

# Verbesserte Dünnschichten aus Ionenstrahlbasierter Zerstäubung für ultraviolette Laseranwendungen

von der Fakultät für Mathematik und Physik  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des Grades  
Doktor der Naturwissenschaften  
Dr. rer. nat.

genehmigte Dissertation

von  
M.Sc. Thimotheus Alig

2022

Referent: Prof. Dr. Detlev Ristau

Korreferenten: apl. Prof. Dr. Milutin Kovacev und Prof. Dr. Günter Bräuer

Tag der Promotion: 18. Februar 2022

# KURZZUSAMMENFASSUNG

---

Im Hinblick auf die optischen Technologien werden mit Hilfe des Ionenstrahlputterverfahrens hochqualitative Schichtsysteme bereitgestellt. Allerdings beschränken sowohl Verlusteigenschaften als auch laserinduzierte Zerstörungen die Anwendungsmöglichkeiten im ultravioletten Spektralbereich. In diesem Zusammenhang sollen Prozesserweiterungen unter anderem Lebenswissenschaften, Halbleiterlithografie und Weltraumanwendungen befördern.

Unter Zuhilfenahme von Materialkombinationen wurden am Beispiel von Hafniumdioxidschichten die optischen Eigenschaften zugeschnitten. Ausschlaggebend waren in diesem Fall die Verlusteigenschaften von Resonatorspiegeln einer nicht-linearen Frequenzkonversion. Zusätzlich zu Aluminiumoxid konnten die ultravioletten Absorptionsverluste auch mit Hilfe von Siliziumdioxid reduziert werden. In Übereinstimmung mit dem Lorentz-Lorenz-Modell verringerte sich allerdings der Brechungsindex der binären Materialkombination. Unter Zuhilfenahme von Lumineszenzspektroskopie konnten Veränderungen der elektronischen Bandstruktur nachgewiesen werden. Darüber hinaus zeigten die komplexen Resonatorspiegel unter Einsatz geringer Beimischungen eine signifikante Reduzierung der Streulichtverluste.

Im Hinblick auf ionengestützte Wachstumsprozesse wurde der Schichtabtrag durch eine sekundäre Ionenstrahlquelle untersucht. Die Sputtereffizienzen der verwendeten Schichtmaterialien bestätigten die grundlegenden Zerstäubungsmechanismen. Zusätzlich zur Substratvorbereitung ermöglichte die Ionenstrahlätzung auch eine Korrektur der einzelnen Schichtdicken. Im Rahmen der Ionenstrahlstützung verstärkte das Argonbombardement die Mikrokristallisation der einlagigen Hafniumdioxidschichten. Unter Zuhilfenahme ionisierter Sauerstoffatome ließ sich im Gegensatz dazu das Streulichtaufkommen reduzieren. Im Hinblick auf zukünftige Weltraummissionen wurden Antireflexbeschichtungen für 355 nm mit Hilfe eines streifenden Argonbombardements beeinflusst. Die sekundären Zerstäubungsvorgänge sollen dem partikelinduzierten Zerstörungsmechanismus im Bereich der Nanosekundenpulse entgegenwirken. Unter Zuhilfenahme von Rasterscantests wurde in diesem Zusammenhang eine Verbesserung der laserinduzierten Zerstörschwelle von mehr als 50 % nachgewiesen.

**Schlagnorte:** Optische Dünnschichten, Ionenstrahlzerstäubung, laserinduzierte Zerstörung

# ABSTRACT

---

The ion beam sputtering provides high quality thin films for a wide range of optical technologies. Optical losses and laser-induced damage nevertheless limit the application in the ultraviolet spectral range. The developed coating processes should advance life sciences, semiconductor lithography, and space applications.

The investigation started with a tailoring of hafnium dioxide for applications in the ultraviolet spectral range using material mixtures. Reference was made to the loss properties of complex resonator mirrors at a wavelength of 355 nm used for a non-linear frequency conversion. The absorption losses in the ultraviolet spectral range could be reduced by the addition of aluminum oxide or silicon dioxide. The refractive index of the combination was also reduced which confirmed consistency with the Lorentz-Lorenz model. Luminescence spectroscopy over a broad wavelength range was used to detect changes in the electronic band structure as a function of the material mixtures. The scattering losses of the resonator mirrors could also be reduced requiring only small amounts of the mixing materials.

An assisted growth process was introduced by investigating the etching behavior of materials against secondary ion bombardment. The fundamental sputtering mechanisms could be matched with the etching efficiencies of the single layer systems. The developed etching process can be used during substrate preparation as well as for the correction of overgrown layer material. During the assisted growth processes the hafnium dioxide films showed micro crystallization when argon ions were applied. In contrast to that bombardment with ionized oxygen was able to reduce the scattering losses of the layer systems. Further attempts included a grazing argon bombardment of antireflection coatings to improve the damage resistance for future flight lasers. The mitigation scheme counteracted the particle-induced damage mechanism at a wavelength of 355 nm that limited the power capability in the nanosecond pulse regime. An increase in the laser-induced damage threshold of more than 50 % was demonstrated by performing large area raster scan tests.

**Keywords:** Optical thin films, ion beam sputtering, laser induced damage

# INHALTSVERZEICHNIS

---

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen zu optischen Schichten im ultravioletten Bereich</b>	<b>5</b>
2.1	Verdampfungsverfahren . . . . .	6
2.1.1	Thermische Verdampfung . . . . .	6
2.1.2	Ionenstrahlgestützte Deposition . . . . .	8
2.2	Ionenstrahlputtern . . . . .	11
2.2.1	Aufbau und Funktionsweise . . . . .	11
2.2.2	Wachstumsprozesse . . . . .	14
2.2.3	Schichteigenschaften und Anwendungsbereiche . . . . .	15
2.3	Mikrostrukturen . . . . .	17
2.4	Hafniumdioxid in optischen Schichten . . . . .	20
2.5	Zusammenfassung . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Materialmischungen mit Hafniumdioxid</b>	<b>25</b>
3.1	Deposition einschichtiger Materialmischungen . . . . .	25
3.2	Gemischbestimmung durch Brechzahlanalyse . . . . .	29
3.3	Elementanalyse mittels Röntgenspektroskopie . . . . .	33
3.4	Minderung der Absorption durch Beimischung . . . . .	37
3.5	Streuverluste der binären Materialmischungen . . . . .	41
3.6	Photolumineszenzspektroskopie . . . . .	46
3.7	Optimierung beispielhafter Laserkomponenten . . . . .	50
3.7.1	Herstellung der komplexen Resonatorspiegel . . . . .	50
3.7.2	Anwendungsorientierte Untersuchung der Schichten . . . . .	53
3.8	Zusammenfassung . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Ionenstrahlätzen von optischen Dünnschichten</b>	<b>59</b>
4.1	Ätzprozesse an einlagigen Schichtsystemen . . . . .	60
4.2	Grundlegende Mechanismen der Zerstäubung . . . . .	62
4.3	Herstellung der verwendeten Dünnschichten . . . . .	65

---

4.4	Ätzverhalten der ultravioletten Dünnschichten . . . . .	67
4.5	Anwendungsorientierte Spiegelbeschichtungen . . . . .	71
4.6	Zusammenfassung . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Beschichtungsprozesse mit dualer Ionenstrahlzerstäubung</b>	<b>77</b>
5.1	Mechanismen im gestützten Schichtwachstum . . . . .	78
5.2	Eigenschaften realisierter Hafniumdioxidfilme . . . . .	80
5.3	Ionenstrahlgestützte Deposition mit Sauerstoff . . . . .	83
5.4	Aktive Vermeidung von Zerstörungsvorläufern . . . . .	86
5.4.1	Defektinduzierte Zerstörungen an Weltraumoptiken . . . . .	87
5.4.2	Ionenbasierte Vermeidung der Zerstörungsvorläufer . . . . .	91
5.4.3	Bestrahlung der Vorläufer im Beschichtungsprozess . . . . .	96
5.4.4	Stufenartiger Rasterscantest . . . . .	99
5.4.5	Zerstöreeigenschaften bei einer Wellenlänge von 266 nm . . .	101
5.5	Zusammenfassung . . . . .	105
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>107</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>109</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>125</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>127</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>129</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>133</b>
	<b>Erklärungen</b>	<b>135</b>



# EINLEITUNG

Die Weiterentwicklung von optischen Dünnschichtsystemen im Hinblick auf den ultravioletten Spektralbereich gewinnt zunehmend an Bedeutung. Ausschlaggebend sind in diesem Zusammenhang unter anderem geringe Verluste und eine hohe Leistungsfestigkeit. Die Anforderungen der optischen Technologien steigen darüber hinaus mit der Erschließung immer kürzerer Emissionswellenlängen. Über 20 Jahre nach Erfindung der ersten Lasersysteme im infraroten und sichtbaren Spektralbereich wurde 1970 der Excimerlaser entwickelt. Unter anderem gelang in diesem Zusammenhang ein wichtiger Schritt zur Herstellung hochintegrierter Halbleiter-Bauelemente. Zusätzlich zur Fotolithografie verbesserten die einhergehenden Entwicklungen zum Beispiel das Schneiden von menschlichem Gewebe.

Zur kompakten und effizienten Strahlerzeugung mit geringer spektraler Breite eignen sich vorwiegend Festkörperlaser. Dabei wird infrarotes bis sichtbares Laserlicht unter Einsatz nichtlinearer Kristalle in den ultravioletten Wellenlängenbereich konvertiert. Die Güte der funktionalen Schichten trägt wesentlich zur Effizienz, Leistungsfestigkeit und Langzeitstabilität der Lasersysteme bei. Im Hinblick auf bildgebende Verfahren wird die Frequenzkonversion zum Beispiel bei der Fluoreszenzanalyse eingesetzt. Im Kontext der Ramanspektroskopie profitiert unter anderem die biomedizinische Forschung, die Medikamentenentwicklung und die klinische Diagnostik. Die optischen Schichtsysteme spielen nicht nur bei der Vergütung von Laserkomponenten eine wichtige Rolle. Im Rahmen von Weltraummissionen werden sie für Instrumente zur Untersuchung der Erdatmosphäre eingesetzt. In diesem Zusammenhang vermessen meteorologische Satelliten das Licht der Erdoberfläche vom ultravioletten bis zum infraroten Wellenlängenbereich. Im Hinblick auf eine Luftqualitätsmessung werden mit Hilfe der Weltraummission AEOLUS stündlich aktualisierte Karten erstellt. Zusätzlich zur Sonneneinstrahlung lässt sich im Rahmen der Klimaüberwachung auch das stratosphärische Ozon berücksichtigen. Vor allem die Zerstörfestigkeit der optischen Schichten ist ausschlaggebend

für die Funktionalität der Instrumente. Darüber hinaus müssen die mechanischen Anforderungen einer Weltraumanwendung einbezogen werden.

Im Hinblick auf Weiterentwicklungen stoßen die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten an die Grenzen der heutigen Beschichtungstechnik. Ausschlaggebend sind Anwendungen mit hoher Leistungsdichte und langer Standzeit im ultravioletten Spektralbereich. Bei der Herstellung von leistungsverträglichen Beschichtungen kommt das Ionenstrahlputterverfahren zum Einsatz. Im Gegensatz zu Verfahren mit thermischer Abscheidung bildet sich durch die hohe Energie eine dichtere Schichtstruktur. Eine geeignete Bandkante für einen Einsatz im ultravioletten Spektralbereich besitzen unter anderem Siliziumdioxid, Aluminiumoxid, Scandiumoxid, Zirconiumdioxid und Hafniumdioxid. Aufgrund hoher Leistungsfestigkeit und Langzeitstabilität liegt der Fokus dieser Arbeit auf Hafniumdioxid. Darüber hinaus sollen die Schichtmaterialien Siliziumdioxid und Aluminiumoxid berücksichtigt werden. Konventionell gesputtertes Hafniumdioxid eignet sich vorwiegend bei dünnen Schichtsystemen mit Anforderungen im nahen ultravioletten Spektralbereich. Beispiele bilden Antireflexbeschichtungen zur Minimierung der Verluste oder Teilreflektoren zur permanenten Strahlanalyse. Optimierungspotential besteht aufgrund steigender Absorption und Streuung hingegen bei komplexen Schichtsystemen. Im mittleren ultravioletten Spektralbereich hat Hafniumdioxid auch bei dünnen Schichten einen signifikanten Einfluss auf die Absorptionsverluste. In seiner konventionellen Form eignet sich das Beschichtungsmaterial in Folge dessen selbst für einfache Systeme nur bedingt.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist eine Weiterentwicklung des konventionellen Zerstäubungsverfahrens für Anwendungen im ultravioletten Spektralbereich. Unter Zuhilfenahme grundlegender Prozessuntersuchungen soll in diesem Zusammenhang eine neue Materialqualität ermöglicht werden. Von besonderem Interesse ist eine Reduzierung der Absorptionsverluste bei kurzen Wellenlängen, eine Verringerung der Streuung bei komplexen Systemen und eine Erhöhung der laserinduzierten Zerstörschwelle zur Verbesserung der Langzeitstabilität.

Die zugrundeliegende Literatur setzt sich unter anderem aus Veröffentlichungen zur Modifikation von Hafniumdioxidschichten zusammen. Foster und Kollegen [1] befassten sich am Beispiel von monoklinem Hafniumoxid mit der theoretischen Berechnung von atomaren und molekularen Zwischengitterstörstellen. Untersuchungen von Langdon und Kollegen [2] zum Einfluss der Prozessbedingungen beinhalten einen Ausschnitt der bisherigen Optimierungsansätze. Darüber hinaus analysierten Patel und Kollegen [3] den Effekt von atomarem Sauerstoff auf die Schichteigenschaften. Im Rahmen dieser Arbeit werden Einzelschichten der zu optimierenden Materialien hergestellt und bezüglich Brechwert, kalorimetrischer Absorption und Streuung charakterisiert. Die erste Methode zur Weiterentwicklung der ultravioletten Schichteigenschaften ist die Beimischung von Aluminiumoxid beziehungsweise Siliziumdioxid. Ausschlaggebend sind sowohl geringe Absorptionsverluste als auch Streulichtaufkommen der niedrig brechenden Schichtmaterialien. Im Hinblick auf

die Mischungsverhältnisse wird eine Elementanalyse mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenspektroskopie durchgeführt. Der Einsatz ausgewählter Mischungen in komplexen Schichtsystemen ermöglicht schließlich eine anwendungsbezogene Bewertung der Prozessentwicklung.

Ein weiteres Konzept zur Verbesserung der ultravioletten Schichteigenschaften beinhaltet ein direktes Ionenbombardement. Als Einstieg in die Stützexperimente werden ausgewählte Einzelschichten in ihrem Ätzverhalten charakterisiert. Basierend auf den Ergebnissen bietet eine Ionenbehandlung im Bereich des Schichtwechsels ein zusätzliches Optimierungspotential. Die letzte Weiterentwicklung im Rahmen dieser Arbeit bildet das Ionenbombardement beim Aufwachsen der optischen Dünnschichten. Die Anforderungen zukünftiger Weltraummissionen motivieren eine Betrachtung von ultravioletten Antireflexbeschichtungen. Unter Berücksichtigung partikelinduzierter Zerstörungen sollen eventuelle Effekte auf die laserinduzierte Zerstörschwelle untersucht werden.

Der erste Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Herstellung der optischen Schichten und reicht von der thermischen Verdampfung bis zum Ionenstrahlputterverfahren. Anschließend wird der heutige Stand von Hafniumdioxid im Bereich der optischen Technologien dargelegt. Die potentiellen Defektzustände der Schichtmaterialien sollen den Abschluss der theoretischen Grundlagen bilden.

Die Modifikation der gesputterten Hafniumdioxidschichten mit Hilfe der Materialmischung wird im dritten Kapitel dieser Arbeit beschrieben. Im Hinblick auf die Herstellung sollen zu Beginn experimentelle Details der Ionenstrahlputteranlage vorgestellt werden. Anschließend lassen sich mit Hilfe energiedispersiver Röntgenspektroskopie die Mischungsverhältnisse der realisierten Einzelschichtsysteme analysieren. Auf Basis der Elementzusammensetzung werden Brechwerte, Absorption und Streuung der verschiedenen Mischungen ermittelt. Theoretische Berechnungen der Schichteigenschaften dienen in diesem Zusammenhang als Vergleich. Abschließend werden die ausgewählten Materialmischungen in funktionalen Schichten eingesetzt. Die optischen Eigenschaften lassen sich schließlich unter Anwendungsbedingungen mit einem konventionellen Referenzsystem vergleichen.

Im Hinblick auf die ionengestützten Wachstumsprozesse umfasst Kapitel 4 das physikalische Ätzverhalten der Schichtmaterialien. Zusätzlich zu den Ätzprozessen werden sowohl die Schichtmaterialien als auch die Abscheideverfahren der Einzelschichtsysteme beschrieben. Unter Berücksichtigung der theoretischen Grundlagen lässt sich anschließend das Ätzverhalten der optischen Dünnsichtsysteme charakterisieren. Die Auswirkungen von geätzten Materialübergängen bilden am Beispiel einer Spiegelbeschichtung den Abschluss dieses Kapitels.

Im Rahmen des fünften Kapitels vervollständigt der ionengestützte Wachstumsprozess die Optimierungsansätze der vorliegenden Arbeit. Die duale Ionenstrahlzerstäubung von Hafniumoxidschichten schafft in diesem Zusammenhang die Grundlage. Zusätzlich zu den optischen Eigenschaften sollen unter Zuhilfenahme der Fluoreszenzspektroskopie auch die Energieniveaus analysiert werden. Streifen-

des Ionenbombardement soll darüber hinaus den partikelinduzierten Zerstörungsmechanismus unterdrücken. Zu diesem Zweck wurde am Beispiel einer ultravioletten Antireflexbeschichtung die laserinduzierte Leistungsfestigkeit untersucht.

Das letzte Kapitel dieser Arbeit vergleicht die Schichtmodifikationen im Hinblick auf die verschiedenen Anwendungsbereiche. In diesem Zusammenhang lassen sich die Vor- und Nachteile der entwickelten Beschichtungsprozesse gegeneinander abwägen. Zum Schluss werden entstandene Fragestellungen aufgezeigt und weitere Verbesserungspotentiale der optischen Dünnschichten dargelegt.

# GRUNDLAGEN ZU OPTISCHEN SCHICHTEN IM ULTRAVIOLETTEN BEREICH

Die vielfältigen Einsatzgebiete in Wissenschaft und Technik erfordern unterschiedliche Herstellungsverfahren der Dünnschichtsysteme. Materialien für den ultravioletten Spektralbereich erstrecken sich von der thermischen Verdampfung mit porösen Schichten bis hin zu dichten Dünnschichten des Ionenstrahlputterverfahrens. In diesem Kapitel werden ausgewählte Abscheidungsverfahren einschließlich der optischen und mechanischen Eigenschaften beschrieben. Die verwendete Fachliteratur liefert zu diesem Zweck die theoretischen und experimentellen Aspekte der Beschichtungstechniken. Unter Zuhilfenahme von Vossen und Kern [4, 5] wird eine größere Zusammenschau von Abscheidungsverfahren bereitgestellt. Theoretische Berechnungen der Zwischengitterstörstellen von Foster und Kollegen [1] beschreiben am Beispiel von Hafniumdioxid die strukturellen Eigenschaften. Zu Beginn dieses Kapitels werden die Grundlagen der thermischen Verdampfung und der ionenstrahlgestützten Deposition erläutert. Die Materialien für Anwendungen im ultravioletten Spektralbereich dienen in diesem Zusammenhang als Beispiel. Anschließend folgt eine ausführliche Beschreibung des Ionenstrahlputterverfahrens. Die Schichteigenschaften sollen gegenüber den vorangegangenen Abscheidungsverfahren abgegrenzt werden. Den Abschluss des Grundlagenkapitels bildet eine theoretische Betrachtung der Zwischengitterstörstellen auf Grundlage der Bandstruktur von Hafniumoxid.

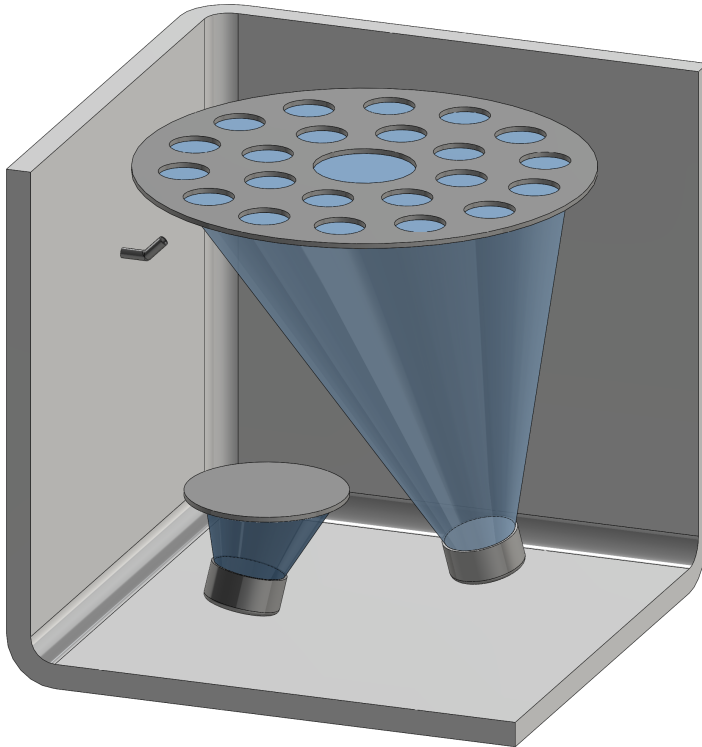
## 2.1 Verdampfungsverfahren

Das Verdampfungsverfahren ermöglicht im Vergleich zu den übrigen Depositionstechniken ein einfaches Aufbringen der optischen Dünnschicht. Dementsprechend finden es in vielen Bereichen der Industrie Verwendung. Die hochvakuumbasierte Beschichtungstechnik zeichnet sich durch eine thermische Verdampfung des Schichtmaterials aus. Anschließend kondensiert der aufsteigende Materialdampf unter Berücksichtigung äußerer Umstände auf der Substratoberfläche. Im ersten Teil wird die Funktionsweise der thermischen Verdampfung beschrieben. Die Besonderheiten der ionenstrahlgestützten Deposition bildet den zweiten Teil dieses Abschnitts.

### 2.1.1 Thermische Verdampfung

Brinsmaid und Kollegen [6] etablierten im Jahre 1957 die Herstellung oxidischer Schichten. Darüber hinaus sollte in diesem Zusammenhang auch das Patent von Auwärter [7] berücksichtigt werden. Wenige Jahre zuvor beschrieben Hass und Salzberg [8] auf Grundlage der optischen Eigenschaften einen starken Einfluss der Prozessbedingungen. Bei der reaktiven Verdampfung wird das Ausgangsmaterial in einer Sauerstoffatmosphäre erhitzt. Es schlägt sich ohne äußere Einwirkungen auf dem Substrat nieder. Dieser Unterabschnitt betrachtet die Grundlagen der thermischen Verdampfung vom Equipment über die physikalischen Abläufe bis zu den Schichteigenschaften.

Thermische Verdampfungsanlagen beinhalten wie in Abbildung 2.01 dargestellt eine Quelle zum Aufschmelzen des Ausgangsmaterials. Zur Kondensation des Materialdampfs dient die Substratoberfläche. Im Hinblick auf eine effektive Verdampfung des Schichtmaterials sollte der typischer Prozessdruck von  $10^{-6}$  mbar herrschen. Außerdem wird dadurch eine Verunreinigung des Dampfstrahls verhindert. Bei der Verdampfung oxidischer Schichtsysteme wird den Ausgangsmaterialien über Gaseinlässe in der Vakuumkammer konstant Sauerstoff zugeführt. Für eine Verdampfung fluoridischer Schichten eignen sich laut Kolbe und Kollegen [9] beispielsweise Aluminium, Magnesium, Lanthan, Neodym und Gadolinium. Der Einsatz von Verschlussklappen über den Verdampferquellen ermöglicht ein Konditionieren des Schmelzprozesses. Außerdem selektieren sie die Ausgangsmaterialien bei der Deposition von Mehrschichtsystemen. Um eine bestimmte Härte und Struktur bei der thermischen Verdampfung zu erreichen, werden neben den Schichtmaterialien auch die Substrate beheizt. Vor und während des Aufdampfens kommen Heizstäbe oder Quarzlampen zur Anwendung. Laut Haefler [10] werden die Substrate in diesem Zusammenhang auf einige 100 °C gebracht. Um eine homogene Schichtverteilung auf den Optiken zu ermöglichen, befinden sich die Substrate auf einem rotierenden Halter. Sie werden mit Hilfe von Blenden gezielt vom Dampfstrahl abgeschirmt.



**Abbildung 2.01:** Schematischer Aufbau einer thermischen Verdampfungsanlage. Das Depositionsverfahren umfasst ein Aufschmelzen des Ausgangsmaterials. Außerdem ist die Kondensation an der Substratoberfläche zu berücksichtigen. Bei der Verdampfung von oxidischen Schichtsystemen wird dem Prozess Sauerstoff zugeführt. Verschlussklappen über den Verdampferquellen ermöglichen ein Konditionieren des Schmelzprozesses. Außerdem selektieren sie die Ausgangsmaterialien bei der Deposition von funktionalen Dünnschichtsystemen.

Widerstandsverdampfer und Induktionsheizer schmelzen das Ausgangsmaterial vollständig auf. Im Unterschied dazu stehen Elektronenstrahlverdampfer, Lichtbogen und Laserstrahl. Das Behältermaterial der thermischen Verdampferquellen sollte einen niedrigen Gasdruck bei hoher Schmelztemperatur aufweisen. Dadurch wird eine Kontamination des Ausgangsmaterials im Aufschmelzbereich verhindert. Bei Widerstandsverdampfern wird das Ausgangsmaterial in Schiffchen aus Molybdän, Wolfram oder Tantal bereitgestellt. Die thermische Verdampfung erfordert eine Temperatur nahe des Siedepunkts. Im Hinblick auf das Gleichgewicht der verdampften Materialmenge darf der Prozessdruck nicht zu hoch liegen. Die verdampften Atome des Ausgangsmaterials können eine durchschnittliche Energie von etwa 0,3 eV erreichen. Sie bewegen sich mit Maxwell'scher Geschwindigkeitsverteilung entlang gerader Linien. Infolge der ungerichteten Emission geht ein Teil des Materialdampfs an den Gefäßwänden des Rezipienten verloren. Die zweckdienlichen Partikel schlagen sich auf den Optiken nieder. Zusätzlich zur Kondensation geben sie ihre Bewegungsenergie in Form von Wärme an das Substrat ab. Atomare Ansammlungen der Substratoberfläche können Abschattungseffekte verursachen. Bei hohen Einfallswinkeln tragen sie zur Entstehung von Hohlräumen in der Schicht bei. Unter Zuhilfenahme einer Substrateheizung lässt sich aufgrund der erhöhten Teilchenmobilität die Bildung von porösen Dünnschichten minimieren. Die Schichtdicken der aufgedampften Filme werden mit einem Schwingquarz gemessen. Unter Berücksichtigung des Füllstands können die Wachstumsraten über die

---

Teilchenenergie	bis zu 0,3 eV
Substrattemperatur	150 bis 400 °C
Struktur	mikrokristallin
Thermische Verschiebung	einige 100 ppm/K [13]
Schichtstress	weniger als 100 MPa Zugspannung

---

**Tabelle 2.01:** Prozesseigenschaften der reaktiven Verdampfung. Bei der Beschichtungs-technik wird das Ausgangsmaterial verdampft. Es schlägt sich unter Zugabe von Reaktivgas auf der Substratoberfläche nieder.

Energiezufuhr zum Heizer geregelt werden.

Die mechanischen und optischen Eigenschaften der aufgedampften Dünnschichten lassen sich direkt aus den Wachstumsprozessen ableiten. Die geringe Packungsdichte ist eine Folge der niedrigen Teilchenenergie. Sie führt bei Wassereinlagerung zu einer spektralen Verschiebung der Filtereigenschaften. Außerdem können sich Mikrokristallite beim Aufwachsen der verdampften Schichten bilden. In diesem Zusammenhang können Streulichtverluste generiert werden. Thielsch und Kollegen [11] demonstrierten bei Hafniumdioxidfilmen eine Brechungsindexvariation. Sie führen den Effekt auf die säulenförmige Struktur im Rahmen dickerer Schichten zurück. Die Einflüsse dieser Inhomogenitäten auf die spektrale Charakteristik eines Einzelschichtsystems werden durch Tikhonravov und Kollegen [12] beschrieben. Des Weiteren bieten aufgedampfte Hafniumoxidschichten eine hohe Laserzerstörungsschwelle. Niedrige Absorptionsverluste ab einer Wellenlänge von etwa 250 nm ermöglichen einen Einsatz im fernen ultravioletten Spektralbereich.

Die thermische Verdampfung wird laut Haefler [10] unter anderem bei der Herstellung von Metallspiegeln, der Entspiegelung von Brillengläsern und der Vergütung von Laserkomponenten eingesetzt. Aufgrund der einfachen Verfahrensweise ist die thermische Verdampfung in der Elektronikindustrie weit verbreitet. In diesem Zusammenhang lassen sich Halbleiterbauelemente und integrierte Schaltkreise fertigen. Außerdem kann die thermische Verdampfung eine Schutzschicht gegen mechanische, chemische, thermische oder klimatische Einflüsse herstellen.

Das wichtigste Kennzeichen der thermischen Verdampfung ist die geringe Teilchenenergie. In Tabelle 2.01 werden die Prozessbedingungen und die Schichteigenschaften zusammengefasst. Wie sich die Teilchenmobilität unter Ionenbeschuss verändert, wird im nächsten Teil dieses Abschnitts beschrieben. Außerdem soll thematisiert werden, welche Einflüsse sich auf die Schichteigenschaften ergeben.

### 2.1.2 Ionenstrahlgestützte Deposition

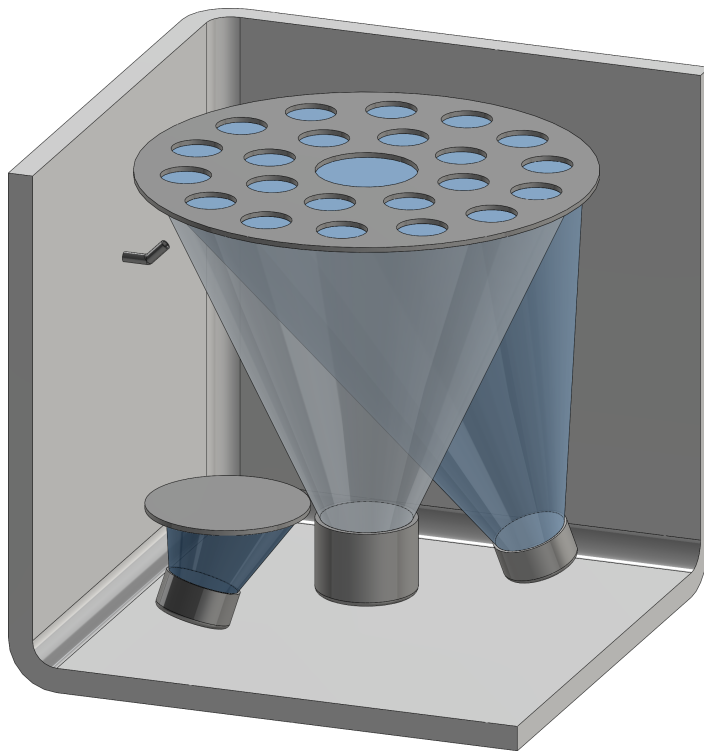
Die Ionenstrahlgestützte Deposition ist eine Erweiterung der thermischen Verdampfung. In diesem Fall kommt ein Ionenbeschuss beim Schichtwachstum zum Einsatz. Erstmals ließ sich die Ionenstrahlgestützte Deposition im Jahre 1964 von



Mattox [14] realisieren. In diesem Zusammenhang wurden Änderungen in der Übergangszone zum Substrat sowie im Film selbst beabsichtigt. Dieser Unterabschnitt enthält eine Beschreibung der ionenstrahlgestützten Deposition. Anhand der Schichteigenschaften zeigt er darüber hinaus die Unterschiede zur thermischen Verdampfung auf.

Beschichtungsanlagen zur ionenstrahlgestützten Deposition beinhalten mindestens eine Verdampferquelle. Zusätzlich dazu ist in Abbildung 2.02 die Ionenquelle zur Manipulation der aufwachsenden Schicht dargestellt. Die Stützquelle befindet sich am Boden der Beschichtungskammer. Unter diesen Bedingungen rotiert der Substrathalter im Wirkungsbereich des Plasmastrahls. Im Hinblick auf reaktive Prozesse lassen sich die Gase über Einlässe der Vakuumkammer regeln. Alternativ können sie unter Zuhilfenahme der Ionenquelle bereitgestellt werden. Im Gegensatz zur thermischen Verdampfung ist keine Erwärmung der Substrate erforderlich. Das Ausgangsmaterial der gestützten Deposition wird mit den Quelleneinheiten der thermischen Verdampfung erhitzt.

Die Ionenquelle dient im Rahmen der gestützten Deposition der Bereitstellung von hochenergetischen Atomen oder Molekülen. Sie sollen mit gleicher Energie und Richtung auf der Schichtoberfläche auftreffen. Zur effektiven Extraktion von niederenergetischen Ionen eignet sich das magnetisierte Plasma einer End Hall Quelle. Am weitesten verbreitet ist die Kaufman Quelle unter Anwendung mehrerer Extraktionsgitter. Laut Mohan und Krishna [15] wird eine unabhängige Steuerung der



**Abbildung 2.02:** Aufbau einer Anlage zur ionenstrahlgestützten Deposition. Die Beschichtungsanlage umfasst die Heizer der thermischen Verdampfung. Eine radiofrequenzinduzierte Ionenquelle dient zur Manipulation der aufwachsenden Schicht. Die Stützquelle befindet sich am Boden des Vakuumsystems. Im Wirkungsbereich des Plasmastrahls liegt der rotierende Substrathalter. Bei reaktiven Prozessen werden die Gase durch Kammereinlässe bereitgestellt. Darüber hinaus können die Zugaben mit Hilfe der Stützquelle ionisiert werden.

Energie und Stromdichte ermöglicht. Die Ionenquelle lässt sich sowohl mit inerten als auch mit reaktiven Arbeitsgasen betreiben. In diesem Zusammenhang werden Energien von mehreren 10 bis 100 eV erreicht. Um einen homogenen Teilchenstrom zu erhalten, sollte die Form des Substrathalters mit der räumlichen Verteilung des Ionenstrahls einhergehen.

Vor dem Schichtwachstum kann die Ionenquelle eine Reinigung der Substratoberfläche bewirken. Außerdem lässt sich die Haftfähigkeit der optischen Dünnschichten steigern. Ausschlaggebend ist in diesem Zusammenhang eine Aktivierung der beaufschlagten Substratoberfläche. Das Schichtwachstum resultiert aus einem Überschuss der eintreffenden Dampfteilchen gegenüber dem Materialabtrag. Elektronenanregung und Atomstöße führen zu einer Erhöhung der Substrattemperatur. Eine Erklärung für das verbesserte Schichtwachstum bieten die Wärmespitzen allerdings nicht. Laut Berechnungen von Müller [16] ist sowohl die Lebenszeit als auch die räumliche Ausdehnung unzureichend. Als Hauptursache für die Verdichtung der optischen Schichten wiesen Targove und Macleod [17] kaskadierte Stöße nach. In diesem Fall können die Ionen wenige Atomlagen tief in das Schichtsystem eindringen. Dabei tragen die einfallenden Ionen überhängende Atome ab. Außerdem halten sie Hohlräume bis zur Belegung mit neuem Schichtmaterial offen. Bei der Herstellung oxidischer Dünnschichten sind nach Malherbe und Kollegen [18] Absorptionsverluste zu beachten. Entscheidend ist in diesem Fall die bevorzugte Zerstäubung der Sauerstoffatome. Die Prozesssteuerung erfolgt über die Energie und das Verhältnis von Ionenbestrahlung zu aufwachsendem Schichtmaterial.

Die optischen und mechanischen Eigenschaften lassen sich überwiegend aus der erhöhten Packungsdichte ableiten. Im Vergleich zur thermischen Verdampfung zeigen die Schichten eine reduzierte Absorption. Außerdem erhöht ein geringer Wasseranteil der gestützten Dünnschichten die spektrale Stabilität gegenüber Temperaturfluktuationen. Robic und Kollegen [19] machten Stressuntersuchungen an ionenstrahlgestützten Siliziumdioxidschichten. Die Zugspannung einer thermisch verdampften Schicht wurde unter diesen Bedingungen in eine Druckspannung überführt. Eine Steigerung der Brechzahlen wurde von McNally und Kollegen [20] nachgewiesen. Am Beispiel von Hafniumdioxid ließ sich mit Hilfe der gestützten Deposition eine optische Dichte von 2,11 bei einer Wellenlänge von 355 nm erreichen.

Laut Kienel und Röll [21] wird die ionenstrahlgestützte Deposition insbeson-

Ionenenergie	einige 10 bis 100 eV [13]
Substrattemperatur	150 bis 250 °C
Struktur	amorph bis mikrokristallin
Thermische Verschiebung	wenige 1 ppm/K [13]
Schichtstress	wenige 100 MPa Druckspannung

**Tabelle 2.02:** Prozesseigenschaften der ionenstrahlgestützten Deposition. Das verdampfte Ausgangsmaterial schlägt sich unter Ionenbeschuss auf der Substratoberfläche nieder.

dere zur Verbesserung der Adhäsion eingesetzt. Die geringe Temperaturbelastung ermöglicht außerdem Anwendungen bei der Metallisierung von Keramiken, Polymeren und thermisch empfindlichen Legierungen. Bei der Herstellung von Bauteilen der Mikromechanik dient die ionenstrahlgestützte Deposition dem Korrosionsschutz und der Verschleißfestigkeit.

Rückblickend lässt sich das verbesserte Schichtwachstum unter Ionenbombardement auf Atomstöße wenige 1 nm unterhalb der Oberfläche zurückführen. Die Prozessbedingungen und Schichteigenschaften der ionenstrahlgestützten Deposition sind in Tabelle 2.02 zusammengefasst. Im Vergleich zur thermischen Verdampfung lassen sich sowohl Haftungsprobleme als auch Wassereinlagerung verringern. Die Herstellung im Ionenstrahlputterverfahren ermöglicht weitere Verbesserungen beim Schichtwachstum. Der heutige Stand dieser Technik wird im nächsten Abschnitt dieses Kapitels beschreiben.

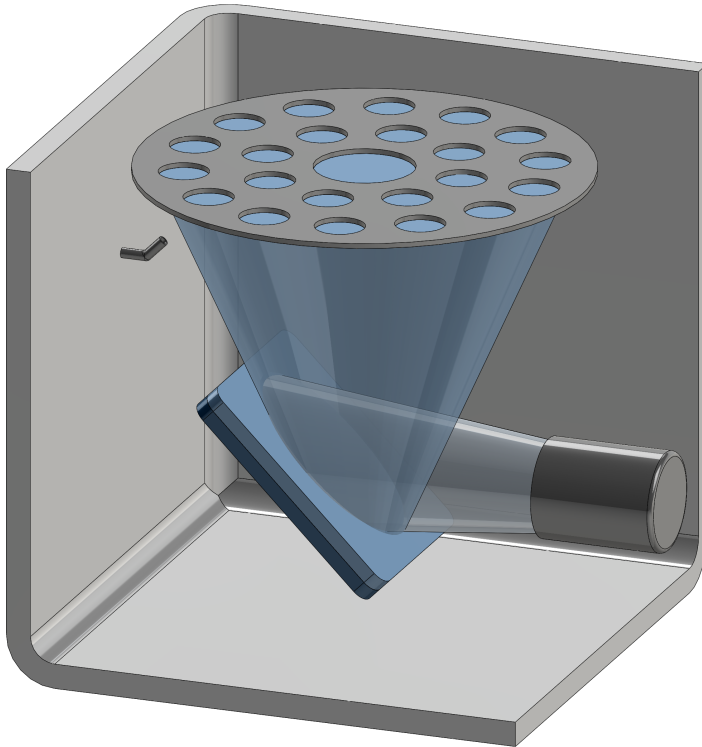
## 2.2 Ionenstrahlputtern

Das Ionenstrahlputtern zählt zu den modernsten Abscheideverfahren im Bereich der optischen Technologien. Es erlaubt die Herstellung von hochwertigen Laserkomponenten für Forschung und Entwicklung. Ionenstrahlgesputterte Optiken ermöglichten laut Wei [22] die Realisierung von Laserkreisel. Diese dienen zur Bestimmung der Drehbewegung in einer Ebene. Die Messung mittels Ringresonator beruht auf dem Sagnac Effekt. Dieser nutzt das Interferenzsignal zweier Lichtwellen mit entgegengesetzter Umlaufrichtung. Laut Aronowitz [23] limitierten bisherigen Komponenten die Detektion geringer Drehbewegungen. Ausschlaggebend war in diesem Fall die Einkopplung von Streulicht in entgegengesetzter Umlaufrichtung. Die Einführung der gesputterten Laserkomponenten in den 1960er Jahren legte den Grundstein für die heutigen Anwendungen. Laserkreisel dienen in der Geodäsie zur Messungen der Erdrotation. Außerdem werden sie in der Luft- und Raumfahrt als Navigationshilfe verwendet.

Beim Ionenstrahlputterverfahren wird das Beschichtungsmaterial unter Zuhilfenahme eines Ionenstrahls herausgeschlagen. Im Vergleich zur gestützten Deposition bildet der hochenergetische Teilchenstrom ein kompaktes Schichtgefüge. Darüber hinaus wird mit Hilfe der schichtbildenden Teilchen eine glatte Oberfläche generiert. Die erste Hälfte dieses Abschnitts beschreibt den grundlegenden Aufbau und die Funktionsweise einer Ionenstrahlputteranlage. Zusätzlich zu den relevanten Wachstumsprozessen beinhaltet die zweite Hälfte eine Diskussion der resultierenden Schichteigenschaften.

### 2.2.1 Aufbau und Funktionsweise

Die wesentlichen Komponenten einer Ionenstrahlputteranlage sind in Abbildung 2.03 dargestellt. In diesem Fall sind zusätzlich zur Ionenquelle sowohl das Be-



**Abbildung 2.03:** Schematischer Aufbau einer Ionenstrahlputteranlage. Unter Zuhilfenahme einer Ionenquelle wird das Arbeitsgas beschleunigt. Im Zuge dessen bombardieren die ionisierten Teilchen das Beschichtungsmaterial. Die obersten Atome und Moleküle werden in Richtung der Substratoberfläche zerstäubt. Mit hoher kinetischer Energie bilden die gesputterten Teilchen den optischen Dünnschichtfilm. Während dieser Zeit ermöglicht die Ionenquelle und Öffnungen in den Gefäßwänden den gezielten Einsatz von Reaktivgasen.

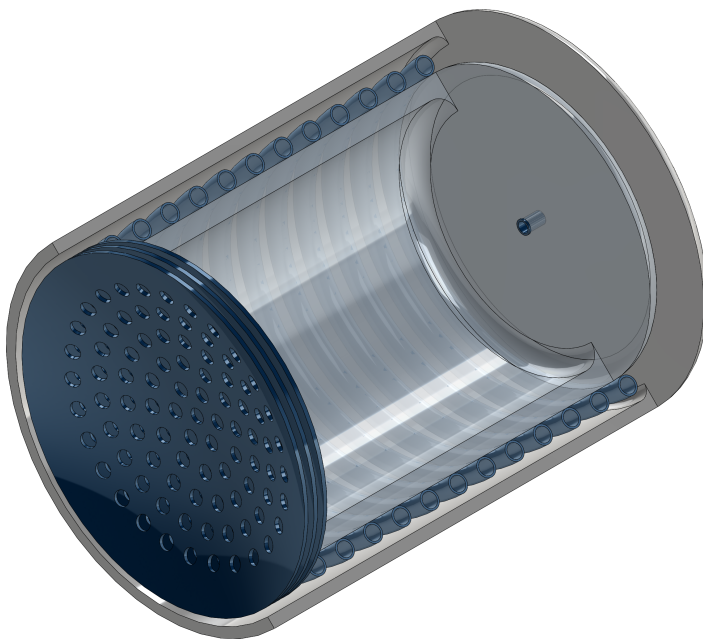
schichtungsmaterial als auch der Substrathalter zu berücksichtigen. Das angeregte Arbeitsgas wird unter Zuhilfenahme eines Gittersystems aus der Ionenquelle extrahiert. Anschließend trifft der Plasmastrahl auf das plattenförmige Beschichtungsmaterial. Im Zuge dessen werden die obersten Atome und Moleküle zerstäubt. Schließlich bilden die hochenergetischen Teilchen auf der Substratoberfläche den optischen Dünnschichtfilm. Im Hinblick auf Zusammenstöße mit umherfliegenden Gasteilchen spielt sich der Beschichtungsprozess in einem Hochvakuumssystem ab. Eine gezielte Zugabe von reaktiven Gasen wird durch die Ionenquelle und Öffnungen in den Gefäßwänden ermöglicht.

Die Verteilung des Beschichtungsmaterials lässt sich unter Zuhilfenahme der Substratrotation homogenisieren. In Übereinstimmung mit den Verdampfungsverfahren kann zusätzlich eine selektive Blende zum Einsatz kommen. Eine Kontamination der optischen Dünnschichten durch Materialien der Anlagenkomponenten soll verhindert werden. Zu diesem Zweck wird das Equipment typischerweise mit Blechen und Folien aus Aluminium verkleidet. Schwenkbare Abdeckungen unterhalb des Substrathalters ermöglichen eine Abschirmung der Optiken. Sie kommen bei der Konditionierung und dem Wechsel des Beschichtungsmaterials zum Einsatz. Beschichtungsanlagen mit einer Schleusenkammer ermöglichen eine weitere Reduzierung der Partikel. Unter diesen Bedingungen wird ein Wechsel der Optiken ohne Belüften der Beschichtungskammer erreicht. Alternativ zur dargestellten Anlagenkonfiguration existieren unter anderem Beschichtungssysteme mit seitlicher

Substratposition. In Folge dessen sollen die Beschichtungsmaterialien in diesem Zusammenhang horizontal eintreffen.

Die Herstellung von gesputterten Dünnschichten erfordert den Einsatz hocheffizienter und betriebsstabiler Ionenquellen. In diesem Fall bilden niedriger Arbeitsdruck und variable Betriebsparameter die Rahmenbedingungen. Entwickelt wurden die Quellen ursprünglich für den von Stuhlinger [24] beschriebenen Einsatz in Rakentriebwerken. Sie dienten in den 1960er Jahren zur Erkundung des Sonnensystems. Bei der Herstellung der gesputterten Dünnschichten sind mit Radiofrequenz betriebene Ionenquellen weit verbreitet. Abbildung 2.04 zeigt den schematischen Aufbau im Inneren des Quellenkörpers. Unter Zugabe des Arbeitsgases betreibt eine Induktionsspule ein ionisierendes Niederdruckplasma. Zueinander ausgerichtete Metallgitter an der Glasbecheröffnung extrahieren die ionisierten Teilchen.

Beim Betrieb wird im Inneren der Ionenquelle ein elektrisches Wirbelfeld erzeugt. Zu diesem Zweck unterliegt die Induktionsspule einem radiofrequenten Wechselstrom. Aufgrund der Bewegung von Elektronen im induzierten Feld kommt es zu ionisierenden Stößen. Durch eine Hochspannung am inneren Gitter wird ein positives Potential erzeugt. Im Bereich der Extraktionsgitter werden die ionisierten Atome und Moleküle des Arbeitsgases abgestoßen. Darüber hinaus lässt sich der Ionenstrahl unter Zuhilfenahme eines negativ geladenen Gitters fokussieren. Ein Auseinanderlaufen der ionisierten Teilchen soll unter diesen Bedingungen verhindert werden. Außerdem können im Rahmen der Ionenstrahlzerstäubung Aufladungseffekte am Beschichtungsmaterial auftreten. In diesem Zusammenhang reicht ein Neutralisator den Plasmastrahl mit Elektronen an. Das extrahierte Arbeitsgas kann eine kinetische Energie von wenigen 1 keV erreichen. Während die-



**Abbildung 2.04:** Aufbau einer mit Radiofrequenz betriebenen Ionenquelle. Durchführungen an der Quellenrückseite versorgen den Glasbecher mit Arbeitsgas. Die Ionisation erfolgt mittels elektrischem Wirbelfeld einer umgebenden Induktionsspule. Gitter an der Öffnung des Glasbechers bilden das Extraktionssystem. Die geladenen Teilchen des Arbeitsgases werden in Folge dessen beschleunigt. Außerdem fokussiert das dreilagige Gittersystem den Ionenstrahl.

