen über die gesamte Prozesszeit hinweg konstant gehalten werden.

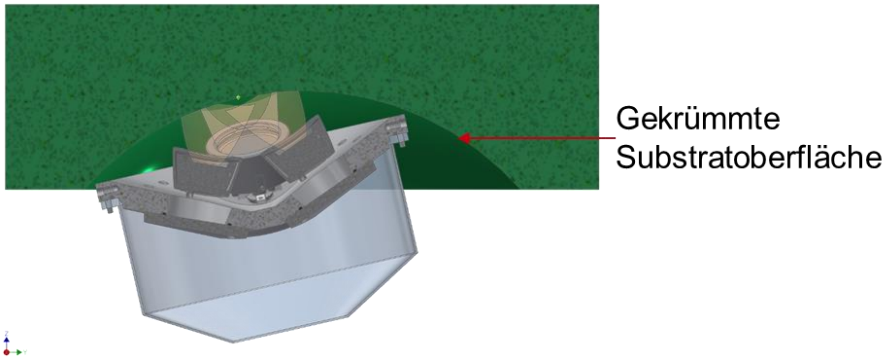


Abbildung 6: Konfokale Magnetronanordnung zur Beschichtung gekrümmter Substratoberflächen

Für die industrielle Anwendung dieser piezoelektrischen Schicht sind weitere Beschichtungen ohne Vakuumbruch zu realisieren. Dies betrifft bspw. Schichten für Elektroden oder als Haftvermittlung. Dazu ist eine Auslegung der Anlage mit mehreren Beschichtungsstationen denkbar. Für die metallischen Elektrodenschichten kann das Konzept wie in Abbildung 3 mit einem einzelnen Magnetron zum Einsatz kommen. Die piezoelektrische Beschichtung wird anschließend in der selben Prozesskammer mit der Magnetronanordnung aus Abbildung 6 durchgeführt.

## AP3 Bewertung der Konzepte auf Eignung für die Beschichtung

**Zeitraum 1.10.2019 – 28.4.2020**

Wie in AP2 dargestellt, ist Konzept 2 für die Beschichtungen besser geeignet. Folgende Gründe liegen vor:

- Modularität erlaubt beliebiges Aneinandersetzen von Beschichtungskammern, welche z.B. für die Trennung von Vorbehandlung, Seedschichten, Piezoschichten und Nachbehandlung benötigt werden
- Diese Trennung wird auch zum sicheren Handling von PZT benötigt, wobei dies genauer in der Sicherheitsbetrachtung geklärt werden wird
- Das bestehende Handlingsystem ist für 1,5 m Optiken mit 1 t Gesamtgewicht ausgelegt und erfolgreich in Betrieb
- Die Kammern bieten genug Platz zur Einbringung von Magnetrons, Heizern etc.

**Zeitraum 29.4.2020 – 21.6.2021**

Durch die Krümmung des Spiegels kann die abgeschiedene Schicht potentiell schlechte Eigenschaften aufweisen, wie in AP2 Konzept 3 dargestellt wird. Falls sich dies in Aniebsversuchen am FhG FEP bestätigt, kann Konzept 3 notwendig werden. Vorteile sind:

- Kompensation der Substratkrümmung, um einen homogenen Beschichtungsabstand zu erreichen
- Manuelles Einlegen des Substrates und Realisierung eines anliegenden Heizers auf Rückseite

**Zeitraum 22.6.2021 – 30.4.2022**

Wie in AP2 beschrieben wurde, sind Konzept 1 und 2 nicht geeignet, da potentiell Schichten mit schlechten Eigenschaften bzw. schlechter Homogenität der Eigenschaften abgeschieden werden. Konzept 3 ist vom Grundprinzip her denkbar; hier werden allerdings 3 (anstatt einem) Magnetron zur Co-Abscheidung benötigt. Es wird aktuell untersucht, inwieweit das konfokale Konzept der scia Magna 200 auf diese Anwendung übertragen werden kann. Kritische Punkte sind hierbei:

- Geometrische Limits (Konzept 4 bedarf mehr Platz aufgrund der Verwendung von 3 Magnetrons (anstatt 1 Magnetron in Konzept 3)
- Konfokale Anordnung hat definierten Bereich, in dem die Plasmaverteilungen aller Magnetrons überlappen. Dieser muss bestmöglich ausgelegt werden. Randbereiche sind durch bspw. Blenden zu schützen.
- Im Gegensatz zur Beschichtung mit ScAlN ist für das neue Material Zr-$BaTiO_3$ eine Prozesstemperatur von ~700°C notwendig. Eine entsprechende Aufheizung der relevanten Komponenten (Substrate) bei gleichzeitiger Kühlung aller anderen Komponenten (Motoren, Kammer, Magnetron) muss realisiert werden.