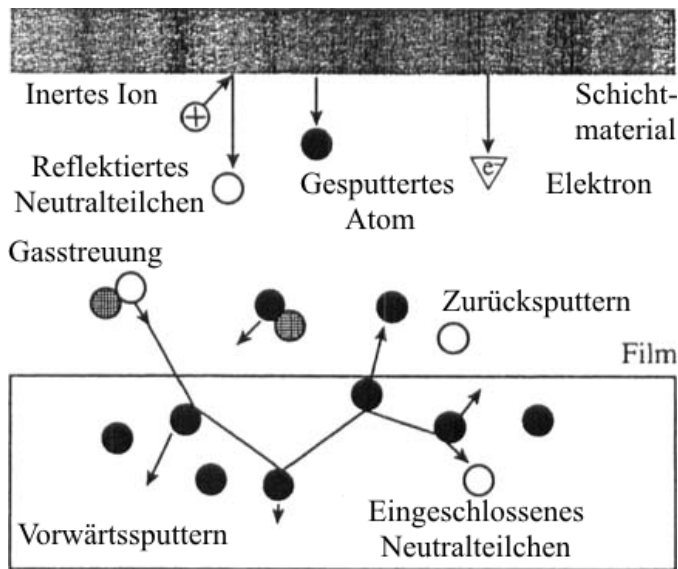
ser Zeit werden im Bereich der Extraktionsgitter typische Stromdichten von etwa  $1 \text{ mA/cm}^2$  herbeigeführt.

Neben der Ionenquelle haben auch die Beschichtungsmaterialien einen großen Einfluss auf die Qualität der gesputterten Dünnschichten. In Übereinstimmung mit den Verdampfungsverfahren besteht das Ausgangsmaterial hauptsächlich aus Metallen oder Halbleitern. Abhängig vom Rohstoff und der Anwendung werden die Beschichtungsmaterialien mittels Gießtechnik, Pulvermetallurgie oder Abscheidungsverfahren gefertigt. Dem Temperatureintrag des Ionenbombardements soll entgegengewirkt werden. Zu diesem Zweck wird das Beschichtungsmaterial über kontaktierte Rückplatten aus Kupfer, Edelstahl oder Molybdän wassergekühlt. Bei der Deposition von funktionalen Schichten sind mehrere Beschichtungsmaterialien erforderlich. Unter Einsatz von Lineartischen oder Drehbewegungen können sie in den Ionenstrahl gefahren werden.

### 2.2.2 Wachstumsprozesse

Die schichtbildenden Teilchen werden durch energetische Ionen aus dem Rohmaterial herausgeschlagen. Nach Wehner und Rosenberg [25] entspricht die Verteilung des Beschichtungsmaterials einer Kosinusfunktion. In diesem Zusammenhang schafft ein senkrecht Ionenbombardement die Voraussetzung. Bei schrägem Ionenbeschuss verlagert sich der Teilchenstrom in Richtung des Ausfallwinkels. Die Größenordnung der resultierenden Abweichung ist von der Bewegungsenergie der einfallenden Teilchen abhängig. Bei Experimenten von Oechsner [26] zeigte die kinetische Energie der zerstäubten Atome eine Maxwellverteilung. Die mittlere Energie lag mit etwa  $10 \text{ eV}$  sehr viel höher als bei den Verdampfungsverfahren. Abbildung 2.05 zeigt das Eintreffen des Beschichtungsmaterials an der Substratoberfläche. Laut Wei und Kollegen [27] können die Teilchen in die aufwachsende Schicht eindringen. Unter diesen Bedingungen wird die aufwachsende Dünnschicht verdichtet ohne gebundene Atome herauszuschlagen. Darüber hinaus trifft auch hochenergetisches Arbeitsgas den optischen Dünnschicht. Der Wachstumsprozess kann in diesem Fall negativ beeinträchtigt werden. Eine weitere Nebenerscheinung bilden im Rahmen der Zerstäubung freigesetzte Sekundärelektronen des Beschichtungsmaterials. Laut Hummel und Guenther [28] führen sie zu einer geringen Temperaturbelastung beim Ionenstrahlputtern.

Die Herstellung von dielektrischen Schichten erfolgt häufig unter Zuhilfenahme einer Reaktivgasatmosphäre. In diesem Zusammenhang wird die Verwendung von metallischen Ausgangsmaterialien ermöglicht. Die Gasteilchen verbinden sich im Hochvakuum oder auf der Substratoberfläche mit dem Beschichtungsmaterial. Bei der Zerstäubung von oxidischen Beschichtungsmaterialien können Reaktivgase das Schichtwachstum unterstützen. Im Hinblick auf den Schichtwechsel bewirkt die Ionenstrahlzerstäubung eine Abstufung des Grenzübergangs von wenigen Atomlagen. Ausschlaggebend ist in diesem Zusammenhang das Eindringen der gesputterten



**Abbildung 2.05:** Wachstumsprozesse beim Ionenstrahlspatternverfahren übersetzt von Windischmann [29]. Das eintreffende Material dringt mit hoher Energie in die optische Dünnschicht ein. In Folge dessen verdichten sich die obersten Atomlagen. Nebenerscheinungen des Sputterverfahrens sind Störstellen infolge von reflektierten oder gestreuten Arbeitsgasen. Außerdem verursachen Sekundärelektronen in diesem Zusammenhang einen Temperatureintrag.

Teilchen. In Folge dessen kann sich darüber hinaus auch die Haftung des Dünnsfilms auf dem Substrat erhöhen. Die Prozesssteuerung erfolgt beim Ionenstrahlspatternverfahren weitgehend automatisiert. Eine hohe Stabilität des Teilchenstroms und eine gute Reproduzierbarkeit beim Schichtwachstum schaffen in diesem Fall die Voraussetzung.

### 2.2.3 Schichteigenschaften und Anwendungsbereiche

Die Prozessbedingungen des gesputterten Schichtwachstums grenzen sich gegenüber der Verdampfungstechnik ab. Gemeinsam mit den resultierenden Schichteigenschaften sind sie in Tabelle 2.03 zusammengefasst. Die gesputterten Dünnsfilme entwickeln Packungsdichten im Bereich des Rohmaterials. Außerdem zeigen sie geringere Variationen der optischen und mechanischen Eigenschaften. Tabata und Kollegen [30] untersuchten gesputterte Siliziumdioxidschichten mit Hilfe der Röntgenphotoelektronenspektroskopie. In diesem Zusammenhang ließ sich stöchiometrische Schichten im Rahmen des reaktiven Sputterverfahrens demonstrieren. Eventuelle Fehlstellen in der amorphen Struktur können im Rahmen einer nachträglichen Temperaturbehandlung ausgeglichen werden. Ausschlaggebend sind in diesem Fall die Diffusionsprozesse auf Grundlage des erhitzten Schichtmaterials. Die hohe Packungsdichte der gesputterten Grundstruktur reduziert die optischen Verluste. Darüber hinaus trägt der geringe Wasseranteil zur thermischen Stabilität der Schichten bei. Verglichen mit Verdampfungsverfahren bewirken die hochenergetischen Teilchen eine geringere Oberflächenrauigkeit. Stressuntersuchungen von D'Heurle [31] zeigen unter Berücksichtigung des Kugelstrahleffekts eine Druckspannung der gesputterten Aluminiumschichten.

---

Teilchenenergie	10 eV [26]
Substrattemperatur	etwa 70 °C [28]
Struktur	amorph [32]
Thermische Verschiebung	wenige 1 ppm/K
Schichtstress	mehrere 100 MPa Druckspannung [29]

---

**Tabelle 2.03:** Prozesseigenschaften des Ionenstrahlputterns. Die Beschichtungsmaterialien werden unter Zuhilfenahme eines Ionenbombardements zerstäubt. In diesem Zusammenhang können sich die Dünnschichtsysteme auf Grundlage einer hohen Teilchenenergie bilden.

Zu den optischen Eigenschaften zählen laut Messungen von Rempe und Kollegen [33] geringe Streulichtaufkommen. In diesem Zusammenhang werden Gesamtverluste im Bereich von unter 1 ppm erreicht. Ausschlaggebend ist die räumliche Abgrenzung von Quellenbetrieb und hochenergetischem Schichtwachstum. Laut Starke und Kollegen [34] liegen die Absorptionsverluste von Hafniumdioxid 5 bis 20 mal höher im Vergleich zur Elektronenstrahlverdampfung. Zurückgeführt wurde das Ergebnis auf reflektiertes Arbeitsgas und Verunreinigungen. Die Brechungsindizes der gesputterten Schichtsysteme sind unter anderem von der Packungsdichte abhängig. Am Beispiel von Hafniumdioxid übersteigen sie mit 2,05 bis 2,20 die Brechzahlen der thermischen Verdampfungsverfahren. Zu den mechanischen Eigenschaften des Ionenstrahlputterns zählt die hohe Substrathaftung. Außerdem verbessert sich die Widerstandsfähigkeit gegenüber Verschleißprozessen und Plasmaabstrahlung.

Das Ionenstrahlputterverfahren wird im Rahmen von Spezialanwendungen eingesetzt. Belastungsfähige Präzisionsoptiken dienen in diesem Zusammenhang als Beispiel. Jenseits von Forschung und Wissenschaft limitieren hohe Investitionskosten die Verbreitung der Ionenstrahlzerstäubung. Außerdem ist sowohl das Fassungsvermögen als auch die Beschichtungsrate gering im Vergleich zum thermischen Verdampfungsverfahren. Die Anwendungsgebiete reichen nach Kärtner und Kollegen [35] von der Fertigung integrierter Schaltkreise bis zur Herstellung gechirpter Spiegel. Sputteranlagen mit benachbarten Ausgangsmaterialien ermöglichen darüber hinaus die Deposition von Rugatefiltern. Laut Lee und Kollegen [36] steigern sie die Leistungsfestigkeit. Ungeachtet dessen bietet sekundäres Ionenbombardement im Rahmen der Wachstumsprozesse eine zusätzliche Modifikationsmöglichkeit.

Zusammenfassend definieren die Stoßprozesse der hochenergetischen Teilchen das Schichtwachstum. Die verlustarmen Schichten mit hoher Leistungsfestigkeit werden in Spezialanwendungen eingesetzt. Im Hinblick auf kürzere Wellenlängen bildet die Untersuchung von neuartigen Beschichtungsmaterialien ein aktuelles Forschungsgebiet. Die Mikrostruktur der optischen Dünnschichten soll im nächsten Abschnitt dieses Kapitels erläutert werden.

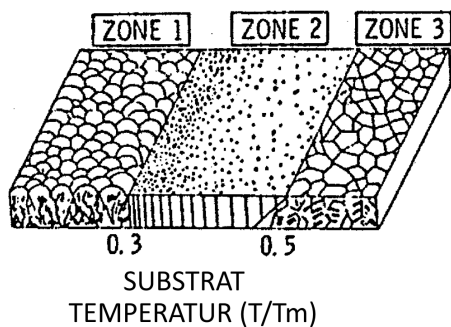


## 2.3 Mikrostrukturen

Unter Berücksichtigung der Wachstumsprozesse erläutern Strukturmodelle die optischen und mechanischen Eigenschaften der Dünnschichten. Im Jahre 1938 untersuchte Hass [37] aufgedampfte Metalle in Abhängigkeit der Temperatur. Sowohl Korngröße als auch Orientierung erklärten in diesem Zusammenhang erstmals die abweichenden Literaturwerte optischer Konstanten. Die Schichtgefüge werden unter anderem im Strukturzonenmodell von Movchan und Demchishin [38] beschrieben. Ausschlaggebend ist das Verhältnis von Substrattemperatur zu Schmelzpunkt des Beschichtungsmaterials. Dieser Abschnitt beschreibt die Strukturzonenmodelle am Beispiel von Schichtmaterialien für den ultravioletten Spektralbereich. Zusätzlich zur Substratmorphologie werden auch die Einflüsse von Schichtunreinheiten erläutert.

Das Strukturzonenmodell nach Movchan und Demchishin beschreibt die Mikrostruktur einer physikalischen Gasphasenabscheidung. Es beruht auf der Deposition von Metallen und Dielektrika. Das Schichtgefüge wandelt sich in diesem Zusammenhang mit der Aktivierungsenergie. In Abbildung 2.06 sind die aufgewachsenen Mikrostrukturen dargestellt. Unter Berücksichtigung der Diffusionsprozesse erfolgt die Unterteilung über das Verhältnis von Substrattemperatur zu Materialschmelzpunkt. Der erste Strukturbereich soll bis zu einem Temperaturverhältnis von 0,3 reichen. Die eintreffenden Teilchen erstarren aufgrund der niedrigen Aktivierungsenergie im äußeren Schichtbereich. In Anbetracht der kegelförmigen Mikrostruktur bilden die anhaftenden Schichtatome eine gewölbte Schichtoberfläche.

Laut Kaiser [39] weicht das kegelförmige Schichtgefüge im zweiten Strukturbereich einer kolumnaren Kristallstruktur. In diesem Zusammenhang bilden sich Verwerfungen entlang der Korngrenzen. Aktivierungsenergien zwischen 0,1 und 0,3 eV ermöglichen eine Oberflächendiffusion der Schichtatome. In Folge dessen entsteht im Bereich der Mikrokristallite eine ebene Schichtoberfläche mit mattem Erscheinungsbild. Steigende Teilchenenergien verbreitern die Säulenstruktur des optischen Dünnsfilms. Das eingesetzte Substrat erreicht schließlich die halbe Schmelztemperatur des Beschichtungsmaterials. Der dritte Strukturbereich von Movchan und Demchishin beinhaltet die verbleibenden Temperaturverhältnisse.

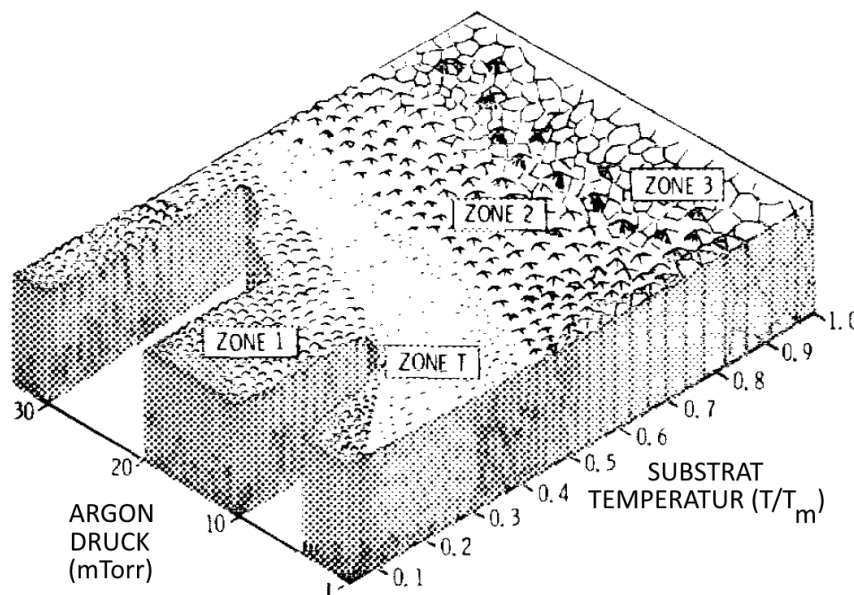


**Abbildung 2.06:** Strukturzonenmodell nach Movchan und Demchishin aus [38]. Das Wachstumskonzept beschreibt das Mikrogefüge von optischen Schichten. Das Verhältnis von Substrattemperatur zu Schmelzpunkt des Schichtmaterials  $T/T_m$  bildet die Grundlage. Die kegelförmige Filmstruktur aus Zone 1 wird über das säulenförmige Schichtgefüge von Zone 2 in die grobkörnigen Kristallite der Zone 3 überführt.

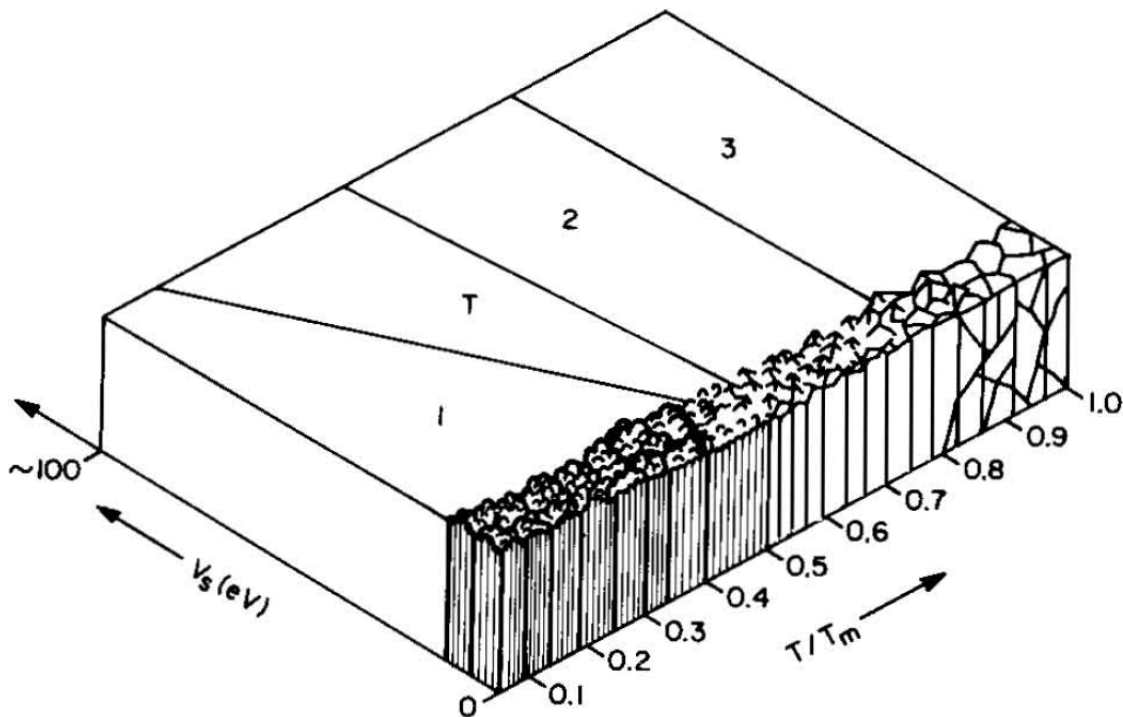
Volumendiffusion prägt aufgrund der hohen Aktivierungsenergie die Strukturbildung im aufwachsenden Schichtsystem. Die gleichachsigen Kristallite wachsen in diesem Fall mit steigender Substrattemperatur. Unter diesen Bedingungen bildet sich schließlich eine dichte Mikrostruktur mit glänzender Oberfläche.

Im Jahre 1974 erweiterte Thornton [40] das Strukturzonenmodell nach Movchan und Demchishin. In diesem Zusammenhang berücksichtigte er die Gasatmosphäre gesputterter Dünnschichten. Das Schichtwachstumsmodell nach Thornton ist in Abbildung 2.07 dargestellt. Zwischen den ersten beiden Strukturbereichen wird eine Übergangszone definiert. Sie beschreibt den Einfluss des Arbeitsgases auf refraktäre Verbindungen und mehrphasige Legierungen. Laut Thornton [41] bilden Abschattungseffekte und Oberflächendiffusion eine faserförmige Mikrostruktur. Darüber hinaus ergibt sich im Rahmen der Übergangszone eine gewölbte Schichtoberfläche. In Anbetracht der geringeren Teilchenmobilität steigt die Übergangstemperatur mit zunehmendem Argonaufkommen.

Messier und Kollegen [42] beschrieben im Jahre 1984 die Wachstumsprozesse unter Teilchenbombardement. In diesem Fall schaffte das Strukturzonenmodell nach Thornton den Ausgangspunkt. Das Schichtwachstumsmodell charakterisiert die Mikrostruktur der ionenstrahlgestützten Deposition unter Berücksichtigung des Substratpotentials. Das zusätzliche Teilchenbombardement erweitert den Übergangsbereich in die erste Strukturzone. In Abbildung 2.08 wird der Verlauf der Übergangstemperatur dargestellt. Niedrige Substrattemperaturen können in Folge dessen mit Hilfe eines Ionenbombardements kompensiert werden. Verglichen mit den Kristalliten der verdampften Dünnschichten besitzen die ionenstrahlgestützten Schichten eine feinkörnige Mikrostruktur.



**Abbildung 2.07:** Strukturzonenmodell nach Thornton aus [41]. Thornton berücksichtigt die Gasatmosphäre von gesputterten Dünnschichten. Die Zone T kennzeichnet das faserförmige Schichtgefüge von refraktären Verbindungen und mehrphasigen Legierungen.



**Abbildung 2.08:** Strukturzonenmodell nach Messier aus [42]. Im Jahre 1984 beschrieben Messier und Kollegen die Wachstumsprozesse unter Teilchenbombardement. Das Strukturzonenmodell nach Thornton schafft in diesem Zusammenhang die Ausgangssituation. Unter Zuhilfenahme hochenergetischer Ionenbeaufschlagung wird die Beweglichkeit der Schichtatome gesteigert. Der Übergangsbereich erweitert sich in Folge dessen mit steigendem Substratpotential  $V_s$  in die erste Strukturzone.

Zusätzlich zur Substrattemperatur beeinflussen Verunreinigungen den Wachstumsprozess der optischen Dünnschichten. In Anbetracht der umgebenden Atmosphäre können sowohl Arbeitsgase als auch Kohlenwasserstoffe eingebunden werden. In diesem Zusammenhang verändert sich unter anderem die innere Spannung der Dünnschichtsysteme. Verunreinigungen auf der Substratoberfläche beinhalten laut Grovenor und Kollegen [43] weitere Einflussfaktoren für das Schichtwachstum. Die Inkorporation von Fremdatomen im Wachstumsprozess wird durch das Strukturzonenmodell nach Barna und Adamik [44] berücksichtigt. Das Wachstumskonzept aus dem Jahr 1995 beschreibt die Mikrostruktur einer optischen Dünnschicht in Abhängigkeit der Verunreinigung.

Im ersten Strukturbereich von Movchan und Demchishin verharrt die eingebrachte Kontamination am Schichtgefüge. Verstärkte Keimbildung schmälert in Folge dessen die faserförmige Mikrostruktur der Dünnschichtsysteme. Im benachbarten Übergangsbereich von Messier werden die Verunreinigungen in Richtung der Korngrenzen gedrängt. Anschließend erreicht das Substratmaterial den Temperaturbereich der zweiten Wachstumszone. Unter diesen Bedingungen bedeckt

der eintreffende Kontaminant die Korngrenzen der säulenförmigen Mikrostruktur. Bei den Aktivierungsenergien der dritten Strukturzone verursacht die Kontamination eine vollständige Separation der Mikrokristallite. Ungeachtet der Strukturzonen bewirken starke Verunreinigungen der Beschichtungsprozesse ein amorphes Schichtgefüge. Die Kristallisationskeime unterbinden in diesem Zusammenhang die Strukturbildung der aufwachsenden Dünnschichtsysteme.

Zusammenfassend beschreiben Wachstumsmodelle die mechanischen und optischen Eigenschaften auf Grundlage der Prozessparameter. Die Teilchenmobilität klassifiziert den Wachstumsprozess von der thermischen Verdampfung bis zum Ionenstrahlsputterverfahren. In diesem Zusammenhang lassen sich unter anderem die Simulationen von realen Schichtgefügen verbessern. Erweiterte Strukturzonenmodelle berücksichtigen darüber hinaus die Substratmorphologie und Verunreinigungen im Schichtgefüge. Zusätzlich zu den Mikrostrukturen der Wachstumsmodelle prägen auch Fehlstellen und Zwischengitterplätze den Dünnschichtfilm. Der nächste Abschnitt charakterisiert am Beispiel von Hafniumdioxid die Merkmale einer optischen Bandstruktur.

## 2.4 Hafniumdioxid in optischen Schichten

Hafniumdioxid ist besonders in Dünnschichtsystemen mit Anwendungen im ultravioletten Spektralbereich weit verbreitet. Ausschlaggebend sind geringe Absorptionsverluste und eine hohe Leistungsfestigkeit. Dirk Coster und George von Hevesy entdeckten Hafnium im Jahre 1923 unter Einsatz von Röntgenstrahlung. Das Übergangsmetall wurde laut Habashi [45] nach der dänischen Hauptstadt Kopenhagen benannt. Unter Zuhilfenahme des Beschichtungsmaterials lassen sich am National Ignition Facility die technischen Abläufe der Kernfusion erforschen. Stolz und Kollegen [46] nutzen die Dünnschichten zur Vorbereitung der ultravioletten Laserstrahlung. Zusätzlich zur Mikrostruktur beeinflussen elektronische Übergänge die optischen Eigenschaften des Beschichtungsmaterials. Dieser Abschnitt erläutert die Eigenschaften von Hafniumdioxidschichten im Hinblick auf die optischen Technologien. Unter Berücksichtigung eventueller Defektzustände wird außerdem die elektronische Bandstruktur der Dünnschichtsysteme betrachtet.

Hafniumdioxid bezeichnet die chemische Verbindung aus einem Hafniumatom und zwei Sauerstoffatomen. Im Rahmen der optischen Technologien dient es als hochbrechendes Beschichtungsmaterial. Der farblose Feststoff besitzt eine Rohdichte von  $9,68 \text{ g/cm}^3$  unter Standardbedingungen. Darüber hinaus verfügt er laut Ruh und Corfield [47] über ein monoklines Kristallsystem. Das Übergangsmetall Zirkonium teilt viele Eigenschaften von Hafnium. Unter Berücksichtigung des Extraktionsverfahrens verkompliziert sich in Folge dessen die Materialgewinnung. Khoshman und Kordes [48] untersuchten magnetrongesputterte Hafniumdioxidschichten. Neben einer Bandkantenenergie von  $5,68 \text{ eV}$  wurden Brechungsindizes

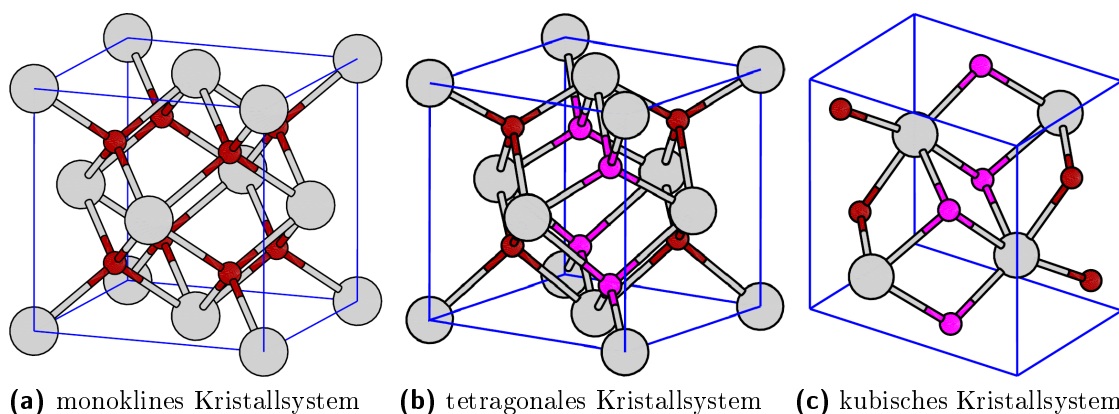
Schmelztemperatur	2900 °C [49]
Rohdichte	9,68 g/cm <sup>3</sup> [49]
Kristallsystem	monoklin (bis 1500 °C)[47]
Bandlücke	5,68 eV [48]
Brechungsindex	1,86 bis 2,15 (200 bis 1400 nm) [48]

**Tabelle 2.04:** Materialeigenschaften von Hafniumdioxid. Hafniumdioxid umfasst die chemische Verbindung zwischen einem Hafniumatom und zwei Sauerstoffatomen. Im Rahmen der optischen Technologien dient es als hochbrechendes Beschichtungsmaterial.

zwischen 1,86 und 2,15 nachgewiesen. Die optischen Eigenschaften sind gemeinsam mit den beschriebenen Stoffmerkmalen in Tabelle 2.04 zusammengefasst.

Das Energiebändermodell ermöglicht eine theoretische Betrachtung der Hafniumdioxidschicht. In Folge dessen können die Energiezustände des Kristallgitters beschrieben werden. Außerdem lassen sich Aussagen zur Wahrscheinlichkeit der elektrischen Übergänge treffen. Im Jahre 1928 entwickelte Bloch [50] das Energiebändermodell der Festkörperphysik. Zu diesem Zweck wurden mit Hilfe von Wellenfunktionen die Grundzustände eines periodischen Potentials charakterisiert. Durch Niveaufenspaltung bilden sich in diesem Fall die kontinuierlichen Energiebänder der Halbleitermaterialien.

Abbildung 2.09 zeigt unterhalb von 1500 °C das monokline Kristallsystem von Hafniumdioxid. Anschließend bildet Hafniumdioxid eine tetragonale Kristallstruktur. Oberhalb von 2700 °C ist das Gittersystem laut Janke [49] kubisch. Das Valenzband beinhaltet die Energieniveaus der gebundenen Zustände. Laut Foster [1] wird es vom Sauerstoff 2*p* Atomorbital gebildet. Die ungebundenen Zustände werden durch das Leitungsband zusammengefasst. Bei Hafniumdioxidschichten bildet



**Abbildung 2.09:** Kristallsysteme von Hafniumdioxid aus [51]. Unterhalb von 1500 °C existiert eine monokline Gitterstruktur. Außerdem besitzt Hafniumdioxid ein tetragonales Kristallsystem. Die Gitterstruktur oberhalb von 2700 °C ist kubisch.

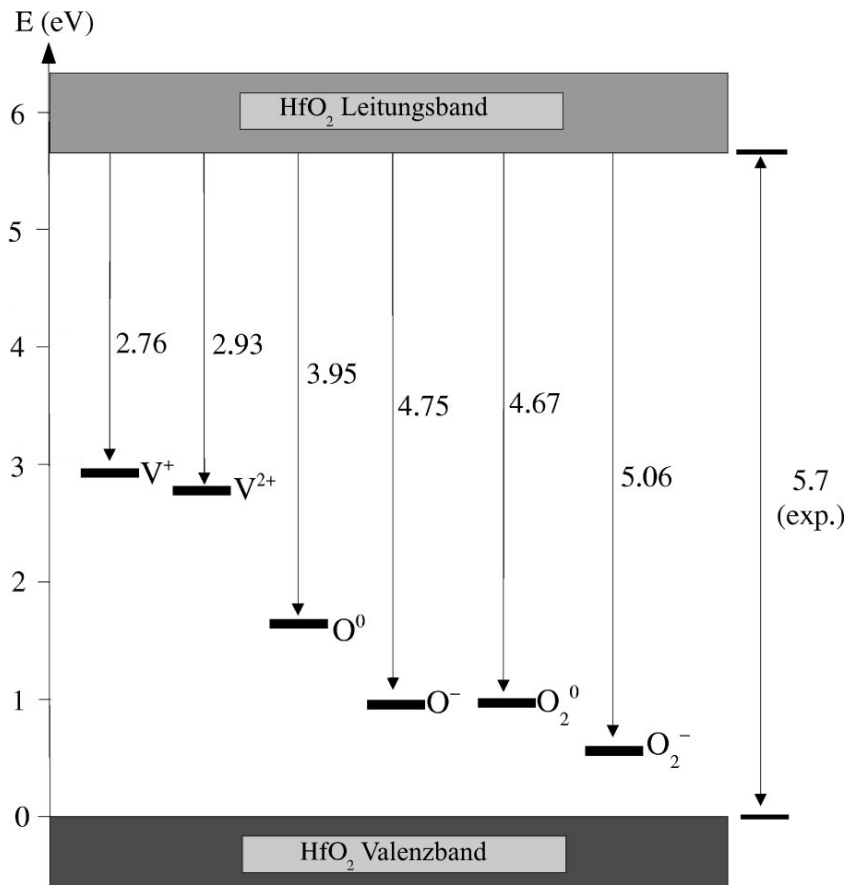
das Hafnium  $5d$  Atomorbital die Grundlage. Unter Berücksichtigung von Holleman und Kollegen [52] ist Hafniumdioxid als elektrischer Isolator zu charakterisieren. Ausschlaggebend ist die Bandlücke zwischen Oberkante des Valenzbandes und Unterkante des Leitungsbandes.

Defekte können die Elektronenzustände im Bändermodell von Hafniumdioxid verschieben. Sie werden durch Fehlstellen oder Zwischengitterplätze der monoklinen Gitterstruktur verursacht. In Folge dessen verändern die resultierenden Energieniveaus die optischen Eigenschaften. Die Störstellen der optischen Dünnschichten können im Rahmen unterstöchiometrischer Wachstumsprozesse entstehen. Außerdem sollten Sauerstoffablagerungen in der monoklinen Gitterstruktur berücksichtigt werden. Die defektbehafteten Hafniumoxidschichten wurden mittels Dichtefunktionaltheorie berechnet. In diesem Zusammenhang zeigten sich Energieniveaus in der verbotenen Zone. Die elektronischen Übergänge sind in Abbildung 2.10 dargestellt. Sie wurden durch Fehlstellen und Zwischengitterplätze des Reaktivgases verursacht.

Das Energiebändermodell beschreibt die defektinduzierten Übergänge ausgehend von der Leitungsbandkante. Ein Sauerstoffmangel erzeugt im Rahmen der Wachstumsprozesse einen hochenergetischen Elektronenzustand. Untersucht wurden die positiv geladenen Fehlstellen der Hafniumdioxidschicht am Beispiel der monoklinen Gitterstruktur. In diesem Zusammenhang ist neben dem dreifach koordinierten Sauerstoff auch mindestens ein Elektron zu entnehmen. Bei einfach geladenen Fehlstellen wurde ein elektronischer Übergang von 2,76 eV ermittelt. Eine Übergangsenergie von 2,93 eV charakterisiert eine Fehlstelle mit doppelter Ladungszahl.

Unter Zuhilfenahme der Dichtefunktionaltheorie lassen sich auch die Auswirkungen von inkorporiertem Sauerstoff untersuchen. Der Zwischengitterplatz befindet sich in diesem Zusammenhang seitlich des Sauerstoffatoms. Unter Verwendung von atomarem Sauerstoff entsteht unter diesen Bedingungen eine kovalente Bindung. Bezüglich der Leitungsbandkante wurde eine Übergangsenergie von 3,95 eV berechnet. Unter Berücksichtigung gefangener Elektronen lassen sich darüber hinaus Übergangsenergien von 4,75 eV feststellen. Im Rahmen von Diffusionsprozessen und chemischen Reaktionen können Defektzustände auch durch molekularen Sauerstoff induziert werden. Elektronenzustände durch ungeladenes Reaktivgas sollen eine Übergangsenergie von 4,67 eV besitzen. Bei negativer Ladung wird die Bindung zum dreifach koordinierten Sauerstoff verweigert. Unter diesen Bedingungen wurde ein elektronischer Übergang von 5,06 eV berechnet.

Rückblickend besitzt Hafniumdioxid einen hohen Brechungsindex und geringe Absorptionsverluste. Im Zuge dessen begründet sich der Einsatz in optischen Schichten des ultravioletten Spektralbereichs. Unter Standardbedingungen bildet das hochbrechende Beschichtungsmaterial ein monoklines Kristallsystem. Defektinduzierte Übergänge der verbotenen Zone schmälern die optischen Eigenschaften des Festkörpers. Fehlstellen und Zwischengitterplätze des Reaktivgases bilden in



**Abbildung 2.10:** Defektinduzierte Energieniveaus in monoklinem Hafniumdioxid verändert von [1]. Das Banddiagramm zeigt die elektronischen Übergänge ausgehend vom Leitungsband. Sie beschreiben Fehlstellen V und Zwischen-gitterplätzen O an dreifach koordiniertem Sauerstoff. Die Fehlstellen können unter anderem durch unterstöchiometrisches Schichtwachstum entstehen.

diesem Zusammenhang die Grundlage. Foster und Kollegen [53] liefern weitere Berechnungen zur Inkorporation und Diffusion von Sauerstoff. Der letzte Abschnitt dieses Kapitels wiederholt die wesentlichen Grundlagen der Beschichtungstechnik.

## 2.5 Zusammenfassung

Die Grundlagen des Schichtwachstums sollen einen Einstieg in die Weiterentwicklung der konventionellen Zerstäubungsprozesse bieten. Optische Schichten für Anwendungen im ultravioletten Spektralbereich bildeten in diesem Zusammenhang den Schwerpunkt. Das Beschichtungsmaterial einer Verdampferquelle kondensiert auf der Substratoberfläche. Aufgrund der geringen Bewegungsenergie besitzen die Dünnschichten eine poröse Mikrostruktur. Bei der gestützten Deposition verdichtet ein Teilchenbombardement die aufwachsenden Schichten. Die höchste Packungsdichte wird im Ionenstrahlsputterverfahren erzielt. In diesem Fall zerstäuben energetische Plasmateilchen das Ausgangsmaterial. Sekundäres Teilchenbombardement ermöglicht in Anlehnung an die gestützte Deposition eine zusätzliche Energiezufuhr.

Schichtstrukturen verbinden die Prozessbedingungen mit den mechanischen und optischen Eigenschaften. In diesem Zusammenhang beschreiben temperaturabhängige Strukturzonenmodelle die Wachstumsprozesse. Sie reichen von der Verdampfungstechnik über die ionenstrahlgestützte Deposition bis zum Ionenstrahlsputterverfahren. Darüber hinaus wurden die Gitterdefekte einer monoklinen Hafniumdioxidschicht mit Hilfe des Energiebändermodells dargestellt. In diesem Zusammenhang lassen sich Fehlstellen und Zwischengitterplätze der optischen Dünnschichtsysteme berücksichtigen. Im Hinblick auf die verbesserten Schichtmaterialien soll unter anderem ein Mischungskonzept entwickelt werden. Das folgende Kapitel beschreibt die Herstellung und Charakterisierung der binären Materialkombinationen. Darüber hinaus sollen die verbesserten Schichtmaterialien am Beispiel eines ultravioletten Lasersystems erprobt werden.



---

# MATERIALMISCHUNGEN MIT HAFNIUMDIOXID

Unter Zuhilfenahme von Materialmischungen können spezielle optische und mechanische Eigenschaften realisiert werden. In diesem Zusammenhang eröffnen sich maßgeschneiderte Lösungen für Anwendungen im Bereich der Forschung und Entwicklung. Lowdermilk und Milam [54] konnten durch Gradientenindexprofile die Leistungsfestigkeit von Antireflexbeschichtung verbessern. Im Rahmen dieses Kapitels dient das Mischungskonzept der Entwicklung von verbesserten Hafniumoxidschichten. Unter Zuhilfenahme von Einzelschichten werden die Eigenschaften im ultravioletten Spektralbereich charakterisiert. Die anwendungsorientierte Erprobung der Dünnschichten erfolgt am Beispiel eines ultravioletten Lasersystems.

Die Fertigungsprozesse der Einzelschichtsysteme bilden den Ausgangspunkt dieses Kapitels. Anschließend werden auf Grundlage der Brecheigenschaften die Mischungsverhältnisse bestimmt. Darüber hinaus beinhaltet die Charakterisierung sowohl die Absorptionsverluste als auch das Streulichtaufkommen. Zur Identifikation defektinduzierter Energieniveaus folgt eine Photolumineszenzanalyse der ionenstrahlgesputterten Materialmischungen. Der letzte Abschnitt dieses Kapitels beschreibt die ausgewählten Materialkombinationen unter Anwendungsbedingungen.

## 3.1 Deposition einschichtiger Materialmischungen

Unter Zuhilfenahme von benachbarten Ausgangsmaterialien können beliebige Mischungsverhältnisse hergestellt werden. In Folge dessen ist eine Maßanfertigung der optischen Dünnschichtsysteme unter Berücksichtigung der Anwendungsbereiche möglich. Im Hinblick auf die Charakterisierung der optischen Eigenschaften sollen einlagige Materialmischungen deponiert werden. Sowohl Aluminiumoxid als

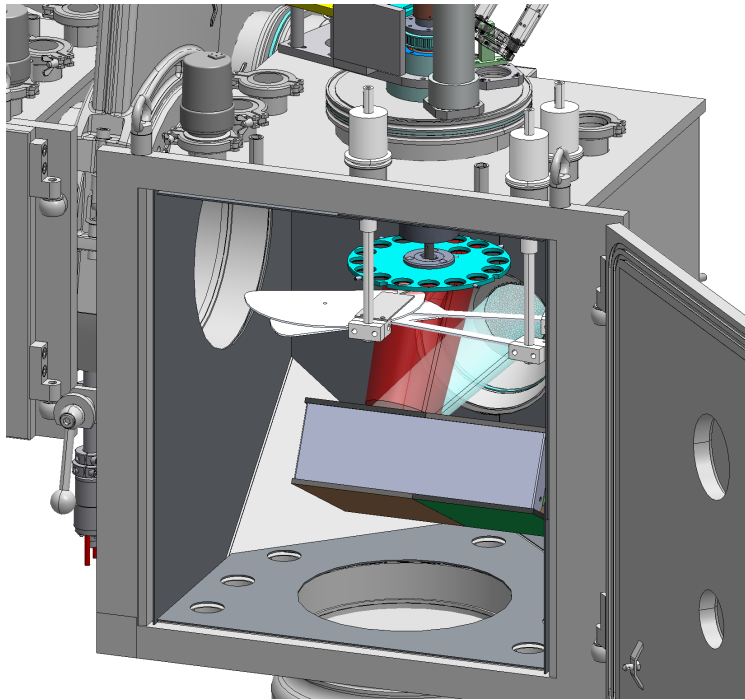
auch Siliziumdioxid dienen im Rahmen der Ionenstrahlzerstäubung als Materialzusätze. Zu Beginn liefert der Abschnitt eine Beschreibung der eingesetzten Ionenstrahlsputteranlage. Außerdem sollen die eingesetzten Beschichtungsmaterialien erläutert werden. Die Herstellungsprozesse mit Hilfe partiell gesputterter Bereichsmaterialien vervollständigen den Abschnitt.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Beimischung mit Hilfe von Aluminiumoxid oder Siliziumdioxid. Die Absorptionsverluste und das Streulichtaufkommen sollen in Folge dessen reduziert werden. Aluminiumoxid lässt sich unter anderem im ultravioletten Spektralbereich verwenden. Auf Grundlage geringer Defektdichten bietet es ein hohes Transmissionsverhalten. Die Abscheideverfahren reichen von der thermischen Verdampfung bis zum Ionenstrahlsputterverfahren (siehe Abschnitt 2.1). Im Hinblick auf die Verdampfungsverfahren sollte die Schmelztemperatur von 2050 °C berücksichtigt werden. Unter Zuhilfenahme leistungsfester Aluminiumoxidschichten verbesserten Kaiser und Kollegen [55] die dielektrischen Beschichtungen eines Excimerlasers. Neben Aluminiumoxid findet auch Siliziumdioxid eine breite Anwendung im Bereich der optischen Technologien. In Kombination mit optisch dichteren Dünnschichten ermöglicht das Beschichtungsmaterial eine effiziente Filterherstellung. Der große Transmissionsbereich qualifiziert Siliziumdioxid für zahlreiche Substratmaterialien. Darüber hinaus zeigt das niedrigbrechende Beschichtungsmaterial eine hohe Temperaturbeständigkeit.

Im Hinblick auf die Charakterisierung werden die einlagigen Materialkombinationen mit einer optischen Dicke von 1064 nm hergestellt. Ausschlaggebend ist diesem Zusammenhang der Kompromiss aus Messgenauigkeit und Beschichtungsdauer. Zusätzlich zur Quarzglassorte Suprasil 2 werden unter Berücksichtigung der Streulichtuntersuchungen auch einschussfreie SQ2 Substrate eingesetzt.

Die optischen Dünnschichten werden in einer Ionenstrahlsputteranlage mit separater Substratschleuse hergestellt. Darüber hinaus verfügt das Beschichtungssystem über eine Vakuumkammer zur Metallabscheidung. Ursprünglich diente das Depositionssystem laut Weichelt und Voss [56] der lötbaren Vergütung von Scheibenlasern. Die Metallkammer ermöglicht das Deponieren von Kupfer, Nickel, Gold und Chrom. Unter Zuhilfenahme eines Schwingquarzes können die Beschichtungsprozesse des eingesetzten Gleichstromsputterverfahrens gesteuert werden. Die gemeinsame Substratschleuse dient der kontaminationsarmen Bestückung des Depositionssystems. Darüber hinaus ermöglicht eine integrierte Mikroskopvorrichtung die visuelle Inspektion der Dünnschichtsysteme. Ein Substratmanipulator transferiert die optischen Komponenten zwischen der Schleusenkammer und den Beschichtungsbereichen.

In Abbildung 3.01 ist die Vakuumkammer zur Herstellung der ionenstrahlgesputterten Dünnschichtsysteme dargestellt. Die schichttragenden Komponenten gelangen über die benachbarte Substratschleuse in das Beschichtungssystem. Im Hinblick auf die Instandhaltung beinhaltet der Zerstäubungsbereich eine großformatige Kammertür. Unter Berücksichtigung verschiedener Druckmesssysteme erzeugt die



**Abbildung 3.01:** Konstruktionszeichnung der Ionenstrahlsputteranlage. Eine Turbomolekularpumpe im Kammerboden dient zur Evakuierung des Beschichtungssystems. Auf der linken Seite befindet sich eine Substratschleuse. Die hochenergetischen Teilchen werden an der Rückwand mit Hilfe einer radiofrequenten Ionenquelle emittiert. Im Mittelpunkt trägt eine verfahrbare Halterung die vier Beschichtungsmaterialien.

bodenseitige Turbomolekularpumpe das Hochvakuum. Die Beschichtungsmaterialien werden mit Hilfe einer leistungsstarken Ionenstrahlquelle zerstäubt.

Die Ionenquelle für Materialbearbeitung mit einem Durchmesser von 100 mm befindet sich in der Kammerrückwand. Zum stabilen Quellenbetrieb gelangen wenige Standardkubikzentimeter Argon pro Minute in den Quarzbecher. Unter Zuhilfenahme eines Anpassungsnetzwerks wird der Induktionsspule eine Leistung von wenigen 100 W bereitgestellt. Eine Wasserkühlung im hohlen Leitungskern der Induktionsspule kompensiert die freigesetzte Wärmeenergie. Im Bereich der Becheröffnung bilden drei Titangitter mit einem Lochkreisdurchmesser von 80 mm das Extraktionssystem. In diesem Zusammenhang speisen separate Netzteile mit einer maximalen Hochspannung von 2 kV die Ionenstrahlquelle.

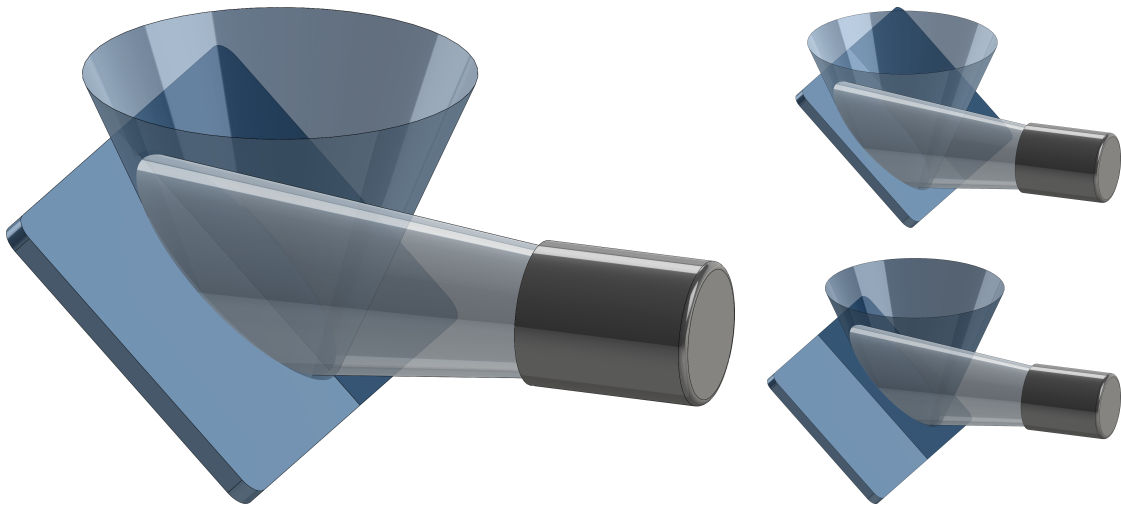
Die plattenförmigen Sputtermaterialien mit einer Kantenlänge von 150 und 200 mm bilden das Zentrum der Vakuumkammer. Im Rahmen des Ionenbombardements müssen die Ausgangsstoffe thermisch stabilisiert werden. Zu diesem Zweck kontaktieren wassergekühlte Kupferplatten die Schichtmaterialien mit Hilfe einer nanoreaktiven Fügefolie. Der einarmige Halteraufbau ermöglicht die Kombination von vier Beschichtungsmaterialien. In Folge dessen ist die gesamte Konstruktion in Translation und Rotation motorisiert. Im Hinblick auf die Schichtdickenverteilung können die Sputtermaterialien um den Ausgangswinkel schwenken. Neben 99,9 % reinem Hafnium bilden bordotiertes Silizium und Aluminium der Reinheit 99,999 % die Ausgangsmaterialien.

Die binären Materialkombinationen werden unter Zuhilfenahme von benachbar-

ten Ausgangsmaterialien hergestellt. In Abbildung 3.02 ist die Zerstäubung der beiden Bereichsmaterialien dargestellt. Die Verfahrsposition bestimmt in Folge dessen das Mischungsverhältnis der verwendeten Beschichtungsmaterialien. Unterschiedlichen Zusammensetzungen der Materialkeule kann mit Hilfe der Substratrotation entgegengewirkt werden. Zusätzlich zu den Verfahrspositionen bestimmen die Depositionsraten der beiden Beschichtungsmaterialien das Mischungsverhältnis. Das Mischungskonzept kann durch komplexere Übergangsgeometrien und zusätzliche Ausgangsmaterialien erweitert werden.

Im Rahmen des Mischungskonzepts sollen die Hafniumdioxidschichten mit Aluminiumoxid und Siliziumdioxid kombiniert werden. Unter Zuhilfenahme der verfahrenbaren Beschichtungsmaterialien lassen sich kontinuierliche Mischungsverhältnisse deponieren. In Tabelle 3.01 sind die Prozessgase der realisierten Materialmischungen dargestellt. Die Nullposition des verwendeten Linearmotors schafft in diesem Zusammenhang den Ausgangspunkt. Das Beschichtungssystem wechselt etwa 162 mm von der niedrigbrechenden zur hochbrechenden Materialseite.

Die Ionenquelle lässt sich unter Zuhilfenahme eines Medientableaus mit hochreinem Argongas versorgen. Die ionisierten Teilchen werden mit einer kinetischen Energie von 1,6 keV extrahiert. Unter diesen Bedingungen lässt sich im Rahmen des Schichtwachstums eine Stromstärke von etwa 160 mA aufbringen. Die metallischen Beschichtungsmaterialien werden im Hinblick auf die optischen Eigenschaften mit einer Sauerstoffatmosphäre kombiniert. In Folge dessen sind die Dünnschichten einem Kammerdruck von  $3E-4$  mbar ausgesetzt. Die optischen Komponenten werden darüber hinaus mit einer Substrattemperatur von etwa  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  belastet.



**Abbildung 3.02:** Schematische Anordnung der partiellen Zerstäubung. Die nebeneinanderliegenden Ausgangsstoffe ermöglichen eine kontinuierliche Materialmischung. Auf Grundlage der Sputterverteilung lässt sich das Mischungsverhältnis bestimmen. Darüber hinaus müssen auch die Depositionsraten der Schichtmaterialien berücksichtigt werden.

Prozessparameter	HfPos	HfSi1	HfSi2	HfSi3	SiPos
Position [mm]	161,84	116,92	105,87	94,80	0,15
Argon [sccm]	2,46	2,48	2,48	2,48	2,47
Sauerstoff [sccm]	4,90	7,21	9,47	11,71	13,98

Prozessparameter	HfAl1	HfAl2	HfAl3	HfAl4	AlPos
Position [mm]	124,38	109,54	87,52	77,05	24,63
Argon [sccm]	1,97	1,97	1,97	2,01	1,47
Sauerstoff [sccm]	4,93	4,95	4,95	4,95	19,98

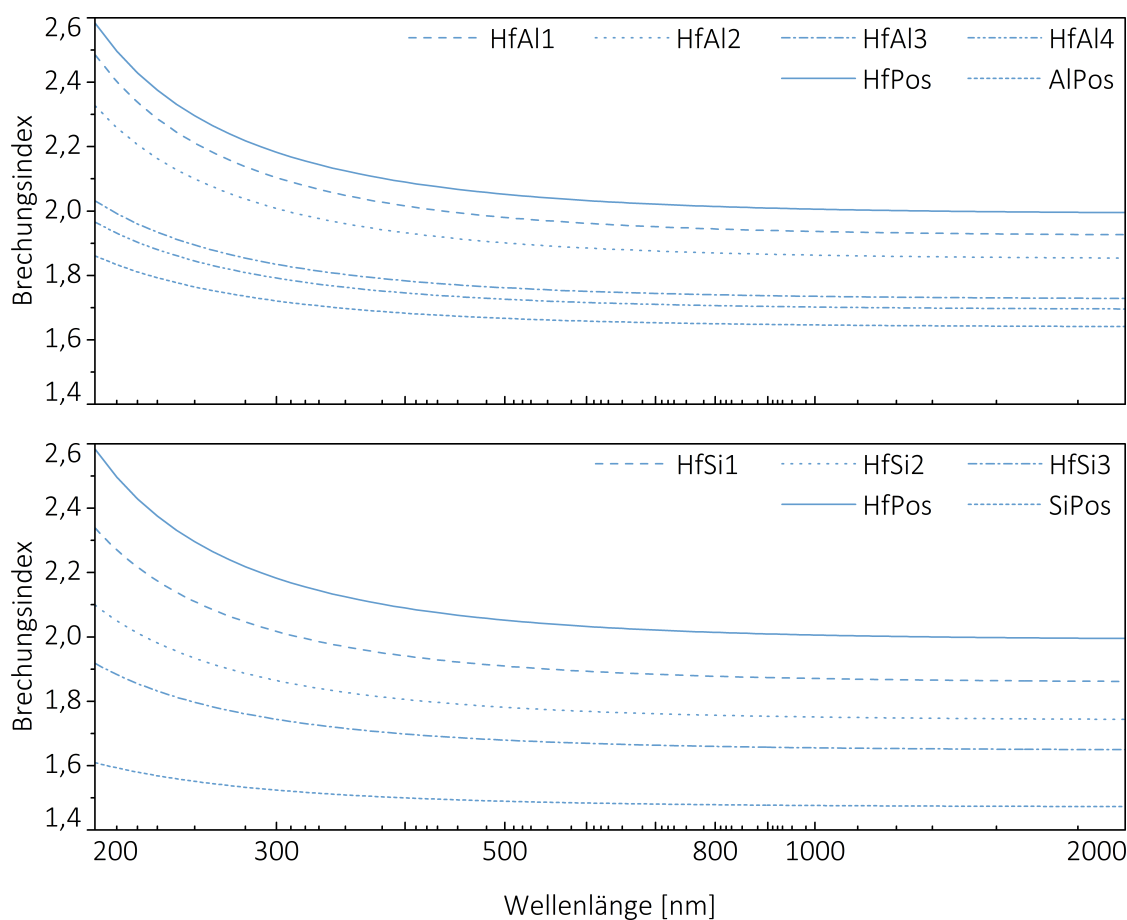
**Tabelle 3.01:** Prozessparameter der einschichtigen Materialmischungen. Hafniumdioxidschichten sollen für den Einsatz im ultravioletten Spektralbereich optimiert werden. Zu diesem Zweck dienen Materialkombinationen mit Aluminiumoxid und Siliziumdioxid. Hochenergetische Argonatome zerstäuben die metallischen Bereichsmaterialien. In diesem Zusammenhang sollte der Sauerstofffluss an die Verfahrsposition angepasst werden.

Die Hafniumdioxidschichten ließen sich rückblickend mit Aluminiumoxid beziehungsweise Siliziumdioxid kombinieren. Ausschlaggebend waren in diesem Zusammenhang die Eigenschaften im ultravioletten Spektralbereich. Die Elementmischungen wurden in einer reaktiven Sauerstoffatmosphäre mit Hilfe benachbarter Beschichtungsmaterialien realisiert. Im Zuge dessen basieren die mechanischen und optischen Eigenschaften auf den binären Mischungsverhältnissen. Im nächsten Abschnitt dieses Kapitels sollen die Stoffmengenanteile auf Grundlage der Brecheigenschaften bestimmt werden.

## 3.2 Gemischbestimmung durch Brechzahlanalyse

Die Stoffkombinationen der gesputterten Einzelschichtsysteme sollen im Rahmen dieses Abschnitts prozessunabhängig klassifiziert werden. Zu diesem Zweck erfolgt eine Analyse der Brechungsindizes unter Zuhilfenahme des Lorentz-Lorenz-Modells. Die Brechungsindizes der binären Einzelschichtsysteme sollen mit Hilfe eines Designprogramms berechnet werden. Spektrale Transmissions- und Reflexionsmessungen schaffen in diesem Zusammenhang die Grundlage. In der ersten Hälfte dieses Abschnitts wird die Untersuchung auf Grundlage photospektrometrischer Verfahren beschrieben. Die Ermittlung der Mischungsverhältnisse im Rahmen des Lorentz-Lorenz-Modells erfolgt in der zweiten Hälfte dieses Abschnitts.

Die Brechzahlen der Einzelschichtsysteme sollen bis in den infraroten Spektralbereich bestimmt werden. Zu diesem Zweck erzeugt das eingesetzte Spektralphotometer Lambda 900 eine unpolarisierte Lichtstrahlung. PerkinElmer Instruments LLC [57] kombiniert in diesem Fall eine Deuterium-Lichtquelle mit einer Wolfram-Halogen-Lampe. Unter Einsatz eines Photoelektronenvervielfachers lassen sich die



**Abbildung 3.03:** Spektraler Brechwertverlauf der Materialmischungen. Die Brechungsindizes wurden unter Zuhilfenahme eines Simulationsprogramms analysiert. Transmissions- und Reflexionsmessungen eines Spektralphotometers bildeten in diesem Zusammenhang die Grundlage. Unter Berücksichtigung der spektralen Charakterisierung sollte eine absolute Fehlerabweichung von 0,01 berücksichtigt werden.

ultravioletten bis sichtbaren Transmissionsgrade ermitteln. Im Rahmen des infraroten Spektralbereichs werden Detektoren aus Bleisulfid mit einer Messungengenauigkeit von 0,1 % verwendet. Unter Zuhilfenahme einer Umlenkeinheit im Bereich der Probenkammer ließen sich die Reflexionsgrade bestimmen. Ein keilförmiges Quarzglassubstrat dient in diesem Zusammenhang als Referenzsystem. Die spektrale Charakterisierung der Einzelschichtsysteme wurde unter Normalbedingungen durchgeführt.

Auf Grundlage der breitbandigen Transmissions- und Reflexionsmessungen werden im nächsten Schritt die Brechungsindizes bestimmt. In diesem Zusammenhang kommt das Designprogramm SPEKTRUM von Dieckmann [58] zum Einsatz. Die Resultate der spektralen Charakterisierung werden in das Programmpaket eingela-

den. Im Rahmen der Simulation sind außerdem die Eigenschaften des verwendeten Substratmaterials erforderlich. Die Transmissions- und Reflexionsmessungen werden mit Hilfe der optischen Schichtdicke angepasst. Im Zuge dessen generiert ein Algorithmus die Dispersionsdaten der binären Materialmischungen. Die Absorptionsverluste lassen sich mit Hilfe des Extinktionskoeffizienten berücksichtigen. Im Unterschied dazu werden die Dispersionsdaten in Form der Sellmeier-Gleichung [59] ausgegeben.

In Abbildung 3.03 werden die spektralen Brechungsindizes als Funktion der Wellenlänge dargestellt. Aufgrund der spektralen Charakterisierung können die Berechnungen eine Fehlerabweichung von 0,01 beinhalten. Diskrete Brechungsindizes bei den harmonischen Wellenlängen eines Nd:YAG-Lasers sind in Tabelle 3.02 zusammengefasst. Die Ergebnisse stimmen im Bereich von mittlerer bis naher Ultraviolettstrahlung mit Starke und Kollegen [34] überein. In diesem Zusammenhang wurde am Beispiel von Hafniumdioxidschichten ein Brechungsindizes zwischen 2,05 und 2,20 ermittelt. Die Absorptionsverluste werden aufgrund der Messgenauigkeit des spektralen Verfahrens mit Hilfe der Laserkalorimetrie bestimmt.

Unter Zuhilfenahme des Lorentz-Lorenz-Modells lässt sich das Mischungsverhältnis einer homogenen Stoffkombination beschreiben. Die Brechungsindizes der Materialmischungen schaffen in diesem Zusammenhang den Ausgangspunkt. Lorenz [60] konnte im Jahr 1880 die mathematische Gleichung

$$P = p_1 P_1 + p_2 P_2 + \dots p_n P_n, \quad P = (n^2 - 1)/(n^2 + 2) v \quad (3.01)$$

aufstellen. Ausschlaggebend sind die Gewichte  $p_1, p_2, \dots p_n$  und Refraktionskonstanten  $P_1, P_2, \dots P_n$  der einzelnen Bestandteile. In diesem Zusammenhang werden homogene Körper mit dem Brechungsindex  $n$  im Rauminhalt  $v$  beschrieben. Die enthaltenen Refraktionskonstanten haben ihren Namen von der jeweiligen Volumeninvarianz. Lorentz [61] entdeckte die mathematische Gleichung zeitgleich mit

Brechungsindex	HfPos	HfSi1	HfSi2	HfSi3	SiPos
355	2,12	1,97	1,83	1,71	1,51
1064 nm	2,00	1,87	1,75	1,65	1,48

Brechungsindex	HfAl1	HfAl2	HfAl3	HfAl4	AlPos
355	2,04	1,96	1,80	1,76	1,70
1064 nm	1,94	1,86	1,74	1,70	1,65

**Tabelle 3.02:** Diskrete Brechungsindizes der Materialmischungen. Die Brechungsindizes wurden in Kombination mit der Schichtdicke berechnet. Spektrale Transmissions- und Reflexionsmessungen bildeten in diesem Fall die Grundlage. Unter diesen Bedingungen sollte eine absolute Fehlerabweichung von 0,01 berücksichtigt werden.

Lorenz. Unter Zuhilfenahme der resultierenden Beziehung

$$(n^2 - 1)/(n^2 + 2) = p_1 (n_1^2 - 1)/(n_1^2 + 2) + p_2 (n_2^2 - 1)/(n_2^2 + 2) \quad (3.02)$$

lässt sich schließlich der Brechungsindex einer binären Materialmischung bestimmen. Zu diesem Zweck wurde das Gleichungssystem 3.01 darüber hinaus auf zwei Bestandteile beschränkt. Das Lorentz-Lorenz-Modell nahm seinen Anfang mit gasförmigen und flüssigen Substanzen. Chemische Verbindungen werden aufgrund der molekularen Änderungen ausgenommen.

Unter Zuhilfenahme des Lorentz-Lorenz-Modells lassen sich die Mischungsverhältnisse der binären Materialkombinationen bestimmen. In diesem Zusammenhang müssen die Brechungsindizes der spektralen Charakterisierung in das Gleichungssystem eingesetzt werden. Neben den Materialmischungen sind darüber hinaus auch die reinen Einzelschichtsysteme zu berücksichtigen. Die resultierenden Gewichtungen der Beschichtungsmaterialien wurden auf Grundlage der diskreten Brechungsindizes bestimmt. In Folge dessen ergibt sich ein arithmetischer Mittelwert über die einzelnen Wellenlängen. Die Mischungsverhältnisse der binären Einzelschichtsysteme sind in Tabelle 3.03 zusammengefasst. Unter Berücksichtigung der spektralen Charakterisierung sollte eine absolute Fehlerabweichung von 1 % angenommen werden.

Im Hinblick auf weitere Materialkombinationen müssen jeder Verfahrensposition die passenden Prozessparameter zugeordnet werden. Die Mischungsverhältnisse der Einzelschichtsysteme sind in Abbildung 3.04 als Funktion der Verfahrensposition dargestellt. Aufgrund der komplexen Ionenverteilung verbindet eine konvergente Polynomfunktion die Messpunkte der realisierten Einzelschichtsysteme. Zusätzlich zum Zerstäubungsbereich können auch die Sputtereffizienzen der Ausgangsmaterialien das Mischungsverhältnis beeinflussen. Die niedrig brechenden Beschichtungsmaterialien zeigen im Rahmen der Zerstäubungsprozesse eine höhere Wachstumsrate. In Folge dessen lässt sich in Abhängigkeit der Verfahrensposition ein asymmetrischer

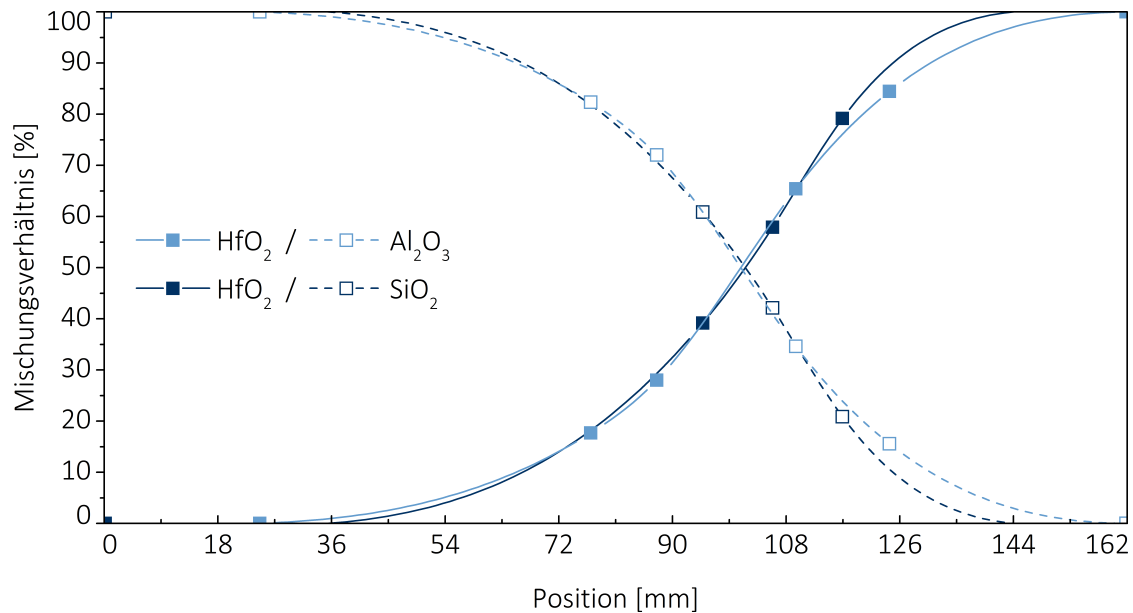
Mischungsverhältnis [%]	HfPos	HfSi1	HfSi2	HfSi3	SiPos
HfO <sub>2</sub>	100,00	79,16	57,86	39,13	0,00
SiO <sub>2</sub>	0,00	20,84	42,14	60,87	100,00

Mischungsverhältnis [%]	HfAl1	HfAl2	HfAl3	HfAl4	AlPos
HfO <sub>2</sub>	84,43	65,38	28,00	17,69	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,57	34,62	72,00	82,31	100,00

**Tabelle 3.03:** Mischungsverhältnisse entsprechend Lorentz-Lorenz-Modell. Die Materialbeimischungen der realisierten Einzelschichtsysteme wurden bestimmt. In diesem Zusammenhang bildeten diskrete Brechungsindizes die Grundlage. Die Mischungsverhältnisse können unter diesen Bedingungen eine absolute Fehlerabweichung von 1 % aufweisen.





**Abbildung 3.04:** Mischungsverhältnisse in Abhängigkeit der Materialposition. Unter Zuhilfenahme von Polynomfunktionen wurden die Mischungsverhältnisse des Lorentz-Lorenz-Modells interpoliert. Die Asymmetrie resultiert aus einer höheren Sputtereffizienz der niedrig brechenden Beschichtungsmaterialien.

Verlauf der Mischungsverhältnisse beobachten.

Rückblickend ließen sich unter Zuhilfenahme des Lorentz-Lorenz-Modells die Mischungsverhältnisse bestimmen. In diesem Zusammenhang wurde eine prozessunabhängige Beschreibung der Stoffkombination ermöglicht. Die Einzelschichtsysteme können neben den Ausgangsmaterialien auch weitere Bestandteile enthalten. Im folgenden Abschnitt wird mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenspektroskopie die Elementzusammensetzung ermittelt. In Folge dessen lassen sich die Mischungsverhältnisse mit dem Lorentz-Lorenz-Modell vergleichen.

### 3.3 Elementanalyse mittels Röntgenspektroskopie

Unter Zuhilfenahme der energiedispersiven Röntgenspektroskopie soll die Elementzusammensetzung analysiert werden. Ausschlaggebend ist in diesem Zusammenhang die Energieverteilung der emittierten Röntgenstrahlung. Die ionenstrahlgesputterte Hafniumoxidschicht dient im Rahmen der Elementanalyse als Ausgangssituation. Darüber hinaus sollen die Mischungsverhältnisse aus dem Lorentz-Lorenz-Modell verifiziert werden. Die erste Hälfte dieses Abschnitts beschreibt die Elementzusammensetzung der konventionellen Hafniumdioxidschicht. In der zweiten Hälfte werden die Zusammensetzungen der binären Materialkombinationen mit dem Lorentz-Lorenz-Modell verglichen.

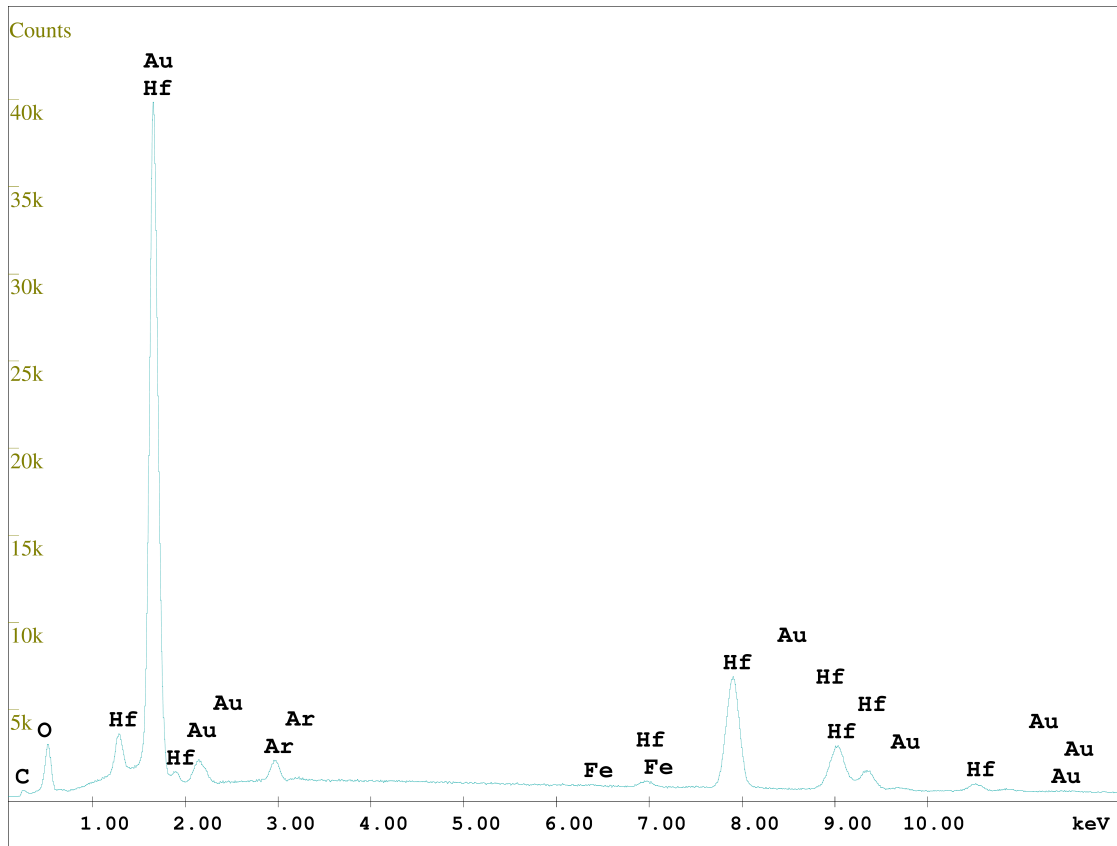
Die Elementanalysen wurden mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops Quanta FEG 400 durchgeführt. Im Zentrum des Hochvakuumsystems befindet sich laut FEI Company [62] die Probenkammer. Außerdem wird ein Elektronensystem und eine elektronenoptische Säule verwendet. Das Rasterelektronenmikroskop besitzt in Folge dessen einen variablen Abbildungsmaßstab. Unter Zuhilfenahme des Quellsystems sollen die Elektronen eine Beschleunigungsspannung von 200 V bis 30 kV erfahren. Abschließend analysiert ein Röntgendetektor die charakteristische Strahlung der Einzelschichtsysteme. Die gemessenen Röntgenspektren werden mit Hilfe des Programms EDAX Genesis der AMETEK GmbH ausgewertet.

Die energiedispersive Röntgenspektroskopie ermöglicht eine orts aufgelöste Analyse der chemischen Zusammensetzung. Charakteristische Atomübergänge im Röntgenspektrum der ausgewählten Materialkombinationen bilden die Grundlage. Unter Berücksichtigung inelastischer Stöße erregt hochenergetisches Elektronenbombardement die inneren Atomorbitale. Anschließend relaxieren gebundene Elektronen aus den höheren Energieniveaus in die unbesetzten Zustände. Die binären Materialkombinationen emittieren im Rahmen der zerstörungsfreien Messmethode schließlich die charakteristischen Röntgenspektren.

Die gemessene Röntgenstrahlung resultiert aus tieferen Schichten der birnenförmigen Anregungszone. Im Gegensatz dazu stehen gestreute und gelöste Elektronen der Materialoberfläche. Die Röntgenspektroskopie dient im Rahmen dieser Arbeit zur Elementanalyse des Probenstücks. In Folge dessen werden die Intensitäten der gemessenen Röntgenemission als Funktion der Strahlungsenergie bestimmt. Bremsstrahlen am Coulombfeld der Atomkerne können die Intensitätsspitzen im energiedispersiven Röntgenspektrum überlagern. Die Messmethode der Materialanalytik ermöglicht eine qualitative Aussage zur Zusammensetzung der Probenstücke. Darüber hinaus können quantitative Aussagen über die nachgewiesenen Elemente getroffen werden. Die Anregungsenergien der enthaltenen Materialien müssen im Rahmen der Röntgenspektroskopie unterhalb der Beschleunigungsspannung liegen.

Isolierende Probenstücke müssen vor der energiedispersiven Röntgenspektroskopie eine metallische Beschichtung erhalten. Unter diesen Bedingungen lassen sich elektrische Aufladungen in Folge der Elektronenbeaufschlagung vermeiden. Die leitenden Deckschichten wurden im Gleichstromverfahren unter Einsatz der Anlage EM ACE600 deponiert. Während der metallischen Deposition konnte ein Prozessdruck von  $3\text{E-}4$  mbar erreicht werden. Zur Herstellung der Gold- und Silberschichten etablierte die Beschichtungsanlage eine Argonatmosphäre. Die leitenden Dünnschichten wurden mit einer Beschichtungsrate zwischen 0,11 und 0,15 nm/s aufgebracht.

Im nächsten Schritt lässt sich die Zusammensetzungen der präparierten Einzelschichtsysteme analysieren. Zu diesem Zweck wurde das Vakuumsystem des Rasterelektronenmikroskops auf einen Prozessdruck von  $1\text{E-}6$  mbar abgepumpt. Die optischen Schichten waren senkrecht zum Elektronenstrahl zu positionieren. Unter



**Abbildung 3.05:** Energiedispersives Röntgenspektrum der Hafniumdioxidschicht. Unter Zuhilfenahme der energiedispersiven Röntgenspektroskopie wurde eine Elementanalyse durchgeführt. Die charakteristischen Elektronenübergänge der Bestandteile schaffen in diesem Fall die Grundlage. Zusätzlich zu den Ausgangsmaterialien zeigt das goldpräparierte Einzelschichtsystem eine Verunreinigung durch Kohlenstoff- und Eisenatome.

Berücksichtigung der Ortsauflösung befand sich der Polschuh etwa 10 mm über der Schichtoberfläche. Die Primärelektronen mussten mit einer Beschleunigungsspannung von 20 kV extrahiert werden. Ausschlaggebend waren in diesem Zusammenhang die hohen Anregungsenergien der Hafniumatome. Die energiedisperive Röntgenspektroskopie wurde im Zentrum der Probe angewendet. Unter diesen Bedingungen ergab sich eine Analysezeit von 200 s pro verwendeter Messposition.

Zu Beginn soll die Zusammensetzung eines einschichtigen Hafniumdioxidsystems analysiert werden. Das energiedisperive Röntgenspektrum der gesputterten Hafniumdioxidschicht ist in Abbildung 3.05 dargestellt. Unter Berücksichtigung der Goldpräparation wurden in Tabelle 3.04 die Massenanteile der optischen Dünnschicht zusammengefasst. Die Messungenauigkeit als Funktion der Ordnungszahl reicht von 0,1 für Hafnium bis hin zu 3 % für Kohlenstoff. Zusätzlich zu den Ausgangsmaterialien enthält das Einzelschichtsystem auch Verunreinigungen (siehe

Element	Massenanteil [%]
Kohlenstoff	1,17
Sauerstoff	7,64
Argon	1,88
Eisen	0,14
Hafnium	89,17

**Tabelle 3.04:** Ausgewählte Massenanteile der Hafniumdioxidschicht. Unter Zuhilfenahme der energiedispersiven Röntgenspektroskopie wurde die Zusammensetzung untersucht. Zusätzlich zu den Ausgangsmaterialien offenbarte das Hafniumdioxidssystem eine Verunreinigung durch Kohlenstoff- und Eisenatome. Unter Berücksichtigung der Ordnungszahl reicht die relative Messungengenauigkeit von 0,1 für Hafnium bis 3 % für Kohlenstoff.

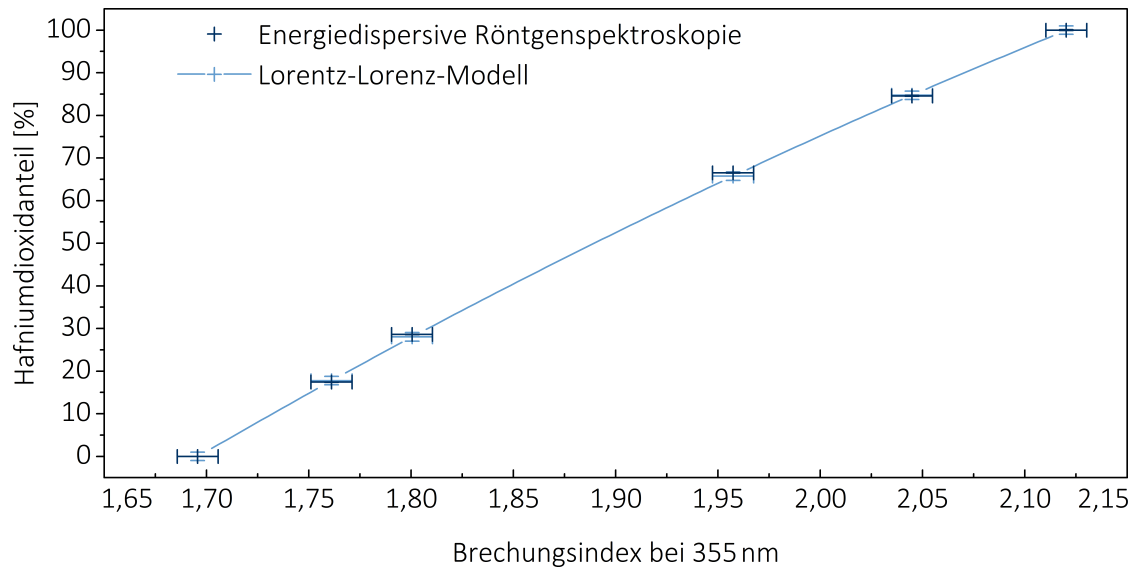
Abschnitt 2.3). Die Eisenatome können in Folge dessen aus gesputterten Anlagenkomponenten resultieren. Darüber hinaus offenbart das energiedispersive Röntgenspektrum eine Kohlenstoffkontamination im Beschichtungsprozess.

Ergänzend zur Hafniumdioxidschicht sollen die Mischungsverhältnisse der binären Materialkombinationen bestimmt werden. Die Untersuchungen beschränken sich in diesem Fall auf Einzelschichtsysteme mit Hafniumdioxid und Aluminiumoxid. Ausschlaggebend sind die Übereinstimmungen der eingesetzten Quarzglassubstrate mit den Siliziumdioxidanteilen. Die atomaren Prozentsätze der zerstäubten Ausgangsmaterialien schaffen im Rahmen der Elementanalyse den Ausgangspunkt. Aufgrund der doppelten Sauerstoffbindung müssen die Hafniumatome dreifach gewichtet werden. Zwei Aluminiumatome verbinden sich im Gegensatz dazu mit drei Sauerstoffatomen. In Folge dessen wurde in diesem Zusammenhang eine Gewichtung von fünf Halbe berücksichtigt.

Die Mischungsverhältnisse der binären Materialkombinationen mit Aluminiumoxid sind in Tabelle 3.05 zusammengefasst. In diesem Zusammenhang sollte eine relative Messungengenauigkeit von 0,1 % berücksichtigt werden. Unter Zuhilfenahme der Elementanalyse lässt sich eine Verifikation des Lorentz-Lorenz-Modells durchführen. In Abbildung 3.06 werden die Mischungsverhältnisse der spektralen Cha-

Mischungsverhältnis [%]	HfPos	HfAl1	HfAl2	HfAl3	HfAl4	AlPos
HfO <sub>2</sub>	100,00	84,56	66,50	28,58	17,40	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	15,44	33,50	71,42	82,60	100,00

**Tabelle 3.05:** Mischverhältnisse der energiedispersiven Röntgenspektroskopie. Unter Zuhilfenahme von Hafniumdioxid und Aluminiumoxid wurden Materialmischungen hergestellt. Die atomaren Prozentsätze der Röntgenspektroskopie mussten unter Berücksichtigung der Oxidationszustände gewichtet werden. Unter diesen Bedingungen können die Mischungsverhältnisse einer relativen Messungengenauigkeit von 0,1 % unterliegen.



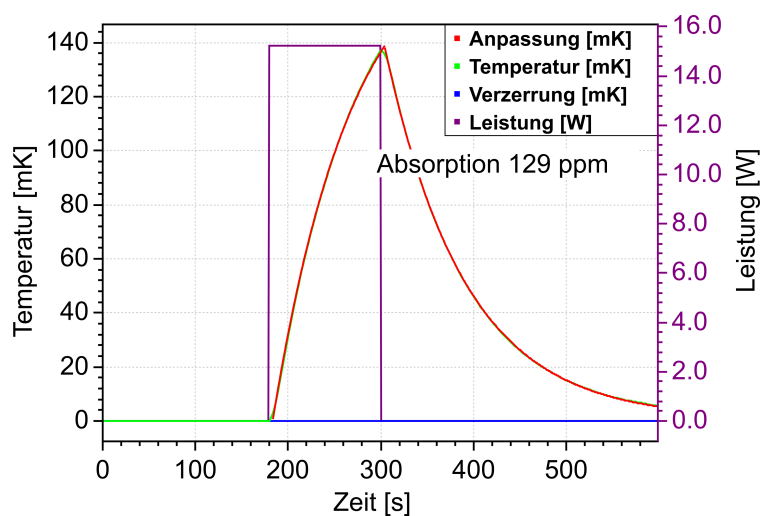
**Abbildung 3.06:** Verifizierung der Mischungsverhältnisse nach Lorentz-Lorenz. Das Lorentz-Lorenz-Modell ermöglicht eine Klassifizierung der binären Materialkombinationen. Unter Zuhilfenahme der energiedispersiven Röntgenspektroskopie sollen die Mischungsverhältnisse verifiziert werden. Die Materialkombinationen aus Hafniumdioxid und Aluminiumoxid dienen in diesem Zusammenhang als Grundlage.

rakterisierung mit der energiedispersiven Röntgenspektroskopie verglichen. Unter Berücksichtigung der angegebenen Fehlergrenzen korrespondieren die jeweiligen Hafniumdioxidanteile. Im Hinblick auf die Siliziumdioxidkombinationen wird das Lorentz-Lorenz-Modell in gleicher Art und Weise verwendet.

Unter Zuhilfenahme der Röntgenspektroskopie konnten die Mischungsverhältnisse des Lorentz-Lorenz-Modells verifiziert werden. Die Elementanalyse einer Hafniumdioxidschicht ermöglichte darüber hinaus eine Charakterisierung der Verunreinigungen. Unter Berücksichtigung der Mischungsverhältnisse sollen weitere Schichteigenschaften der Materialkombinationen untersucht werden. Der nächste Abschnitt dieses Kapitels beinhaltet eine Charakterisierung der ultravioletten Absorptionsverluste mit Hilfe der Laserkalorimetrie.

### 3.4 Minderung der Absorption durch Beimischung

Zur Bewertung des binären Mischungskonzepts sollen die kalorimetrischen Absorptionsverluste charakterisiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit bilden Kombinationen aus Hafniumoxid und Aluminiumoxid beziehungsweise Siliziumdioxid die Grundlage. Die Absorptionsverluste sollen über das laserinduzierte Temperaturverhalten der Einzelschichtsysteme bestimmt werden. In der ersten Hälfte dieses Abschnitts lässt sich am Beispiel der Hafniumdioxidschicht die Laserkalorimetrie



**Abbildung 3.07:** Kalorimetrische Absorptionsmessung einer Hafniumdioxidschicht. Die Absorptionsverluste werden über das Temperaturverhalten bestimmt. Dazu bestrahlt ein Laser bei 1064 nm das Einzelschichtsystem. Im Rahmen der Messung konnte ein Absorptionsverlust von 129 ppm ermittelt werden.

erläutern. Die Absorptionsverluste der binären Materialkombinationen werden in der zweiten Hälfte dieses Abschnitts charakterisiert.

Die Absorptionsverluste der binären Materialkombinationen sollen mit Hilfe eines Laserkalorimeters untersucht werden. In diesem Zusammenhang ist das strahlungsinduzierte Temperaturverhalten der Schichtsysteme zu ermitteln. Laut Willamowski [63] können kalorimetrische Messverfahren eine Nachweisgrenze von unter 1 ppm erreichen. Die Absorptionsverluste der Einzelschichtsysteme werden in einer thermisch isolierenden Probenkammer charakterisiert. Innerhalb der staubfreien Umgebung beaufschlagt ein Laserstrahl das Zentrum der zölligen Probenstücke. Während dieser Zeit werden unter Einsatz von Heißeleitern die Temperaturen im Randbereich der Einzelschichtsysteme monitoriert. Im Gegensatz zur spektralen Charakterisierung sind kalorimetrische Messtechniken auf optische Verluste mit Wärmefreigabe beschränkt.

Die kalorimetrische Absorptionsmessung erfolgt nach ISO 11551:2019 [64] für Optik und optische Instrumente. Zu Beginn sollte sich das Einzelschichtsystem für mindestens 30 Sekunden im thermischen Gleichgewicht befinden. Anschließend werden die binären Materialkombinationen unter Berücksichtigung der Maximaltemperatur bestrahlt. In diesem Zusammenhang ist auf Grundlage der Schichteigenschaften eine Dauer von 5 bis 300 Sekunden einzuhalten. Zum Schluss können die ionenstrahlgesputterten Einzelschichtsysteme für mindestens 200 Sekunden abkühlen. Unter Zuhilfenahme einer Exponentialfunktion lassen sich schließlich die Absorptionsverluste bestimmen. Die Prozessparameter des kalorimetrischen Messverfahrens schaffen in diesem Zusammenhang die Grundlage.

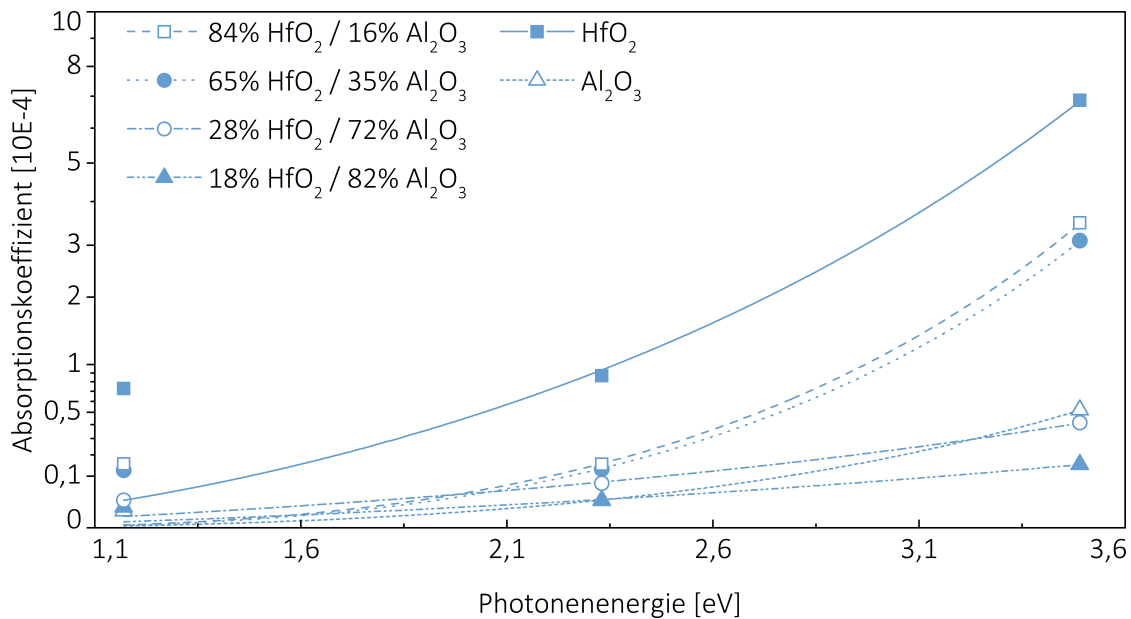
Die kalorimetrischen Absorptionsverluste sollen am Beispiel der Hafniumdioxidschicht ermittelt werden. In Abbildung 3.07 ist das angepasste Temperaturverhalten auf Grundlage einer Wellenlänge von 1064 nm dargestellt. Während des Aufheizintervalls werden die Probenstücke mit einer Laserleistung von 15,45 W be-

strahlt. Die Hafniumdioxidschicht hat in diesem Zusammenhang eine Maximaltemperatur von 137,3 mK herbeigeführt. Im Rahmen des Abkühlungsintervalls wurde mit Hilfe der Modellfunktion ein Absorptionsverlust von 129 ppm ermittelt. Die Temperaturänderung während der Absorptionsmessung wurde durch eine Steigung von  $-9,427 \mu\text{K/s}$  kompensiert.

Auf Grundlage der Laserkalorimetrie können die Absorptionskoeffizienten der binären Materialkombinationen bestimmt werden. Der Absorptionskoeffizient charakterisiert den exponentiellen Intensitätsabfall in Abhängigkeit der Eindringtiefe. Eventuelle Streuverluste der elektromagnetischen Strahlung sollen in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden. Die computergestützte Berechnung der Absorptionskoeffizienten erfolgte unter Berücksichtigung der ermittelten Einzelschichtdaten. Die einzelnen Absorptionsverluste sollen im nächsten Schritt mit Hilfe des Extinktionskoeffizienten

$$k = a \cdot \exp(b/\lambda + c \cdot \lambda) \quad (3.03)$$

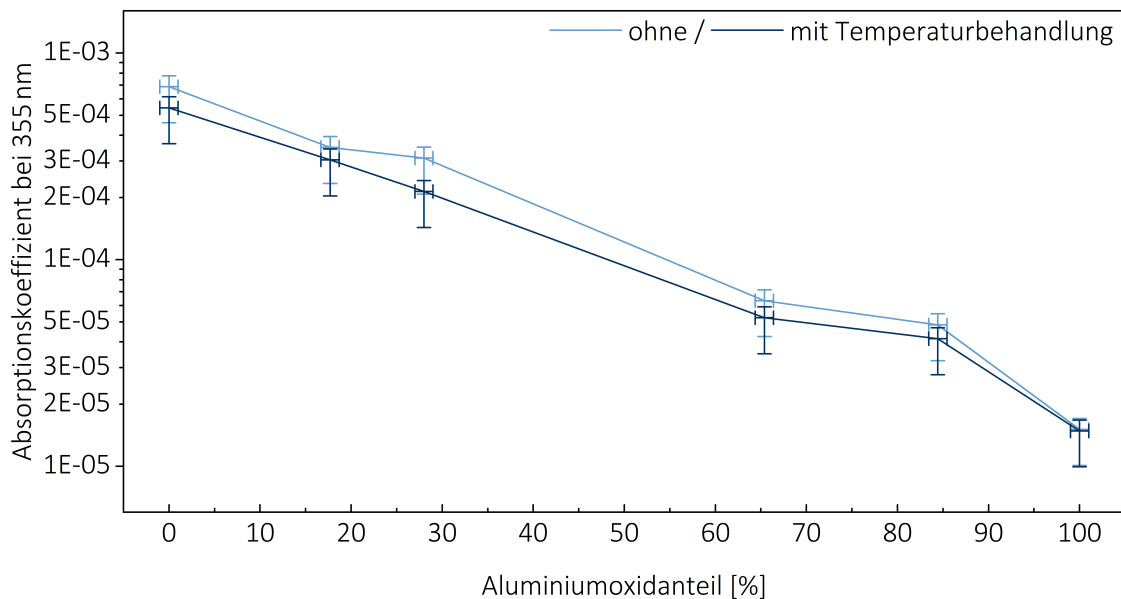
interpoliert werden. Unter Zuhilfenahme der Formvariablen  $a$ ,  $b$  und  $c$  ist eine Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$  gegeben. In Folge dessen beschreibt die Parametrisierung die Absorptionsverluste eines amorphen Schichtmaterials.



**Abbildung 3.08:** Absorptionskoeffizienten als Funktion der Photonenergie. Im Rahmen des Mischungskonzepts wurden die kalorimetrischen Absorptionsverluste bestimmt. Die Absorptionskoeffizienten können in Anbetracht der Laserkalorimetrie einen relativen Messfehler von +13 bis -33 % aufweisen.

Die kalorimetrischen Absorptionsmessungen wurden auf die Materialkombinationen zwischen Hafniumdioxid und Aluminiumoxid beschränkt. Ausschlaggebend ist in diesem Zusammenhang eine erhöhte Partikelkonzentration der Siliziumdioxidsysteme. Abbildung 3.08 beinhaltet die Absorptionskoeffizienten bei einer Wellenlänge von 1064 nm und den höheren Harmonischen. Die Absorptionsverluste der gemessenen Einzelschichtsysteme werden als Funktion der Photonenenergie dargestellt. Im Rahmen der kalorimetrischen Absorptionsmessung ist ein relativer Messfehler von +13 bis -33 % zu berücksichtigen. Ungeachtet dessen konnten die Absorptionsverluste der Hafniumdioxidschicht mit Hilfe der Materialbeimischung reduziert werden.

Auf Grundlage der kalorimetrischen Absorptionsverluste sollen die Effekte einer Temperaturbehandlung untersucht werden. In diesem Zusammenhang könnte sich eine zusätzliche Absorptionsminderung der Hafniumdioxidschicht ergeben. Unter Zuhilfenahme eines industriellen Hochtemperaturofens werden die binären Materialkombinationen erhitzt. Während dieser Zeit begünstigt eine Sauerstoffatmosphäre die Nachoxidation defizitärer Einzelschichtsysteme. Die Absorptionsverluste sollen mit Hilfe einer Ofentemperatur von etwa 300 °C reduziert werden. In diesem Zusammenhang lieferte eine Prozessdauer von 8 Stunden eine effiziente Temperaturbehandlung. Im Zuge der Diffusionsprozesse erfahren die Schichtmaterialien eine vernachlässigbare Brechzahlvariation. Darüber hinaus können die spektralen



**Abbildung 3.09:** Absorptionsverhalten der wärmebehandelten Materialmischungen. Die absorptiven Verluste der Hafniumdioxidschicht sinken mit zunehmendem Aluminiumoxidanteil. Darüber hinaus lassen sich die Absorptionskoeffizienten unter Zuhilfenahme einer Temperaturbehandlung reduzieren. Die Absorptionsverluste der Materialkombinationen können in diesem Fall einen relativen Messfehler von +13 bis -33 % beinhalten.



Absorptionskoeffizient	355	532	1064 nm
HfO <sub>2</sub>	5,43 E-04	3,32 E-05	6,38 E-06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,48 E-05	2,86 E-06	6,50 E-07

**Tabelle 3.06:** Absorptionskoeffizienten der verwendeten Ausgangsmaterialien. Die Absorptionsverluste der Einzelschichtsysteme wurden unter Zuhilfenahme eines Laserkalorimeters bestimmt. In diesem Zusammenhang ist ein relativer Messfehler von +13 bis -33 % zu berücksichtigen.

Eigenschaften um wenige Promille verschoben sein.