**Zeitraum 30.4.2022 – 30.4.2023**

Eine prinzipielle Eignung des Konzept 3 wurde in AP2 erläutert. Die geometrischen Bedingungen für den Einsatz einer konfokalen Sputteranordnung wurden geprüft. Durch einige Abänderungen von bestehenden Anlagenkonzepten können die Vorgaben aus dem Lastenheft vom Fraunhofer FEP erfüllt werden – dies betrifft insbesondere den Target-Substrat-Abstand. Auf den notwendigen Einsatz von Blenden wurde oben bereits hingewiesen.

## AP4 Erarbeitung eines neuen Anlagenkonzeptes aufgrund des gewählten Layouts

**Zeitraum 1.10.2019 – 28.4.2020**

Als Grundlage wird die erfolgreich am Markt eingesetzte scia Multi 1500 genutzt, welche ein modulares Konzept besitzt. Eine CAD Zeichnung ist in Abbildung 7 dargestellt. Über eine Auswuchtstation wird eine sichere Substratrotation bis 3 Hz sichergestellt. Die Vorreinigung ist bisher nur als Dummy vorgesehen und kann in der Studie entsprechend mit den benötigten Komponenten befüllt werden. Das Beschichtungsmodul ist für mit je einer Leerkammer umgeben, um eine komplette Überfahrt des Spiegels zu ermöglichen. Die Magnetronintegration ist in Abbildung 8 dargestellt. Das bisherige Konzept sieht einen absenkbaren Grundflansch vor, welcher auf einem Servicewagen unter der Anlage hervorgefahren werden kann.  Damit ist eine optimale Targetzugänglichkeit möglich. Die Magnetrons werden im Rahmen der Anforderungen durch entsprechend besser geeignete Quellen ersetzt werden müssen.

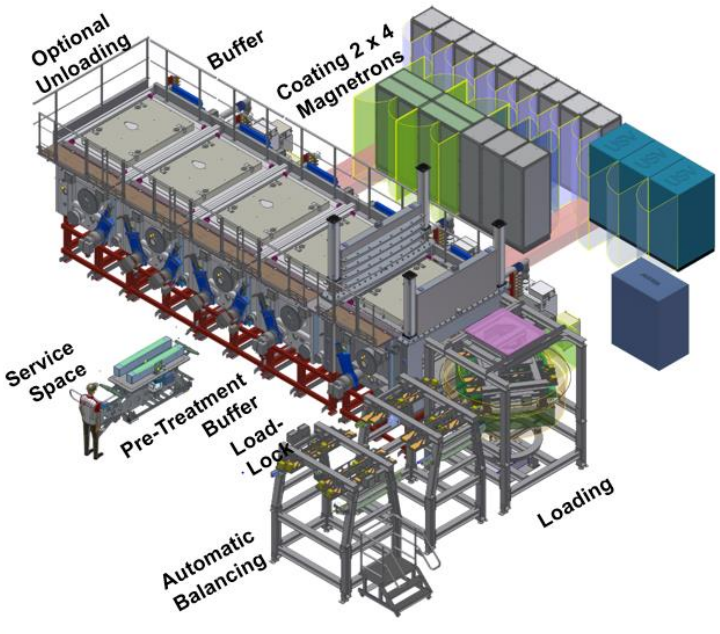


*Abbildung 7: CAD Ansicht der scia Multi 1500 mit Beschriftung der Stationen.*

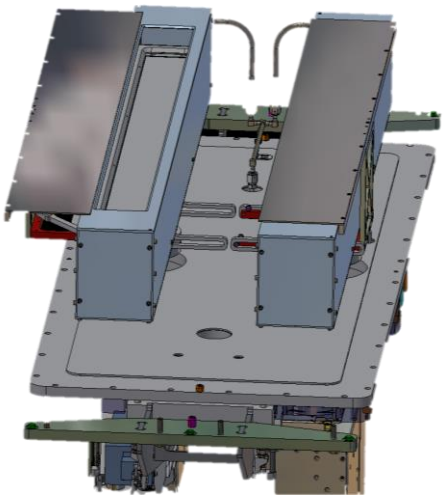

*Abbildung 8: Magnetronintegration der scia Multi 1500.*

Die Abscheidung von Aluminiumnitrid oder PZT erfordern die Technologie des reaktiven Magnetronsputterns, d.h. die Abscheidung des genannten Materials unter Nutzung von Reaktivgas, in diesem Fall Stickstoff oder Sauerstoff.

Im Falle von PZT muss entschieden werden, ob die Materialien von Einzeltargets gesputtert werden, Zr, Ti, Pb oder vom Verbundtarget PZT. Beides hat Vor- und Nachteile (siehe Abbildung ). Beim Partner TUD wird der Ansatz der Einzeltargets verfolgt. Die Nutzung von Verbundtargets muss eruiert werden, um eine Abschätzung zur Machbarkeit abzugeben. Dies hat direkten Einfluss auf das Sputterarrangement und damit auch auf das Design des Sputtermoduls der Anlage.

| | Einzeltarget | Verbundtarget |
|---|---|---|
| Pro | • Targetverfügbarkeit bis 1,5 m vorhanden<br>• Möglichkeit Stöchiometrie einzustellen | • Geringe Prozesskomplexität → gut für Produktion<br>• Geringere Prozesszeit (weniger Verfahrweg) |
| Kontra | • Prozessführung mit Überfahrt<br>• Prozesszeit durch Verfahrweg<br>• Komplexität hoch: Targetabnutzung, Ratedrift, …) | • Prinzipiell Beweis der Machbarkeit notwendig<br>• Targetverfügbarkeit und Targetqualität kritisch |

*Abbildung 9: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile bei Nutzung von Einzel- und Verbundtarget zur Abscheidung von PZT.*

Ein weiterer Aspekt ist das gepulste, reaktive Magnetronsputtern, welches insbesondere für Aluminiumnitrid verbesserte Schichteigenschaften und hohe Raten liefert. In diesem Rahmen kann bipolar gepulste DC eingesetzt werden, welche zwei Magnetrons nutzt, die elektrisch miteinander verschalten sind. Vorteil sind eine hohe Langzeitstabilität, ein hohes Ionenbombardement der Substratoberfläche und damit ein optimales Schichtwachstum. Ein solches Arrangement ist in Abbildung 10 dargestellt. Dieses muss geometrisch so ausgerichtet werden, um eine optimale Homogenität mit den Bewegungsprofilen der Substratbewegung zu erreichen.

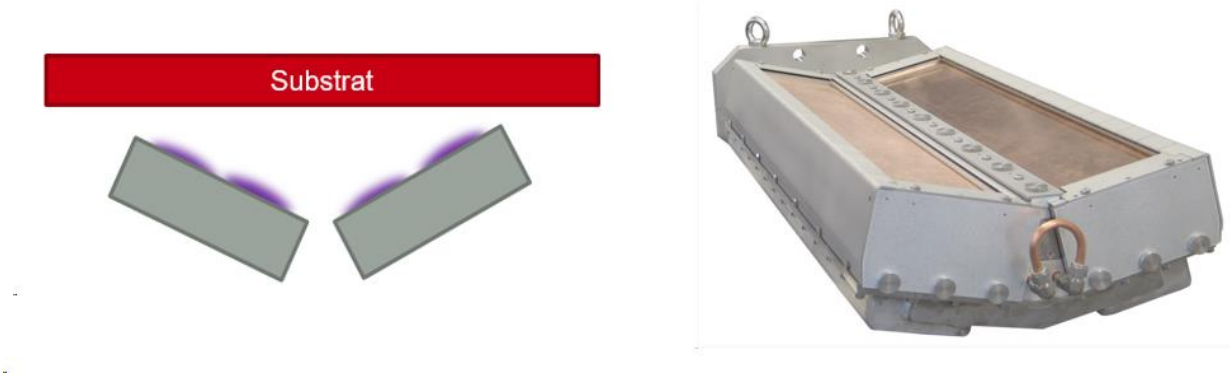


*Abbildung 10: Magnetronarrangement zur Nutzung von bipolar gepulstem, reaktivem Magnetronsputtern. Links ist eine Prinzipskizze dargestellt, rechts eine Umsetzung.*

Zusätzlich erfordert insbesondere PZT eine hohe Substrattemperatur, optimaler Weise während der Beschichtung. Durch die Rotation und Bewegung des Substrates ist eine Heizung am Substrat nur durch Schleifringe und Schleppketten integrierbar. Beides sind Komponenten, welche die Komplexität und Ausfallwahrscheinlichkeit erhöhen. Eine Heizung auf Magnetronseite, wie in Abbildung 11 dargestellt, kann statisch integriert werden. Die sich ergebende Substrattemperatur besitzt dann allerdings eine komplexe Dynamik, welche untersucht werden muss. Für Materialien, welche eine geringe Temperatur benötigen, ist dieses Konzept ausreichend. Für die für PZT geforderten ~ 500 °C Abscheidetemperatur muss das Konzept geprüft werden.