Im Rahmen der Temperaturbehandlung wurde das Absorptionsverhalten der ausgewählten Einzelschichtsysteme bestimmt. Abbildung 3.09 zeigt am Beispiel einer Wellenlänge von 355 nm die Absorptionskoeffizienten als Funktion der Mischungsverhältnisse. Die Absorptionsverluste sinken in diesem Zusammenhang nahezu exponentiell mit zunehmendem Aluminiumoxidanteil. Unter Zuhilfenahme der Sauerstoffatmosphäre lässt sich im Rahmen der Temperaturbehandlung die Stöchiometrie verändern. In Folge dessen konnten die Absorptionsverluste der binären Materialkombinationen reduziert werden. Darüber hinaus sind in Tabelle 3.06 die Absorptionskoeffizienten der temperaturbehandelten Ausgangsmaterialien zusammengefasst.

Rückblickend ließen sich unter Zuhilfenahme der Laserkalorimetrie die Absorptionsverluste charakterisieren. Ausschlaggebend war in diesem Fall das Temperaturverhalten der Ionenstrahlgesputterten Materialkombinationen. Die absorptiven Verluste der Schichtmaterialien konnten mit zunehmendem Aluminiumoxidanteil gesenkt werden. Darüber hinaus bewährte sich eine nachträgliche Temperaturbehandlung der Einzelschichtsysteme. Im nächsten Abschnitt dieses Kapitels sollen die Streueigenschaften der binären Materialkombinationen charakterisiert werden.

## 3.5 Streuverluste der binären Materialmischungen

Zusätzlich zu niedrigen Absorptionsverlusten zeigen hochqualitative Laserkomponenten ein geringes Streulichtaufkommen. Im Hinblick auf die ultravioletten Lasersysteme lässt sich mit Hilfe streuarmer Schichtmaterialien die Ausgangsleistung steigern. Darüber hinaus können störende Interferenzen mit benachbarten Systemeinheiten vermieden werden. Die erste Hälfte dieses Abschnitts präsentiert die rückwärtigen Streuverluste einer Hafniumdioxidschicht. Die Streueigenschaften der übrigen Beschichtungsmaterialien werden in der zweiten Hälfte dieses Abschnitts untersucht.

Im Rahmen der Charakterisierung wurde der Streulichtmessplatz FastTS am Laser Zentrum Hannover e.V. verwendet. Das gemessene Streulichtaufkommen berücksichtigt die rückwärtige Hemisphäre der Einzelschichtsysteme. Unter Zuhilfe-

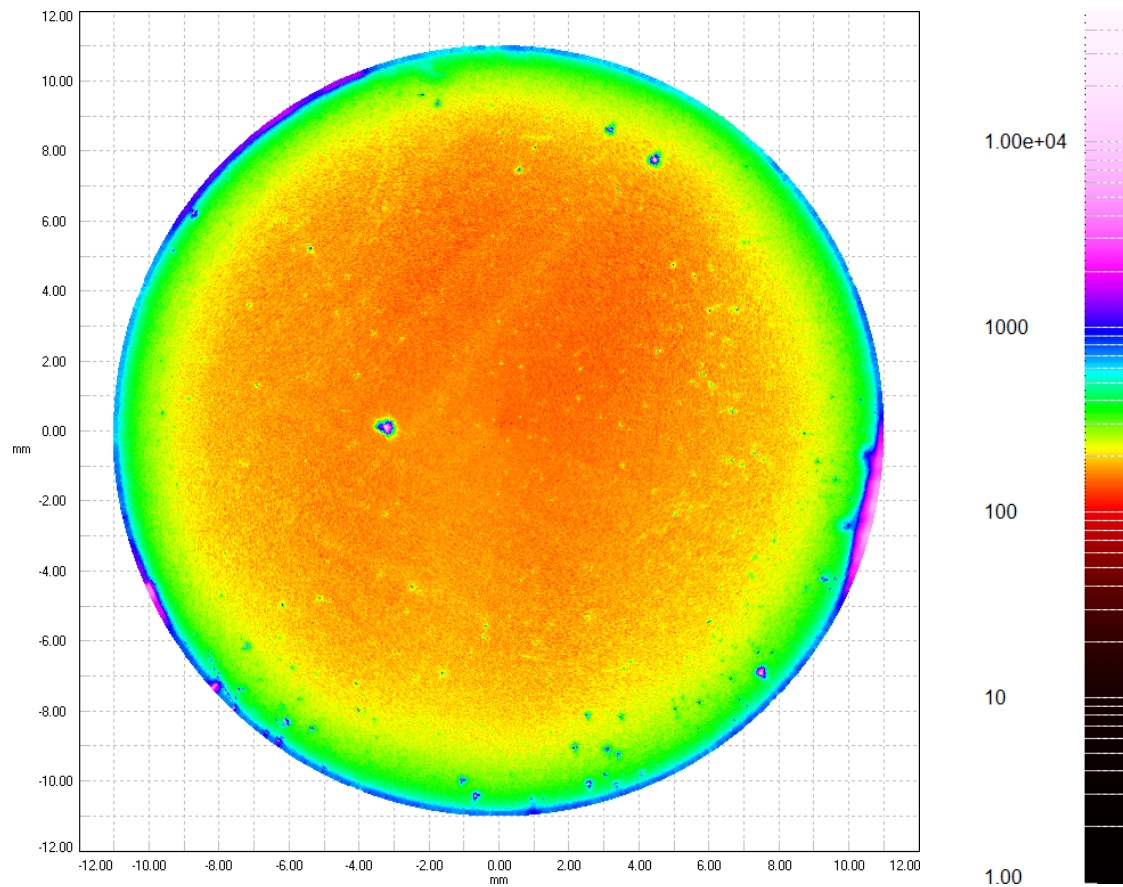
nahme eines Helium-Neon Lasers werden die Dünnschichtsysteme auf Grundlage einer Wellenlänge von 543,3 nm bestrahlt. In Übereinstimmung mit ISO 13696:2002 [65] rastert eine spiralförmige Trajektorie die gesamte Probenoberfläche. Das gestreute Laserlicht der Materialkombinationen wird mit Hilfe einer rückwärtigen Coblenz-Halbkugel gesammelt. In Folge dessen lässt sich eine zweidimensionale Streulichtkarte der Einzelschichtsysteme generieren.

Die binären Materialkombinationen können mit Hilfe des Streulichtmessplatzes vollständig kartographiert werden. Unter diesen Bedingungen soll die Detektoreinheit eine Nachweisgrenze von unter 1 ppm bereitstellen. Allerdings können Streueffekte der verwendeten Probenhalterung die äußeren Messbereiche überlagern. Das laterale Auflösungsvermögen des Streulichtmessplatzes beschreibt die Unterscheidung zweier punktförmiger Objekte. Laut Kadkhoda und Kollegen [66] kann in diesem Zusammenhang ein Abstand von unter 50  $\mu\text{m}$  detektiert werden. Die relative Messungenauigkeit von bis zu 5 % ist von der jeweiligen Streucharakteristik abhängig. Ausschlaggebend ist in diesem Fall die Durchgangsöffnung der verwendeten Sammeleinheit. Darüber hinaus beeinflussen die Reflexionseigenschaften der binären Materialkombinationen die gemessenen Streulichtverluste.

Die rückwärtigen Streulichtkarten müssen unter Berücksichtigung der übrigen Eigenschaften betrachtet werden. Unter Berücksichtigung der hochqualitativen Oberflächenpolitur bildeten SQ2 Substrate die Grundlage der vermessenen Einzelschichtsysteme. Streulichtaufkommen der unbehandelten Rückseite können im Rahmen des bildgebenden Messverfahrens vernachlässigt werden. Unter Berücksichtigung der Laserwellenlänge entsprechen die Transmissionsgrade der binären Materialkombinationen einem unbeschichteten Quarzglassubstrat.

Zu Beginn sollen die rückwärtigen Streuverluste am Beispiel der Hafniumdioxidschicht ausgewertet werden. Unter Berücksichtigung einer relativen Messungenauigkeit von 5 % ist in Abbildung 3.10 die rückwärtige Streulichtkarte dargestellt. Die Streuverluste der ausgewählten Dünnschichtsysteme ließen sich unter Zuhilfenahme einer Tangensfunktion visualisieren. Im Hinblick auf das einlagige Schichtsystem können Streuverluste zwischen 1 ppm und 5 % aufgezeichnet werden. Im Bereich eines Durchmessers von 22 mm überlagern Randeffekte das rückwärtige Streulichtaufkommen. Darüber hinaus lassen sich Reinigungsrückstände der manuellen Substratvorbereitung identifizieren. Im Fall der gesputterten Hafniumdioxidschicht wurde ein Basisniveau von 168 ppm ermittelt. Ein Computerprogramm analysierte in diesem Zusammenhang die rückwärtigen Streuverluste.

Zusätzlich zu den Reinigungsrückständen durchsetzen vereinzelte Partikeldefekte das optische Dünnschichtsystem. Die detektierten Unvollkommenheiten können durch Verunreinigungen im Ionenstrahlsputterprozess entstehen. In Abbildung 3.11 ist das Defektaufkommen des Einzelschichtsystems dargestellt. Die zweidimensionale Streulichtkarte der Ionenstrahlgesputterten Hafniumdioxidschicht umfasst 1159 Streulichtobjekte. Eine Detektionsschwelle von 10 % bildete in diesem Zusammenhang die Grundlage. Unter Zuhilfenahme zusätzlicher Computerprogramme

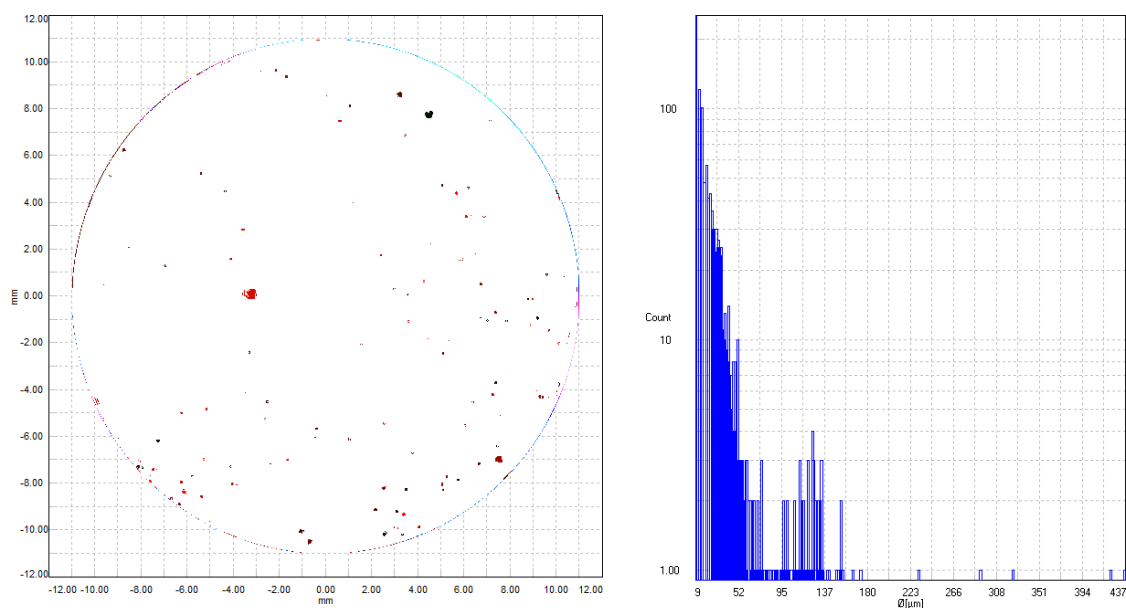


**Abbildung 3.10:** Rückwärtiges Streulichtaufkommen einer Hafniumdioxidschicht. Die Streulichtverluste der gesputterten Einzelschichtsysteme wurden im sichtbaren Spektralbereich untersucht. Zusätzlich zu Reinigungsrückständen ließen sich im Rahmen der zweidimensionalen Streulichtkarte auch Partikeldefekte nachweisen. Im Hinblick auf das Messverfahren sollte eine relative Messgenauigkeit von 5 % berücksichtigt werden.

wurde die Größenverteilung der Partikel analysiert. Die Partikelanzahl der vermessenen Dünnschichtsysteme verringerte sich mit dem Äquivalenzdurchmesser.

Im nächsten Schritt sollen die Streueigenschaften von Aluminiumoxid beziehungsweise Siliziumdioxid untersucht werden. Am Beispiel der gesputterten Siliziumdioxidschicht ließ sich ein Basisniveau von 29,7 ppm feststellen. Im Vergleich zu den anderen Ausgangsmaterialien wurde darüber hinaus ein erhöhtes Defektaufkommen ermittelt. Der geringste Streulichtverlust von 5,80 ppm ließen sich im Zentralbereich der ionenstrahlgesputterten Aluminiumoxidschicht nachweisen. Zusätzlich zum Basisniveau sind in Tabelle 3.07 auch die Minimalwerte der rückwärtigen Streulichtaufkommen zusammengefasst. In diesem Zusammenhang zeigen Aluminiumoxid und Siliziumdioxid gegenüber Hafniumdioxid ein geringeres Streulichtaufkommen.

Schlussendlich sollen die Streueigenschaften der binären Materialkombinatio-



**Abbildung 3.11:** Defektanalyse einer Hafniumoxidschicht im Streulichtmessplatz. Die Unvollkommenheiten wurden auf Grundlage einer zweidimensionalen Streulichtkarte ermittelt. Unter Berücksichtigung einer Detektionsschwelle von 10 % ließ sich mit Hilfe zusätzlicher Programme das Defektaufkommen auswerten. Die Anzahl der detektierten Unvollkommenheiten fällt laut Größenverteilung mit dem jeweiligen Objektdurchmesser.

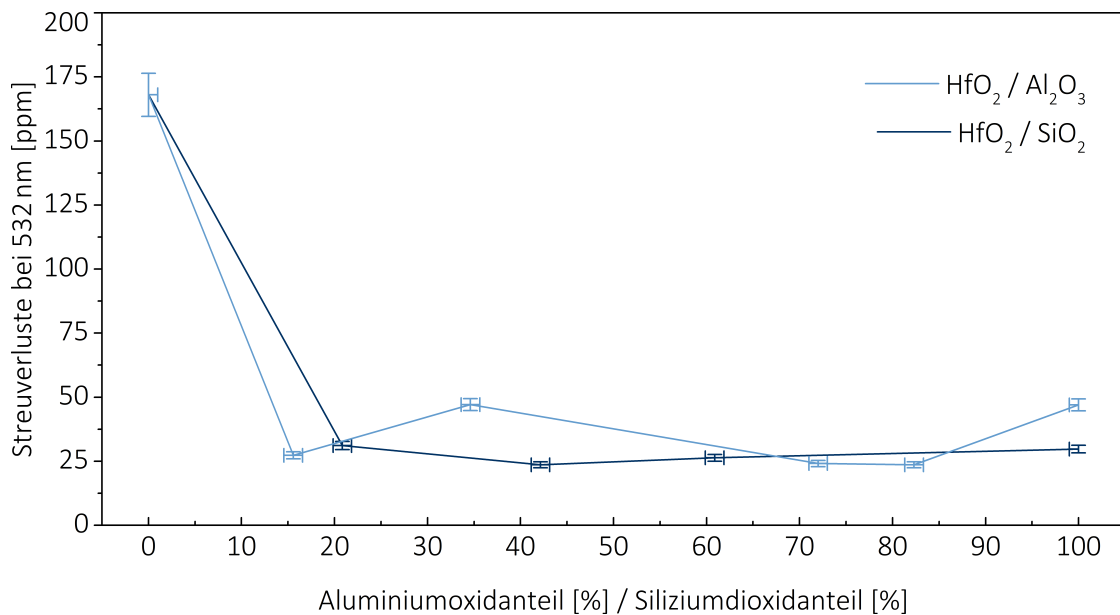
nen untersucht werden. Die verwendeten Ausgangsmaterialien schaffen in diesem Zusammenhang den Ausgangspunkt. Abbildung 3.12 zeigt auf Grundlage des sichtbaren Spektralbereichs die Basiswerte der binären Materialmischungen. Ausgewählte Einzelschichtsysteme unterlagen im Rahmen der Untersuchungen einer nachträglichen Reinigungsprozedur. In Folge dessen hatte sich das Streulichtaufkommen eines Aluminiumoxidanteil von 34 beziehungsweise 100 % verstärkt. Geringe Mischungsverhältnisse der Materialkombinationen offenbarten bereits eine signifikante Streulichtabnahme. Im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit wurden

Streuverluste [ppm]	HfO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Basisniveau	168	29,7	47,0
Mindestwert	96,1	6,24	5,80

**Tabelle 3.07:** Rückwärtige Streuverluste der gesputterten Ausgangsmaterialien. Zusätzlich zur Hafniumdioxidschicht wurden auch die niedrigbrechenden Schichtmaterialien untersucht. Das sichtbare Streulichtaufkommen der Ausgangsmaterialien ließ sich mit einer relativen Messungenauigkeit von 5 % ermitteln. Im Gegensatz zur Siliziumdioxidschicht unterlag die Aluminiumoxidschicht im Hinblick auf die Untersuchungen einer nachträglichen Reinigungsprozedur.

am Beispiel der einlagigen Hafniumdioxidschicht mehrerer Wiederholungen durchgeführt. Dieckmann [67] untersuchte im Rahmen des Mischungskonzepts die Eigenschaften von aufgedampften Hafniumdioxidschichten. Im Fall von Siliziumdioxid offenbarte Rasterelektronenmikroskopie eine Verwaschung der mikrokristallinen Schichtstruktur. Darüber hinaus steigerten Konzentrationen im Bereich von 10 bis 18 % den Brechungsindex des hochbrechenden Beschichtungsmaterials. Ausschlaggebend ist die höhere Packungsdichte der Materialkombination im Vergleich zur Säulenstruktur einer aufgedampften Hafniumdioxidschicht.

Im Rahmen des Mischungskonzepts ließen sich ausgewählte Streueigenschaften der Materialkombinationen untersuchen. Am Beispiel der Hafniumdioxidschicht wurde ein Basisniveau der totalen Streuverluste von 168 ppm festgestellt. Sowohl Aluminiumoxid als auch Siliziumdioxid reduzierten auf Grundlage geringer Beimischungen das rückwärtige Streulichtaufkommen. Im Hinblick auf die Anwendungsbereiche sollen weitere Einflussmöglichkeiten des Mischungskonzepts identifiziert werden. Zu diesem Zweck folgt eine Untersuchung der binären Materialkombinationen auf Grundlage der Bandstruktur. Im nächsten Abschnitt dieses Kapitels sollen mit Hilfe der Photolumineszenzspektren die elektronischen Übergänge identifiziert werden.



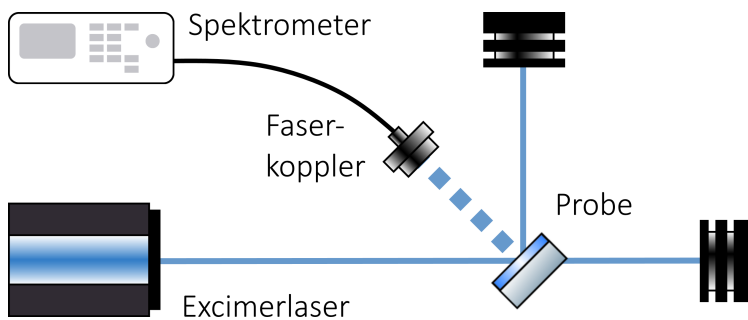
**Abbildung 3.12:** Rückwärtige Streuverluste der binären Materialkombinationen. Das totale Streulichtaufkommen der ausgewählten Mischmaterialien wurde untersucht. In diesem Zusammenhang ist eine relative Messungenauigkeit von 5 % zu berücksichtigen. Das ermittelte Basisniveau der Aluminiumoxidanteile von 34 und 100 % wurde im Rahmen einer nachträglichen Reinigungsprozedur beeinflusst.

### 3.6 Photolumineszenzspektroskopie

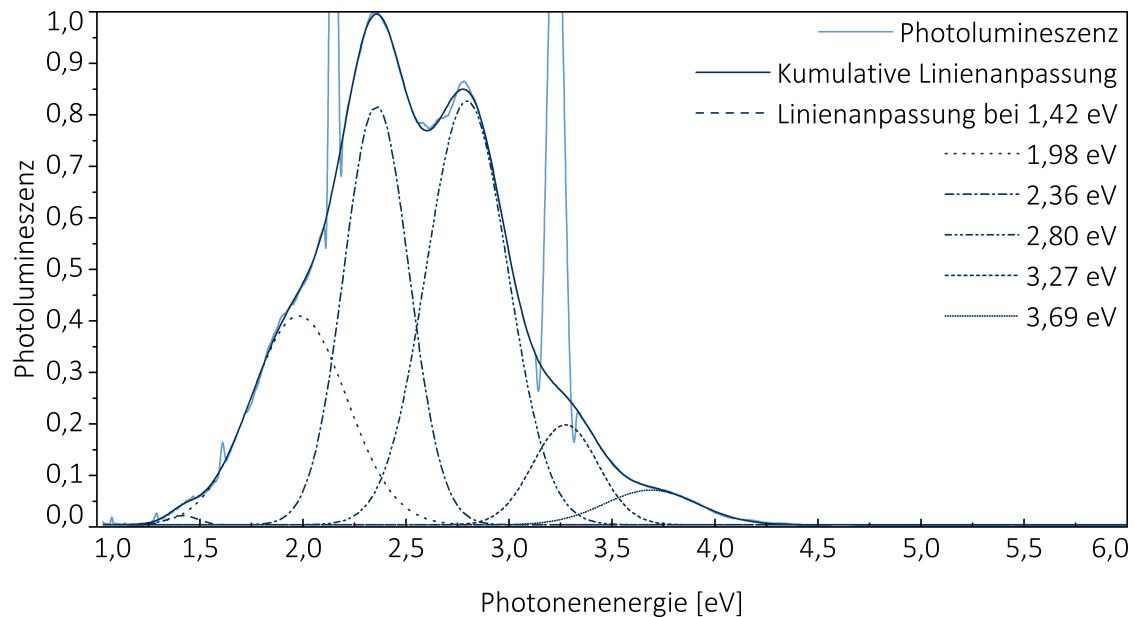
Unter Zuhilfenahme der Photolumineszenzspektroskopie soll die Bandstruktur der optischen Dünnschichtsysteme charakterisiert werden. Die bisherigen Schichtuntersuchungen der binären Materialkombinationen bilden in diesem Zusammenhang den Hintergrund. Der maßgeschneiderte Photolumineszenzmessplatz reicht vom ultravioletten bis zum infraroten Spektralbereich. Am Beispiel der Hafniumdioxidschicht beschreibt die erste Hälfte dieses Abschnitts die Photolumineszenzspektroskopie. Die Emissionsspektren der binären Mischschichten werden in der zweiten Hälfte dieses Abschnitts behandelt.

Unter Zuhilfenahme von Laserpulsen sollen im Bereich ultravioletter Wellenlängen die Valenzelektronen angeregt werden. In diesem Zusammenhang lassen sich die Emissionsspektren der gesputterten Einzelschichtsysteme generieren. Die Energie der emittierten Photonen gibt Aufschluss über die elektronische Bandstruktur einer Materialkombination. Zusätzlich zur Fluoreszenz beschreibt die Phosphoreszenz unter diesen Bedingungen ein Abklingen der angeregten Ladungsträger. Unter Berücksichtigung der Valenz- und Leitungsbandkante können Defektzustände des optischen Dünnschichtsystems identifiziert werden. Die Charakterisierung der binären Materialkombinationen erfolgte in Kombination mit Suprasil 2 Substraten.

Im Hinblick auf die Bandstrukturanalyse zeigt Abbildung 3.13 den errichteten Lumineszenzmessplatz. Laut Lambda Physik AG ist der Excimerlaser LPF 200 mit einer Wellenlänge von 193 nm spezifiziert. Sowohl die Abbildungssysteme als auch die binären Materialkombinationen müssen in Folge dessen mit Stickstoff gespült werden. Unter Zuhilfenahme eines Spiegels ließ sich das Lumineszenzspektrum im Bereich der Anregungswellenlänge unterdrücken. Ausschlaggebend ist in diesem Zusammenhang das Streulichtaufkommen der hochbrechenden Materialkombinationen. Anschließend wird die ausgesandte Strahlung mit Hilfe der optischen Faser XSR zur Detektoreinheit geleitet. Laut Ocean Optics Inc ist in diesem Fall ein Transmissionsbereich von 180 bis 900 nm vorgesehen. Zum Schluss muss die Photolumineszenz der optischen Dünnschichtsysteme charakterisiert werden. Das Spektrometer iHR320 der HORIBA Jobin Yvon GmbH bildet in Kombination mit dem Kamerasystem Synapse die Grundlage.



**Abbildung 3.13:** Schematischer Messaufbau zur Photolumineszenzspektroskopie mit Hilfe von [68]. Die Proben werden durch einen Excimerlaser angeregt. Zur Charakterisierung dient in diesem Fall ein Spektrometer.



**Abbildung 3.14:** Photolumineszenzspektrum der Hafniumdioxidschicht. Unter Zuhilfenahme der Photolumineszenzspektroskopie ließen sich elektronische Übergänge identifizieren. In diesem Zusammenhang wurden die Emissionslinien auf Grundlage Gaußscher Normalverteilungen angepasst. Ungeachtet dessen überlagert Streulichtaufkommen das Lumineszenzspektrum der ionenstrahlgesputterten Hafniumdioxidschicht.

Die binären Materialkombinationen wurden auf Grundlage einer Folgefrequenz von 200 Hz beschossen. In diesem Zusammenhang konnte der eingesetzte Excimerlaser eine Pulsenergie von 3,5 mJ bereitstellen. Die Bandstrukturen der optischen Dünnschichtsysteme wurden unter einem Einfallswinkel von  $45^\circ$  analysiert. Während der Photolumineszenzspektroskopie befanden sich die gesputterten Einzelschichtsysteme unter Normalbedingungen. Unter Berücksichtigung eines Eingangspalts von 2 mm wurde das Spektrometer auf Grundlage einer Integrationszeit von 1 s betrieben. Unter Zuhilfenahme sequentieller Messzyklen ließen sich die Signalrauschverhältnisse der charakteristischen Photolumineszenzspektren reduzieren.

Im ersten Schritt soll die Bandstruktur der Einzelschichtsysteme am Beispiel der Hafniumdioxidschicht ermittelt werden. Abbildung 3.14 zeigt in diesem Zusammenhang das normierte Lumineszenzspektrum des Beschichtungsmaterials. Unter Zuhilfenahme Gaußscher Normalverteilungen konnten Emissionslinien der einlagigen Hafniumdioxidschicht identifiziert werden. In Anbetracht der Raumtemperatur ist eine Verbreiterung der elektronischen Übergänge zu berücksichtigen. Darüber hinaus überlagern Störsignale das Lumineszenzspektrum im Bereich von Vielfachen der Anregungswellenlänge. Ausschlaggebend ist in diesem Zusammenhang das erhöhte Streulichtaufkommen der Hafniumdioxidschicht. Unter Zuhilfenahme des Photolumineszenzspektrums konnten sechs elektronische Übergänge des Schichtmaterials festgestellt werden. Die Emissionslinien der optischen Dünnschicht sind

Photonenenergie	Linienbreite [eV]	Photonenenergie	Linienbreite [eV]
$1,416 \pm 0,002$	$0,142 \pm 0,003$	$2,796 \pm 0,001$	$0,395 \pm 0,002$
$1,980 \pm 0,002$	$0,465 \pm 0,002$	$3,274 \pm 0,002$	$0,318 \pm 0,006$
$2,356 \pm 0,001$	$0,317 \pm 0,001$	$3,688 \pm 0,012$	$0,452 \pm 0,014$

**Tabelle 3.08:** Charakteristiken im Lumineszenzspektrum von Hafniumdioxid. Die elektronische Bandstruktur einer Hafniumdioxidschicht wurde charakterisiert. Unter Zuhilfenahme Gaußscher Normalverteilungen ließen sich Emissionslinien interpolieren. Die Grundlage bildete das normierte Photolumineszenzspektrum der Hafniumdioxidschicht.

unter Berücksichtigung der Linienbreite in Tabelle 3.08 zusammengefasst.

Unter Zuhilfenahme der Emissionslinien soll im nächsten Schritt die Bandstruktur der optischen Dünnschicht analysiert werden (siehe Abschnitt 2.4). Das gemessene Lumineszenzspektrum erstreckt sich vom ultravioletten bis zum infraroten Spektralbereich. Toshihide und Kollegen [69] konnten im Bereich einer Energiedifferenz von 2,80 eV ebenfalls eine Emissionslinie nachweisen. Die Hafniumdioxidschicht resultierte in diesem Fall aus einer plasmaunterstützten chemischen Gasphasenabscheidung. Foster und Kollegen [1] berechneten darüber hinaus ähnliche Übergänge am Beispiel einer monoklinen Hafniumdioxidstruktur. Ausschlaggebend waren in diesem Zusammenhang die Zwischengitterstörungen auf Grundlage eines atomaren Sauerstoffmangels. Ciapponi und Kollegen [70] konnten ungeachtet dessen weitere Lumineszenzdefekte nachweisen. Die Hafniumdioxidschichten reichen von der Elektronenstrahlverdampfung bis zum dualen Ionenstrahlputterverfahren.

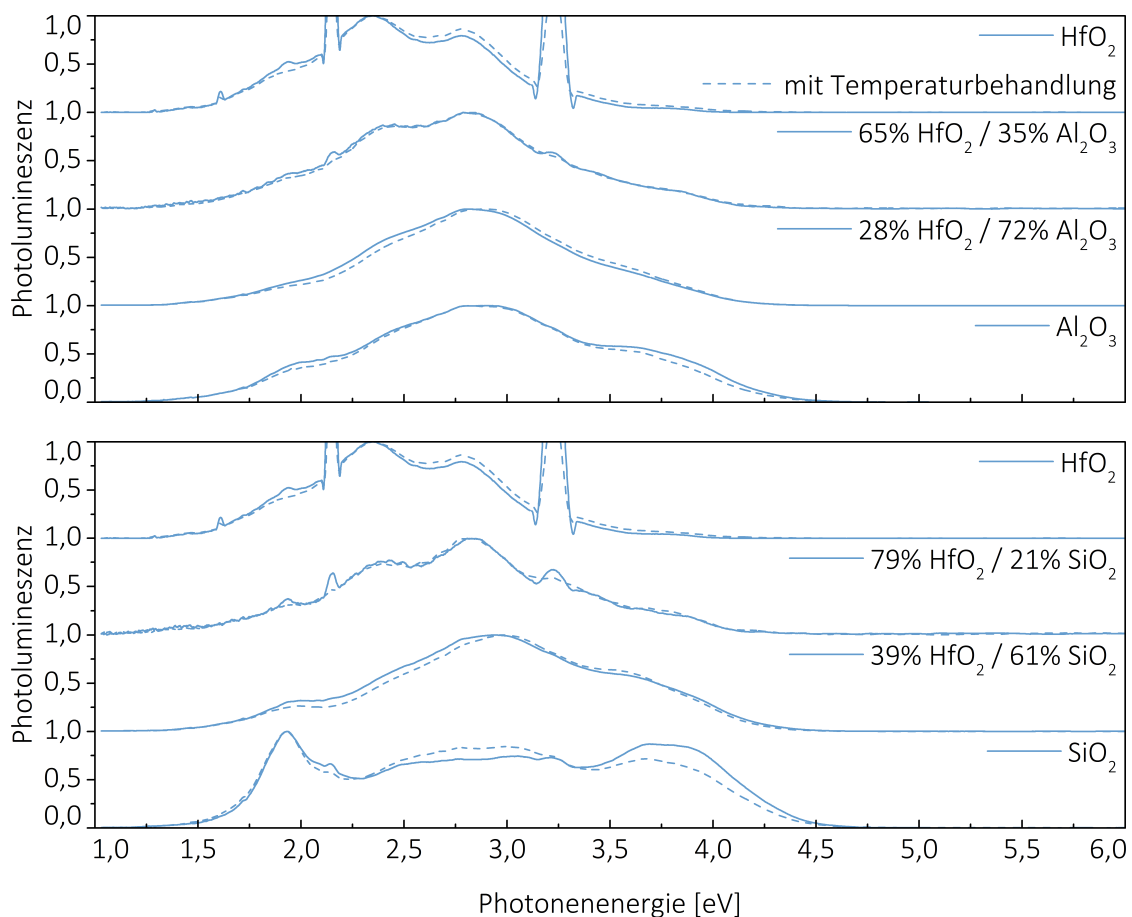
Im Hinblick auf die gesputterten Materialkombinationen schafft die Hafniumdioxidschicht den Ausgangspunkt. Sowohl Aluminiumoxid als auch Siliziumdioxid bilden die weiteren Bestandteile der Schichtmaterialien. Zusätzlich zu den Ausgangsmaterialien sind in Abbildung 3.15 die Lumineszenzspektren der binären Stoffkombinationen dargestellt. Die Photolumineszenzspektren der optischen Dünnschichten mussten in Anbetracht der unterschiedlichen Schichteigenschaften normiert werden. In Übereinstimmung mit Leclerc und Kollegen [71] offenbart die Siliziumdioxidschicht ein rotes Fluoreszenzband. Ausschlaggebend sind in diesem Zusammenhang nicht überbrückende Fehlstellen in Folge eines Sauerstoffmangels. Im Photolumineszenzspektrum der Aluminiumoxidschicht konnten ebenfalls Emissionslinien nachgewiesen werden.

Zusätzlich zu den Ausgangsmaterialien sollen die Emissionsspektren der binären Stoffkombinationen charakterisiert werden. Die Lumineszenzspektren können in diesem Fall als Superposition der jeweiligen Schichtbestandteile beschrieben werden. Im Rahmen einer 8 stündigen Nachbehandlung auf Grundlage einer Temperatur von 300 °C ließen sich die Gesamtverluste reduzieren. In diesem Zusammenhang soll die Bandstruktur der binären Materialkombinationen analysiert werden. Am Beispiel der Siliziumdioxidschicht resultieren die Veränderungen aus dem Anregungsprozess der optischen Dünnschichtsysteme. In Folge dessen konnten



keine Einflüsse der nachträglichen Temperaturbehandlung festgestellt werden.

Rückblickend ließ sich das Photolumineszenzspektrum einer gesputterten Hafniumdioxidschicht ermitteln. Die Emissionslinien konnten mit einem atomaren Sauerstoffmangel in Verbindung gebracht werden. Allerdings blieben die Lumineszenzspektren von einer nachträglichen Temperaturbehandlung unbeeinflusst. Die binären Stoffkombinationen bildeten eine Überlagerung der entsprechenden Ausgangsmaterialien. Neben den einlagigen Probestücken sollen die binären Materialkombinationen auch komplexe Mehrschichtsysteme verbessern. Der nächste Abschnitt dieses Kapitels erprobt das Mischungskonzept am Beispiel eines ultravioletten Lasersystems.



**Abbildung 3.15:** Photolumineszenzspektren der binären Materialkombinationen. Die gesputterten Einzelschichtsysteme wurden mit Hilfe eines Excimerlasers angeregt. Ein fasergekoppeltes Spektrometer charakterisierte anschließend die ausgesendete Strahlung. Die Lumineszenzspektren der binären Stoffkombinationen resultieren aus einer Überlagerungen der Ausgangsmaterialien. In diesem Zusammenhang muss das eingekoppelte Streulichtaufkommen der Hafniumdioxidschicht vernachlässigt werden.

## 3.7 Optimierung beispielhafter Laserkomponenten

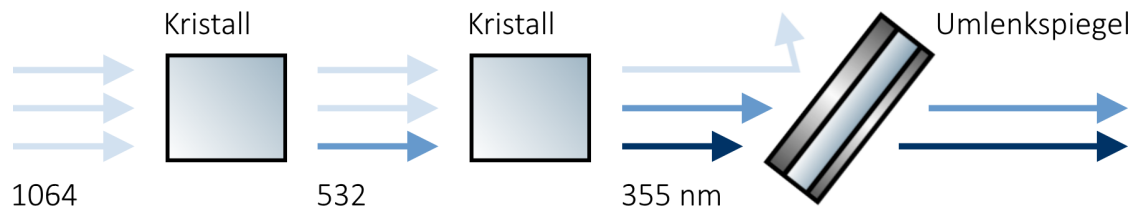
Funktionale Dünnschichten werden zum Beispiel in ultravioletten Lasersystemen verwendet. In diesem Zusammenhang profitieren unter anderem biomedizinische Forschung sowie optimierte Herstellungsprozesse. Kompakte Lasersysteme mit einem günstigen PreisLeistungsverhältnis können die Anwendungsbereiche erweitern. Die Leistungseffizienz einer nichtlinearen Frequenzkonversion kann mit Hilfe der optischen Dünnschichten erhöht werden. Darüber hinaus sind sowohl die nichtlinearen Kristalle als auch die Laserplattform zu berücksichtigen. Im Hinblick auf kommerzielle Lasersysteme wird eine hohe Langzeitstabilität der funktionalen Schichten gefordert. Am Beispiel der Frequenzverdreifung ist eine erhöhte Ausgangsleistung im ultravioletten Spektralbereich beabsichtigt. Die reduzierten Gesamtverluste der Materialkombinationen sollen in diesem Fall die Voraussetzung schaffen.

Unter Zuhilfenahme des Mischungskonzepts sollen anwendungsorientierte Mehrschichtsysteme realisiert werden. Die Laserkomponenten einer nichtlinearen Frequenzkonversion bilden in diesem Zusammenhang die Grundlage. Die funktionalen Dünnschichten werden im Ionenstrahlputterverfahren hergestellt. Auf Grundlage der Spezifikationen sind sowohl die Absorptionsverluste als auch das Streulichtaufkommen zu charakterisieren. In diesem Zusammenhang sollen die optimierten Dünnschichten mit konventionellen Referenzsystemen verglichen werden. Die erste Hälfte dieses Abschnitts beinhaltet die Herstellung der exemplarischen Laserkomponenten. Die Eigenschaften der funktionalen Dünnschichtsysteme beschreibt die zweite Hälfte dieses Abschnitts.

### 3.7.1 Herstellung der komplexen Resonatorspiegel

Im Hinblick auf die spektralen Spezifikationen des Resonatorspiegels ist eine hohe Schichtdickenpräzision erforderlich. Die aufwachsenden Dünnschichten werden in Folge dessen mit Hilfe eines optischen Breitbandmonitors abgeschaltet. Ausschlaggebend ist das Transmissionsspektrum vom ultravioletten bis zum infraroten Wellenlängenbereich. Unter Zuhilfenahme der Breitbandmonitorierung können Filter mit einer Schichtdicke von mehreren 10  $\mu\text{m}$  realisiert werden. Die optischen Komponenten am Extremely Large Telescope dienen in diesem Zusammenhang als Beispiel. Laut Gilmozzi und Spyromilio [72] liefert das Großteleskop der Europäischen Südsternwarte ein wissenschaftliches Sichtfeld von mindestens fünf Bogenminuten. Im Rahmen dieser Arbeit soll der optische Breitbandmonitor die Herstellung der anwendungsorientierten Mehrschichtsysteme ermöglichen.

Das exemplarische Lasersystem generiert die ultraviolette Strahlung mit Hilfe nichtlinearer Konversionskristalle. Unter Zuhilfenahme Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Kristalle wird die Grundwellenlänge bereitgestellt. Unter Berücksichtigung einer Wellenlänge von 808 nm bilden Pumpmodule die Vorausset-



**Abbildung 3.16:** Schematische Darstellung des komplexen Umlenkspiegels mit Hilfe von [68]. Hochreflektierende Schichten falten die Grundwellenlänge der nichtlinearen Frequenzkonversion. Die ultraviolette Ausgangsstrahlung wird mit Hilfe periodisch gepolter Konversionskristalle generiert. Darüber hinaus sind in diesem Zusammenhang sowohl die erste Oberwelle als auch die ultraviolette Ausgangsstrahlung zu entkoppeln.

zung. Ein gleichschenkliger Dreiecksresonator überhöht den elektrischen Feldverlauf der Grundwellenlänge unter Berücksichtigung der Polarisation. Die infrarote Laserstrahlung soll mit Hilfe der periodisch gepolten Kristalle eine Laserwellenlänge von 355 nm generieren. Im Hinblick auf die Konversionseffizienz spielen die hochreflektierenden Resonatorspiegel eine wichtige Rolle. Darüber hinaus werden mit Hilfe der komplexen Mehrschichtsysteme auch die unerwünschten Longitudinalmoden entkoppelt.

Die spektralen Anforderungen im Rahmen der nichtlinearen Konversionsprozesse sind in Abbildung 3.16 dargestellt. Unter Zuhilfenahme der polarisationsabhängigen Reflexion lässt sich die Leistung der Grundwellenlänge verstärken. Die Überhöhung der infraroten Laserstrahlung steht im Gegensatz zur Transmission der dritten Harmonischen. Darüber hinaus soll sowohl der Pumplichtbeitrag als auch die erste Oberwelle unterdrückt werden. Die Spezifikationen des komplexen Mehrlagensystems sind in Tabelle 3.09 zusammengefasst.

Unter Zuhilfenahme der binären Materialkombinationen sollen sowohl die Absorptionsverluste als auch das Streulichtaufkommen reduziert werden. Im Hinblick auf die spektralen Anforderungen eignen sich die temperaturbehandelte Aluminiumoxidkombinationen. Die Untersuchungen der einlagigen Musterbeispiele schaffen in diesem Zusammenhang die Grundlage. Unter Zuhilfenahme eines Alumini-

	1064	808	532	355 nm
Vorderseite	$R_s > 99,9\% / R_p < 35\%$	$R < 4\%$	$R_s < 2\%$	$R_s < 2\% / T_s > 94\%$
Rückseite	$R < 1\%$	$R < 2\%$	$R_s < 1\%$	$R_s < 1\%$

**Tabelle 3.09:** Spektrale Anforderungen des komplexen Resonatorspiegels. Die exemplarische Laserkomponente befindet sich in einem Dreiecksresonator. In Folge dessen definieren die nichtlineare Konversionsprozesse die spektralen Anforderungen. Die Laserkomponente muss die Grundwellenlänge mit Hilfe eines infraroten Dünnschichtpolarisators überhöhen. Unter Zuhilfenahme eines Einfallswinkels von  $38^\circ$  soll die ultraviolette Ausgangswellenlänge ausgekoppelt werden.

umoxidanteils von 16 % sollen die Absorptionsverluste reduziert werden. Die binäre Materialkombination unterliegt darüber hinaus einem geringen Brechzahlverlust. Außerdem ließ sich unter diesen Bedingungen das Streulichtaufkommen der einlagigen Hafniumdioxidschicht reduzieren. In Anbetracht der spektralen Anforderungen wird zusätzlich zur Materialkombination das niedrigbrechende Siliziumdioxid verwendet.

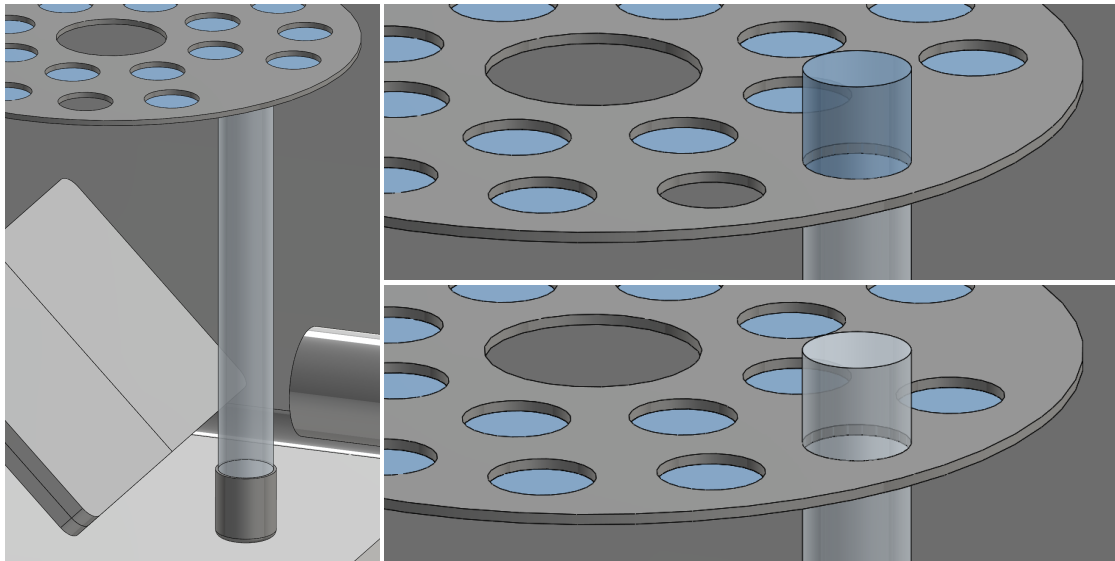
Im Hinblick auf den Aufbau der optischen Dünnschicht schafft die Reflexion der infraroten Grundwellenlänge den Ausgangspunkt. Das Grundsystem mit 40 Schichten wurde unter Berücksichtigung der zahlreichen Entspiegelungen angepasst. Vorgegebene Stützstellen des Designprogramms bildeten in diesem Zusammenhang die Voraussetzung. Unter Zuhilfenahme breitbandiger Zielvorgaben werden mögliche Inhomogenitäten der Schichtdicke berücksichtigt. Darüber hinaus kann die geplante Temperaturbehandlung eine Verschiebung der Wellenlänge verursachen. In Anbetracht der reduzierten Brechungsindizes ist im Rahmen der Materialkombination die physikalische Dicke von 6,7 auf 7,2  $\mu\text{m}$  angewachsen. Die Unterschiede zwischen dem binären Mischungskonzept und der konventionellen Referenzschicht sind in Tabelle 3.10 zusammengefasst.

Die exemplarischen Resonatorspiegel resultieren aus einem vollständig automatisierten Beschichtungsprozess. Unter Zuhilfenahme energetischer Argonionen werden die metallischen Beschichtungsmaterialien zerstäubt. In Folge dessen unterliegen die Laserkomponenten während des Ionenstrahlsputterverfahrens einer Sauerstoffatmosphäre. Die Zerstäubung der binären Stoffkombination erfolgt auf Grundlage der benachbarten Ausgangsmaterialien. Während des Schichtwechsels können die ultravioletten Laserkomponenten durch Aluminiumbleche geschützt werden. Zusätzlich zur Substratrotation lassen sich die eintreffenden Schichtmaterialien mit Hilfe von Homogenitätsblenden uniformieren.

Die Schichtdickenkontrolle der ultravioletten Laserkomponenten übernimmt ein optischer Breitbandmonitor. In Abbildung 3.17 sind die verwendeten Messpositionen des Substrathalters dargestellt. Die Bestrahlung wird mit Hilfe einer Halogenlampe innerhalb der Hochvakuumkammer realisiert. Unter Berücksichtigung der Substratdrehung erfasst der optische Breitbandmonitor den aufwachsenden Dünnschichtfilm. Außerdem lässt sich in diesem Zusammenhang sowohl die Referenzmessung

Entwurf	Schichtmaterial	Gesamtdicke [ $\mu\text{m}$ ]
Mischungskonzept	84 % $\text{HfO}_2$ / 16 % $\text{Al}_2\text{O}_3$	7,2
Referenzsystem	$\text{HfO}_2$	6,7

**Tabelle 3.10:** Entwurfseigenschaften der ultravioletten Laserkomponenten. Die Materialkombinationen sollen am Beispiel einer nichtlinearen Frequenzkonversion angewendet werden. Zu diesem Zweck sind die funktionalen Dünnschichten mit einem konventionellen Referenzsystem zu vergleichen. Ausschlaggebend für die physikalische Gesamtdicke ist der Brechwertkontrast der verwendeten Beschichtungsmaterialien.



**Abbildung 3.17:** Schematische Anordnung der optischen Breitbandmonitorierung. Im Hinblick auf die Laserkomponenten ist eine präzise Schichtdickenkontrolle erforderlich. Die aufwachsenden Dünnschichten werden in Folge dessen mit Hilfe eines optischen Breitbandmonitors vermessen. Außerdem sind sowohl die freibleibende Referenzposition als auch die Dunkelmessung zu berücksichtigen. Unter Zuhilfenahme eines fasergekoppelten Spektrometers können die Transmissionsanteile schließlich analysiert werden.

als auch das Hintergrundsignal ermitteln. Unter Zuhilfenahme eines fasergekoppelten Spektralphotometers werden im Bereich von 420 bis 950 nm die Transmissionsanteile charakterisiert. Die optische Breitbandmonitorierung kann unter diesen Bedingungen eine Wellenlängengenauigkeit von unter 0,5 % erreichen. Laut Ristau und Kollegen [73] wurde der Bewertungsalgorithmus im Rahmen der Kalkulation berücksichtigt.