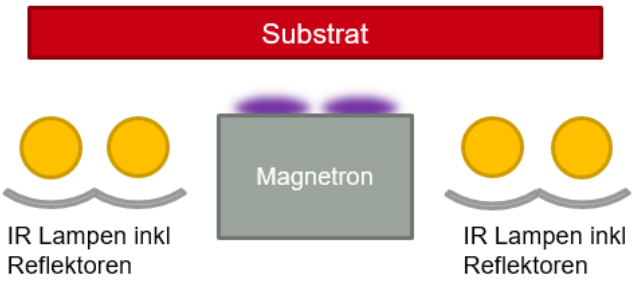


*Abbildung 11: Konzept der Substratheizung während der Abscheidung mit IR Lampen auf Seite des Magnetrons.*

Im Rahmen des Meilensteins „Concept Study Outline“ werden die Betrachtungen zur Anlage zusammengefasst und Aktionen definiert, die zur Detailgestaltung der Anlage notwendig sind.

**Zeitraum 29.4.2020 – 21.6.2021**

Die Einschätzung potentieller Risiken bei Abscheidung von PZT und ScAlN auf gekrümmten Spiegeln, hat potentiell ein neues Layout zur Folge. Da noch nicht alle Rahmenbedingungen von Vorabtests zur Verfügung stehen, kann dieser Punkt noch nicht weiter bearbeitet werden.

Zusätzlich sind Infrarottests mit ULE Substraten beauftragt, welche als Ziel haben, eine geeignete Wellenlänge zum Heizen der Substrate zu finden und eine Heizerauslegung zu definieren.

**Zeitraum 22.6.2021 – 30.4.2022**

Da im Rahmen des Projektes auf ein neues Materialsystem zur Beschichtung umgestiegen wurde, ist eine Neuauslegung der bisherigen Konzepte notwendig. Die Rahmenbedingungen wurden in AP2 und AP3 beschrieben. Ein entsprechendes Lastenheft wurde in Zusammenarbeit mit Zeiss und Fraunhofer FEP erstellt und wird aktuell auf Machbarkeit geprüft.

**Zeitraum 30.4.2022 – 30.4.2023**

Wie bereits in vorherigen Arbeitspaketen angedeutet wurde, stellt die Substrattemperatur während des Beschichtungsprozesses gewisse Herausforderungen dar. Zur Untersuchung der prinzipiellen Machbarkeit und Temperaturhomogenität wurden Testversuche und Simulationen durchgeführt.

Die Testversuche wurden an einem ULE Testsubstrat gemacht. Dieses hat eine deutlich geringere Größe aber die gleichen physikalischen Eigenschaften. In einem Testaufbau in einer Vakuumkammer (siehe Abbildung 12) wurde das Substrat mittels Infrarot-Heizstrahlern aufgeheizt. Es zeigte sich, dass die Substrate mit der verwendeten Wellenlänge auf die Zieltemperatur von >700°C aufgeheizt werden können. Weiterhin kann von den Versuchen eine Abschätzung über die notwendige Heizleistung für das finale ULE Substrate getroffen werden. Diese beläuft sich auf >200kW. Diese Abschätzung geht aber davon aus, dass jegliche vom Substrat emittierte Strahlung verloren geht. Bspw. durch den Einsatz von Spiegelblechen besteht hier noch Optimierungspotential.

Abbildung 12: Heizversuche mit ULE Testsubstrat; Links: Befestigung von Thermoelementen am Substrat; Rechts: Versuchsaufbau in Vakuumkammer

Die Versuche mit dem ULE Testsubstrat wurden anschließend erneut durchgeführt, nachdem der Partner Fraunhofer FEP eine geeignete Elektrodenbeschichtung aufgebracht hat. Diese würde auch im finalen Anwendungsfall zum Einsatz kommen und stellt somit einen praxisnahen Versuch dar. Die Haftung der Beschichtung auf dem Testsubstrat versagte allerdings im Rahmen des Versuches.

Nach einer Prozessoptimierung für die Beschichtung des Testsubstrates durch das Fraunhofer FEP, sowie eine Optimierung des Heizregimes durch definierte Aufheizrampen konnte die Zieltemperatur auch ohne Schichtversagen erreicht werden.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde ein Heizsystem ausgelegt, welches aus linearen Heizstrahlern an Mantelfläche und Rückseite des ULE Substrates besteht (siehe Abbildung 13). Weiterhin wurden auf Grundlage der Heizversuche am Testsubstrat und dem Heizsystem Simulationen seitens Fraunhofer FEP durchgeführt. Ziel dieser Simulationen sind Ergebnisse über die Homogenität der Temperatur auf der Seite des Substrates, auf welcher die Beschichtung stattfindet. Aus diesen geht hervor, dass die Anforderungen an die Anlagentechnik damit bedient werden können.