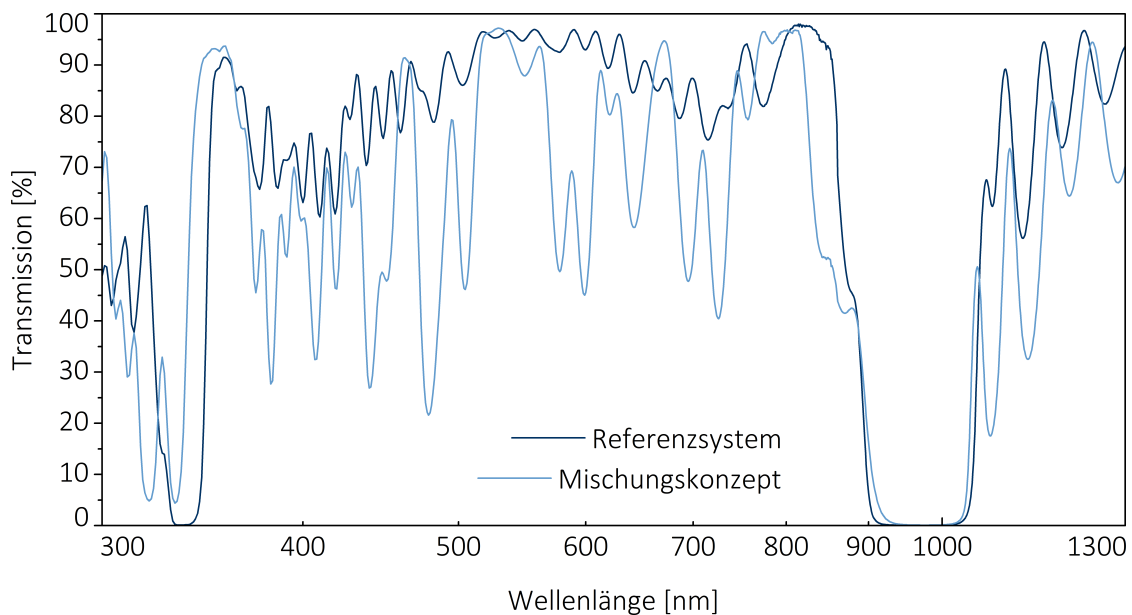
Unter Zuhilfenahme des binären Mischungskonzepts wurden Laserkomponenten für den ultravioletten Spektralbereich realisiert. Die aufwachsenden Dünnschichten ließen sich mit Hilfe optischer Breitbandmonitorierung abschalten. Im nächsten Abschnitt sollen die Eigenschaften der komplexen Mehrschichtsysteme untersucht werden.

### 3.7.2 Anwendungsorientierte Untersuchung der Schichten

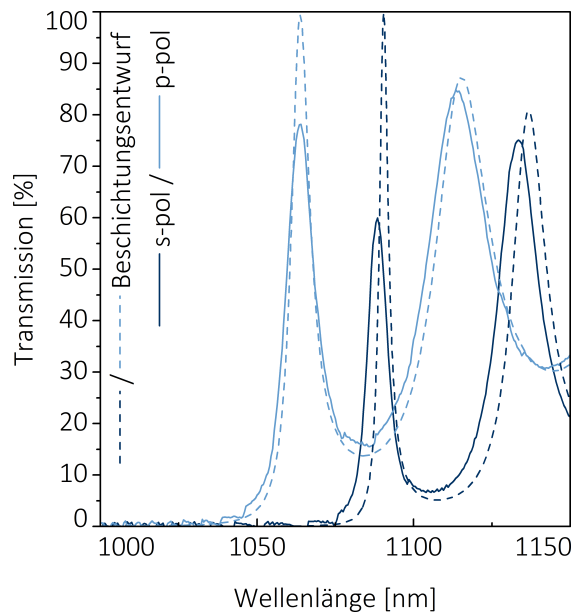
Die hergestellten Dünnschichten sollen die Leistungseffizienz der nichtlinearen Frequenzkonversion erhöhen. Darüber hinaus ist auch das Streulichtaufkommen der komplexen Mehrschichtsysteme zu unterdrücken. Die Eigenschaften der funktionalen Schichten sollen unter Berücksichtigung der Anwendungsbedingungen charakterisiert werden. In diesem Zusammenhang sind unter anderem die spektralen Anforderungen der Frequenzkonversion zu berücksichtigen.

Die modifizierte Laserkomponente wurde ebenso wie das konventionelle Referenzsystem im Ionenstrahlputterverfahren realisiert. Unter Zuhilfenahme der prozessbegleitenden Transmissionsspektren ließen sich Schichtdickenabweichungen von unter 1 nm feststellen. Ausschlaggebend war zusätzlich zur hohen Prozessstabilität auch die Verwendung der optischen Breitbandmonitorierung. Im Vergleich zum Referenzsystem wurde im Fall der binären Materialkombination eine Beschichtungsrate von 0,118 statt 0,092 nm/s berechnet. Darüber hinaus zeigte sich im Hinblick auf die Quarzglassubstrate eine hohe Haftbeständigkeit der Schichtsysteme. Unter Zuhilfenahme der angefertigten Homogenitätsblenden konnte eine Schichtdickenverteilung von 1 % realisiert werden.

Zu Beginn sollen die komplexen Resonatorspiegel mit Hilfe breitbandiger Spektralphotometrie charakterisiert werden. Ausschlaggebend ist in diesem Zusammenhang die Leistungseffizienz der nichtlinearen Frequenzkonversion. In diesem Fall werden die einseitigen Monitorsubstrate unter Berücksichtigung eines Einfallswinkels von  $38^\circ$  vermessen. Im Hinblick auf die Anwendungsbedingungen unterlagen die Lichtstrahlen einer parallelen Polarisationsrichtung. In Abbildung 3.18 sind die spektralen Transmissionsgrade als Funktion der Wellenlänge dargestellt. Im Rahmen der Charakterisierung zeigt sich zusätzlich zu den höheren Harmonischen auch die Entspiegelung der verwendeten Pumplichtmodule. Im Hinblick auf den



**Abbildung 3.18:** Breitbandige Transmissionsspektren der Resonatorspiegel. Unter Berücksichtigung eines Einfallswinkels von  $38^\circ$  wurde im Hinblick auf die Anwendungsbedingungen die parallele Polarisationsrichtung verwendet. Im Rahmen der spektralen Charakterisierung ist unter diesen Bedingungen eine Messungenauigkeit von etwa 0,1 % zu berücksichtigen. Unter Zuhilfenahme der Materialkombinationen konnten die Transmissionsgrade des ultravioletten Spektralbereichs gesteigert werden.



**Abbildung 3.19:** Transmissionsspektren des infraroten Dünnpolarisators. Unter Zuhilfenahme der Laserkomponente entsteht eine polarisationsabhängige Leistungsüberhöhung. Die Transmissionsgrade der vergüteten Rechtecksubstrate wurden auf Grundlage eines Einfallswinkels von  $38^\circ$  charakterisiert. Im Rahmen der Spektralphotometrie ist unter diesen Bedingungen eine Messgenauigkeit von 0,1% zu berücksichtigen. Das spektrale Auflösungsvermögen bewirkt messtechnische Abweichungen im Vergleich zur theoretischen Berechnung. Darüber hinaus können inhomogene Schichtdickenverteilung die Polarisationsabhängigkeit beeinflussen.

ultravioletten Spektralbereich steigert die binäre Materialkombination den Transmissionsgrad. Im Unterschied zur vollständigen Laserkomponente sind in diesem Zusammenhang die Rückseitenreflexe zu berücksichtigen. Unter Zuhilfenahme von Reflexionsmessungen ließen sich im Wellenlängenbereich von 355 nm die optischen Gesamtverluste ermitteln. Im Vergleich zum konventionellen Referenzsystem wurde ein Gesamtverlust von 0,93 statt 2,84 % festgestellt. In Anbetracht der verwendeten Charakterisierungsverfahren ist eine absolute Messabweichung von etwa 0,3 % zu berücksichtigen.

Im Hinblick auf die nichtlinearen Konversionsprozesse muss die Grundwellenlänge überhöht werden. Darüber hinaus soll das Reflexionsverhalten der infraroten Laserstrahlung vom Polarisationszustand abhängen. Die Transmissionsgrade der modifizierten Laserkomponente sind in Abbildung 3.19 unter Berücksichtigung der Anwendungsbedingungen dargestellt. In diesem Zusammenhang werden die gemessenen Transmissionsspektren mit dem Beschichtungsdesign verglichen. Die berechneten Spektralverläufe beruhen auf den experimentellen Dispersionsdaten der binären Materialkombination. Die Abweichungen können aus einer inhomogenen Schichtdickenverteilung der Dünnschichtsysteme resultieren. Im Hinblick auf die Transmissionsspitzen sollte darüber hinaus das spektrale Auflösungsvermögen berücksichtigt werden.

Unter Zuhilfenahme der binären Materialkombination soll störendes Streulichtaufkommen unterdrückt werden. Zu diesem Zweck erfolgte eine Mikroskopie der komplexen Umlenkspiegel auf Grundlage einer indirekten Weißlichtquelle. Die Streueigenschaften der einseitigen Monitorsubstrate werden in Abbildung 3.20 unter Berücksichtigung einer Belichtungszeit von 200 ms dargestellt. Im Vergleich zur

getrübten Referenzschicht erhöhte das binäre Mischungskonzept die Durchlässigkeit der optischen Dünnschicht. In diesem Zusammenhang konnten die sichtbaren Streulichtverluste der Laserkomponente um 26 auf 201 ppm reduziert werden.

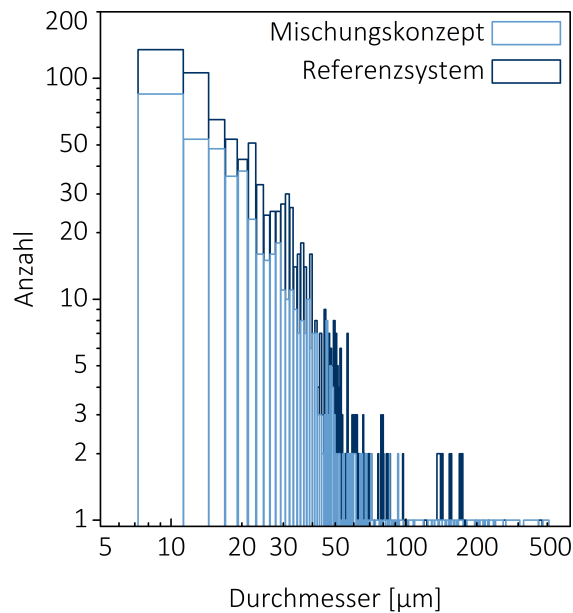
Zusätzlich zum Beschichtungsmaterial beeinflussen Unvollkommenheiten die Streulichtverluste der komplexen Mehrschichtsysteme. Darüber hinaus können Defektaufkommen auch die laserinduzierte Zerstörfestigkeit der Dünnschichtsysteme beeinträchtigen. Abbildung 3.21 zeigt unter Berücksichtigung der rückwärtigen Streulichtkarten die Größenverteilungen der detektierten Unvollkommenheiten. Die Defektverteilung der Laserkomponente wurde auf Grundlage einer Detektionsschwelle von 10 % ermittelt. In diesem Zusammenhang ließen sich Streulichtzentren der binären Materialkombination oberhalb eines Durchmessers von 9  $\mu\text{m}$  untersuchen. Im Vergleich zur konventionellen Referenzschicht wurde eine Reduzierung der detektierten Partikelanzahl von 1007 auf 566 festgestellt. In Folge dessen bestätigen die Streueigenschaften der komplexen Mehrschichtsysteme die Untersuchungen der einlagigen Musterbeispiele. Unter Zuhilfenahme der binären Materialkombinationen konnte die Partikelhäufigkeit fast aller Größenklassen signifikant reduziert werden.

Im Hinblick auf die Streulichtproblematik wurde eine weitere Komponente des Dreiecksresonators realisiert. In diesem Fall sollen sowohl die erste als auch die zweite Harmonische einer Reflexionsanforderung von mindestens 95 % unterliegen. Im Vergleich zur konventionellen Referenzstruktur mussten die spektralen Anforderungen mit 76 statt 66 Schichten umgesetzt werden. Die spektralen Eigenschaften der Mehrschichtsysteme ließen sich mit Hilfe der Spektralphotometrie verifizieren. Darüber hinaus wurde im Hinblick auf das binäre Mischungskonzept auch das



**Abbildung 3.20:** Dunkelfeldmikroskopie der ultravioletten Laserkomponente. Unter Zuhilfenahme der binären Materialkombination sollen Störsignale vermieden werden. Die Streueigenschaften ließen sich mit Hilfe einer indirekten Weißlichtquelle mikroskopieren. Im Vergleich zur Referenzprobe links konnte die Transparenz der binären Materialkombination rechts gesteigert werden.





**Abbildung 3.21:** Histogramm zur Defektanalyse der komplexen Mehrschichtsysteme. Defektaufkommen können die laserinduzierte Zerstörfestigkeit der ultravioletten Komponente beeinträchtigen. In Folge dessen wurde die Partikelverteilungen der einseitigen Monitorsubstrate ermittelt. Die rückwärtigen Streulichtkarten der Umlenkspiegel bildeten in diesem Zusammenhang die Grundlage. Im Vergleich zur konventionellen Referenzschicht konnte die binäre Materialkombination die Anzahl der Streulichtzentren senken. Darüber hinaus reduzierte sich in diesem Fall auch die Partikelhäufigkeit unter Berücksichtigung fast aller Größenklassen.

sichtbare Streulichtaufkommen mikroskopiert. Die signifikante Verbesserung der Streueigenschaften konnte in diesem Zusammenhang bestätigt werden.

Rückblickend offenbarte die binäre Materialkombination in Anbetracht stabiler Wachstumsprozesse eine hohe Fertigungspräzision. Im Hinblick auf den ultravioletten Spektralbereich zeigten die exemplarischen Laserkomponenten darüber hinaus einen geringeren Absorptionsverlust. Unter Zuhilfenahme der Materialkombinationen nahm die Herstellung der komplexen Mehrschichtsysteme mehr Zeit in Anspruch. Ausschlaggebend ist der geringere Brechungsindex im Vergleich zur konventionellen Hafniumdioxidschicht. Zusätzlich zu den Absorptionsverlusten konnten mit Hilfe der Materialbeimischung die Unvollkommenheiten reduziert werden.

Zusätzlich zum Lasersystem können die binären Materialkombinationen auch einen direkten Konversionsprozess ermöglichen. In diesem Fall generieren nichtlineare Interferenzschichten die dritte Harmonische auf Grundlage einer gepulsten Infrarotstrahlung. Laut Günster und Kollegen [74] könnte unter diesen Bedingungen eine Konversionseffizienz von 10 bis 15 % erreicht werden. Der letzte Abschnitt dieses Kapitels wiederholt die Ergebnisse der zurückliegenden Schichtentwicklung.

### 3.8 Zusammenfassung

Die Hafniumdioxidssysteme konnten sowohl mit Hilfe von Aluminiumoxid als auch Siliziumdioxid verbessert werden. In Übereinstimmung mit dem Lorentz-Lorenz-Modell wurden die Brechungsindizes der einlagigen Musterbeispiele beeinflusst. Der Absorptionskoeffizient ließ sich im Rahmen der Aluminiumoxidbeimischungen um eine Größenordnung reduzieren. Ungeachtet der Partikelbelastung konnte für

den Fall der Siliziumdioxidsysteme eine vergleichbare Schichtoptimierung erzielt werden. Darüber hinaus ließen sich mit Hilfe breitbandiger Photolumineszenzspektroskopie mehrere Zwischengitterstörungen identifizieren. Am Beispiel der ionenstrahlgesputterten Hafniumdioxidschicht konnte unter anderem ein Sauerstoffmangel festgestellt werden.

Schlussendlich wurden die Hafniumdioxidschichten am Beispiel einer nichtlinearen Frequenzkonversion untersucht. Die Herstellung der exemplarischen Laserkomponente berücksichtige eine binäre Materialkombination. Unter diesen Bedingungen reduzierte sich sowohl die Absorption als auch das Streulichtaufkommen der funktionalen Dünnschichten. Im Hinblick auf maßgeschneiderte Schichteigenschaften können Nanolamine einen weiteren Entwicklungsansatz darstellen. Ungeachtet dessen sollen die Wachstumsprozesse der konventionellen Ionenstrahlzerstäubung verbessert werden. Das nächste Kapitel dieser Arbeit beschäftigt sich mit den Auswirkungen eines Ionenbombardements. In diesem Zusammenhang soll der Ausgangspunkt einer ionenbasierten Schichtmodifikation geschaffen werden.

# IONENSTRAHLÄTZEN VON OPTISCHEN DÜNNSCHICHTEN

Unter Zuhilfenahme des Ionenbombardements wird eine Modifikation der optischen Komponenten beabsichtigt. Farnsworth und Kollegen [75] konnten Veränderungen am Beispiel einer beaufschlagten Substratoberfläche nachweisen. Darüber hinaus lässt sich auch das Schichtmaterial mit Hilfe einfallender Teilchenbombardements beeinflussen. Im Rahmen dieser Arbeit soll eine mit Radiofrequenz betriebene Ionenquelle die Schichtmaterialien beaufschlagen. Die Dünnschichten werden im Zuge ausgewählter Ätzprozesse mit thermischen Abscheideverfahren verglichen. Eine Breitbandmonitorierung der beaufschlagten Beschichtungsmaterialien bildet in diesem Fall die Voraussetzung. Die ausgewählten Ätzprozesse sollen im Hinblick auf ein gestütztes Schichtwachstum charakterisiert werden.

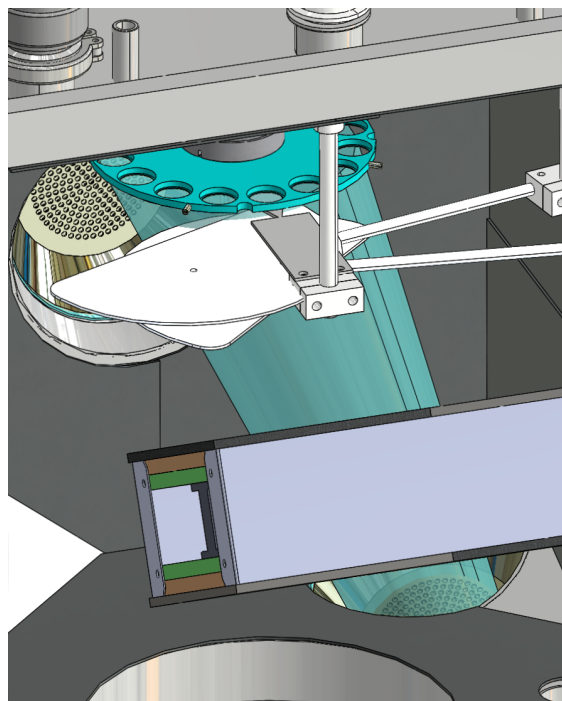
Darüber hinaus lässt sich das sekundäre Ionenbombardement auch im Rahmen der Schichtwechsel verwenden. In diesem Zusammenhang soll die laserinduzierte Zerstörfestigkeit der Schichtsysteme untersucht werden. Die optische Breitbandmonitorierung verzögert am Beispiel eines reflektierenden Dünnschichtsystems die Abschaltzeitpunkte. Anschließend kann das überschüssige Beschichtungsmaterial mit Hilfe der Ionenstrahlquelle abgetragen werden. Der Beginn dieses Kapitels beschreibt im Hinblick auf die einlagigen Ätzexperimente den Versuchsaufbau. Unter Berücksichtigung der physikalischen Zerstäubungsmechanismen werden anschließend die Ätzeigenschaften charakterisiert. Schließlich erfolgt am Beispiel der reflektierender Mehrschichtsysteme die Untersuchung der laserinduzierten Zerstörfestigkeit.

## 4.1 Ätzprozesse an einlagigen Schichtsystemen

Gestützte Wachstumsprozesse sollen eine Schichtentwicklung im Bereich ultravioletter Wellenlängen ermöglichen. In diesem Zusammenhang können die folgenden Ätzexperimente einen geeigneten Ausgangspunkt schaffen. Zusätzlich zu den Schichtmaterialien lassen sich auf Grundlage der ausgewählten Ätzprozesse auch die Abscheideverfahren differenzieren. Im Rahmen der Ätzexperimente können unter anderem die eingelassenen Prozessgase verändert werden. Darüber hinaus ist zum Beispiel die Teilchenenergie des einfallenden Ionenbombardements zu berücksichtigen. In der ersten Hälfte dieses Abschnitts werden die verwendeten Ätzaufbauten beschrieben. Die ausgewählten Ätzexperimente bilden unter Berücksichtigung der optischen Breitbandmonitorierung die zweite Hälfte.

Die grundlegenden Ätzexperimente sollen am Beispiel einlagiger Schichtsysteme durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang erweitern zusätzliche Komponenten die Ionenstrahlsputteranlage. Unter Berücksichtigung des sekundären Ionenbombardements zeigt Abbildung 4.01 den schematischen Versuchsaufbau. Die Ionenquelle wurde in der hinteren rechten Ecke der Vakuumkammer platziert. In Folge dessen trifft die höchste Stromdichte des Teilchenbombardements im Zentrum der Substrathalterung auf.

Das Teilchenbombardement wurde im Rahmen der Ätzexperimente mit Hilfe einer radiofrequenten Ionenquelle generiert. Unter Zuhilfenahme der rückwärtigen



**Abbildung 4.01:** Schematischer Versuchsaufbau der einschichtigen Ätzexperimente. Auf Grundlage relevanter Schichtmaterialien sollen die Auswirkungen eines Ionenbombardements untersucht werden. Die beschriebene Ionenstrahlsputteranlage schafft in diesem Zusammenhang den Ausgangspunkt der physikalischen Ätzexperimente. Unter Zuhilfenahme einer mit Radiofrequenz betriebenen Ionenstrahlquelle entsteht im unteren Bereich der Vakuumkammer das hochenergetische Teilchenbombardement. Im Hinblick auf eine gezielte Schichtmodifikation beaufschlagt das Ionenbombardement die Unterseiten der rotierenden Quarzglassubstrate. Unter diesen Bedingungen treffen die ionisierten Edelgasteilchen fast senkrecht auf die Schichtoberfläche.

Modell	RIM 10 Ionenquelle
Gittersystem	dreifach
Ausgangsleistung	2 kV / 600 mA

**Tabelle 4.01:** Technische Spezifikationen der sekundären Ionenstrahlquelle. Unter Zuhilfenahme der Sekundärquelle wird ein hochenergetisches Teilchenbombardement der Dünnschichtsysteme ermöglicht. Das Extraktionssystem beinhaltet drei Titangitter mit einer kontaminationsarmen Geometrieoptimierung. In Kombination mit einem Ionenstrom von 600 mA kann eine Beschleunigungsspannung von bis zu 2 kV verwendet werden.

Durchführungen lassen sich die verwendeten Arbeitsgase bereitstellen. Die Ionenquelle verfügt im Hinblick auf die Plasmageneration über einen spulenumwickelten Quarzbecher. In Übereinstimmung mit der primären Ionenstrahlquelle wurde ein Durchmesser von 10 cm verwendet. Unter Berücksichtigung einer kontaminationsarmen Geometrieoptimierung lässt sich mit Hilfe dreier Titangitter das Ionenbombardement extrahieren. In Verbindung mit einem Ionenstrom von 600 mA können unter diesen Bedingungen Beschleunigungsspannungen von bis zu 2 kV angewendet werden. Die technischen Spezifikationen der Sekundärquelle sind in Tabelle 4.01 zusammengefasst.

Im Hinblick auf die Ätzexperimente sollen die Prozessbedingungen der sekundären Ionenbeaufschlagung beschrieben werden. Das Vakuumsystem kann im Rahmen der Schichtexperimente einen Basisdruck von  $1\text{E-}6$  mbar bereitstellen. In Anbetracht des Ionenbombardements ist eine Prozesstemperatur von etwa  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  zu berücksichtigen. Darüber hinaus bilden Kombinationen aus Argon und Sauerstoff die Gasatmosphäre der jeweiligen Ätzprozesse. Unter Zuhilfenahme der Durchflussmesser lässt sich im Zuge dessen ein Prozessdruck von wenigen  $1\text{E-}4$  mbar einstellen. In Tabelle 4.02 sind die Prozessbedingungen der physikalischen Ionenstrahlätzung zusammengefasst. Unter Zuhilfenahme umfassender Aluminiumverkleidungen lassen sich oberflächliche Verunreinigungen vermeiden. Ausschlaggebend sind in diesem Fall die Fremdmaterialien der verwendeten Anlagenkomponenten.

Im Rahmen der physikalischen Ätzexperimente wurde ein rotierender Substrathalter verwendet. Ausschlaggebend war die Vergleichbarkeit der Beaufschlagung unter Berücksichtigung der jeweiligen Probenposition. Die Quarzglassubstrate der einlagigen Dünnschichtsysteme mussten einem Probendurchmesser von 25 mm aufweisen. Zusätzlich zu den oxidischen Probenstücken sollen auch die Ätzeigenschaften von fluoridischen Schichtmaterialien untersucht werden. Im Hinblick auf die Monitorierung teilen alle Schichtsysteme den selben Radius des Substrathalters. Eventuelle Beschichtungen der Komponenten in Folge zerstäubter Umgebungsmaterialien sollen verhindert werden. In diesem Zusammenhang werden die rückwärtigen Substratoberflächen mit Hilfe einer Aluminiumabdeckung geschützt.

Unter Zuhilfenahme einheitlicher Prozessabläufe soll die Vergleichbarkeit der physikalischen Ätzexperimente gewährleistet werden. Im Rahmen der Warmlauf-

---

Prozessdruck	wenige 1E-4 mbar
Atmosphäre	Argon / Sauerstoff
Temperatur	etwa 100 °C

---

**Tabelle 4.02:** Prozessbedingungen der physikalischen Ätzexperimente. Das Ätzverhalten soll im Rahmen hochenergetischer Ionenbombardements bestimmt werden. Unter Zuhilfenahme der Gaseinlässe lassen sich Kombinationen aus Argon und Sauerstoff verwenden. Darüber hinaus sollte im Rahmen der Ionenbeaufschlagung die Prozesstemperatur berücksichtigt werden.

phase können Funkenschläge der verwendeten Extraktionsgitter auftreten. Schwenkbare Aluminiumbleche verdecken während dieser Zeit die einlagigen Dünnschichtsysteme. Im Hinblick auf die Homogenität beeinflussen spezielle Aluminiumblenden das eintreffende Ionenbombardement. Unter Berücksichtigung der Substratrotation können in diesem Fall Schichtdickenverteilungen von wenigen 1 % realisiert werden. Die optische Breitbandmonitorierung ermöglicht eine Schichtdickenkontrolle der einlagigen Dünnschichtsysteme. Ungeachtet dessen werden die Ätzexperimente nach einer Anwendungsdauer von 30 Minuten abgeschaltet. In diesem Zusammenhang lassen sich die beweglichen Abdeckbleche der Warmlaufphase verwenden.

Zusammenfassend wurde mit Hilfe zusätzlicher Anlagenkomponenten ein hochenergetisches Ionenbombardement bereitgestellt. Die sekundäre Ionenbeaufschlagung ist in Anbetracht der Anlagenkonfiguration auf senkrechte Einfallswinkel beschränkt. Unter Zuhilfenahme variabler Einfallrichtungen werden im nächsten Kapitel dieser Arbeit weitere Einflussmöglichkeiten untersucht. Im Hinblick auf eine wissenschaftliche Auswertung sind die physikalischen Grundlagen des Ionenbombardements zu berücksichtigen. Der nächste Abschnitt dieses Kapitels beschreibt zu diesem Zweck die Zerstäubungsmechanismen am Beispiel optischer Dünnschichten. In diesem Zusammenhang sollen unter anderem die verwendeten Parameter des Teilchenbombardements berücksichtigt werden.

## 4.2 Grundlegende Mechanismen der Zerstäubung

Die Auswertung der physikalischen Ätzexperimente erfordert theoretische Grundlagen. Zu diesem Zweck sollen unter anderem die Teilchenströme der sekundären Ionenstrahlquelle beschrieben werden. Im Hinblick auf die Zerstäubungseffizienz erfolgt darüber hinaus eine Betrachtung der verschiedenen Einflussgrößen. In diesem Zusammenhang schafft unter anderem die Veröffentlichung von Harper [76] eine Grundlage. Die erste Hälfte dieses Abschnitts beinhaltet eine Diskussion der prinzipiellen Zerstäubungsmechanismen. Die relevanten Einflussgrößen der Sputtereffizienz werden in der zweiten Hälfte dieses Abschnitts identifiziert.

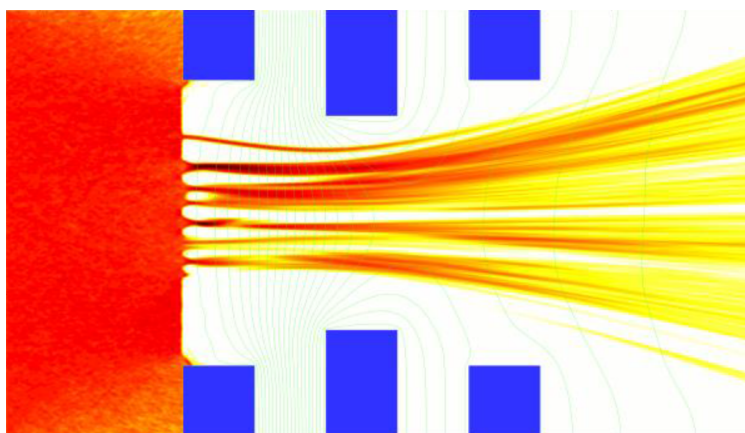
Das hochenergetische Ionenbombardement wird unter Zuhilfenahme eines dreilagigen Extraktionssystems generiert. Ausschlaggebend sind in diesem Zusammen-

hang die Betriebsparameter der sekundären Ionenstrahlquelle. Laut Starke [77] werden in Abbildung 4.02 einige Trajektorien der verwendeten Gitterkonfiguration dargestellt. Die kollineare Ausrichtung der Extraktionsgitter ermöglicht sowohl eine konvergente als auch divergente Strahlpropagation. Im Hinblick auf die laterale Strahlgeometrie ist eine gaußsche Normalverteilung anzunehmen.

Die einzelnen Bestandteile der Dünnschichtsysteme werden unter Berücksichtigung der Bindungszustände zerstäubt. In Anbetracht der Bewegungsenergien lassen sich die Wechselwirkungspotentiale zu den einfallenden Teilchen vernachlässigen. Die Zerstäubungsvorgänge der optischen Dünnschichten resultieren in Folge dessen aus der klassischen Teilchenmechanik. Abbildung 4.03 zeigt elastische Zweierstöße der Ionenbeaufschlagung im Bereich der äußeren Schichtteilchen. In diesem Zusammenhang übertragen kaskadierte Stoßprozesse den Teilchenimpuls auf weitere Festkörperatome. Laut Berisch [78] soll im Rahmen der Ionenstrahlzerstäubung eine Bewegungsenergien von wenigen 1 keV berücksichtigt werden. Im Hinblick auf den Materialabtrag bewirken die kaskadierten Stoßprozesse ein Herausschlagen der äußeren Dünnschichtatome. Im Vergleich zum einfallenden Ionenbombardement besitzen die Teilchen in Folge dessen eine rückwärtige Impulsrichtung.

In Anbetracht der Zerstäubungsvorgänge berücksichtigt die totale Zerstäubungsausbeute unter anderem die Bindungsenergie. Die Sputtereffizienz der beaufschlagten Schichtmaterialien sinkt in Folge dessen mit zunehmender Sublimationsenergie. Der entsprechende Besetzungszustand steht im Verhältnis zur Kernladungszahl der gebundenen Festkörperatome. Unter diesen Bedingungen ergibt sich ein periodischer Verlauf der Zerstäubungsausbeute als Funktion der Ordnungszahl.

Darüber hinaus können die Sputtereffizienzen auf Grundlage der einfallenden Gasteilchen beeinflusst werden. In Anbetracht der elastischen Zweierstöße ist ein ausgeglichenes Massenverhältnis der Stoßpartner förderlich. In Tabelle 4.03 sind in diesem Zusammenhang die Atommassen der relevanten Arbeitsgase zusammengefasst. Die Bestandteile der untersuchten Schichtmaterialien werden in gleicher Art und Weise berücksichtigt.

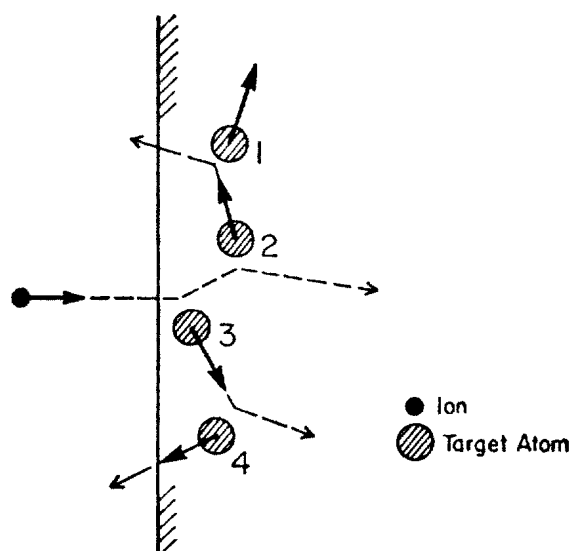


**Abbildung 4.02:** Trajektorien einer simulierten Ionenextraktion von Starke [77]. Das energetische Ionenbombardement wird mit Hilfe einer dreilagigen Gittergeometrie definiert. Die zylindrischen Lochformen bilden in diesem Zusammenhang ein kollineares Beschleunigungssystem.

Im Hinblick auf die Einflussfaktoren wurde ein senkrecht Teilchenbombardement der Schichtsysteme betrachtet. Unter Zuhilfenahme eines schrägen Einfallswinkels lässt sich die Sputtereffizienz der einfallenden Teilchen beeinflussen. Ausschlaggebend ist die Richtungsänderung der zerstäubten Beschichtungsmaterialien im Vergleich zum senkrechten Ionenbombardement. Darüber hinaus werden in diesem Fall höhere Bewegungsenergien im Bereich der oberen Schichtbestandteile bereitgestellt. Laut Norgate und Hammond [80] konnte mit Hilfe einer schiefwinkligen Ionenbeaufschlagung die Kupferausbeute um etwa 350 % gesteigert werden. Im Vergleich zur senkrechten Ionenbeaufschlagung ließ sich zu diesem Zweck ein Einfallswinkel von  $70^\circ$  realisieren. Im Übergang zu einer streifenden Beaufschlagung reduziert sich die theoretische Zerstäubungsausbeute. Unter diesen Bedingungen überwiegt laut klassischer Teilchenmechanik eine Reflexion der auftreffenden Edelgasteilchen.

Im Hinblick auf das Sputterverhältnis sollte zusätzlich zum Einfallswinkel auch die Ionenenergie berücksichtigt werden. Die Hochspannungen der verwendeten Extraktionsgitter schaffen in diesem Zusammenhang die Grundlage. Am Beispiel der senkrechten Zerstäubung definieren die atomaren Bindungen der Schichtteilchen die untere Energieschwelle. Darüber hinaus müssen in diesem Fall auch die Stoßparameter der verwendeten Teilchenkombinationen einbezogen werden. Zu Beginn steigt die theoretische Zerstäubungsausbeute der Ionenbeaufschlagung annähernd linear mit der einfallenden Teilchenenergie. Im Bereich von mehreren 1 keV verliert sich allerdings der proportionale Zusammenhang der totalen Sputtereffizienz. Höhere Bewegungsenergien reduzieren schließlich die Zerstäubungsausbeute in Folge einer zunehmenden Einbettung der Edelgasteilchen.

Zusammenfassend zerstäuben die eintreffenden Teilchen die Dünnschichtatome auf Grundlage kaskadierter Stoßprozesse. In Folge dessen sollte ein ausgeglichene



**Abbildung 4.03:** Kaskadierte Stoßprozesse unter senkrechtem Ionenbombardement von Sigmund [79]. Die Wechselwirkungspotentiale können im Vergleich zur einfallenden Teilchenenergie vernachlässigt werden. In Folge dessen basieren die Zerstäubungsvorgänge auf der Newtonschen Mechanik. Die Impulse der einfallenden Teilchen werden auf die gebundenen Festkörperatome übertragen. In diesem Zusammenhang verursachen die elastische Zweierstöße einen kaskadierten Stoßprozess. Unter Berücksichtigung der Bindungsenergie werden die äußeren Schichtbestandteile herausgeschlagen.



Element	Atommasse [u]	Element	Atommasse [u]
Sauerstoff	15,999	Silizium	28,086
Fluor	18,988	Argon	39,948
Magnesium	24,305	Lanthan	138,91
Aluminium	26,982	Hafnium	178,49

**Tabelle 4.03:** Absolute Atommassen der verwendeten Elemente von Fluck und Heumann [81]. Laut Zerstäubungsmechanismus steigert eine geringe Sublimationsenergie der Bestandteile die Sputtereffizienz. In gleicher Art und Weise beeinflusst auch ein ausgeglichenes Massenverhältnis die Zerstäubungsausbeute des einfallenden Teilchenbombardements.

nes Massenverhältnis zu den eintreffenden Gasteilchen hergestellt werden. Darüber hinaus beeinflussen auch schiefe Einfallsrichtungen des Ionenbombardements die totale Zerstäubungsausbeute. Im Fall chemischer Verbindungen können abweichende Konzentrationen an der Oberfläche der zerstäubten Dünnschichten auftreten. Ausschlaggebend ist in diesem Zusammenhang die Sputtereffizienz der jeweiligen Schichtmaterialien. Im Hinblick auf das physikalische Ätzverhalten müssen zusätzlich zu den theoretischen Grundlagen auch die Dünnschichtsysteme erläutert werden. Unter Berücksichtigung der physikalischen Abscheideverfahren beschreibt der nächste Abschnitt dieses Kapitels die eingesetzten Schichtmaterialien.

### 4.3 Herstellung der verwendeten Dünnschichten

Im Hinblick auf die Ätzexperimente sollen die Herstellungsverfahren der einlagigen Dünnschichtsysteme beschrieben werden. Die erste Hälfte dieses Abschnitts beinhaltet eine Charakterisierung der verwendeten Hafniumdioxidschichten. Eine Beschreibung der übrigen Beschichtungsmaterialien erfolgt in der zweiten Hälfte dieses Abschnitts. Zusätzlich zu den bisherigen Schichtsystemen sollen in diesem Zusammenhang auch fluoridische Verbindungen berücksichtigt werden.

Die Eigenschaften der verwendeten Schichtmaterialien sind vom jeweiligen Herstellungsverfahren abhängig (siehe Abschnitt 2.1). Im Vergleich zu anderen Depositionstechniken besitzen die aufgedampften Dünnschichten eine geringe Teilchenenergie. In Folge dessen bildet sich im Rahmen der thermischen Verdampfungstechnik ein poröses Schichtmaterial. Die Ionenstrahlgestützte Deposition umfasst ein zusätzliches Teilchenbombardement der Dünnschichtsysteme. Im Gegensatz zur thermischen Verdampfung verdichtet sich in diesem Zusammenhang das Beschichtungsmaterial. Leistungsfeste Laserkomponenten müssen auf Grundlage hochenergetischer Wachstumsprozesse deponiert werden. In diesem Fall lassen sich die Dünnschichtsysteme unter Zuhilfenahme der Ionenstrahlzerstäubung realisieren (siehe Abschnitt 2.2).

Zu Beginn sollen die Ätzeigenschaften der gesputterten Hafniumdioxidschicht untersucht werden. Dünnschichten der thermischen Verdampfung dienen in diesem Zusammenhang als Vergleich. Die zerstäubten Schichtsysteme wurden mit Hilfe hochenergetischer Argonionen deponiert. Zusätzlich zum Prozessdruck von wenigen  $1\text{E-}4$  mbar ist eine Substrattemperatur von  $50\text{ }^\circ\text{C}$  anzunehmen. Im Gegensatz dazu wurde im Rahmen des Verdampfungsverfahrens eine Prozesstemperatur von  $250\text{ }^\circ\text{C}$  verwendet. Im Vergleich zum Ionenstrahlputterverfahren ist darüber hinaus eine höhere Beschichtungsrate von  $0,30$  statt  $0,10$  nm/s zu berücksichtigen. Die Herstellungsparameter der oxidischen Dünnschichtsysteme sind in Tabelle 4.04 zusammengefasst.

Zusätzlich zu den Hafniumdioxidsystemen sollen auch niedrigbrechende Schichtmaterialien untersucht werden. Unter Zuhilfenahme der optischen Breitbandmonitorierung ließen sich die Dünnschichtsysteme allerdings nicht vermessen. Ausschlaggebend sind in diesem Fall die Eigenschaften der verwendeten Quarzglassubstrate. Zusätzliche Tantalpentoxidschichten ermöglichen trotz dieses Umstandes eine präzise Breitbandmonitorierung der Schichtsysteme.

Im Hinblick auf die niedrigbrechenden Schichtmaterialien soll unter anderem Siliziumdioxid untersucht werden. Zusätzlich zur Ionenstrahlzerstäubung ließen sich auch Dünnschichtsysteme mit Hilfe der gestützten Deposition realisieren. In diesem Zusammenhang wurde eine maximale Substrattemperatur von etwa  $150\text{ }^\circ\text{C}$  verwendet. In Übereinstimmung mit den Hafniumdioxidsystemen halbierte sich im Fall der Verdampfungsverfahren die Herstellungsdauer. Im Rahmen der niedrigbrechenden Schichtmaterialien soll darüber hinaus auch Aluminiumoxid berücksichtigt werden.

Zusätzlich zu den oxidischen Schichtmaterialien werden sowohl Magnesium-

Hafniumdioxid	Druck [mbar]	Temperatur [ $^\circ\text{C}$ ]	Rate [nm/s]
Ionenstrahlzerstäubung	$1\text{E-}4$	50	0,10
Elektronenstrahlverdampfung	$1\text{E-}4$	250	0,30
Siliziumdioxid	Druck [mbar]	Temperatur [ $^\circ\text{C}$ ]	Rate [nm/s]
Ionenstrahlzerstäubung	$1\text{E-}4$	50	0,30
Gestützte Deposition	$1\text{E-}4$	150	0,60
Aluminiumoxid	Druck [mbar]	Temperatur [ $^\circ\text{C}$ ]	Rate [nm/s]
Ionenstrahlzerstäubung	$1\text{E-}4$	50	0,13

**Tabelle 4.04:** Herstellungsparameter der oxidischen Dünnschichtsysteme. Die Herstellung der gesputterten Schichtmaterialien erfolgte auf Grundlage eines Argonbombardements. Darüber hinaus wurde am Beispiel einer Hafniumdioxidschicht die Elektronenstrahlverdampfung eingesetzt. Die Siliziumdioxidschichten berücksichtigen zusätzlich zur Ionenstrahlzerstäubung auch das gestützte Depositionsverfahren.

Magnesiumfluorid	Druck [mbar]	Temperatur [°C]	Rate [nm/s]
Thermische Verdampfung	1E-4	350	0,20

Lanthanfluorid	Druck [mbar]	Temperatur [°C]	Rate [nm/s]
Thermische Verdampfung	1E-4	350	0,20

**Tabelle 4.05:** Herstellungsparameter der fluoridischen Dünnschichtsysteme. Die verwendeten Schichtmaterialien sollen im Hinblick auf das physikalische Ätzverhalten beschrieben werden. In Anbetracht der thermischen Verdampfung unterliegen die fluoridischen Dünnschichten einem niederenergetischen Wachstumsprozess. Die verwendeten Substrate mussten in Folge dessen einer Temperaturbelastung von 350 °C standhalten.

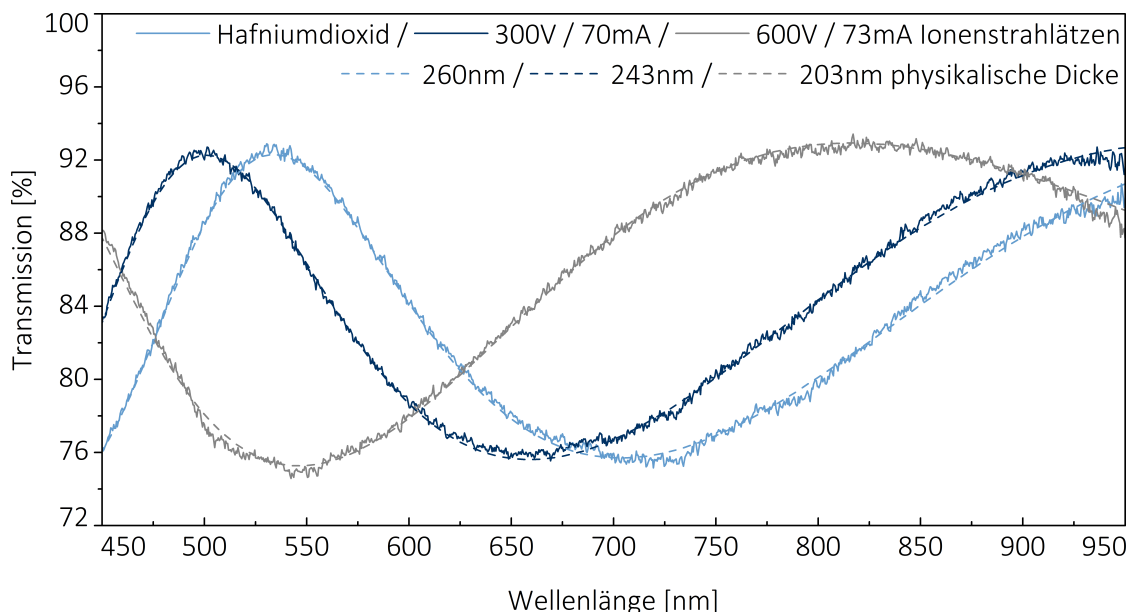
fluorid als auch Lanthanfluorid untersucht. Die niedrigen Brechungsindizes lassen sich zum Beispiel im Rahmen breitbandiger Antireflexbeschichtungen verwenden. Ausschlaggebend sind in diesem Zusammenhang unter anderem die ultravioletten Transmissionsbereiche der Beschichtungsmaterialien. Die fluoridischen Dünnschichtsysteme wurden auf Grundlage der thermischen Verdampfung hergestellt. In Folge dessen unterlagen die einlagigen Musterbeispiele einem niederenergetischen Wachstumsprozess. Unter Zuhilfenahme keramischer Heizelemente wurde darüber hinaus eine Substrattemperatur von 350 °C hergestellt. Weitere Prozessparameter der fluoridischen Schichtsysteme sind in Tabelle 4.05 zusammengefasst.

Unter Berücksichtigung der Abscheideverfahren wurden ausgewählte Prozessbedingungen der Dünnschichtsysteme erläutert. Zusätzlich zum Sputterverfahren sind sowohl die thermische Verdampfung als auch die gestützte Deposition vertreten. Im nächsten Abschnitt dieses Kapitels soll das Ätzverhalten der ausgewählten Schichtmaterialien analysiert werden.

## 4.4 Ätzverhalten der ultravioletten Dünnschichten

Unter Zuhilfenahme der Ionenbeaufschlagung wird eine Modifikation der aufwachsenden Schichtmaterialien beabsichtigt. Im Rahmen parametrisierter Ionenbombardements sollen zu diesem Zweck die physikalischen Ätzeigenschaften charakterisiert werden. In diesem Zusammenhang sind unter Berücksichtigung der Prozessparameter die abgetragenen Schichtdicken zu bestimmen. Die erste Hälfte dieses Abschnitts ermittelt die physikalischen Ätzeigenschaften am Beispiel der gesputterten Hafniumdioxidschicht. Eventuelle Unterschiede der Schichtmaterialien sollen in der zweiten Hälfte dieses Abschnitts ausgewertet werden.

Im Rahmen der Ionenstrahlätzung wurden die Schichtdicken mit Hilfe der optischen Breitbandmonitorierung ermittelt. Einige Transmissionspektren der geätzten Hafniumdioxidschicht sind in Abbildung 4.04 dargestellt. Die Abtragsraten sind von den Prozessparametern der physikalischen Ionenstrahlätzung abhängig.



**Abbildung 4.04:** Transmissionsspektren der ionengeätzten Hafniumdioxidschicht. Die Transmissionsspektren wurde mit Hilfe der optischen Breitbandmonitorierung aufgezeichnet. In diesem Zusammenhang ist eine Wellenlängengenauigkeit von 0,5 nm zu berücksichtigen. Unter Zuhilfenahme der Simulationsprogramme wurden schließlich die Schichtdicken der ionengeätzten Dünnschichtsysteme ermittelt.