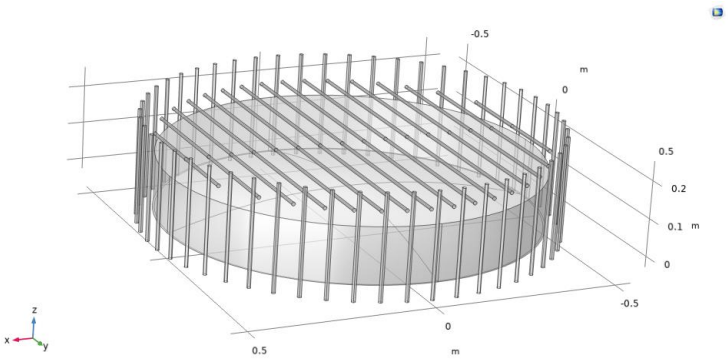


Abbildung 13: Auslegung eines Heizerfeldes mit linearen Infrarot-Strahlern

## AP5 Erarbeitung des Sicherheitskonzepts

**Zeitraum 29.4.2020 – 21.6.2021**

Für die Nutzung von PZT muss die Abscheidekammer komplett vakuumseitig separierbar sein. Dies kann durch Vakuumschieber umgesetzt werden. Die Bleikontamination durch die Beschichtung muss bei der Reinigung der Kammerbleche berücksichtigt werden. Das Tragen von Schutzausrüstung sowie die Reinigung der Bleche bei einem zertifizierten Unternehmen muss gewährleistet werden. Dies trifft auf alle Konzepte zu.

Bei ScAlN ist keine kritische Vorsorge notwendig.

Bei Nutzung eines Achsensystems zum Verfahren des Magnetrons werden Sicherheitsschalter standardmäßig genutzt, um die Personensicherheit zu gewährleisten.

**Zeitraum 22.6.2021 – 30.4.2022**

Gefahren, welche potentiell durch die Auswahl des neuen Beschichtungsmaterials Zr-dotiertes BaTiO3 auftreten könnten, müssen erst noch abgeschätzt werden.

## AP6 3D-Modellierung der Prozessanordnung und des Kammerlayouts

Aufgrund der häufig geänderten Anforderungen an die Anlagentechnik konnte im Rahmen der Laufzeit des Projektes kein finales Kammerlayout modelliert werden. Es wurden stattdessen nur einzelne wichtige Komponenten modelliert.

## AP7 3D-Modellierung einer Substrataufnahme für das gewählte Konzept

Die Größe und das Gewicht der Substrate, sowie weitere Rahmenbedingungen, konnten im Rahmen dieses Projektes nicht finalisiert werden. Aufgrund dessen kann noch keine konkrete Substrataufnahme entworfen werden.

Allerdings besitzt scia Systems bereits mehrjährige Erfahrung im Handling von großen EUV-Spiegeloptiken in Vakuumbeschichtungsanlagen. Es kann mit hoher Wahrscheinlichkeit demnach auf vorhandene Konzepte zurückgegriffen werden.

## AP8 3D-Modellierung der Beschichtungsquellen

In AP2 wurde bereits die konfokale Anordnung von 3 Magnetrons vorgestellt. Ein separates Modell ist nochmals in Abbildung 14 zu sehen. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist rückseitig noch eine Atmosphärenbox notwendig. In dieser befinden sich unter anderem die elektrischen Anschlüsse für die Leistungsversorgung der einzelnen Magnetrons. Im Fall von RF-Anregung müsste hier ebenfalls eine Matchbox räumlich untergebracht werden. Verbindungen wie Kabel und Schläuche werden über Medienschleppketten bei Bewegung der Sputtereinheit geführt.

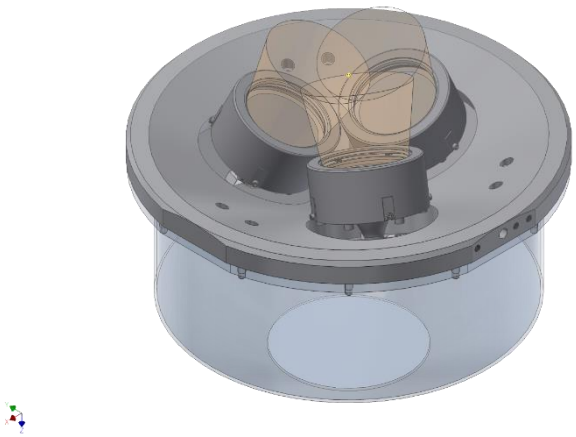

Abbildung 14: CAD-Modell der konfokalen Magnetronanordnung

## AP9 3D-Modellierung der Substratbeladung und Manipulation während der Beschichtung

Aufgrund des Heizkonzeptes kommt nur eine manuelle Beladung direkt in die Prozesskammer infrage. Während des Prozesses muss das Substrat um seine eigene Achse rotieren können.

Wie bereits in AP7 dargelegt wurde, kann die Beladung und Manipulation der Substrate im Rahmen der Projektlaufzeit allerdings nicht finalisiert werden, da die Rahmenanforderungen nicht bekannt sind.

## AP10 Konstruktionsverteidigung (CDR) im Konsortium

Modelle der einzelnen Komponenten (bspw. Magnetronanordnung, Heizkonzept, …) wurden mit den Projektpartnern geteilt und diskutiert. Hier konnten konkrete Konzepte erstellt werden.

Aufgrund der häufig geänderten Anforderungen an die Anlagentechnik im Verlauf des Projektes konnte kein gesamtes Anlagenmodell entwickelt werden.

## AP11 Anpassung der Konstruktion nach den Ergebnissen des CDR

Dieses Arbeitspaket wird im Anschluss an AP10 bearbeitet. Da AP10 nicht vollendet werden konnte, kann auch AP11 nicht vollendet werden.

## AP12 Erstellung der Medienpläne

Da es keinen finalen Entwurf einer Prozessanlage gibt, können im Rahmen des Projektes keine Medienpläne erstellt werden.

## AP13 Erstellung der Elektropläne

Da es keinen finalen Entwurf einer Prozessanlage gibt, können im Rahmen des Projektes keine Elektropläne erstellt werden.

## AP14 Erstellung der Sicherheitsdokumentation

Da es keinen finalen Entwurf einer Prozessanlage gibt, kann im Rahmen des Projektes keine Sicherheitsdokumentation erstellt werden.

## AP15 Entwurf Beschichtungsanlage für große Substrate

Da es keinen finalen Entwurf einer Prozessanlage gibt, kann dieser im Rahmen des Projektes auch nicht geteilt werden. Es wurden stattdessen nur einzelne Komponenten entworfen und konstruiert.

## AP16 Anforderungsanalyse für die Beschichtung des Funktionsmodells

**Zeitraum 1.10.2019 – 28.4.2020**

Zur Beschichtung eines Funktionsmodells müssen folgende Schichten abgeschiedenen werden:

- Elektrode unten
- Piezo Material
- Elektrode oben
- Mo/Si Stapel als Reflektor

Die Elektrode muss strukturiert werden und durch Leiterbahnen kontaktiert werden. Eine Isolationsschicht $SiO_2$ kann benötigt werden. Im Rahmen von Diskussionen mit den Partnern wird eine Beschichtung mittels AlN als Schritt 1 angestrebt, wobei perspektivisch auch PZT genutzt werden soll.

Letztlich soll der FUMO die Funktion der Auslenkung mittels Spannung an einer realen Wellenfront beweisen, d.h. die Schichten müssen von hoher Qualität sein, um die Effekte nachzuweisen.

Die Diskussion ist weiterhin im Gange und wird in den nächsten Wochen konkretisiert.

**Zeitraum 29.4.2020 – 21.6.2021**

Da die Beschichtungen am Fraunhofer FEP erfolgen, wird eine Anlagenadaption der scia Magna 200 durchgeführt. Betroffen sind:

- Substratablage: Anpassung der Ablage für Betrieb mit Carrier.
- Substrathandling: Es kommt ein dünner Carrier aus kohlefaserverstärktem Graphit (CFC) zum Einsatz (Abbildung 15)

- Design einer Handlinghilfe zum Einsatz der Carriers in die Vakuumschleuse

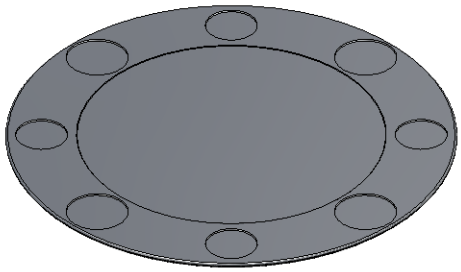

*Abbildung 15: CFC Carrier mit Taschen für FUMO (Mitte) und Monitorproben (Rand).*

**Zeitraum 22. 6. 2021 – 30. 4. 2022**

Für das neue Schichtmaterial kann der o.g. Carrier für das Handling von FUMO und Monitorproben weiter genutzt werden.