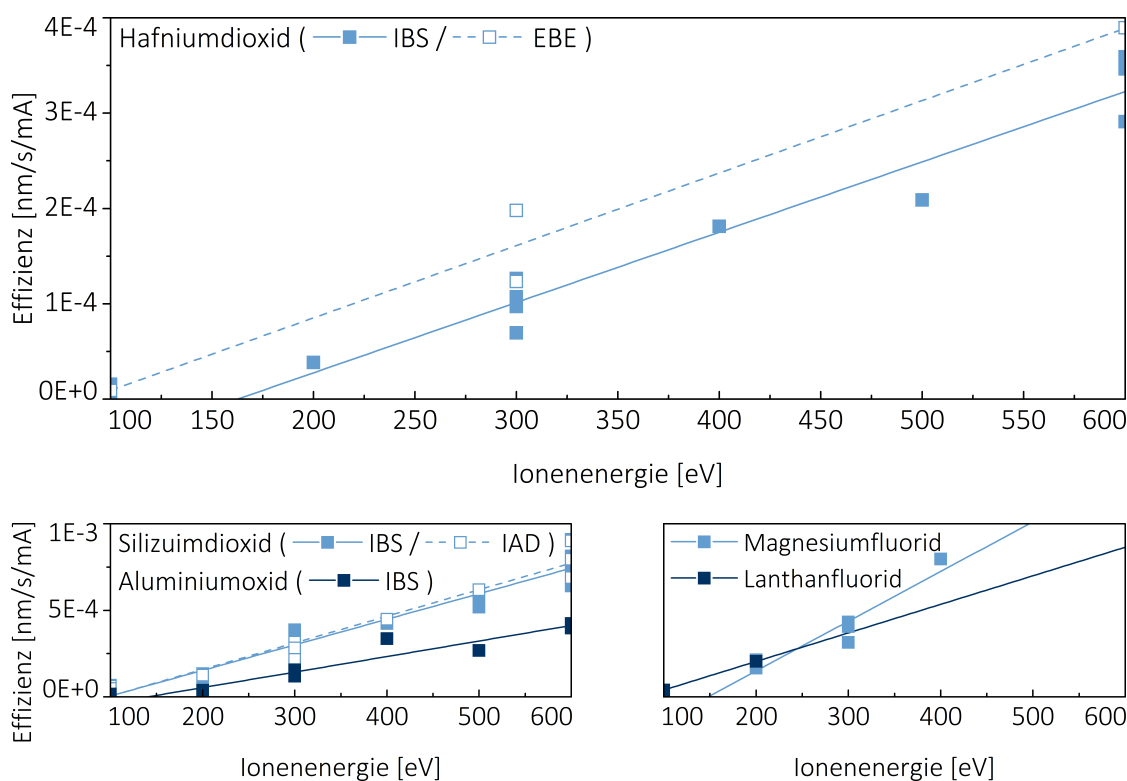
In diesem Fall wurden die Transmissionsspektren der einlagigen Dünnschichten auf Grundlage mehrerer Kalottendrehungen aufgezeichnet. Unter Zuhilfenahme nachträglicher Spektralphotometrie ließen sich die Messungen der optischen Breitbandmonitorierung überprüfen. Im Hinblick auf die Schichtdickenkontrolle kann in Folge dessen eine Wellenlängengenauigkeit von 0,5 nm angenommen werden. Unter Berücksichtigung der Dispersionsdaten erfolgte mit Hilfe zugehöriger Simulationsprogramme die Auswertung der gemessenen Transmissionsspektren.

Die physikalischen Abtragsraten konnten mit Hilfe unterschiedlicher Betriebsparameter der Ionenstrahlquelle beeinflusst werden. Abbildung 4.05 zeigt in diesem Zusammenhang die Sputtereffizienzen der verwendeten Schichtmaterialien. Das Verhältnis aus physikalischer Abtragsrate und Ladungsstrom ist als Funktion der Ionenenergie dargestellt. In Anbetracht der theoretischen Grundlagen lassen sich die Sputtereffizienzen mit Hilfe einer Linearfunktion interpolieren. Im Hinblick auf Abweichungen sind unter anderem die unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen zu berücksichtigen.

Die Ätzeigenschaften der gesputterten Hafniumdioxidschicht sollen mit der thermischen Verdampfungstechnik verglichen werden. Im Rahmen der gesputterten Hafniumdioxidschicht ließ sich eine Zerstäubungsrate von bis zu 0,02 nm/s feststellen. Der Materialabtrag entspricht in diesem Fall der Wachstumsrate im Rahmen der ursprünglichen Schichtherstellung. Tabelle 4.06 beinhaltet die Schwellenenergi-

en der verwendeten Beschichtungsmaterialien. Im Fall der gesputterten Hafniumdioxidschicht wurde eine spezifische Schwellenenergie von 163 eV nachgewiesen. In Folge dessen ließ sich eine höhere Zerstäubungsfestigkeit im Vergleich zur Elektrodenstrahlverdampfung feststellen. Ausschlaggebend sind in diesem Zusammenhang die geringeren Packungsdichten im Rahmen der Verdampfungsverfahren.

Darüber hinaus wurden auch die Schwellenenergien der niedrigbrechenden Beschichtungsmaterialien verglichen. Die Herstellung der gesputterten Siliziumdioxidschichten erfolgte unter Zuhilfenahme unterschiedlicher Beschichtungsanlagen. In Übereinstimmung mit der gestützten Deposition wurde im Fall der gesputterten Dünnschichten eine spezifische Schwellenenergie von 96 eV festgestellt. Laegreid und Wehner [82] untersuchten das Ätzverhalten am Beispiel einer polykristallinen Siliziumschicht. In diesem Zusammenhang konnte eine ähnliche Schwellenenergie von etwa 80 eV nachgewiesen werden. Die fluoridischen Schichtmaterialien generierten aufgrund der Sauerstoffatmosphäre eine absorptive Schichtoberfläche. Ungeachtet dessen offenbarte die Magnesiumfluoridschicht im Vergleich zur Lanthan-



**Abbildung 4.05:** Sputtereffizienzen der unterschiedlichen Beschichtungsmaterialien. Die Zerstäubungsausbeute der sekundären Teilchenbeaufschlagung ist als Funktion der Ionenenergie dargestellt. In diesem Zusammenhang wurde das Verhältnis zum extrahierten Ladungsstrom berücksichtigt. In Anbetracht der theoretischen Grundlagen ließen sich die Sputtereffizienzen mit Hilfe einer Linearfunktion interpolieren.

fluoridschicht die doppelte Schwellenenergie.

Der spezifische Steigungsfaktor vervollständigt die Parametrisierung der physikalischen Zerstäubungsausbeute. Abbildung 4.06 vergleicht in diesem Zusammenhang die verwendeten Beschichtungsmaterialien. In Anbetracht der Messabweichungen ließen sich im Fall der Abscheideverfahren keine Unterschiede nachweisen. Im Gegensatz dazu konnte im Rahmen der zerstäubten Schichtmaterialien eine Korrelation mit dem Brechungsindex festgestellt werden. Das Ätzverhalten der fluoridischen Dünnschichten zeigte im Vergleich zu oxidischen Schichtmaterialien eine stärkere Energieabhängigkeit.

Eine Kontamination der beaufschlagten Oberflächen ließ sich mit Hilfe der spektralen Charakterisierung ausschließen. Allerdings steigerte hochenergetisches Ionenbombardement im Bereich der ultravioletten Wellenlängen die Absorptionsverluste. Die partielle Zerstäubung der Schichtbestandteile ließ sich mit Hilfe entsprechender Reaktivgasversorgung kompensieren. In Anbetracht der oberflächlichen Wechselwirkungen zeigten die Dispersionsdaten der verwendeten Beschichtungsmaterialien keine Beeinflussung. Strukturelle Veränderungen ließen sich weder auf Grundlage von Streulichtmessungen noch im Rahmen einer Rasterelektronenmikroskopie feststellen.

Rückblickend wurden die verwendeten Schichtmaterialien im Hinblick auf das physikalische Ätzverhalten verglichen. In diesem Zusammenhang ließ sich am Beispiel der gesputterten Hafniumdioxidschicht eine hohe Schwellenenergie nachweisen. Unter Zuhilfenahme der Ionenbeaufschlagung sollen darüber hinaus auch funktionale Schichtsysteme beeinflusst werden. Im nächsten Abschnitt dieses Kapitels beeinflusst das Ionenbombardement die Grenzflächen eines reflektierenden Mehrschichtsystems.

Schwellenenergie [eV]	TED	EBE	IAD	IBS
Hafniumdioxid		88 ± 26		163 ± 24
Siliziumdioxid			97 ± 19	96 ± 10
Aluminiumoxid				140 ± 38
Magnesiumfluorid	148 ± 26			
Lanthanfluorid	76 ± 8			

**Tabelle 4.06:** Schwellenenergien der ionengeätzten Beschichtungsmaterialien. Die physikalischen Ätzeigenschaften wurden mit Hilfe eines Argonbombardements untersucht. In diesem Fall ließ sich die Zerstäubungsausbeute mit Hilfe einer Linearfunktion extrapoliert. Die zerstäubte Hafniumdioxidschicht zeigte im Vergleich zur thermischen Verdampfung eine höhere Schwellenenergie.

	Steigung [nm/s/mA/V]
Hafniumdioxid	
IBS	7,38E-7
EBE	7,6E-7
Siliziumdioxid	
IBS	1,48E-6
IAD	1,54E-6
Aluminiumoxid	
IBS	8,97E-7
Magnesiumfluorid	
TED	2,87E-6
Lanthanfluorid	
TED	1,65E-6

**Abbildung 4.06:** Steigungsfaktoren der linearisierten Sputtereffizienzen. Die optischen Dünnschichten unterlagen einem hochenergetischen Argonbombardement. Zusätzlich zur Schwellenenergie wurde die Zerstäubungsausbeute mit Hilfe eines Steigungsfaktors parametrisiert. Die Zerstäubungsfestigkeit der gesputterten Dünnschichtsysteme korreliert mit dem Brechungsindex. Im Hinblick auf das Abscheideverfahren konnten keine Unterschiede festgestellt werden.

## 4.5 Anwendungsorientierte Spiegelbeschichtungen

Unter Zuhilfenahme des Ionenbombardements sollen die Grenzflächen eines funktionalen Mehrschichtsystems beaufschlagt werden. Ausschlaggebend sind in diesem Zusammenhang unter anderem die Auswirkungen einer ionenbasierten Substratvorbehandlung. Die beaufschlagten Mehrschichtsysteme sollen unter anderem im Hinblick auf die laserinduzierte Zerstörschwelle charakterisiert werden. Die erste Hälfte dieses Abschnitts beschreibt die Herstellung der reflektierenden Mehrschichtsysteme. Die laserinduzierte Zerstörfestigkeit der Dünnschichtsysteme wird in der zweiten Hälfte dieses Abschnitts bestimmt.

Die Leistungsfestigkeit einer industriellen Hochleistungsoptik kann unter anderem durch Poliermittelreste beeinträchtigt werden. In diesem Zusammenhang untersuchten Kamimura und Kollegen [83] die Zerstöreeigenschaften einer magnetrongesputterte Tantalpentoxidschicht. Unter Zuhilfenahme einer vorhergehenden Ionenbehandlung ließen sich in verbliebene Cereinlagerungen entfernen. Die laserinduzierte Zerstörschwelle der Tantalpentoxidschicht konnte mit Hilfe der Ionenvorbehandlung verdoppelt werden. Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Spiegelbeschichtung die Zerstöreeigenschaften eines anwendungsnahen Dünnschichtsystems repräsentieren. Unter Zuhilfenahme der Ionenbeaufschlagung sollen die Schichtübergänge des funktionalen Mehrschichtsystems beeinflusst werden.

Die einzelnen Prozessschritte der sequentiellen Ionenbehandlung werden in Abbildung 4.07 dargestellt. Ein konventionelles Quarzglassubstrat schafft in diesem Zusammenhang den Ausgangspunkt. Im Rahmen der Wachstumsprozesse zerstäubt ein Argonbombardement die metallischen Beschichtungsmaterialien. Im Gegensatz zum Referenzsystem werden auf Grundlage der Breitbandmonitorierung die Abschaltzeiten verzögert. Die ursprünglichen Schichtdicken lassen sich anschließend mit Hilfe der sequentiellen Ionenbeaufschlagung rekonstruieren. Zusätzlich zum Schichtmaterial schattieren die Aluminiumblenden auch das sekundäre Ionenbombardement. Unter diesen Bedingungen konnten die Dünnschichtsysteme eine rela-

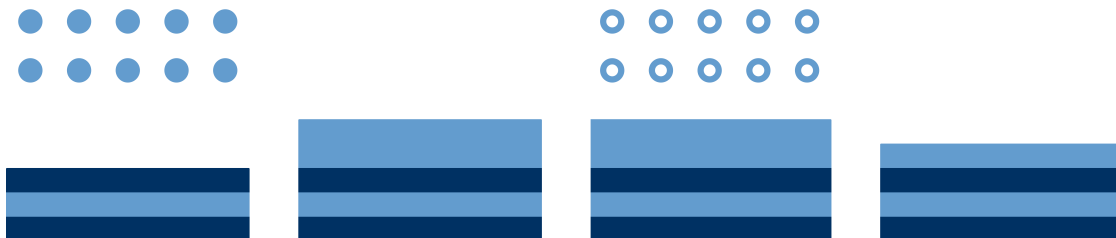
tive Materialverteilung von etwa 1 % vorweisen.

In Anbetracht der Leistungsfestigkeit wurden die Hafniumdioxidschichten in Kombination mit Siliziumdioxidschichten verwendet. Unter Zuhilfenahme der Breitbandmonitorierung ließ sich eine Zentralwellenlänge von 532 nm realisieren. Zusätzlich zu 29 Wechselschichten beinhaltet die Laserkomponente eine doppelte Siliziumdioxidlage. Unter diesen Bedingungen ließ sich ein senkrecht Reflexionsvermögen von über 99,9 % realisieren. Im Gegensatz zum Referenzsystemen wurde im Fall der Grenzflächenmodifikation ein Zehntel der Schichtdicke hinzugefügt. Ein Ionenbombardement konnte das überschüssige Beschichtungsmaterial auf Grundlage einer Extraktionsleistung von etwa 44 W beseitigen.

Im Hinblick auf die Anwendungsbedingungen sollen eventuelle Einflüsse der sequentiellen Ionenbeaufschlagung festgestellt werden. Unter Zuhilfenahme des hochenergetischen Ionenbombardements können oberflächliche Strukturierungen hervorgerufen werden. Darüber hinaus ist eine permanente Temperaturbelastung der Dünnschichtsysteme zu berücksichtigen. Die unterschiedlichen Schichteigenschaften sollen mit Hilfe ausgewählter Messverfahren charakterisiert werden. In diesem Zusammenhang ist die beaufschlagte Spiegelbeschichtung mit der konventionellen Referenzschicht zu vergleichen.

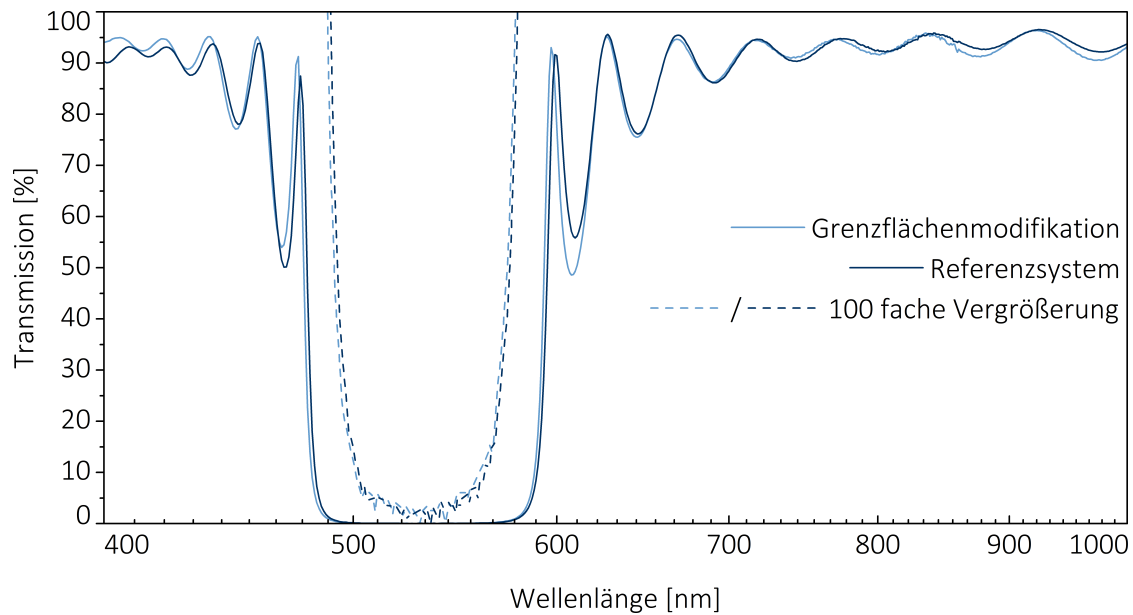
Zu Beginn wurden die exemplarischen Dünnschichtsysteme mit Hilfe breitbandiger Spektralphotometrie untersucht. Das Transmissionsspektrum der modifizierten Spiegelbeschichtung ist in Abbildung 4.08 dargestellt. Im Hinblick auf die spektralen Anforderungen ist eine absolute Messgenauigkeit von 0,1 % zu berücksichtigen. Unter Zuhilfenahme des simulierten Beschichtungsdesigns konnte ein Reflexionsgrad von über 99,9 % nachgewiesen werden. Ungeachtet dessen unterliegen die realisierten Mehrschichtsysteme im Bereich kürzerer Wellenlängen einer spektralen Abweichung. Ausschlaggebend ist eine Selbstkompensation der entstandenen Schichtdickenfehler im Rahmen der Breitbandmonitorierung.

Im Vergleich zum Referenzsystem wurde darüber hinaus die laserinduzierte Zerstörfestigkeit untersucht. In Übereinstimmung mit ISO 21254 [84–87] ließen sich äquidistante Messpositionen der Schichtoberfläche festlegen. Die gepulste Laser-



**Abbildung 4.07:** Schematischer Ablauf der sequentiellen Ionenbeaufschlagung. Unter Zuhilfenahme der optischen Breitbandmonitorierung erfolgte eine Verzögerung der ursprünglichen Abschaltzeiten. Anschließend konnte das überschüssige Beschichtungsmaterial mit Hilfe der sekundären Ionenstrahlquelle heruntergeätzt werden.



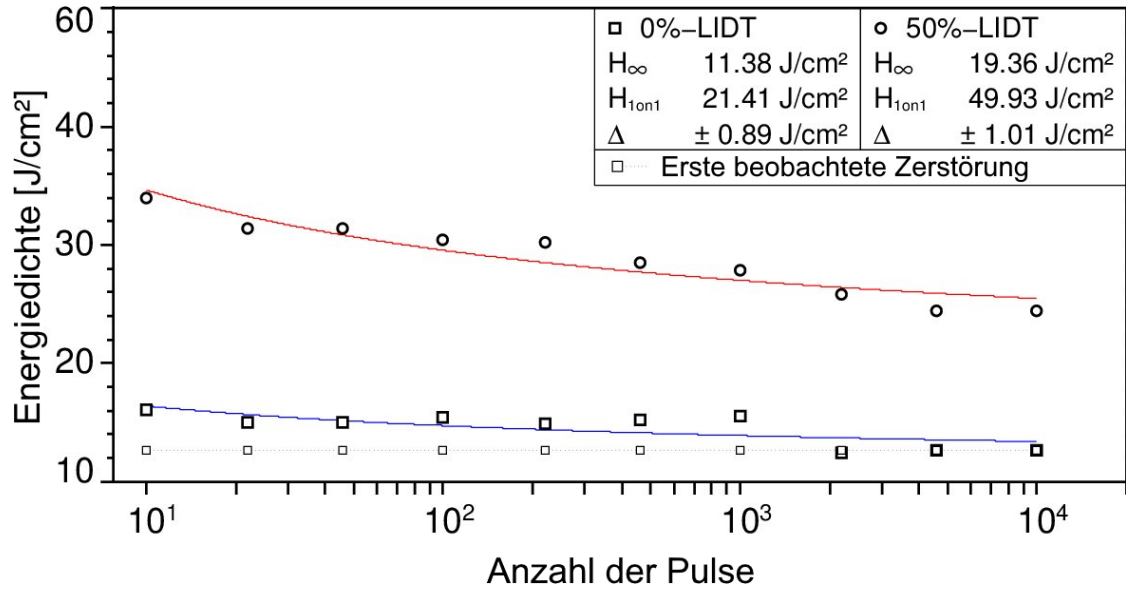


**Abbildung 4.08:** Transmissionsspektrum der ionengeätzten Spiegelbeschichtung. Zusätzlich zur modifizierten Laserkomponente ist das konventionelle Referenzsystem dargestellt. In diesem Zusammenhang ist eine absolute Messungenauigkeit von 0,1% zu berücksichtigen. Unter Zuhilfenahme der Simulationsprogramme konnte ein Reflexionsvermögen von über 99,9% nachgewiesen werden.

strahlung adressiert die Zentralwellenlänge des exemplarischen Wechselschichtsystems. Während der Zerstörschwellenmessung lassen sich die beaufschlagten Messpositionen mit Hilfe einer Streulichtdetektion monitorieren. Die induzierten Zerstörungen müssen ungeachtet dessen mit Hilfe der Nomarskimikroskopie verifiziert werden. Darüber hinaus erfolgt die Betrachtung unter Berücksichtigung der Anzahl der jeweiligen Laserschüsse.

Die laserinduzierte Zerstörschwelle des Dünnschichtsystems ist in Abbildung 4.09 dargestellt. Im Hinblick auf die Langzeitstabilität lässt sich eine laserinduzierte Zerstörschwelle von  $11,38 \text{ J/cm}^2$  extrapolieren. Im Gegensatz dazu würde eine Einzelpulsmessung eine laserinduzierte Zerstörschwelle von  $21,41 \text{ J/cm}^2$  hervorbringen. Unter Berücksichtigung der Messungenauigkeit konnten in diesem Fall keine Unterschiede zum konventionellen Referenzsystem festgestellt werden.

Zusätzlich zur Zerstörfestigkeit wurden die Absorptionsverluste der exemplarischen Schichtsysteme untersucht. Darüber hinaus erfolgte in diesem Zusammenhang eine Charakterisierung des rückwärtigen Streulichtaufkommens. Unter Berücksichtigung einer Wellenlänge von  $1064 \text{ nm}$  wurden die kalorimetrischen Absorptionsverluste von 39 auf 13 ppm reduziert. Das sequentielle Ionenbombardement lässt sich in Folge dessen mit einer Temperaturbehandlung vergleichen. Im Gegensatz dazu zeigte das rückwärtige Streulichtaufkommen im Bereich der Zentralwellenlänge keine Unterschiede. In Anbetracht der Detektoröffnung wurde in



**Abbildung 4.09:** Laserinduzierte Zerstörschwelle der geätzten Spiegelbeschichtung. Unter Berücksichtigung von ISO 21254 wurde die Zerstörfestigkeit des komplexen Schichtsystems charakterisiert. Im Hinblick auf die Langzeitstabilität lässt sich eine laserinduzierte Zerstörschwelle von  $11,38 \text{ J/cm}^2$  feststellen. Im Gegensatz dazu würde eine Einzelpulsmessung eine laserinduzierte Zerstörschwelle von  $21,41 \text{ J/cm}^2$  hervorbringen.

diesem Zusammenhang eine Messungenauigkeit von bis zu 5% angenommen. Sowohl die Absorptionsverluste als auch das Streulichtaufkommen der reflektierenden Spiegelbeschichtung ist in Tabelle 4.07 zusammengefasst.

Unter Zuhilfenahme einer Ionenbeaufschlagung wurden rückblickend die Grenzflächen einer hochreflektierenden Spiegelbeschichtung beeinflusst. In diesem Zusammenhang ließen sich unter Berücksichtigung der Messungenauigkeit keine Unterschiede der Zerstörfestigkeit feststellen. Im Gegensatz dazu reduzierte die Ionenbehandlung die kalorimetrischen Absorptionsverluste der Spiegelbeschichtungen. Darüber hinaus untersuchten Poitras und Kollegen [88, 89] verschiedene Beschichtungsdesigns im Hinblick auf eine präzisere Schichtdickenkontrolle. In diesem Zu-

	Grenzflächenmodifikation	Referenzsystem
Kalorimetrische Absorption	13 ppm	39 ppm
Rückwärtiges Streulicht	440 ppm	460 ppm

**Tabelle 4.07:** Ausgewählte Eigenschaften der modifizierten Spiegelbeschichtung. Die Absorptionsverluste bei  $1064 \text{ nm}$  wurden mit Hilfe der Grenzflächenmodifikation reduziert. In Folge dessen lässt sich das Ionenbombardement mit einer Temperaturbehandlung der optischen Dünnschichten gleichsetzen. Signifikante Unterschiede im Hinblick auf die Streulichtverluste bei  $532 \text{ nm}$  konnten nicht nachgewiesen werden.

sammenhang konnte der Schichtdickenfehler mit Hilfe einer Ionenbeaufschlagung auf 0,1 nm begrenzt werden. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels sollen die wesentlichen Aspekte der Ätzexperimente zusammengefasst werden.

## 4.6 Zusammenfassung

Unter Zuhilfenahme energetischer Argonbombardements ließ sich im Hinblick auf gestützte Wachstumsprozesse das Ätzverhalten analysieren. Die gesputterten Hafniumdioxidschichten wurden zu diesem Zweck mit Hilfe breitbandiger Spektralphotometrie charakterisiert. Darüber hinaus ließen sich unter Berücksichtigung der ultravioletten Anwendungsbereiche weitere Schichtmaterialien untersuchen. Die höchste Zerstäubungsfestigkeit konnte schließlich am Beispiel einer gesputterten Hafniumdioxidschicht festgestellt werden.

Darüber hinaus wurde auf Grundlage funktionaler Schichtsysteme ein sequentielles Ionenbombardement untersucht. Die laserinduzierte Zerstörschwelle einer Spiegelbeschichtung ließ sich in diesem Zusammenhang nicht beeinflussen. Ungeachtet dessen wurde mit Hilfe der sequentiellen Ionenbeaufschlagung eine Schichtdickenkorrektur demonstriert. Im letzten Kapitel dieser Arbeit wird auf Grundlage der Ätzeigenschaften die gestützte Schichtherstellung untersucht.



## BESCHICHTUNGSPROZESSE MIT DUALER IONENSTRAHLZERSTÄUBUNG

Unter Zuhilfenahme einer dualen Ionenstrahlzerstäubung soll unter anderem die Zuverlässigkeit von zukünftigen Weltrauminstrumenten verbessert werden. Die aufwachsenden Beschichtungsmaterialien unterliegen in diesem Zusammenhang einem sekundären Ionenbombardement. Im Hinblick auf die zukünftigen Weltraummisionen wird eine gesteigerte Langzeitstabilität der Vergütungssysteme beabsichtigt. Ungeachtet dessen lassen sich im Rahmen der dualen Ionenstrahlzerstäubung auch weitere Anwendungsbereiche berücksichtigen. Die Eigenschaften der beaufschlagten Schichtmaterialien werden am Beispiel einlagiger Dünnschichtsysteme charakterisiert. Unter Zuhilfenahme der Lumineszenzspektroskopie lassen sich Zwischenbandzustände der dualgesputterten Beschichtungsmaterialien identifizieren. Die verbesserten Zerstöreeigenschaften der Weltraumoptiken sollen am Beispiel einer ultravioletten Antireflexbeschichtung demonstriert werden. Unter Zuhilfenahme der spektralen Charakterisierung lassen sich darüber hinaus auch die optischen Eigenschaften untersuchen.

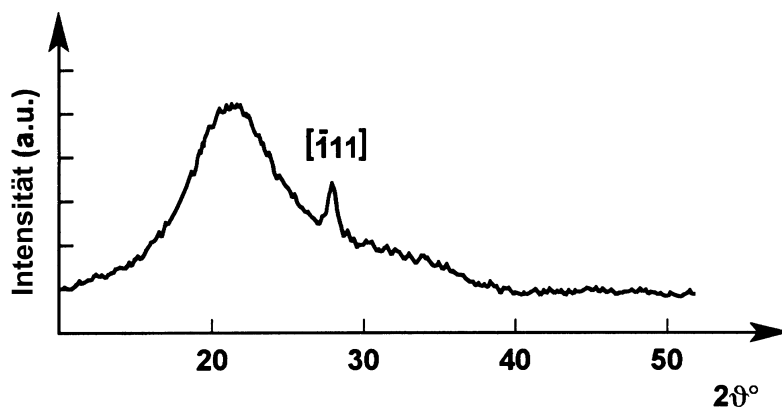
Die erste Hälfte dieses Kapitels beschreibt am Beispiel einer Hafniumdioxid-schicht die grundlegenden Wachstumsprozesse. Anschließend werden die einlagigen Dünnschichtsysteme im Hinblick auf die elektronische Bandstruktur untersucht. Die Zerstörschwelle lässt sich in der zweiten Hälfte dieses Kapitels am Beispiel einer ultravioletten Antireflexbeschichtung betrachten.

## 5.1 Mechanismen im gestützten Schichtwachstum

Unter Zuhilfenahme der sekundären Ionenbeaufschlagung können die optischen Schichteigenschaften beeinflusst werden. Ausschlaggebend sind in diesem Zusammenhang die veränderten Wachstumsbedingungen der Beschichtungsmaterialien. Im Rahmen der gestützten Sputterverfahren können Kornstrukturen der aufwachsenden Schichtsysteme beeinflusst werden. Darüber hinaus ist in diesem Fall eine Veränderung der bevorzugten Orientierung zu berücksichtigen. Reaktives Ionenbombardement kann im Hinblick auf den ultravioletten Spektralbereich die Stöchiometrie der optischen Dünnschichtsysteme verbessern. Unter Berücksichtigung der Wachstumsmechanismen werden in der ersten Hälfte dieses Abschnitts die Grundlagen diskutiert. Die zweite Hälfte dieses Abschnitts erläutert darüber hinaus die Auswirkungen einer reaktiven Ionenbeaufschlagung.

Im Hinblick auf die duale Ionenstrahlzerstäubung schafft eine konventionelle Beschichtungsanlage den Ausgangspunkt. Darüber hinaus sollen die Schichtmaterialien mit Hilfe eines sekundären Ionenbombardements beaufschlagt werden. Der Materialabtrag der sekundären Ionenbeaufschlagung kann in diesem Zusammenhang die Depositionsrate beeinflussen. Das eintreffende Ionenbombardement soll das Schichtwachstum der optischen Dünnschichtsysteme verbessern. Ausschlaggebend ist in diesem Fall unter anderem die Zerstäubung von angebondenen Oberflächenatomen. Die Sputtereffizienzen der einzelnen Schichtbestandteile können unter diesen Bedingungen voneinander abweichen. Im Bereich der Schichtoberfläche sollte in Folge dessen eine veränderte Zusammensetzung berücksichtigt werden.

Unter Zuhilfenahme der sekundären Ionenbeaufschlagung lässt sich die effektive Teilchenmobilität steigern. Die zusätzliche Oberflächenenergie könnte allerdings auch den Kristallisationsgrad der optischen Dünnschichten beeinflussen. Darüber hinaus sollte die sekundäre Ionenbeaufschlagung eine höhere Prozesstemperatur etablieren. Im Hinblick auf den Kristallisationsgrad zeigt Abbildung 5.01 die Röntgendiffraktometrie einer dualgesputterten Hafniumdioxidschicht. Die Beugungserscheinung der optischen Dünnschicht wurde in diesem Fall bei einem Ablen-



**Abbildung 5.01:** Röntgendiffraktometrie an einer gestützten Hafniumdioxidschicht übersetzt von [90]. Im Hinblick auf die kristalline Röntgenbeugung des Dünnschichtsystems wurde ein Ablenkungswinkel von  $27,8^\circ$  untersucht.

---

Brechungsindex (308 nm)	$2,12 \pm 0,03$ / $2,08 \pm 0,03$ bei $30\text{ °C}$ / $100\text{ °C}$ [90]
Absorption (1064 nm)	etwa 100 ppm für LL(HL) <sup>4</sup> H bei 1064 nm [92]
Oberflächenrauigkeit	etwa 0,5 nm / 3 nm für 2H bei 355 nm / 1064 nm [91]
Elektronendichte	$2380\text{ 1/nm}^3$ [90]
Druckspannung	etwa 0,35 GPa für LL(HL) <sup>4</sup> H bei 1064 nm [92]

---

**Tabelle 5.01:** Schichteigenschaften von dualgesputterten Hafniumdioxidsystemen. Das duale Zerstäubungsverfahren wurde auf Grundlage ausgewählter Literaturdaten beschrieben. In Anbetracht der zusätzlichen Teilchenenergie können aufwachsende Mikrokristallite die Oberflächenrauigkeit intensivieren. Darüber hinaus verstärkt der Kugelstrahlmechanismus die vorhandene Druckspannung der Dünnschichtsysteme.

kungswinkel von  $27,8^\circ$  festgestellt. Die zugehörigen Mikrokristallite können unter anderem die Oberflächenrauheit der optischen Schichtsysteme verstärken. Ausschlaggebend sind in diesem Zusammenhang die Kornstrukturen der aufwachsenden Beschichtungsmaterialien. Gallais und Kollegen [91] verifizierten im Rahmen der dualen Ionenstrahltechnologie eine signifikante Oberflächenrauigkeit. Die Untersuchungen der dualgesputterten Hafniumdioxidschicht wurden auf Grundlage einer optischen Schichtdicke von 532 nm durchgeführt.

Die Auswirkungen der dualen Zerstäubung sollen am Beispiel einer Hafniumdioxidschicht beschrieben werden. In diesem Zusammenhang bilden wissenschaftliche Veröffentlichungen von Schichtexperimenten die Grundlage. Zum Beispiel konnten Alvisi und Kollegen [90] bei einer Wellenlänge von 308 nm einen Brechungsindex von  $2,12 \pm 0,03$  feststellen. Darüber hinaus intensiviert der Kugelstrahlmechanismus laut Patel und Kollegen [92] die ursprüngliche Druckspannung. Die Arbeitsgase der zusätzlichen Ionenbeaufschlagung können die Zusammensetzung der optischen Dünnschichten beeinflussen. Im Hinblick auf dualgesputterte Hafniumdioxidschichten lässt sich in Folge dessen einen Argonanteil von wenigen 1 % nachweisen. Zusätzlich zu den genannten Veröffentlichungen sind in Tabelle 5.01 auch weitere Schichteigenschaften aufgeführt.

Ionisierter Sauerstoff könnte im Rahmen einer Beaufschlagung die Stöchiometrie der aufwachsenden Schichtmaterialien verbessern. Unter Zuhilfenahme einer Sauerstoffzugabe kontrollierten Emiliani und Scaglione [93] die Stoffmengenanteile einer Siliziumdioxidschicht. In diesem Zusammenhang könnte eine verbesserte Sauerstoffzugabe zum Beispiel die laserinduzierte Zerstörschwelle verbessern. Rosnagel und Cuomo [94] analysierten die Auswirkungen der ionisierten Sauerstoffzugabe unter Berücksichtigung der einfallenden Teilchenverhältnisse. Darüber hinaus sind sowohl die Bewegungsenergien als auch die Einfallswinkel der ionisierten Sauerstoffatome zu berücksichtigen. Laut Johansson und Kollegen [95] können am Beispiel einlagiger Hafniumnitridfilme die prozessabhängigen Phasenübergänge nachgewiesen werden. Im Rahmen dieser Arbeit könnte das reaktive Ionenbombardement die Defektzustände der optischen Dünnschichtsysteme reduzieren.

Zusammenfassend lassen sich mit Hilfe der Ionenbeaufschlagung die physikalischen Wachstumsprozesse beeinflussen. In diesem Zusammenhang können unter anderem die ungebundenen Oberflächenatome zurückgesputtert werden. Unter Zuhilfenahme einer reaktiven Beaufschlagung lässt sich außerdem die stöchiometrische Zusammensetzung verändern. Der nächste Abschnitt dieses Kapitels beinhaltet die ionengestützten Schichtexperimente auf Grundlage eines Argonbombardements.

## 5.2 Eigenschaften realisierter Hafniumdioxidfilme

Der gestützte Wachstumsprozess einer Hafniumdioxidschicht soll in Abhängigkeit der Ionenstromstärke charakterisiert werden. Darüber hinaus ist die Bewegungsenergie der einfallenden Teilchenbeaufschlagung zu berücksichtigen. Im Kontext der ultravioletten Anwendungsbereiche befasst sich die erste Hälfte dieses Abschnitts mit den optischen Eigenschaften. Die zweite Hälfte dieses Abschnitts umfasst eine Charakterisierung der elektronischen Zwischenbandzustände mit Hilfe der Lumineszenzspektroskopie.

Die grundlegenden Abhängigkeiten der Schichteigenschaften sollen mit Hilfe parametrisierter Herstellungsprozesse untersucht werden. Schichteinflüsse lassen sich in diesem Zusammenhang mit den Betriebsparametern der sekundären Ionenstrahlquelle vergleichen. Die aufwachsenden Dünnschichtsysteme werden unter Zuhilfenahme ionisierter Argonatome bombardiert. Im Hinblick auf die Streulichtverluste ist zusätzlich zu den Suprasilsubstraten auch eine superpolierte Quarzglassorte zu verwenden. Unter Berücksichtigung der Charakterisierungsverfahren wurde eine physikalische Schichtdicke von etwa 1064 nm festgelegt.

Die durchgängige Ionenbeaufschlagung der Hafniumdioxidschichten wurde mit Hilfe des Schleusensystems realisiert. In diesem Zusammenhang ließen sich die Argonatome mit einer Bewegungsenergie von mehreren 10 eV extrahieren. Die Herstellung der optischen Dünnschichten wurde auf Grundlage der optischen Breitbandmonitorierung durchgeführt. Unter Berücksichtigung der Transmissionsverläufe war eine Beschichtungsrate im Bereich von 0,11 nm/s festzustellen.

Die Eigenschaften der optischen Dünnschichten sollen unter anderem in Abhängigkeit der Bewegungsenergie analysiert werden. Ausschlaggebend sind in diesem Zusammenhang die Hochspannungen des verwendeten Extraktionssystems. Abbildung 5.02 zeigt die Brechungsindizes der einlagigen Hafniumdioxidschichten unter Berücksichtigung der Teilchenenergie. In diesem Zusammenhang wurde auf Grundlage der Ionenbeaufschlagung ein Teilchenstrom von etwa 50 mA verwendet. Die Brechungsindizes bei einer Wellenlänge von 355 nm ließen sich mit Hilfe der Spektralphotometrie ermitteln. In gleicher Art und Weise konnten auch die Gesamtverluste der einlagigen Hafniumdioxidschichten charakterisiert werden. Die zusätzliche Teilchenenergie reduzierte im Vergleich zur Referenzprobe den Brechungsindex der optischen Dünnschichtsysteme. Im Gegensatz dazu verstärkten sich im Rah-

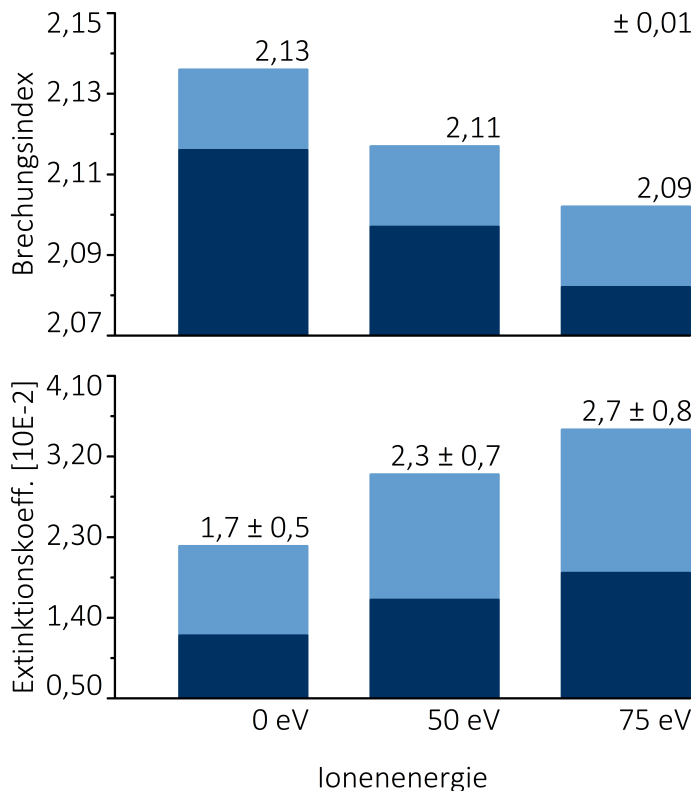


men der sekundären Ionenbeaufschlagung die ultravioletten Gesamtverluste. Die Änderung der optischen Eigenschaften könnte auf eine Mikrokrystallisation der aufwachsenden Hafniumdioxidschicht zurückgeführt werden. Ausschlaggebend war ein verstärktes Streulichtaufkommen der Dünnschichtsysteme im Rahmen der Dunkel-feldmikroskopie.

In gleicher Art und Weise wie die Teilchenenergie beschreibt Abbildung 5.03 die Stromabhängigkeit der ionengestützten Hafniumdioxidschicht. In Anbetracht vergleichbarer Depositionsraten beschreibt die Ionenstromstärke in diesem Zusammenhang das Beaufschlagungsverhältnis. Unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit konnten keine signifikanten Abhängigkeiten der Schichteigenschaften festgestellt werden.

Die beobachteten Strukturmodifikationen sollen mit Hilfe der ultravioletten Lumineszenzspektroskopie analysiert werden. Unter Zuhilfenahme der gepulsten Excimerstrahlung ließ sich ein Emissionsspektrum der gestützten Hafniumdioxidschicht ermitteln. Signifikante Unterschiede der Lumineszenzspektren konnten auf Grundlage der bisherigen Dünnschichtsysteme nicht festgestellt werden. Im Hinblick auf ausgeprägte Strukturmodifikationen ließ sich eine zusätzliche Hafniumdioxidschicht realisieren. Im Unterschied zu den bisherigen Schichtsystemen wurde in diesem Fall eine Ionenenergie von 200 eV verwendet.

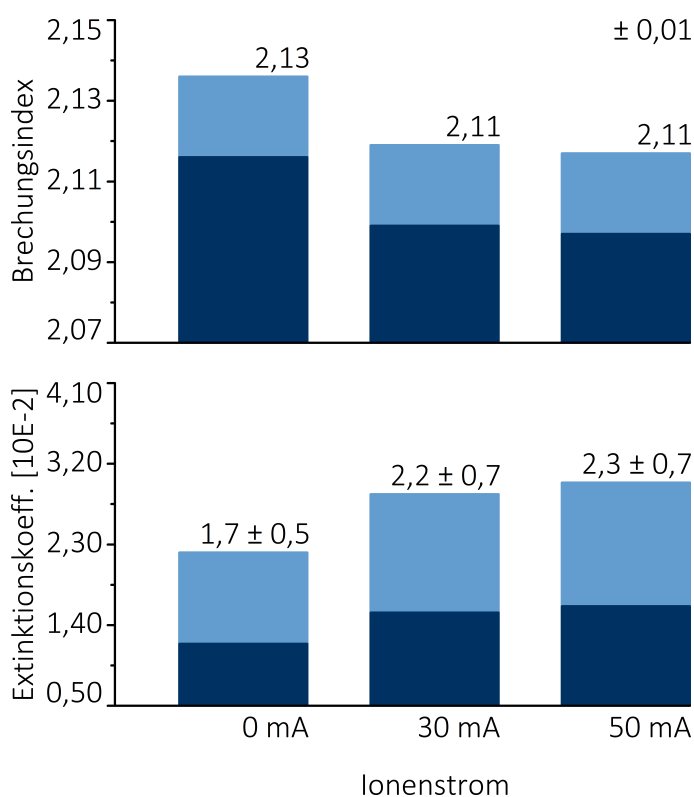
Das Lumineszenzspektrum der ionengestützten Hafniumdioxidschicht ist in Ab-



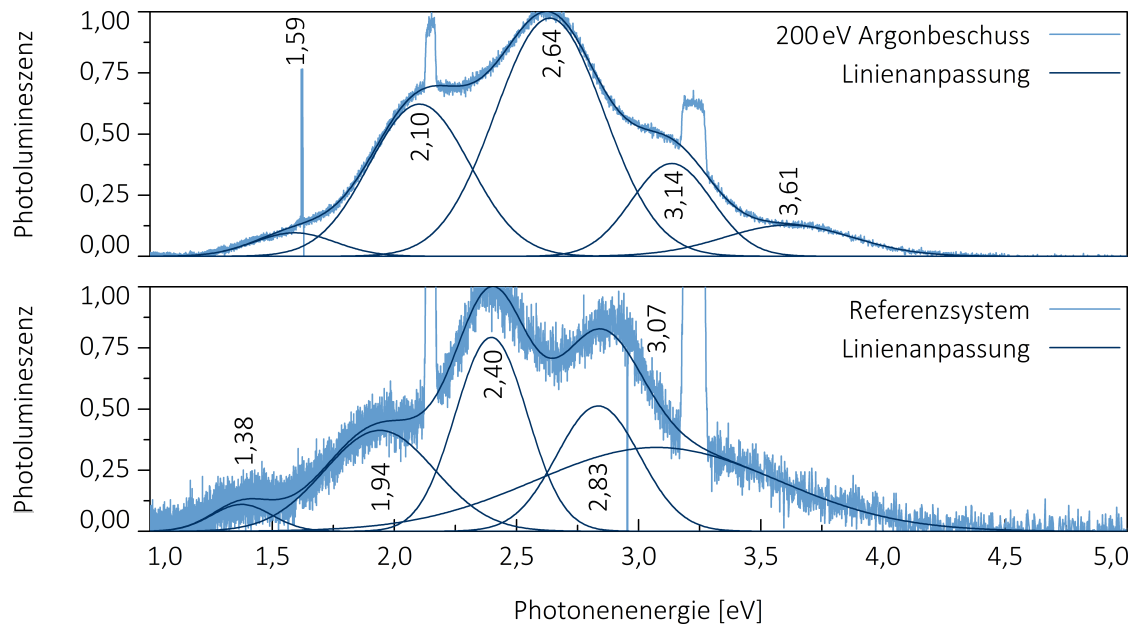
**Abbildung 5.02:** Energieabhängigkeit der ionengestützten Hafniumdioxidschicht. Das sekundäre Ionenbombardement wurde mit Hilfe eines dreilagigen Gittersystems beschleunigt. In Folge dessen unterliegen die Bewegungsenergien den angelegten Hochspannungen. Die einlagigen Hafniumdioxidschichten ließen sich auf Grundlage der breitbandigen Spektralphotometrie charakterisieren. Im Rahmen der Ionenbeaufschlagung wurde der Brechungsindex bei einer Wellenlänge von 355 nm reduziert. Im Gegensatz dazu intensivierete das Ionenbombardement die Gesamtverluste der einlagigen Hafniumdioxidschicht.

bildung 5.04 dargestellt. Im Vergleich zur Referenzschicht lässt sich ein höheres Signal zu Rausch Verhältnis feststellen. Darüber hinaus konnte in Anbetracht der abweichenden Übergangsenergien eine Strukturveränderung nachgewiesen werden. Die Lumineszenzspektren der gestützten Hafniumdioxidschichten ließen sich mit Hilfe Gaußscher Normalverteilungen interpolieren. Unter Berücksichtigung der Streulichtverluste verändert Mikrokrystallisation die Zwischenbandzustände der gestützten Dünnschichtsysteme. Zusätzlich zu dieser Arbeit beschreiben Alig und Kollegen [96] die Ionenbeaufschlagung der dualgesputterten Hafniumdioxidschichten.

Zusammenfassend wurden die dualgesputterten Hafniumdioxidschichten mit zunehmender Teilchenenergie intransparent. Lichtstreuende Gittergeflechte implizierten in diesem Zusammenhang einen mikrokristallinen Wachstumsprozess. In Folge dessen kann das sekundäre Ionenbombardement die oberflächliche Beschaffenheit der Dünnschichtsysteme beeinflussen. Darüber hinaus sollte der mechanische Schichtstress im Rahmen der gestützten Wachstumsprozesse berücksichtigt werden. Zusätzlich zu den optischen Eigenschaften der Dünnschichtsystem ließ sich mit Hilfe der Lumineszenzspektroskopie eine veränderte Bandstruktur nachweisen. Im Hinblick auf die Stöchiometrie eröffnen reaktive Arbeitsgase eine weitere Einflussmöglichkeit der Ionenbeaufschlagung. Im folgenden Abschnitt sollen am



**Abbildung 5.03:** Stromabhängigkeiten der ionengestützten Hafniumdioxidschicht. Im Rahmen der Ionenbombardements sollen eventuelle Schichtmodifikationen identifiziert werden. Die Teilchenströme definieren in diesem Zusammenhang das angewendete Beaufschlagungsverhältnis. Unter Zuhilfenahme breitbandiger Spektralphotometrie wurden die ionengestützten Hafniumdioxidschichten charakterisiert. Der Brechungsindex bei einer Wellenlänge von 355 nm unterlag keiner signifikanten Stromabhängigkeit. In Übereinstimmung mit dem Brechungsindex konnten auch keine Änderungen des Extinktionskoeffizienten festgestellt werden.