## AP17 Konstruktion eines Substrathalters für eine vorhandene Anlage scia Magna 200 für die Aufnahme des Funktionsmodells

**Zeitraum 29.4.2020 – 21.6.2021**

Parallel zu dem Umbau der scia Magna 200 am Fraunhofer FEP wird ein Substrathalter zum Erreichen der typischen Beschichtungsparameter designt. Dieser hat folgende Funktionen:

- Aufnahme von 150 mm und 200 mm Proben mit Option zum Umbau
- Substratlift für Handling
- Heizer für Substrattemperatur bis 500 °C
- Elektrisches Vorspannen des Substrats (Bias) mit Hochfrequenzanregung (HF, 13,56 MHz)
- Substratrotation bis 20 rpm

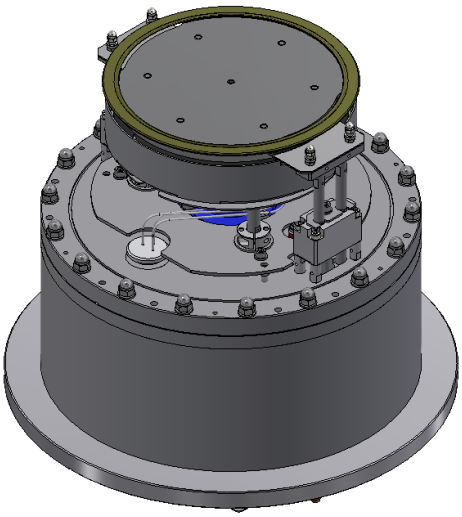

*Abbildung 16: Substrathalter im Rahmen des PIn3S Projekts.*

## AP18 Fertigung des Substrathalters und Funktionstests

### Zeitraum 29.4.2020 – 21.6.2021

Die Fertigung des Substrathalters konnte im Mai abgeschlossen werden. Beim Aufbau wurden bereits erste Verbesserungen durchgeführt, welche den Service und die Funktion verbessern.

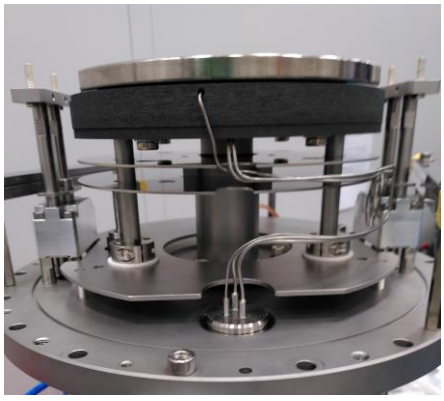

*Abbildung 17: Substrathalter während der Fertigung.*

Im Rahmen der Tests wurde der Substrathalter in eine scia Magna 200 Anlage installiert. Die in *Abbildung* 18 links dargestellten Ergebnisse zeigen, dass durch Leistungsvariation eine Temperatur am Heizer von 750°C erreicht wurde. Ein Pyrometer nahe des Substrates hat 500°C ermittelt, was durch den Dunkelraumspalt zwischen Heizer und Substratteller bedingt ist. Die

Abbildung 18 zeigt außerdem einen Blick auf den glühenden Heizer während dieser Tests. Die erreichte Temperatur ist in dem benötigten Bereich für ScAlN und PZT.

Die HF Bias Ergebnisse sind in *Abbildung* 18 rechts dargestellt. Eine Leistungsvariation bis 300 W wurde durchgeführt. Dabei konnte ein stabiles Plasma mit einer Bias Spannung von bis zu 600V erzeugt werden.

Beide Tests zeigen die Eignung des Substrathalters für die angestrebten Prozesse. Zusätzlich wurden das Substrathandling und die Rotation erfolgreich getestet. Die Vakuumdichtheit des Halters ist auf dem benötigten Niveau von < 5e-8 mbar*l/s.

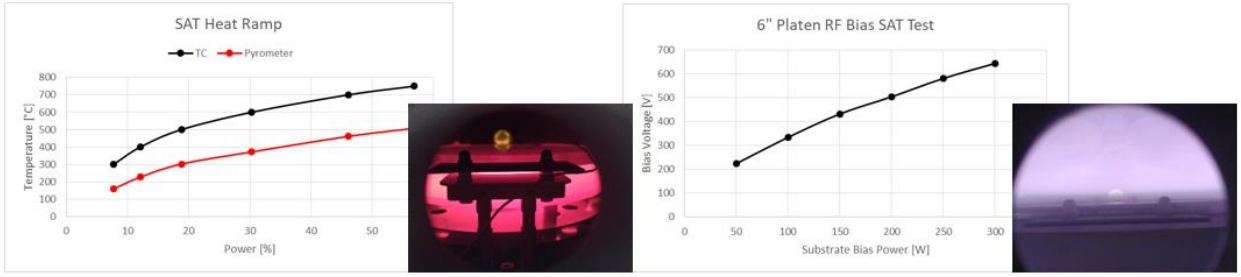


*Abbildung 18: Darstellung der Heizergebnisse (links). Rechts ist die Substratvorspannung dargestellt.*

## AP19 Integration des Substrathalters in die vorhandene scia Magna 200 Anlage

### Zeitraum 29.4.2020 – 21.6.2021

Die Vorbereitung der Integration läuft. Es wurden entsprechend der Elektroplan der Anlage angepasst und die benötigten elektrischen Komponenten bestellt.

### Zeitraum 22.6.2021 – 30.4.2022

Der Substrathalter wurde in die bestehende scia Magna 200 eingebaut, getestet und bereits erfolgreich im Sputterprozess für AlN verwendet. Für die ersten Versuche wurde zunächst nur auf AlN gesetzt, in weiterführenden Versuchen sollte ScAlN getestet werden.

Da im Laufe des Projektes zu einer neuen Materialkombination (Zr-$BaTiO_3$) gewechselt wurde, sind erneute Prozesstests notwendig. Hierfür benötigt scia Systems weitere Informationen vom Partner FEP, welcher aktuell noch Grundlagenuntersuchungen zum Schichtmaterial durchführt. Im Anschluss können Experimente an der scia Magna 200 durchgeführt werden.

### Zeitraum 30.4.2022 – 30.4.2023

Die notwendigen Untersuchungen mit dem neuen Schichtmaterial wurden am Fraunhofer FEP durchgeführt, da diese über umfassendes Verständnis bzgl. der Anforderungen an das neue Material verfügen.

## AP20 Beschichtungstests mit Planarkathoden, Messung und Bewertung

Das Arbeitspaket wird zu einem späteren Zeitpunkt im Projekt bearbeitet, sobald die vorherigen Experimente zum neu gewählten Material seitens des Projektpartners FEP abgeschlossen sind.

**Zeitraum 30.4.2022 – 30.4.2023**

Wie in AP19 dargelegt wurden weitere Beschichtungstests am Fraunhofer FEP durchgeführt.

## AP21 Beschichtungstests mit DRM400, Messung und Bewertung

Das Arbeitspaket wird derzeit vom Projektpartner FEP bearbeitet. Messungen und Auswertungen stehen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht zur Verfügung.

## AP22 Beschichtung des von Zeiss bereitgestellten Funktionsmodells

Das Arbeitspaket wird zu einem späteren Zeitpunkt im Projekt bearbeitet, sobald die vorherigen Experimente zum neu gewählten Material seitens des Projektpartners FEP abgeschlossen sind.

**Zeitraum 30.4.2022 – 30.4.2023**

Das Funktionsmodell (FUMO) wurde erfolgreich beschichtet. Anschließend wurde dessen Qualität von Zeiss SMT untersucht und bewertet. Nähere Informationen dazu sind dem nachfolgenden Arbeitspaket 23 zu entnehmen.

## AP23 Bewertung des Funktionsmodells, Rückführung in Anlagendesign, Darstellung der Projektergebnisse

Das Funktionsmodell (FUMO) wurde erfolgreich durch das Fraunhofer FEP beschichtet. Die Bewertung der Qualität erfolgte durch Zeiss SMT. Hierbei stellte sich heraus, dass das FUMO den Anforderungen nicht genügt. Seitens des Beschichtungsprozesses konnten keine Verbesserungen erzielt werden, welche die Anforderungen erfüllen können.

Aus diesem Grund erfolgte anschließend ein umfassendes Screening seitens Fraunhofer FEP nach alternativen piezoelektrischen Beschichtungsmaterialien. Im Zuge dessen wurde der Fokus anstatt auf AlN bzw. AlScN auf Zr-dotiertes BaTiO3 gelegt. Die Änderungen der Anforderungen an die Beschichtungstechnologie wurden bereits in den neuesten Berichtszeiträumen der früheren Arbeitspakete ausführlich diskutiert.

Eine Beschichtung eines FUMO mit dem neuen Schichtmaterial ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht erfolgt.