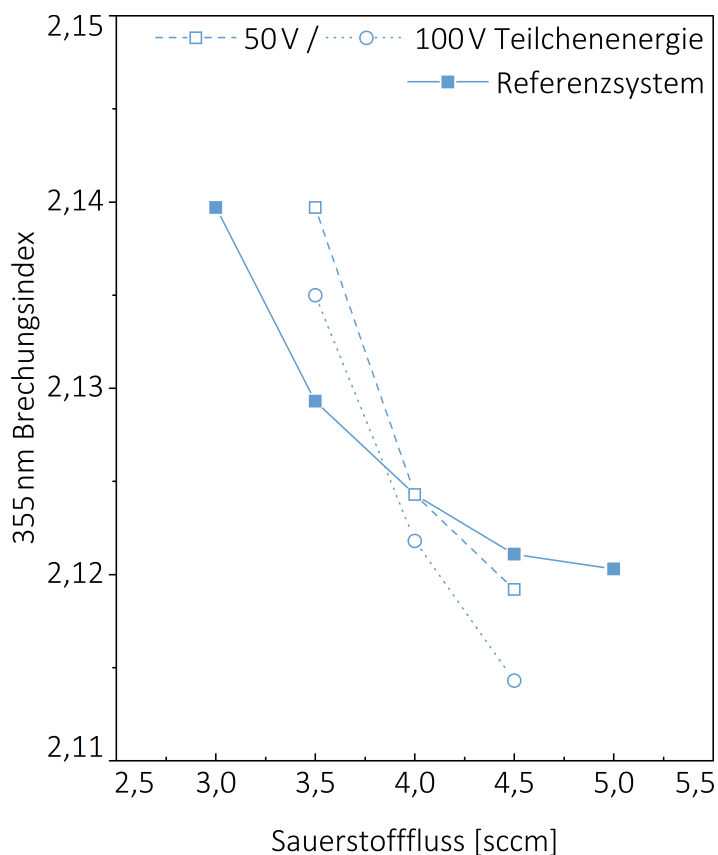
**Abbildung 5.04:** Lumineszenzspektrum einer ionengestützten Hafniumdioxidschicht. Im Hinblick auf die elektronische Bandstruktur wurde eine Lumineszenzspektroskopie durchgeführt. In diesem Zusammenhang konnten mit Hilfe von Normalverteilungen die verschobenen Übergangsenergien der Dünnschichtsysteme festgestellt werden.

Beispiel der Hafniumdioxidschicht die Auswirkungen einer angeregten Sauerstoffzugabe untersucht werden.

### 5.3 Ionenstrahlgestützte Deposition mit Sauerstoff

Unter Zuhilfenahme der ionisierten Sauerstoffzugabe wird eine verbesserte Stöchiometrie der Hafniumdioxidschichten beabsichtigt. Die Herstellung von gestützten Dünnschichtsystemen unter Berücksichtigung der Teilchenenergie schafft in diesem Zusammenhang den Ausgangspunkt. Die Schichteigenschaften der einlagigen Hafniumdioxidsysteme sollen im Hinblick auf den ultravioletten Anwendungsbereich charakterisiert werden. Die erste Hälfte dieses Abschnitts beschreibt die Prozessbedingungen der reaktiven Ionenstrahlstützung. Die Schichteigenschaften der ultravioletten Dünnschichtsysteme werden in der zweiten Hälfte dieses Abschnitts evaluiert.

Die einlagigen Hafniumdioxidschichten sollen mit Hilfe einer reaktiven Ionenbeaufschlagung realisiert werden. In diesem Zusammenhang zerstäuben Argonteilchen das metallische Ausgangsmaterial. Im Gegensatz zum konventionellen Beschichtungsprozess erfolgt die Sauerstoffzugabe auf Grundlage der sekundären Ionenbeaufschlagung. Die aufwachsenden Beschichtungsmaterialien unterliegen darüber hinaus keiner zusätzlichen Sauerstoffversorgung. In Übereinstimmung mit



**Abbildung 5.05:** Brechungsindizes der reaktiv gestützten Hafniumdioxidsysteme. Die Dispersionsdaten wurden mit Hilfe der breitbandigen Spektralphotometrie ermittelt. In diesem Zusammenhang ist eine absolute Messungenauigkeit von 0,01 zu berücksichtigen. Die Brechungsindizes der ultravioletten Dünnschichtsysteme sinken mit zunehmendem Sauerstofffluss. Im Bereich geringer Sauerstoffzugaben begrenzen starke Absorptionsverluste die Schichtexperimente. Unter Zuhilfenahme der konventionellen Ionenstrahlzerstäubung wurde im Hinblick auf die gestützten Wachstumsprozesse ein Referenzsystem geschaffen.

den bisherigen Schichtexperimenten terminiert der optische Breitbandmonitor die Wachstumsprozesse.

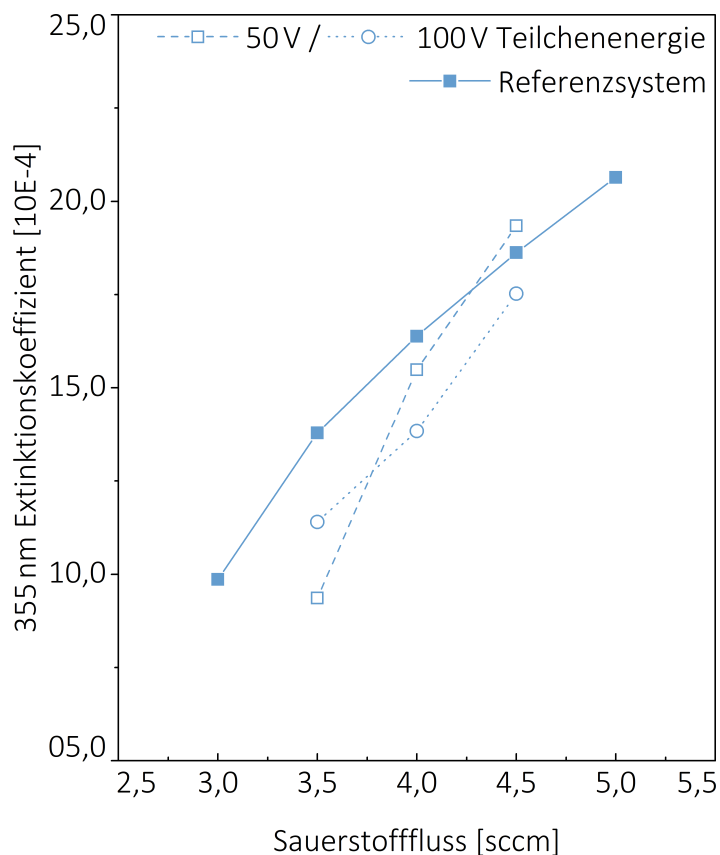
Unter Berücksichtigung der Teilchenenergie beinhaltet Abbildung 5.05 die Brechungsindizes der reaktiv gestützten Hafniumdioxidsysteme. In Anbetracht der verwendeten Spektralphotometrie ist eine absolute Messungenauigkeit von 0,01 zu berücksichtigen. Zunehmender Sauerstofffluss reduzierte unter diesen Bedingungen die Brechungsindizes der optischen Dünnschichtsysteme. Ausschlaggebend ist in diesem Zusammenhang die Stöchiometrie der Hafniumdioxidschichten. Ungeachtet dessen beschränken absorptive Wachstumsprozesse die Schichtexperimente im Bereich geringer Sauerstoffzugaben. Im Vergleich zur Referenzschicht verstärkt das Ionenbombardement die Sauerstoffabhängigkeit der ultravioletten Brechungsindizes.

Unter Zuhilfenahme der breitbandigen Spektralphotometrie wurden darüber hinaus die optischen Gesamtverluste analysiert. In diesem Zusammenhang ist eine relative Messungenauigkeit von etwa 30 % zu berücksichtigen. Die Extinktionskoeffizienten der reaktiv gestützten Hafniumdioxidschichten sind in Abbildung 5.06 dargestellt. In Übereinstimmung mit dem Referenzsystem intensiviert ein zunehmender Sauerstofffluss die Absorptionsverluste. Der gestützte Wachstumsprozess

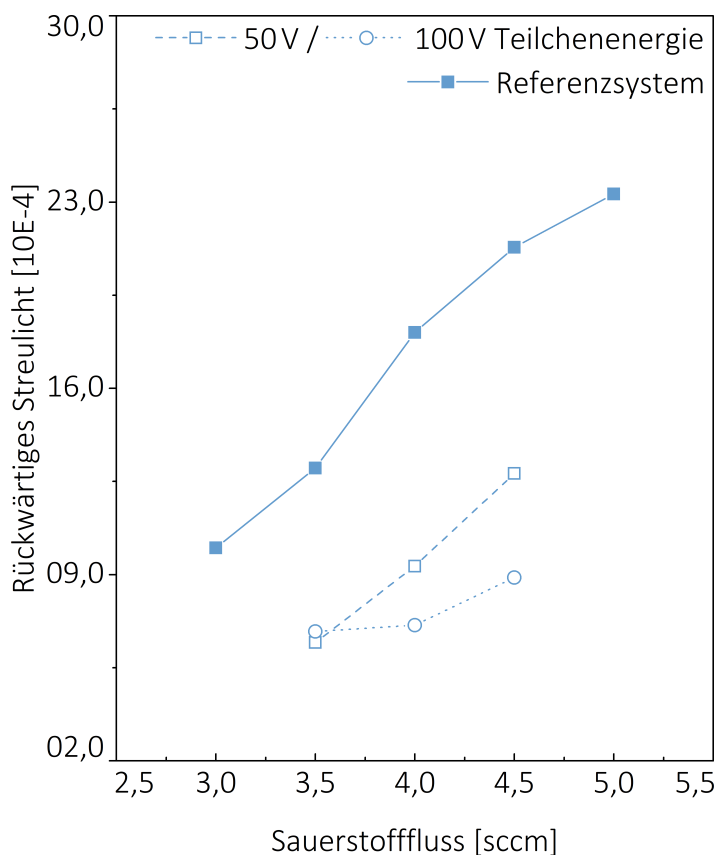
könnte eine präzisere Sauerstoffversorgung der Dünnschichtsysteme sicherstellen. Ausschlaggebend ist in diesem Fall die Sauerstoffzugabe mit Hilfe der sekundären Ionenstrahlquelle. Im Hinblick auf die geforderten Schichteigenschaften sollte der kleinstmögliche Sauerstofffluss verwendet werden.

Zusätzlich zu den Dispersionsdaten sollen die Streueigenschaften der gestützten Hafniumdioxidschichten bestimmt werden. Unter Berücksichtigung einer Wellenlänge von 532 nm sind in Abbildung 5.07 die rückwärtigen Streulichtverluste dargestellt. In diesem Zusammenhang wird das grundlegende Streulichtniveau der Dünnschichtsysteme betrachtet. Im Vergleich zum Referenzsystem lassen sich die Streulichtverluste mit Hilfe der gestützten Wachstumsprozesse reduzieren. In Anbetracht des Messverfahrens ist in diesem Fall eine relative Messungenauigkeit von 3 % zu berücksichtigen. Yoon und Kollegen [97] untersuchten Tantalpentoxidschichten im Hinblick auf eine reaktive Ionenbeaufschlagung. In Übereinstimmung mit dieser Arbeit offenbarte sich unter Berücksichtigung niedriger Prozesstemperaturen eine verbesserte Schichtstruktur.

Zusammenfassend konnten die Schichteigenschaften im Rahmen der reaktiven Ionenbeaufschlagung verbessert werden. Ausschlaggebend war in diesem Zusammenhang die Stöchiometrie der optischen Dünnschichtsysteme. Unter Zuhilfe-



**Abbildung 5.06:** Absorptionsverluste der reaktiv gestützten Hafniumdioxidsysteme. Der Extinktionskoeffizient konnte mit abnehmendem Sauerstofffluss der Ionenstrahlquelle reduziert werden. Ausschlaggebend ist in diesem Zusammenhang die veränderte Stöchiometrie der Dünnschichtsysteme. Die Absorptionsverluste ließen sich mit Hilfe der breitbandigen Spektralphotometrie charakterisieren. Unter diesen Bedingungen sollte eine relative Messungenauigkeit von etwa 30 % berücksichtigt werden. Im Hinblick auf die ultravioletten Anwendungsbereiche ist der kleinstmögliche Sauerstofffluss zu verwenden.



**Abbildung 5.07:** Streulichtverluste der reaktiv gestützten Hafniumdioxidsysteme. Im Rahmen der dualen Ionenstrahltechnologie wurden die grundlegenden Streulichtniveaus ermittelt. Die einlagigen Dünnschichtsysteme werden in Kombination mit einer konventionellen Referenzschicht dargestellt. In Übereinstimmung mit den bisherigen Streulichtmessungen wurde eine Wellenlänge von 532 nm verwendet. Das Basisniveau der rückwärtigen Streuverluste ließ sich mit Hilfe der gestützten Wachstumsprozesse reduzieren. In diesem Zusammenhang sollte eine relative Messungengenauigkeit von etwa 3 % berücksichtigt werden.

nahme der ionisierten Sauerstoffzugabe konnte vor allem das Streulichtaufkommen reduziert werden. Zusätzlich zu den optischen Eigenschaften erfordern gegenwärtige Satelliteninstrumente auch eine hohe Langzeitstabilität. Im nächsten Abschnitt dieses Kapitels soll der Wachstumsprozess im Hinblick auf die laserinduzierte Zerstörungsschwelle untersucht werden.

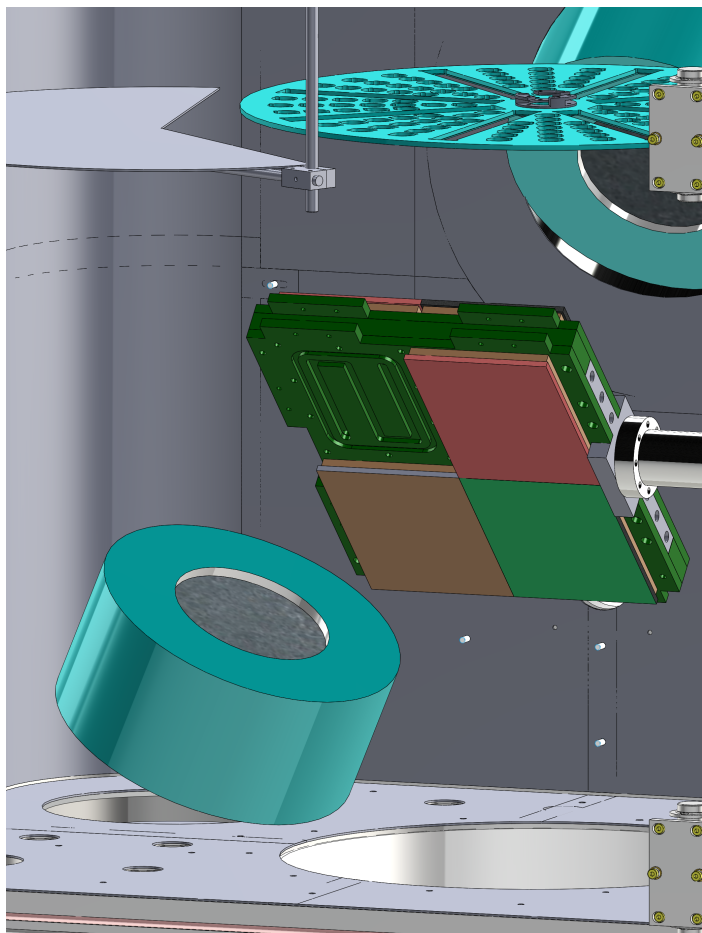
## 5.4 Aktive Vermeidung von Zerstörungsvorläufern

Nanoskalige Zerstörungsvorläufer können die Leistungsfestigkeit eines optischen Dünnschichtsystems beeinträchtigen. Unter Zuhilfenahme der Ionenbeaufschlagung wird eine Entschärfung der entsprechenden Unvollkommenheiten beabsichtigt. Die Leistungsfestigkeit einer ultravioletten Antireflexbeschichtung dient in diesem Zusammenhang als Beispiel. Die erste Hälfte dieses Abschnitts beschreibt im Rahmen gegenwärtiger Weltraumanwendungen die ultraviolette Antireflexbeschichtung. Die Zerstörungsfestigkeit des funktionalen Dünnschichtsystems wird in der zweiten Hälfte dieses Abschnitts charakterisiert.

### 5.4.1 Defektinduzierte Zerstörungen an Weltraumoptiken

Im Hinblick auf gegenwärtige Weltraummissionen wird eine langzeitstabile Leistungsfestigkeit der Dünnschichtsysteme gefordert. Das Instrument Mars Organic Molecule Analyser der Raumfahrtmission ExoMars dient in diesem Zusammenhang als Beispiel. Laut Brinckerhoff und Kollegen [98] soll mit Hilfe der Weltraummission nach Zeichen des vergangenen Lebens gesucht werden. Ungeachtet der schwierigen Umweltbedingungen ist die Zusammensetzung von gesammelten Gesteinsproben zu analysieren. Darüber hinaus erforschen Schillinger und Kollegen [99] im Rahmen der Weltraummission AEOLUS die Entwicklung der globalen Windprofile. Im Hinblick auf das laserinduzierte Kontaminationsverhalten untersuchten Riede und Kollegen [100] in diesem Zusammenhang flüchtige Kohlenstoffverbindungen.

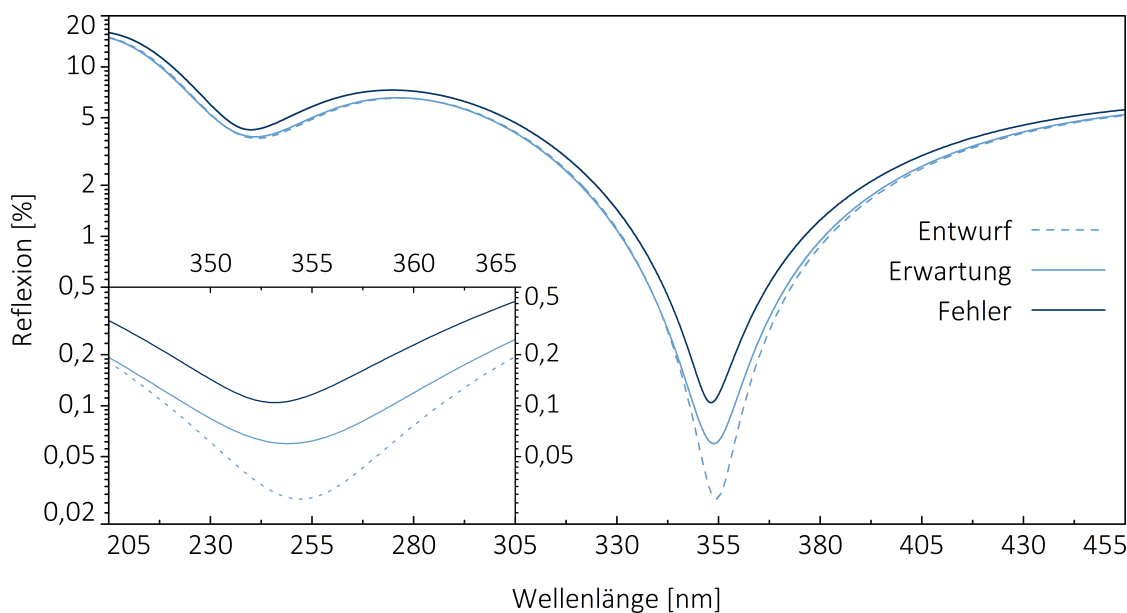
In Anbetracht der ultravioletten Anwendungswellenlänge können nanoskalige Schichtdefekte die Zerstörfestigkeit beeinträchtigen. Deshazer und Kollegen [101] demonstrierten den Zerstörmechanismus auf Grundlage verschiedener Probenstrahldurchmesser. Die Laserbestrahlung induziert im Zusammenhang der Absorptions-



**Abbildung 5.08:** Schematische Zeichnung des dualen Zerstäubungssystems. Im Vergleich zum Schleusensystem wurde eine geräumigere Zerstäubungsanlage verwendet. Ungeachtet dessen ermöglicht die dargestellte Anlagenkonfiguration eine ionenstrahlgestützte Schichtherstellung. Die ionisierten Arbeitsgase lassen sich mit Hilfe einer dreilagigen Gitterstruktur extrahieren. Unter Zuhilfenahme einer drehbaren Halterung können die jeweiligen Schichtmaterialien positioniert werden. Die Konstruktion beinhaltet darüber hinaus eine wassergekühlte Verbindungsplatte. Im Hinblick auf die Materialverteilung wird zusätzlich zur vorhandenen Substratrotation eine Aluminiumblende verwendet.

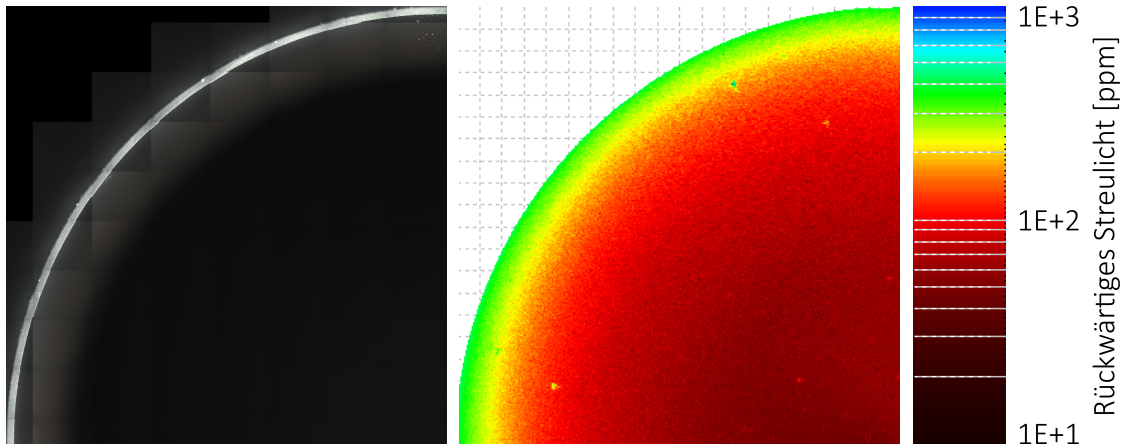
verluste einen lokalen Temperaturanstieg der Schichtbereiche. Unter Berücksichtigung der mechanischen Spannungsfelder werden die aufliegenden Schichtmaterialien herausgesprengt. Papernov und Schmid [102] untersuchten die Zerstörungsmorphologie einer defektbehafteten Siliziumdioxidschicht mit Hilfe von Goldnanopartikeln. Zusätzlich zu einem unsauberen Wachstumsprozess können die Zerstörungsvorläufer auch im Zuge der Substratvorbereitung generiert werden. Im Gegensatz zu Spiegelbeschichtungen sind die Substratoberflächen der verwendeten Antireflexbeschichtungen einer höheren Laserleistung ausgesetzt.

Die sekundäre Ionenbeaufschlagung soll die Zerstörungsvorläufer im Rahmen des Schichtwachstums neutralisieren. Im Hinblick auf die laserinduzierte Zerstörfestigkeit lassen sich in diesem Zusammenhang zeitaufwändige Messprozeduren vermeiden. Riede und Kollegen [103] erwarten am Beispiel der zukünftigen Weltraummissionen eine Erweiterung der bestehenden Zerstörungsprüfstände. Die sekundäre Ionenbeaufschlagung soll die Zerstörungsvorläufer auf Grundlage abweichender Sputtereigenschaften herauslösen. Eventuelle Verwerfungen der Schichtoberfläche ließe sich unter Zuhilfenahme der folgenden Materialteilchen korrigieren. Die laserinduzierte Zerstörfestigkeit der Dünnschichtsysteme würde lediglich der materialeigenen Leistungsfestigkeit unterliegen. Darüber hinaus ermöglicht das Teilchenbombardement der sekundären Ionenstrahlquelle eine Substratvorbehandlung. Unter Zuhilfenahme der Ionenbeaufschlagung ließ sich der Zerstörwettbe-



**Abbildung 5.09:** Fertigungstoleranzen einer ultravioletten Antireflexschicht. Unter Zuhilfenahme des Dünnschichtsystems soll die laserinduzierte Zerstörfestigkeit untersucht werden. Die vierlagige Antireflexschicht beinhaltet zusätzlich zu Aluminiumoxid auch niedrig brechendes Siliziumdioxid. Unter Berücksichtigung der Fertigungstoleranzen wurde im Rahmen der Computersimulation ein Schichtdickenfehler von 3 % verwendet.





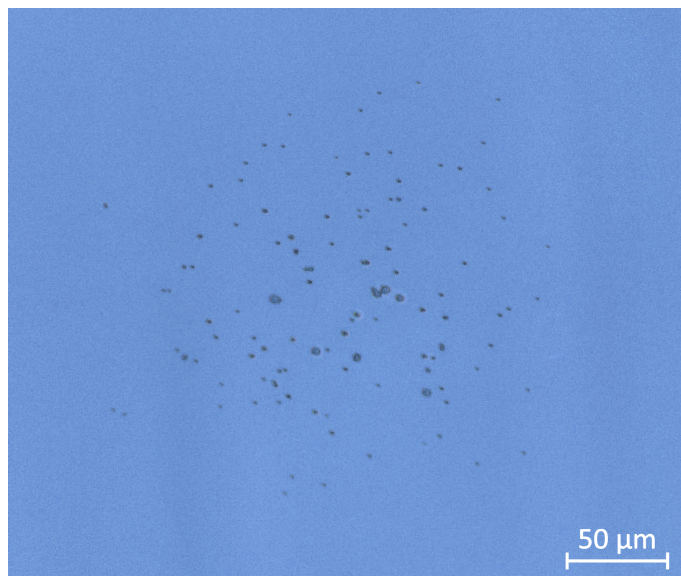
**Abbildung 5.10:** Partikelanalyse des konventionellen Vergütungssystems. Im Hinblick auf die Zerstörfestigkeit wurde die Defektverteilung einer ultravioletten Antireflexbeschichtung untersucht. Weder Dunkelfeldmikroskopie noch Streulichtmessplatz offenbarten in diesem Fall relevante Unvollkommenheiten des Dünnschichtsystems. Im Rahmen der Dunkelfeldmikroskopie sollte in diesem Zusammenhang ein räumliches Auflösungsvermögen von etwa 500 nm berücksichtigt werden.

werb der Konferenz SPIE Laser Damage gewinnen. Laut Stolz und Kollegen [104] wurden in diesem Fall Spiegelbeschichtungen bei einer Wellenlänge von 1064 nm charakterisiert.

Im Rahmen der ionenbasierten Defektneutralisierung wurde eine geräumige Ionenstrahlsputteranlage verwendet. Die schematische Anordnung der Komponenten ist in Abbildung 5.08 dargestellt. Im Gegensatz zum Schleusensystem lässt sich die Beschichtungsanlage mit Hilfe einer Kondensationspumpe evakuieren. Die primäre Ionenstrahlquelle mit einem Durchmesser von 16 cm musste mit einem Neutralisator kombiniert werden. Unter Zuhilfenahme einer drehbaren Haltekonstruktion lassen sich in Übereinstimmung mit dem Schleusensystem die Ausgangsmaterialien positionieren. Die Materialkacheln mit einer Fläche von  $150 \times 200 \text{ mm}^2$  wurden in Kombination mit wassergekühlten Kupferplatten bereitgestellt. Die Stöchiometrie der aufwachsenden Dünnschichtsysteme lässt sich mit Hilfe einer reaktiven Sauerstoffatmosphäre kontrollieren.

Im Hinblick auf die sekundäre Beaufschlagung der Schichtsysteme wurde eine zusätzliche Ionenstrahlquelle implementiert. Unter Berücksichtigung einer Radiofrequenz von 13,56 MHz ließen sich die Arbeitsgase mit Hilfe einer wassergekühlten Induktionsspule ionisieren. Die Edeltgasteilchen wurden laut Veeco Instruments Incorporated [105] auf Grundlage gewölbter Molybdängitter extrahiert. In diesem Zusammenhang können die Plasmateilchen ein elektrisches Potential von 50 bis 1500 V durchlaufen. Unter Berücksichtigung einer Stromstärke von 200 mA soll die Quelleneinheit eine Teilchendichte von mehreren  $1 \text{ mA/cm}^2$  bereitstellen.

In Anbetracht zukünftiger Weltraummissionen sollen die Modifikationen am



**Abbildung 5.11:** Laserinduzierte Zerstörungen einer konventionellen Entspiegelung. Unter Zuhilfenahme standardisierter Zerstörmessungen wurde die Ausgangssituation ermittelt. In Anbetracht der punktuellen Zerstörungen ließ sich in diesem Fall eine defektinduzierte Wechselwirkung nachweisen. Unter Berücksichtigung einer Wellenlänge von 355 nm wurde darüber hinaus eine laserinduzierte Zerstörschwelle von etwa  $7,5 \text{ J/cm}^2$  bestimmt.

Beispiel einer ultravioletten Antireflexbeschichtung durchgeführt werden. Das vierlagige Dünnschichtsystem umfasst in diesem Zusammenhang sowohl Aluminiumoxid als auch Siliziumdioxid. Abbildung 5.09 zeigt im Hinblick auf die Designstabilität unterschiedliche Spektralverläufe der Antireflexbeschichtung. Unter Berücksichtigung der Fertigungstoleranzen wurde in diesem Fall ein relativer Schichtdickenfehler von 3 % angenommen. Im Rahmen der Simulation ließ sich die Reflexionsvorgabe von 0,2 % unter diesen Bedingungen aufrechterhalten. Darüber hinaus unterliegen die Dünnschichten in Anbetracht der entspiegelnden Spektraleigenschaften einem gleichmäßigen Feldstärkeverlauf.

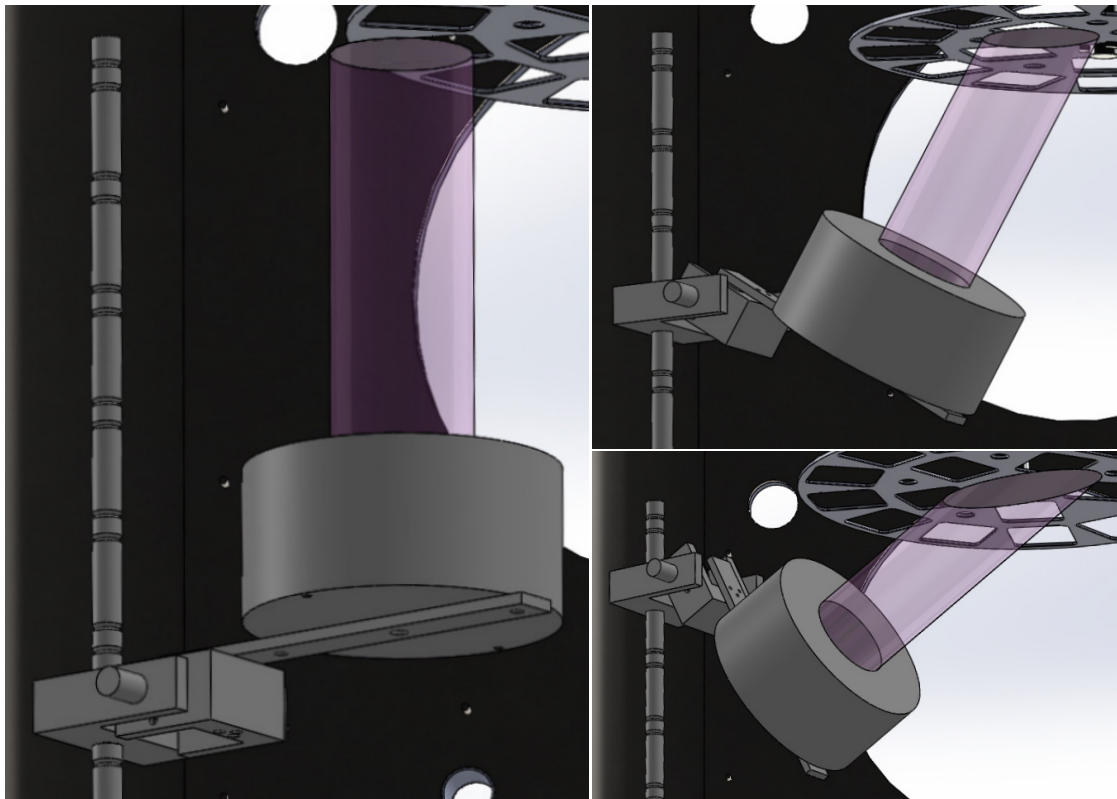
Im Hinblick auf die laserinduzierte Zerstörfestigkeit wurde die Defektverteilung einer konventionellen Referenzschicht untersucht. Zusätzlich zur Dunkelfeldaufnahme beinhaltet Abbildung 5.10 die rückwärtige Streulichtverteilung der Antireflexbeschichtung. In Anbetracht der eingesetzten Analyseverfahren wurde ein superpoliertes Quarzglassubstrat verwendet. Unter Berücksichtigung der zentrumsnahen Schichtbereiche ließen sich keine relevanten Defektaufkommen feststellen. Ungeachtet dessen könnten auch unentdeckte Defektaufkommen die laserinduzierte Zerstörschwelle beeinträchtigen. In diesem Zusammenhang sollte im Rahmen der Dunkelfeldmikroskopie ein Auflösungsvermögen von etwa 500 nm berücksichtigt werden.

Unter Zuhilfenahme einer laserinduzierten Zerstörschwellenmessung ließ sich der konzeptionelle Ausgangspunkt ermitteln. Die bestrahlte Antireflexbeschichtung wurde in diesem Zusammenhang mit Hilfe der Nomarskimikroskopie analysiert. Abbildung 5.11 präsentiert die Zerstörungsmorphologie des beaufschlagten Dünnschichtsystems. Der defektinduzierte Zerstörungsmechanismus der Antireflexbeschichtung konnte mit Hilfe der punktförmigen Schadensbilder nachgewie-

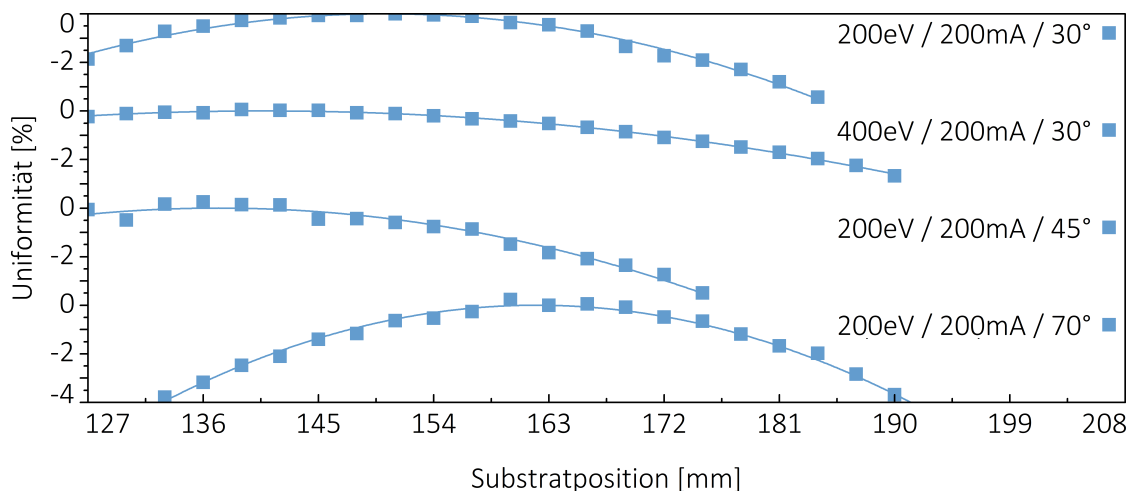
sen werden. Unter Berücksichtigung der Laserpulsdauer von 5,3 ns ließ sich darüber hinaus eine laserinduzierte Zerstörschwelle von  $7,5 \text{ J/cm}^2$  feststellen. In Anbetracht unveränderter Messpositionen konnte eine materialeigene Leistungsfestigkeit von mindestens  $19 \text{ J/cm}^2$  festgestellt werden.

### 5.4.2 Ionenbasierte Vermeidung der Zerstörungsvorläufer

Im Rahmen der Schichtexperimente sollen unterschiedliche Einfallsrichtungen der Ionenbeaufschlagung verwendet werden. Abbildung 5.12 demonstriert die entwickelte Stützquellenhalterung am Beispiel verschiedener Winkeleinstellungen. Im Hinblick auf die spektralen Anforderungen muss eine relative Sputterverteilung von etwa  $\pm 1\%$  eingehalten werden. Die Sputterverteilung lässt sich in diesem Zusammenhang mit Hilfe der schwenkbaren Stangenhalterung beeinflussen. Unter Zuhilfenahme gesputterter Tantalpentoxidschichten wurden die verwendeten Konfigurationen charakterisiert. Die resultierenden Abtragsverteilungen sind in Abbil-



**Abbildung 5.12:** Schematischer Aufbau der Stützquellenhalterung. Im Hinblick auf die Schichtexperimente werden verschiedene Einfallsrichtungen der Ionenbeaufschlagung untersucht. Zusätzlich zum gewünschten Neigungswinkel ermöglicht die Quellenhalterung auch eine individuelle Höheneinstellung. Unter Zuhilfenahme der Rotationsfreiheit lässt sich darüber hinaus der Wirkungsbereich der sekundären Beaufschlagung beeinflussen.



**Abbildung 5.13:** Abtragsverteilungen von ausgewählten Prozesskonfigurationen. Die Abtragsverteilungen wurden auf Grundlage gesputterter Tantalpentoxidschichten ermittelt. Im Hinblick auf die polynomiale Kurvenanpassung ist eine absolute Messungenauigkeit von 0,1 % zu berücksichtigen. Am Beispiel der entspiegelten Laserkomponenten lässt sich in Folge dessen ein relativer Schichtabtrag von  $\pm 1\%$  realisieren.

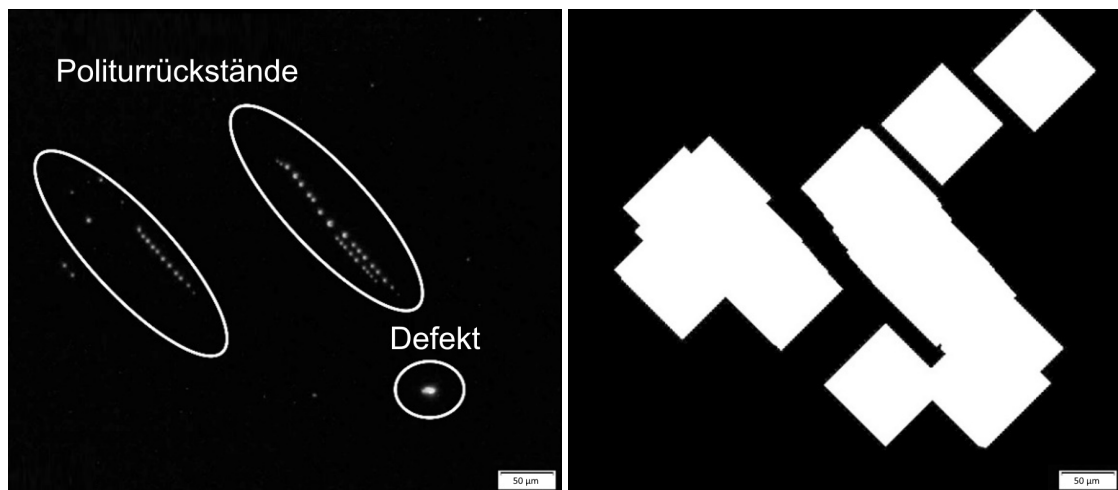
Abbildung 5.13 auf Grundlage einer quadratischen Interpolation dargestellt. In Anbetracht der verwendeten Spektralphotometrie ist eine absolute Messungenauigkeit von 0,1 % zu berücksichtigen. Zum Beispiel wurde im Fall eines Einfallswinkels von  $30^\circ$  eine Teilchenenergie von 200 eV mit einer Ionenstromstärke von 200 mA kombiniert. Die Beaufschlagung der gesputterten Aluminiumoxidschicht konnte unter diesen Bedingungen einen Materialabtrag von  $0,0116 \text{ nm/s}$  hervorrufen. In Vergleich dazu wurde am Beispiel der Siliziumdioxidschicht ein Abtragsrate von  $0,0198 \text{ nm/s}$  festgestellt.

Zusätzlich zum Schichtmaterial durchläuft die Laserstrahlung aufgrund der Spektraleigenschaften auch die Substratoberfläche. In Folge dessen soll mit Hilfe der Ionenstrahlquelle unter anderem die Substratoberfläche beaufschlagt werden. Unter Zuhilfenahme von chemischen Ätzprozessen erreichten Qiu und Kollegen [106] am Beispiel einer Siliziumschicht die dreifache Zerstörfestigkeit. Ausschlaggebend waren in diesem Zusammenhang die Untergrundschäden konventioneller Quarzglassubstrate. Juškevičius und Kollegen [107] simulierten die laserinduzierte Zerstörfestigkeit von Mehrschichtsystemen unter Berücksichtigung oberflächlicher Kratzer. Verwerfungen der aufgetragenen Materialschichten konnten die Zerstörschwelle aufgrund fokussierender Strukturen beeinträchtigen. Ungeachtet dessen lässt sich auf Grundlage der Substratbehandlung eine vergleichbare Ausgangssituation der Schichtexperimente sicherstellen. In Anbetracht einer festen Prozessdauer können die Materialabträge mit Hilfe der Ionenstromstärke beeinflusst werden. Die Zerstäubung der verschiedenen Bestandteile lässt sich auf Grundlage der angewendeten Ionenenergie verändern. Unter Zuhilfenahme diskreter Winkeleinstellung

kann darüber hinaus die Impulsrichtung des sekundären Ionenbombardements eingestellt werden.

Die Zerstörungsvorläufer der ultravioletten Dünnschichtsysteme sollen mit Hilfe gepulster Laserstrahlung identifiziert werden. Im Hinblick auf geringe Defektverteilungen unterliegt die laserinduzierte Zerstörschwelle einer hohen Schwankungsbreite. Die Ionenbasierte Partikelvermeidung wurde in Folge dessen im Rahmen einer lückenlosen Probenrasterung charakterisiert. Die Bestrahlung der ultravioletten Antireflexschichten erfolgte im Unterschied zur Anwendung nicht unter Vakuumbedingungen. Laut Riede und Kollegen [108] schafft die Stabilität der dichten Schichtstruktur in diesem Zusammenhang die Voraussetzung. Darüber hinaus konnten Jensen und Kollegen [109] die Übertragbarkeit am Beispiel gesputterter Antireflexbeschichtung nachweisen. Im Hinblick auf die gestützten Schichtexperimente wurde ein effektiver Strahldurchmesser von  $200\ \mu\text{m}$  verwendet. Unter Berücksichtigung zweier Rasterflächen von  $12\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$  ließen sich verschiedene Bestrahlungsenergien verwenden. Die Zerstörungsaufkommen der bestrahlten Dünnschichtsysteme wurden mit Hilfe der Dunkelfeldmikroskopie identifiziert.

Im Hinblick auf die finanziellen Risiken einer Weltraummission sollen verborgene Zerstörungsvorläufer betrachtet werden. Die mikroskopischen Unvollkommenheiten der Dünnschichtsysteme sind dementsprechend zu vernachlässigen. Im Gegensatz zu den verborgenen Zerstörungsvorläufern lassen sich die sichtbaren Beschichtungsdefekte charakterisieren. Das Zerstörungspotential der mikroskopischen Unvollkommenheiten kann in Anbetracht früherer Untersuchungen vorhergesagt werden.

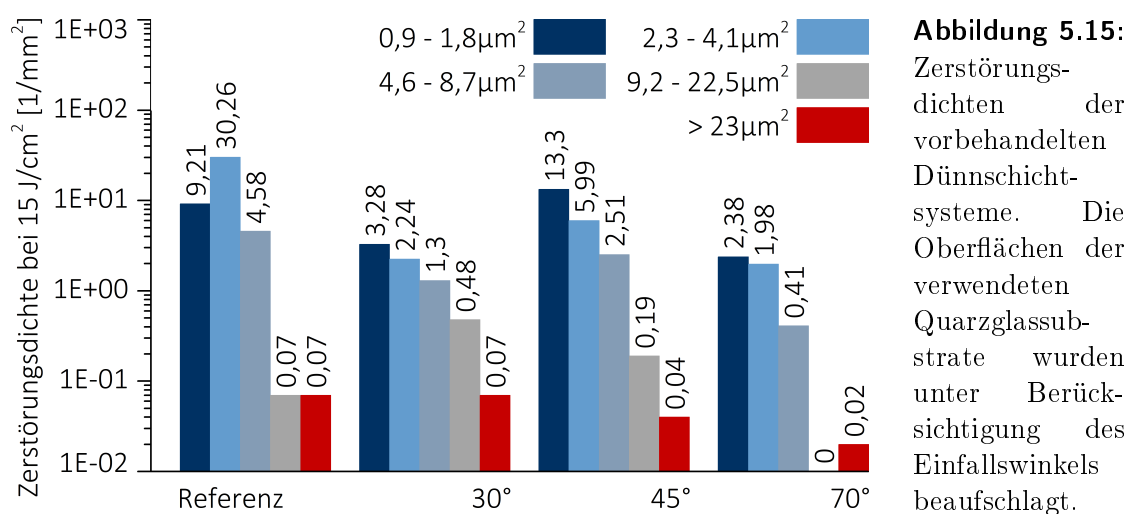


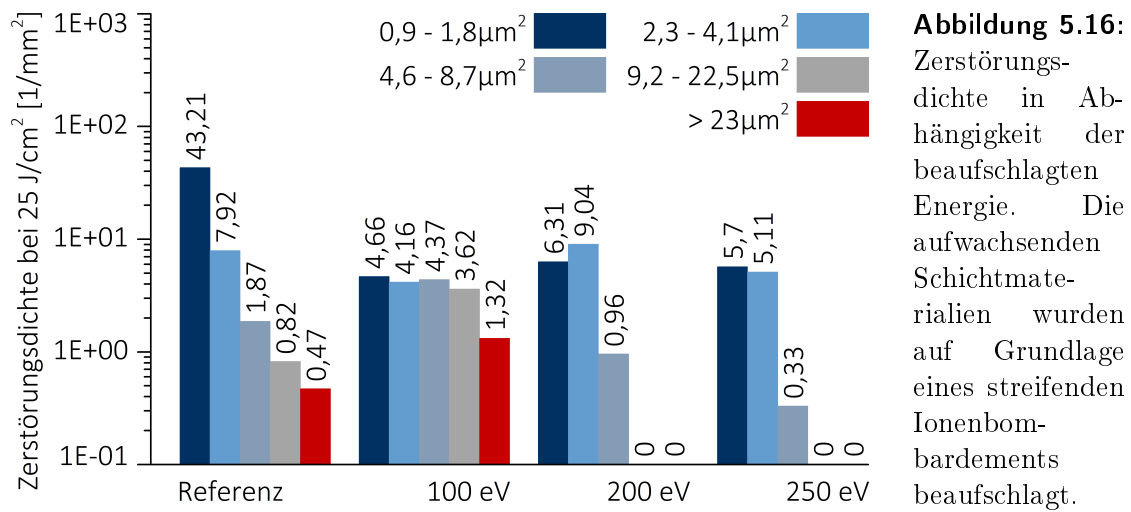
**Abbildung 5.14:** Schematische Darstellung der Defektausblendung. Unter Zuhilfenahme der Defektausblendung sollen verborgene Zerstörungsvorläufer identifiziert werden. Die Dunkelfeldaufnahmen lassen sich zu diesem Zweck auf Grundlage der Helligkeitsverteilung analysieren. Im Hinblick auf die bestrahlten Schichtsysteme sind die anfänglichen Unvollkommenheiten mit Hilfe der Programmiersprache Python auszublenden.

Die laserinduzierten Zerstörungen der Antireflexbeschichtungen sollen mit Hilfe der Dunkelfeldmikroskopie identifiziert werden. Unter Berücksichtigung verschiedener Größenklassen ermöglichte die Helligkeitsverteilung eine Kartierung der anfänglichen Unvollkommenheiten. In Anbetracht der jeweiligen Streucharakteristik ist eine Abweichung zur tatsächlichen Objektgröße zu berücksichtigen. Die anfänglichen Streulichobjekte sind im Hinblick auf die verborgenen Zerstörungsvorläufer auszublenden. Unter Zuhilfenahme der Programmiersprache Python wurden zu diesem Zweck Bereiche von etwa  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  verwendet. Abbildung 5.14 zeigt die Ausblendung der anfänglichen Unvollkommenheiten am Beispiel einer konventionellen Referenzschicht. Zusätzlich zu Polierrückständen wurde in diesem Fall auch ein Beschichtungsdefekt des ultravioletten Dünnschichtsystems festgestellt.

Im Rahmen der Substratvorbehandlung wurde eine Beseitigung der oberflächlichen Unvollkommenheiten beabsichtigt. Unter Berücksichtigung verschiedener Betriebsparameter ließen sich keine Abhängigkeiten der Zerstörfestigkeit feststellen. Ausschlaggebend ist vermutlich die herausragende Oberflächenqualität der Quarzglassubstrate. Im Gegensatz dazu konnte der Einfallswinkel der sekundären Ionenbeaufschlagung eine Veränderung der laserinduzierten Zerstörfestigkeit herbeiführen. Am Beispiel einer Energiedichte von  $15 \text{ J/cm}^2$  sind in Abbildung 5.15 die entsprechenden Zerstörungsaufkommen dargestellt. Die anfänglichen Unvollkommenheiten der Dünnschichtsysteme wurden im Rahmen der Dunkelfeldauswertung vernachlässigt. Im Vergleich zum konventionellen Referenzsystem ließ sich auf Grundlage eines Einfallswinkels von etwa  $70^\circ$  die geringste Zerstörungsdichte realisieren. Der schräge Einfallswinkel bewirkt im Gegenteil zum senkrechten Ionenbombardement vermutlich ein seitliches Herauslösen der Schichtdefekte.

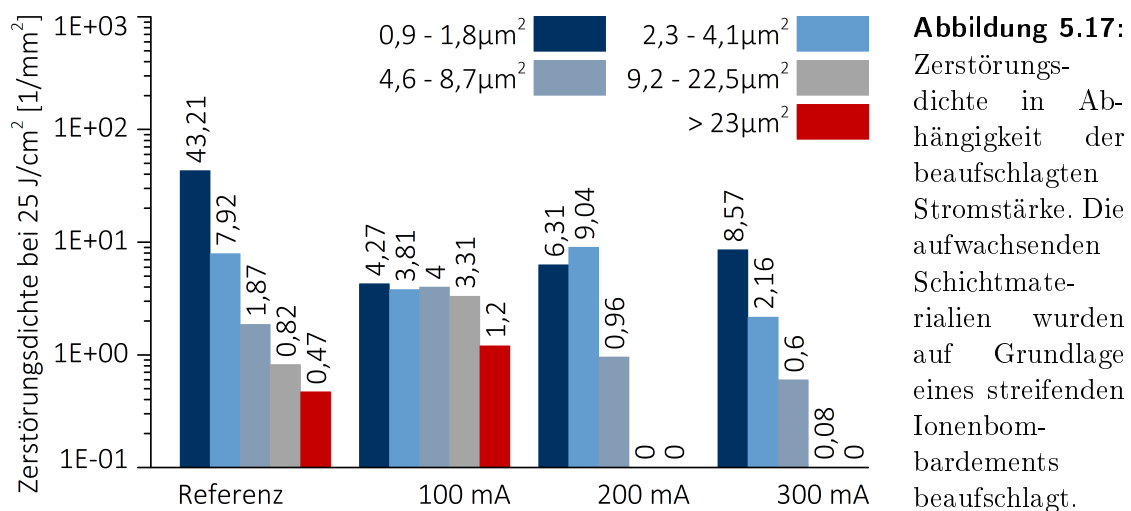
Zusätzlich zur Substratvorbehandlung sollen auch die aufwachsenden Beschichtungsmaterialien beaufschlagt werden. Die beschriebene Ionenbeaufschlagung der Quarzglassubstrate schafft in diesem Zusammenhang die Ausgangssituation. In





Übereinstimmung mit der Substratvorbehandlung wurde im Rahmen des Schichtwachstums ein Einfallswinkel von etwa  $70^\circ$  verwendet. Darüber hinaus wurden die beiden Beschichtungsmaterialien auf Grundlage der gleichen Betriebsparameter beaufschlagt. Zusätzlich zur Teilchenenergie lassen sich in diesem Zusammenhang auch verschiedene Ionenstromstärken der Teilchenbeaufschlagung berücksichtigen.

Die Leistungsfestigkeit der beaufschlagten Schichtsysteme wurde auf Grundlage einer Energiedichte von  $25 \text{ J/cm}^2$  charakterisiert. Die Zerstörungsdichten der ultravioletten Antireflexbeschichtungen sind in Abbildung 5.16 als Funktion der Teilchenenergie dargestellt. Im Gegensatz dazu beinhaltet Abbildung 5.17 die laserinduzierten Zerstörungsdichten unter Berücksichtigung der Ionenstromstärke. In diesem Zusammenhang lässt sich die Anzahl der eintreffenden Argonteilchen im Verhältnis zum Beschichtungsmaterial verändern. Unter Zuhilfenahme der ange-



wendeten Betriebsparameter konnte eine signifikante Reduzierung der Zerstörungsdichte festgestellt werden. Im Unterschied zu bisherigen Schichtexperimenten ist der streifende Einfallswinkel der Teilchenbeaufschlagung hervorzuheben. Unter Berücksichtigung der Substrathalterebene wurde im Fall der Ausgangskonfiguration eine Ionenstromdichte von etwa  $0,5 \text{ mA/cm}^2$  eingebracht.

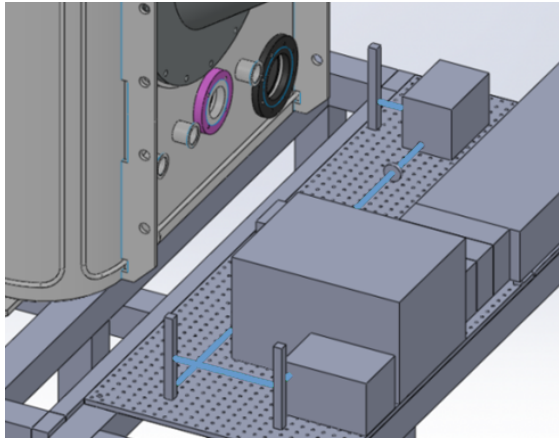
In Anbetracht der verbesserten Zerstörfestigkeit bildeten sich die kritischen Zerstörungsvorläufer während der Wachstumsprozesse. Insbesondere das streifende Ionenbombardement gestattete eine effiziente Zerstäubung der eintreffenden Schichtdefekte. Sowohl die Teilchenenergie als auch die Ionenstromdichte beeinflussen darüber hinaus die Effektivität der verwendeten Vermeidungsstrategie. Allerdings dürfen die Zerstäubungsvorgänge den Wachstumsprozess der eintreffenden Beschichtungsmaterialien nicht kompensieren. Eine signifikante Auswirkung der Vorbehandlung konnte aufgrund der hochqualitativen Quarzglassubstrate nicht festgestellt werden. Portal und Kollegen [110] zerstäubten Siliziumdioxidkugeln im Bereich von wenigen 100 nm mit Hilfe eines Argonbombardements. Zusätzlich zu einem senkrechten Ionenbeschuss wurde in diesem Zusammenhang auch ein Einfallswinkel von etwa  $45^\circ$  verwendet. Die Ionenbeaufschlagung soll in Kombination mit dem kolloidalen Lithographieverfahren eine anisotrope Oberfläche des Siliziumsubstrats generieren. Unter Zuhilfenahme der Rasterelektronenmikroskopie wurden die Oberflächenstrukturen in Abhängigkeit der verwendeten Winkeleinstellungen analysiert. Der senkrechte Ionenbeschuss erzeugte in diesem Zusammenhang eine Einarbeitung der aufliegenden Siliziumdioxidkugeln. Im Gegensatz dazu konnte die schräge Ionenbeaufschlagung eine Abgrenzung von der Substratoberfläche herbeiführen. Ausschlaggebend war die höhere Zerstäubungseffizienz des Siliziumsubstrats im Vergleich zu den Siliziumdioxidkugeln. Im Hinblick auf die entwickelte Partikelvermeidung könnte das schräge Ionenbombardement in Folge dessen einer Einarbeitung der auftreffenden Zerstörungsvorläufer entgegenwirken.

### 5.4.3 Bestrahlung der Vorläufer im Beschichtungsprozess

Unter Zuhilfenahme der Laserbestrahlung sollen weitere Eigenschaften der Zerstörungsvorläufer ermittelt werden. Im Unterschied zu den bisherigen Zerstörungsmessungen erfolgen die Rasterscantests im Rahmen der Schichtherstellung. Die aufwachsenden Dünnschichtsysteme werden in diesem Zusammenhang unter Berücksichtigung verschiedener Laserparameter beaufschlagt.

Das Lasersystem Spitlight Hybrid der InnoLas Laser GmbH wurde der Beschichtungsanlage mit Hilfe eines Aluminiumgestells hinzugefügt. Abbildung 5.18 zeigt den Versuchsaufbau der laserbasierten Schichtexperimente im Hinblick auf die Strahlvorbereitung. In Kombination mit einer Pulsdauer von 6,5 ns konnte auf Grundlage des Lasersystems eine Wellenlänge von 355 nm verwendet werden. Die Probenraasterung der ultravioletten Antireflexschichten erfolgte mit Hilfe der Ablenkeinheit Superscan III-15 der Raylase GmbH. Eine Laserbestrahlung auf Grund-





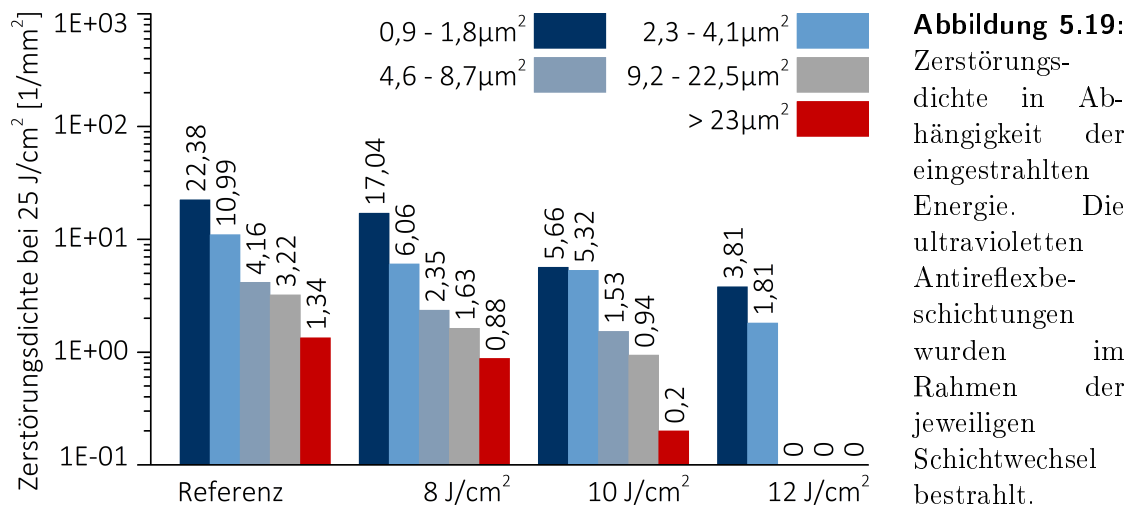
**Abbildung 5.18:** Schematischer Aufbau der laserbasierten Schichtexperimente. Unter Zuhilfenahme einer Laserbestrahlung sollen weitere Eigenschaften der Zerstörungsvorläufer ermittelt werden. Ein Aluminiumgestell verbindet das gepulste Lasersystem mit der Rückseite der verwendeten Beschichtungsanlage. Sowohl die Substratoberfläche als auch die deponierten Schichtmaterialien können im Rahmen der Laserbestrahlung konditioniert werden.

lage einer spiralförmigen Probenbewegung wurde in Anbetracht der Partikelauflage verworfen. Das gepulste Laserlicht wurde im Bereich des Kammerbodens unter Zuhilfenahme eines Fensterflansches eingekoppelt. Die Bestrahlung der ultravioletten Antireflexschichten erfolgte in Folge dessen auf Grundlage eines senkrechten Einfallswinkels.

Die Laserbestrahlung wurde in Übereinstimmung mit der ionenbasierten Partikelvermeidung auf der Substratoberfläche angewendet. Unter Zuhilfenahme einer ultravioletten Laserkonditionierung produzierten Menapace und Kollegen [111] zerstörfeste Quarzglassubstrate. Darüber hinaus konnten Ness und Streater [112] mit Hilfe der Vorbehandlung die Zerstörfestigkeit von ultravioletten Antireflexschichten verbessern. Unter Berücksichtigung der mikroskopischen Zerstörungen wurde in diesem Zusammenhang das Absorbermodell verwendet.

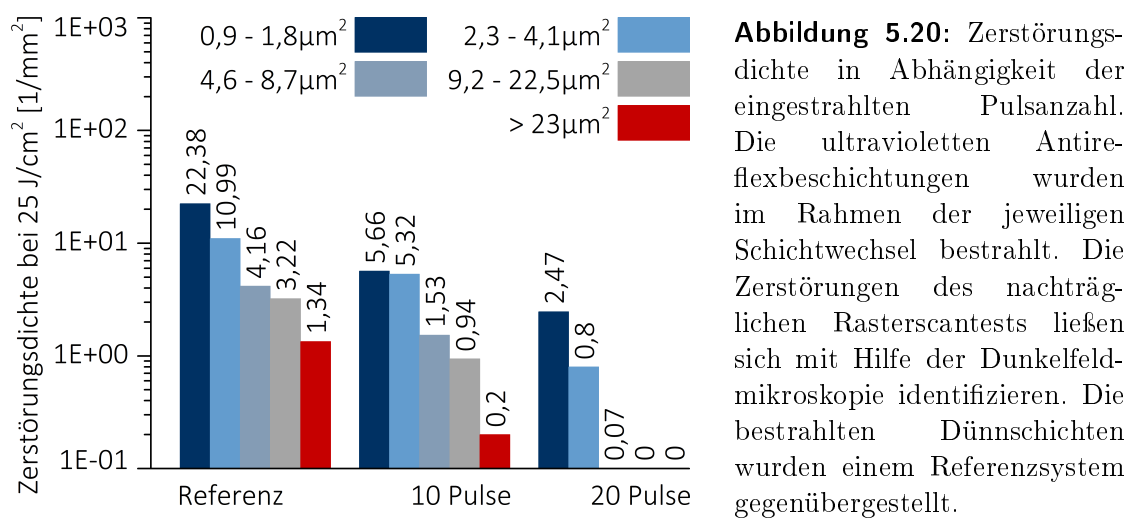
Im Hinblick auf die Probenrasterung wurde das jeweilige Quarzglassubstrat mit Hilfe der Kalottenrotation positioniert. Unter Zuhilfenahme der zeilenweisen Probenrasterung ließ sich ein Durchmesser von etwa 18 mm berücksichtigen. Verschiedene Energiedichten ermöglichten in diesem Zusammenhang eine differenzierte Charakterisierung der Zerstörungsvorläufer. Unter Berücksichtigung mehrerer Durchläufe lässt sich darüber hinaus die Pulsanzahl der angewendeten Probenrasterung verändern. Zusätzlich zur Vorbehandlung soll auch der Wachstumsprozess der ultravioletten Antireflexbeschichtung adressiert werden. Im Unterschied zu den ionenbasierten Schichtexperimenten erfolgte die Laserbestrahlung im Rahmen der jeweiligen Schichtwechsel.

Die Dünnschichtsysteme wurde in Übereinstimmung mit den bisherigen Rastercantests auf Grundlage einer Energiedichte von  $25 \text{ J/cm}^2$  charakterisiert. Unter Zuhilfenahme der Dunkelfeldmikroskopie ließ sich in Folge dessen das Zerstörungsaufkommen detektieren. Im Rahmen der Vorbehandlung beeinflussten weder Energiedichte noch Pulsanzahl die laserinduzierte Zerstörfestigkeit. Zusätzlich zur Substratoberfläche wurde darüber hinaus eine Beaufschlagung der einzelnen Dünnschichten durchgeführt. Die Zerstörungsdichte der ultravioletten Antireflex-



beschichtungen ist in Abbildung 5.19 als Funktion der Energiedichte dargestellt. Im Gegensatz dazu enthält Abbildung 5.20 das Schadensaufkommen unter Berücksichtigung der Laserpulsanzahl. Die Zerstörungsdichten der bestrahlten Antireflexschichten wurden mit dem konventionellen Beschichtungsprozess verglichen.

Unter Zuhilfenahme der Vorbehandlung konnte keine Veränderung der laserinduzierten Zerstörungsdichte herbeigeführt werden. In diesem Zusammenhang bestätigte sich die hohe Substratqualität im Hinblick auf die ultraviolette Zerstörfestigkeit. Im Gegensatz dazu konnte eine Laserbestrahlung der deponierten Materialschichten die Zerstörungsvorläufer adressieren. Zusätzlich zur Energiedichte ließ sich das Zerstörungsaufkommen auch mit Hilfe der Pulsanzahl beeinflussen. In Übereinstimmung mit den gestützten Schichtexperimenten zeigten mehrere Größenklassen keine Zerstörungen der ultravioletten Antireflexbeschichtung. Un-

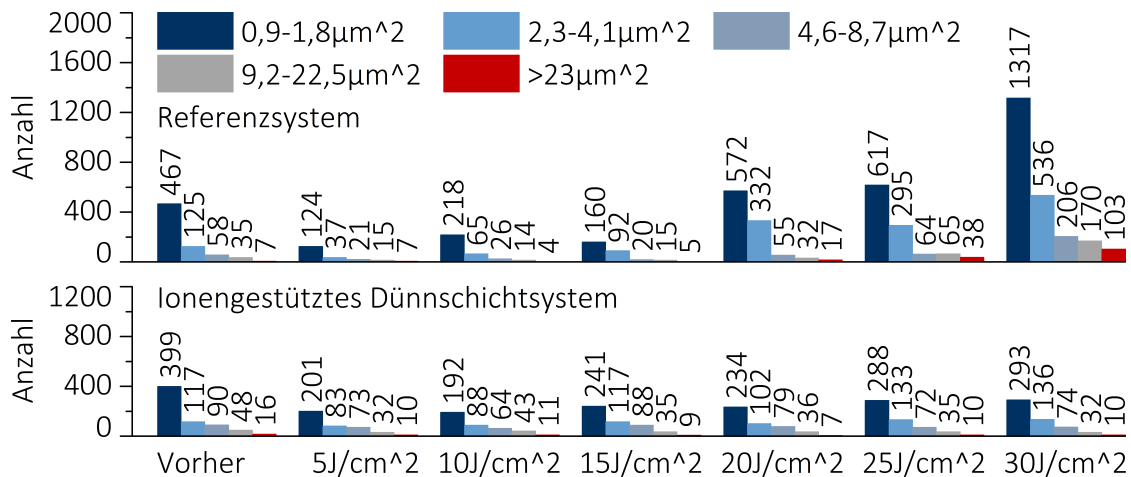


ter Berücksichtigung einer Wellenlänge von 1064 nm untersuchten Kozłowski und Kollegen [113] die Laserkonditionierung einer reflektierenden Spiegelbeschichtung. Die Dünnschichtsysteme des Lawrence Livermore National Laboratory enthielten neben Siliziumdioxid entweder Hafniumdioxid oder Zirkoniumdioxid. Unter Zuhilfenahme einer Laserbestrahlung im Bereich der Zerstörungsschwelle konnte eine Verbesserung von 2,7 herbeigeführt werden. Die Steigerung der laserinduzierten Zerstörungsschwelle beruhte in diesem Fall auf einer Beseitigung der elektronischen Zwischenbandzustände. Darüber hinaus konnten im Rahmen der Beschichtungsprozess die laserinduzierten Zerstörungen mit Hilfe der ausstehenden Dünnschichten überdeckt werden.

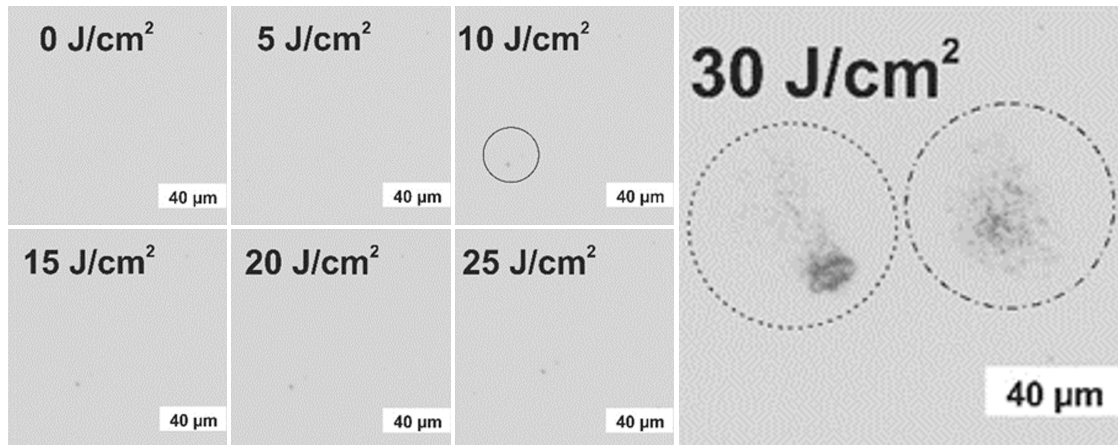
#### 5.4.4 Stufenartiger Rasterscantest

Unter Berücksichtigung der ionenbasierten Vermeidungsstrategie ist die Zerstörungsschwelle der ultravioletten Dünnschichtsysteme zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde eine Probenfläche von  $12\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  in mehreren Schritten mit einer Energiedichte von bis zu  $30\text{ J/cm}^2$  beaufschlagt. Unter Berücksichtigung eines effektiven Strahldurchmessers von  $200\text{ }\mu\text{m}$  erfolgte eine Anzahl von 10 Pulsen pro Probenposition. Das Schadensaufkommen der gerasterten Laserkomponenten ließ sich auf Grundlage der Dunkelfeldmikroskopie analysieren. Unter Berücksichtigung der bisherigen Prozesskonfigurationen wurde eine Teilchenenergie von  $250\text{ eV}$  angewendet.

Die Zerstörungen der gestuften Rasterscantests sind in Abbildung 5.21 als Funktion der Energiedichte dargestellt. Im Vergleich zur konventionellen Referenz-



**Abbildung 5.21:** Stufenartiger Rasterscantest der beaufschlagten Antireflexschicht. Unter Berücksichtigung der bisherigen Prozesskonfigurationen wurde eine Teilchenenergie von  $250\text{ eV}$  angewendet. Im Hinblick auf die Zerstörungsschwelle unterlag die Probenfläche von  $12\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  einem Energiedichteanstieg. Die Zerstörungen der ultravioletten Laserkomponenten ließen sich auf Grundlage der Dunkelfeldmikroskopie identifizieren.



**Abbildung 5.22:** Zerstörungsmorphologie am Beispiel der Referenzbeschichtung. Im Rahmen der stufenartigen Rasterscantests wurden ausgewählte Schichtbeschädigungen untersucht. Quadratische Bildausschnitte der Interferenzkontrastmikroskopie schaffen in diesem Zusammenhang die Grundlage. Zusätzlich zur dargestellten Schadensmorphologie wurden auch Zerstörungen in Folge von Beschichtungsdefekten identifiziert.

schicht zeigte das beaufschlagte Dünnschichtsystem ein höheres Defektaufkommen. Zusätzlich zu den Beschichtungsdefekten sollten auch geringe Rückstände der Reinigungsprozedur berücksichtigt werden. Der erste Rasterscantest konnte in Übereinstimmung mit Mann und Kollegen [114] einige Verunreinigungen der ultravioletten Antireflexschichten beseitigen. Leiderer und Kollegen [115] untersuchten die Beseitigung von aufliegenden Staubpartikeln am Beispiel eines Siliziumwafers. Signifikante Zerstörungen der Referenzschicht ließen sich auf Grundlage einer Energiedichte von  $20 \text{ J/cm}^2$  herbeiführen. Im Vergleich zu bisherigen Rasterscantests der Referenzschicht wurden in diesem Fall weniger Zerstörungen festgestellt. Ausschlaggebend ist laut Bartels und Kollegen [116] eine Laserkonditionierung im Rahmen der stufenartigen Rasterscantests. Die beaufschlagte Antireflexbeschichtung zeigte im Unterschied zum konventionellen Referenzsystem kein laserinduziertes Zerstörungsaufkommen. Im Hinblick auf die aktuelle Marktsituation veranstaltet die Konferenz SPIE Laser Damage einen jährlichen Zerstörungswettbewerb auf Grundlage doppelter Anonymität. In diesem Zusammenhang wurden ultraviolette Antireflexbeschichtungen unter Berücksichtigung einer Laserwellenlänge von  $351 \text{ nm}$  charakterisiert. Die relevanten Beschichtungsverfahren sind laut Stolz und Kollegen [117] auf eine laserinduzierte Zerstörschwelle von  $20 \text{ J/cm}^2$  beschränkt.

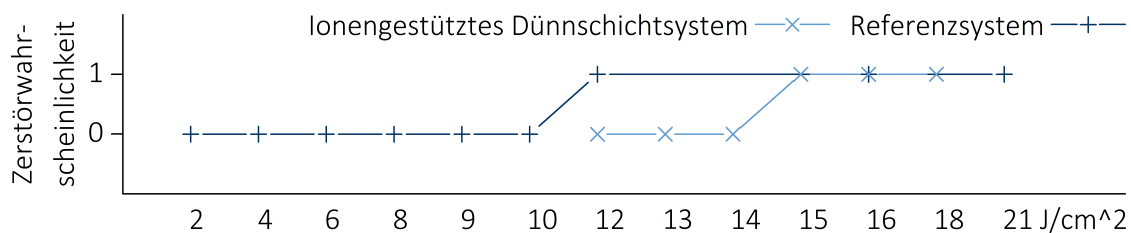
Zusätzlich zur Anzahl wurde im Rahmen der Rasterscantests auch die Morphologie der laserinduzierten Zerstörungen betrachtet. Abbildung 5.22 zeigt einen Ausschnitt der konventionellen Referenzschicht unter Berücksichtigung der angewendeten Energiedichte. Unter Zuhilfenahme der Interferenzkontrastmikroskopie konnten keine Zerstörungsvorläufer identifiziert werden. Die stufenartige Laserbestrahlung verursachte im Bereich der Mikroskopaufnahme eine punktförmige Zer-

störungsmorphologie. In Übereinstimmung mit Paschel und Kollegen [118] ließen sich im Rahmen der folgenden Rasterscantests keine Größenänderungen feststellen. Darüber hinaus sollen auch wiederholte Bestrahlungen der Schichtbereiche keine Wachstumsprozesse verursachen. Ungeachtet dessen analysierten Negres und Kollegen [119] am Beispiel von Quarzglassubstraten die Laserpulsdauer. Die Zerstörungsmorphologie implizierte im Pulsdauerbereich von 1 bis 5 ns eine Veränderung des fundamentalen Wachstumsmechanismus. Im Gegensatz zum Exponentialverlauf der hohen Laserpulsdauern zeigte sich am Beispiel der Wellenlänge von 351 nm ein lineares Wachstumsverhalten. Im Rahmen der stufenartigen Rasterscantests wurde die Zerstörung auf Grundlage einer Energiedichte von  $30 \text{ J/cm}^2$  vergrößert. Darüber hinaus erzeugte die Laserbestrahlung der ultravioletten Antireflexbeschichtung ein weiteres Zerstörungsaufkommen. Zusätzlich zur dargestellten Mikroskopaufnahme ließen sich auch Zerstörungen auf Grundlage von Beschichtungsdefekten identifizieren.

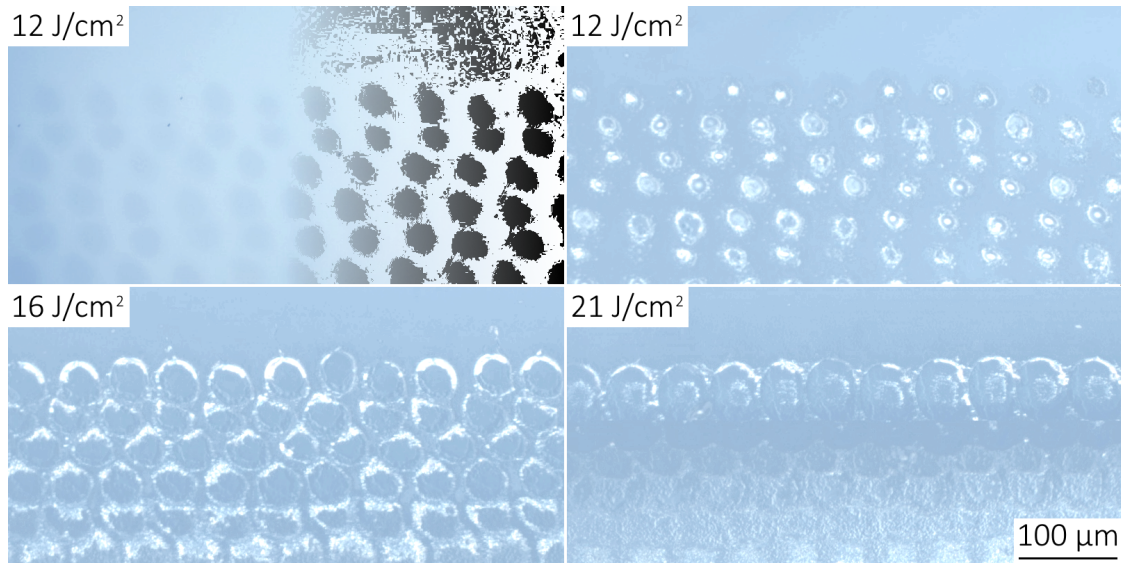
#### 5.4.5 Zerstöreigenschaften bei einer Wellenlänge von 266 nm

Im Hinblick auf weitere Weltraummissionen sollen die Zerstöreigenschaften auf Grundlage einer Wellenlänge von 266 nm untersucht werden. Zum Beispiel forscht die ExoMars Mission mit Hilfe kurzweiliger Lasersysteme nach Spuren von ehemaligem Leben. In Übereinstimmung mit dem bisherigen Vergütungssystem ließen sich vier Dünnschichten aus Aluminiumoxid und Siliziumdioxid verwenden. Die Antireflexbeschichtung wurde unter Berücksichtigung der bisherigen Schichtexperimente mit Hilfe einer Ionenenergie von 250 eV realisiert. Im Gegensatz zu den stufenartigen Rasterscantests erfolgte die Charakterisierung der laserinduzierten Zerstörschwelle auf Grundlage separater Probenbereiche.

Im Hinblick auf die Leistungsfestigkeit steht die Antireflexbeschichtung im Vergleich zu einem konventionellen Referenzsystem. Unter Berücksichtigung ei-



**Abbildung 5.23:** Antireflexschichten für 266 nm im Rasterscantest. Im Hinblick auf weitere Weltraumanwendungen soll die schräge Ionenbeaufschlagung im Bereich kürzerer Wellenlängen angewendet werden. Im Gegensatz zu den stufenartigen Rasterscantests erfolgte die Charakterisierung der laserinduzierten Zerstörschwelle auf Grundlage separater Probenbereiche. In Anbetracht der verwendeten Messinstrumente sollte in diesem Zusammenhang eine relative Unsicherheit von 16 % berücksichtigt werden.



**Abbildung 5.24:** Zerstörungsmorphologien des konventionellen Referenzsystems. Unter Zuhilfenahme der Nomarskimikroskopie sollen die Zerstörungsmorphologien im Rahmen der Rasterecantests untersucht werden. Unter Berücksichtigung einer Energiedichte von  $12 \text{ J/cm}^2$  ließen sich sowohl Verfärbungen als auch Zerstörungen feststellen. Zunehmende Energiedichten verursachen aufgrund der materialeigenen Zerstörfestigkeit eine Ausdehnung der betroffenen Schichtbereiche.

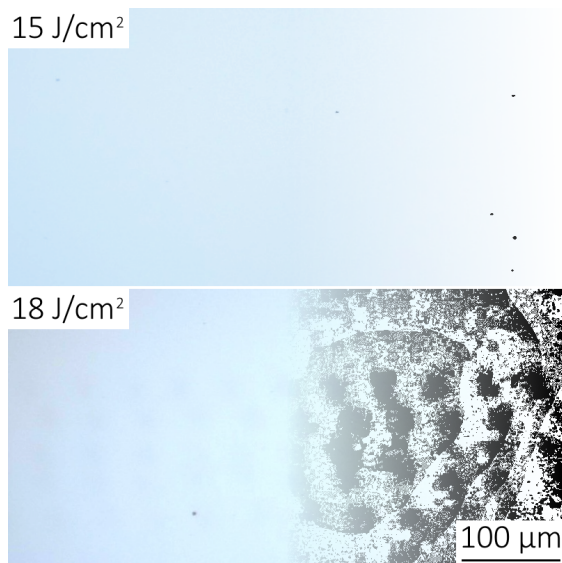
nes Strahldurchmesser von etwa  $130 \mu\text{m}$  wurde im Rahmen der Rasterecantests eine Wellenlänge von  $266 \text{ nm}$  verwendet. Die detektierten Zerstörungen waren in Folge der Dunkelfeldmikroskopie auf einen Äquivalenzdurchmesser von  $4,5 \mu\text{m}$  beschränkt. Abbildung 5.23 zeigt die Ergebnisse der separaten Rasterecantests als Funktion der verwendeten Energiedichte. In Anbetracht der Pulsdauer von  $4,5 \text{ ns}$  bestätigt eine Zerstörschwelle zwischen  $10$  und  $12 \text{ J/cm}^2$  die Leistungsfestigkeit der konventionellen Referenzschichten. Ungeachtet dessen wurde im Rahmen der beaufschlagten Dünnsichtsysteme eine Zerstörschwelle zwischen  $14$  und  $15 \text{ J/cm}^2$  festgestellt. Im Unterschied zu den bisherigen Schichtexperimenten offenbarte sich oberhalb der Zerstörschwelle ein vollflächiges Zerstörungsaufkommen. Ausschlaggebend ist in diesem Fall vermutlich die intrinsische Zerstörfestigkeit der Beschichtungsmaterialien. Eine signifikante Verbesserung der laserinduzierten Zerstörfestigkeit konnte aufgrund der relativen Messungenauigkeit von  $16 \%$  nicht nachweisen werden.

Zusätzlich zur laserinduzierten Zerstörschwelle sollen auf Grundlage der Nomarskimikroskopie auch die Schadensbilder untersucht werden. Eine Betrachtung des konventionellen Referenzsystems schafft in diesem Zusammenhang den Ausgangspunkt. Abbildung 5.24 zeigt auf Grundlage ausgewählter Energiedichten die Mikroskopaufnahmen der bestrahlten Probenbereiche. In Anbetracht der Verfärbungen wurde dem konventionellen Referenzsystem die laserinduzierte Zerstör-

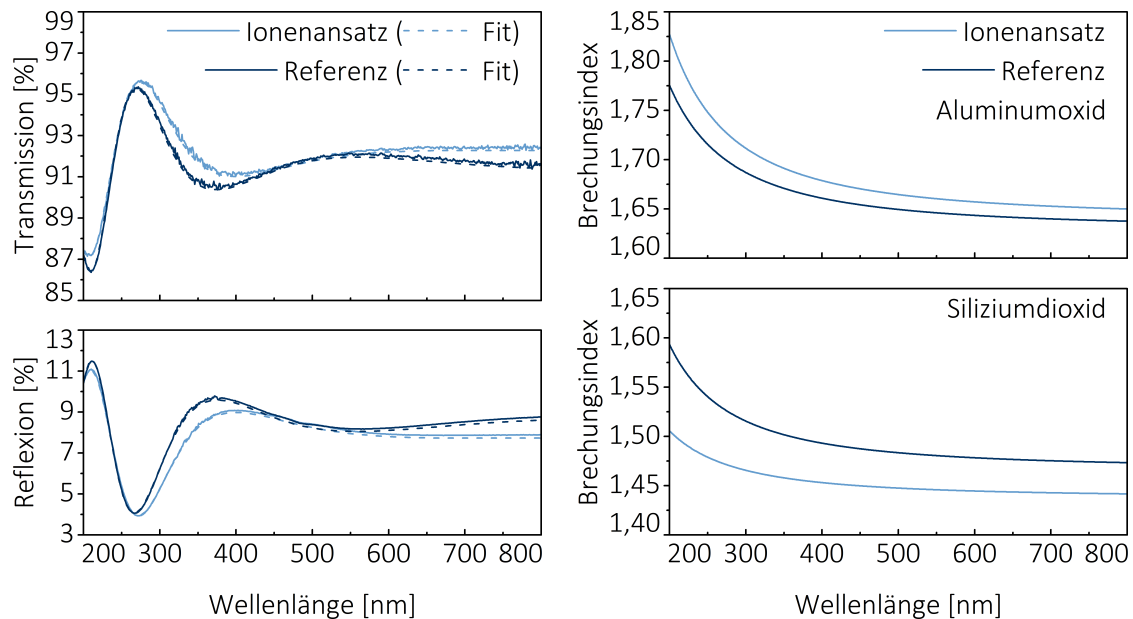
schwelle von  $12 \text{ J/cm}^2$  zugewiesen. Die betroffenen Schichtbereiche ließen sich mit Hilfe des Bildbearbeitungsprogramms Fiji Is Just ImageJ hervorheben. Ungeachtet der hohen Energiedichte unterblieb in diesem Fall eine Delamination der ultravioletten Antireflexbeschichtung. Die Verfärbungen könnten in diesem Zusammenhang sowohl Aufschmelzprozesse als auch Strukturveränderungen offenbaren.

Zusätzlich zu den Verfärbungen wurden am Beispiel der konventionellen Referenzsysteme auch Zerstörungen festgestellt. Die ersten Zerstörungen ließen sich in Übereinstimmung mit den Verfärbungen auf Grundlage einer Energiedichte von  $12 \text{ J/cm}^2$  nachweisen. Unter Berücksichtigung der relativen Messungenauigkeiten konnte in Folge dessen ein Übergangsbereich festgelegt werden. Die Zerstörungen der konventionellen Referenzschicht beschränken sich auf den Zentralbereich der gaußschen Intensitätsverteilung. Ausschlaggebend sind in diesem Zusammenhang die Zerstörungsschwellen der verwendeten Beschichtungsmaterialien. Unter Berücksichtigung einer Energiedichte von  $16 \text{ J/cm}^2$  offenbarte sich in Folge dessen eine Zunahme der betroffenen Schichtbereiche. Eine lückenlose Zerstörungsmorphologie konnte schließlich auf Grundlage einer Energiedichte von  $21 \text{ J/cm}^2$  herbeigeführt werden. Ungeachtet der Schichtbeschädigungen zeigte die Referenzschicht keine partikelinduzierten Zerstörungen.

Im Vergleich zum Referenzsystem sollen die Zerstörungsmorphologien der beaufschlagten Antireflexbeschichtung untersucht werden. Unter Berücksichtigung einer Energiedichte von  $15 \text{ J/cm}^2$  ließ sich in diesem Fall ein partikelinduziertes Zerstörungsaufkommen feststellen. Abbildung 5.25 zeigt die Zerstörungen der beaufschlagten Antireflexbeschichtung auf Grundlage der Nomarskimikroskopie. In Übereinstimmung mit der Referenzbeschichtung ließen sich die betroffenen Schichtbereiche im Rahmen einer Bildnachbearbeitung verdeutlichen. Eine Verfärbung der beaufschlagten Antireflexbeschichtung wurde auf Grundlage einer Energiedich-



**Abbildung 5.25:** Zerstörungsmorphologien der beaufschlagten Antireflexschicht. Unter Zuhilfenahme der Nomarskimikroskopie sollen die Beschädigungen der gerasterten Schichtbereiche analysiert werden. Das punktförmige Schadensaufkommen offenbart einen defektinduzierten Zerstörmechanismus der Laserbestrahlung. Unter Berücksichtigung einer Energiedichte von  $18 \text{ J/cm}^2$  wurden darüber hinaus Verfärbungen festgestellt. In Übereinstimmung mit dem Referenzsystem ließen sich Die betroffenen Schichtbereiche mit Hilfe einer Bildbearbeitung verdeutlichen.



**Abbildung 5.26:** Spektrale Charakterisierung der Antireflexbeschichtungen. Unter Berücksichtigung des Ionenbombardements sollen Veränderungen der optischen Schichteigenschaften untersucht werden. Die Spektralverläufe können in diesem Zusammenhang eine absolute Messungsgenauigkeit von 0,1 % beinhalten. Im Hinblick auf die berechneten Brechwertverläufe ist eine Fehlerabweichung von 0,01 zu berücksichtigen.

te von  $18 \text{ J/cm}^2$  nachgewiesen. Unter Berücksichtigung der bisherigen Schichtuntersuchungen bildet diese Zerstörungsmorphologie die Vorstufe der vollständigen Schichtablösung. In Folge dessen konnte mit Hilfe der schrägen Ionenbeaufschlagung eine Verbesserung der materialeigene Zerstörfestigkeit herbeigeführt werden.

Im Hinblick auf die optischen Eigenschaften wurde eine spektrale Charakterisierung der Antireflexbeschichtungen durchgeführt. Unter Zuhilfenahme der Spektralphotometrie ließen sich sowohl Transmissions- als auch Reflexionsverhalten feststellen. Die Spektralverläufe der einseitigen Antireflexbeschichtung werden zusätzlich zum Referenzsystem in Abbildung 5.26 dargestellt. Unter Zuhilfenahme der Programme Recalc&Reopt des Laser Zentrums Hannover e.V. [120] ließen sich die Dispersionsdaten berechnen. In Anbetracht einer absoluten Messungsgenauigkeit von 0,1 % konnte in Folge dessen die geforderte Restreflexion der Dünnschichtsysteme nachgewiesen werden. Im Hinblick auf die Brechungsindizes ist aufgrund der spektralen Charakterisierung eine Fehlerabweichung von 0,01 zu berücksichtigen. Die optische Dichte der Aluminiumoxidschichten konnte auf Grundlage des streifenförmigen Ionenbombardements gesteigert werden. Im Gegensatz dazu offenbarten die Siliziumdioxidschichten eine Reduzierung des Brechungsindex. Zusätzlich zu den Brechungsindizes ließ sich mit Hilfe der Spektralphotometrie auch die optischen Verluste bestimmen. Signifikante Unterschiede der Verlusteigenschaften wurden im Hinblick auf das streifende Ionenbombardement nicht festgestellt.



Unter Berücksichtigung der gemessenen Schichteigenschaften soll die Leistungsfestigkeit eingeordnet werden. Das beaufschlagte Dünnschichtsystem zeigte im Rahmen der Rastercantests eine Verbesserung der materialeigenen Zerstörfestigkeit. Veränderte Verlusteigenschaften der Dünnschichtsysteme konnten auf Grundlage der spektralen Charakterisierung ausgeschlossen werden. Die berechneten Dispersionsdaten implizierten allerdings einen veränderten Wachstumsprozess der Beschichtungsmaterialien. Im Gegensatz zu den vorherigen Untersuchungen konnte keine Reduzierung der defektinduzierten Zerstörungen untersucht werden. Ausschlaggebend war die geringere Leistungsfestigkeit der Beschichtungsmaterialien im Vergleich zum partikelinduzierten Zerstörungsmechanismus.

Zusammenfassend konnte im Hinblick auf zukünftige Weltraumanwendungen eine signifikante Verbesserung der Zerstörfestigkeit herbeigeführt werden. Die Zerstörungsvorläufer der deponierten Dünnschichtsysteme befanden sich unterhalb der Detektionsschwelle der verwendeten Inspektionsverfahren. Ausschlaggebend für die reduzierte Zerstörungsdichte war eine streifende Argonbeaufschlagung der Dünnschichtsysteme. Die laserinduzierte Zerstörfestigkeit unterlag sowohl der Ionenstromdichte als auch der kinetischen Teilchenenergie. Im Hinblick auf eine Wellenlänge von 266 nm konnte eine Verbesserung der intrinsischen Zerstörfestigkeit dargelegt werden.

## 5.5 Zusammenfassung

Unter Berücksichtigung verschiedener Anwendungsbereiche wurden die Einflussmöglichkeiten einer simultanen Ionenbeaufschlagung untersucht. Im Hinblick auf die optischen Verlusteigenschaften beaufschlagte ein Argonbombardement die aufwachsende Hafniumdioxidschicht. Kristallisationseffekte der zusätzlichen Teilchenenergie verursachten allerdings eine Verschlechterung der ultravioletten Verlusteigenschaften. Darüber hinaus wurde eine Beeinflussung der aufwachsenden Hafniumdioxidschicht mit Hilfe ionisierter Sauerstoffatome durchgeführt. Im Gegensatz zur Argonbeaufschlagung ließen sich die Streulichtverluste der ultravioletten Dünnschichtsysteme in diesem Fall reduzieren.

Zusätzlich zu den Verlusteigenschaften wurde das duale Zerstäubungsverfahren auch im Hinblick auf die Zerstörfestigkeit eingesetzt. Unter Zuhilfenahme einer streifenden Ionenbeaufschlagung ließen sich Zerstörungsvorläufer einer ultravioletten Antireflexbeschichtung vermeiden. Zusätzlich zur Zusammenfassung sollen im letzten Kapitel die Verwertungsmöglichkeiten der verschiedenen Entwicklungsansätze dargelegt werden. In diesem Zusammenhang lassen sich darüber hinaus zukünftige Anwendungen im Bereich der ultravioletten Wellenlängen identifizieren.



---

## ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Unter Berücksichtigung der ultravioletten Anwendungsbereiche sollen Verwertungsmöglichkeiten der entwickelten Beschichtungsprozesse identifiziert werden. Im Rahmen der binären Materialkombinationen ließen sich die optischen Eigenschaften von Hafniumdioxidschichten verbessern. Unter Zuhilfenahme des Lorentz-Lorenz-Modells konnten die Brechungsindizes der realisierten Mischmaterialien verifiziert werden. Sowohl Aluminiumoxid als auch Siliziumdioxid reduzierten die ultravioletten Absorptionsverluste der Hafniumdioxidschicht. Darüber hinaus ließen sich mit Hilfe geringster Materialbeimischungen die verlustbehafteten Mikrokristallite unterdrücken. Lumineszenzmessungen der binären Materialkombinationen implizierten in diesem Zusammenhang eine Veränderung der elektronischen Zwischenzustände.

Unter Zuhilfenahme des binären Mischungskonzepts konnten sowohl Antireflexschichten als auch komplexe Resonatorspiegel entwickelt werden. Im Hinblick auf die Anwendungsbereiche sind neben geringen Absorptionsverlusten auch die reduzierten Brechungsindizes zu berücksichtigen. Geringe Materialbeimischungen beinhalten auf Grundlage der reduzierten Streulichtverluste das größte Optimierungspotential. Die verwendete Lumineszenzspektroskopie ermöglicht darüber hinaus eine Schichtoptimierung unter Berücksichtigung der jeweiligen Anwendungswellenlänge. Einsatzmöglichkeiten bilden unter anderem die Resonatorspiegel der exemplarischen Frequenzkonversion. Im Zuge dessen können neben höherer Konversionseffizienz auch kürzere Anwendungswellenlängen umgesetzt werden. Technologische Innovationen ermöglichen die ultravioletten Lasersysteme unter anderem im Bereich der Messtechnik, Medizin, Biotechnologie und Halbleiterlithografie. Im Hinblick auf die Medizin können die kompakten Lasersysteme zum Beispiel die Versorgung mit speziellen Diagnoseinstrumenten verbessern.

Im Hinblick auf einen gestützten Wachstumsprozess wurden die Ätzeigenschaften von geeigneten Schichtmaterialien untersucht. Unter Zuhilfenahme der einlagigen Schichtsysteme ließ sich eine lineare Steigerung der Abtragsraten als Funktion

der Ionenenergie bestimmen. Zusätzlich zur Materialzusammensetzung beeinflusste auch das Abscheideverfahren die resultierende Zerstäubungsausbeute. Die laserinduzierte Zerstörfestigkeit konnte mit Hilfe der Ionenstrahlzerstäubung nicht gesteigert werden. Allerdings ermöglichen ionengeätzte Grenzflächenflächen eine Korrektur der einzelnen Schichtdicken im Hinblick auf die spektralen Eigenschaften.

Zusätzlich zum Mischungskonzept wurden im Hinblick auf verbesserte Hafniumdioxidschichten auch gestützte Wachstumsprozesse realisiert. Der Energieübertrag einer senkrechten Argonbeaufschlagung förderte allerdings die Entwicklung von verlustbehafteten Mikrokristalliten. Unter Zuhilfenahme ionisierter Sauerstoffatome ließ sich im Gegensatz dazu unter anderem die Stöchiometrie verbessern. Darüber hinaus konnte in diesem Zusammenhang das Streulichtaufkommen des hochbrechenden Schichtmaterials reduziert werden. Im Vergleich zum Mischungskonzept beeinträchtigt die reaktive Beaufschlagung nicht den Brechungsindex der optischen Dünnschichtsysteme.

Im Hinblick auf zukünftige Weltraummissionen wurde die Zerstörschwelle einer ultravioletten Antireflexbeschichtung verbessert. Nanoskalige Unvollkommenheiten des Schichtmaterials beeinträchtigen die laserinduzierte Zerstörfestigkeit. Unter Zuhilfenahme streifender Ionenbeaufschlagung unterdrückte der entwickelte Wachstumsprozess die kritischen Zerstörungsvorläufer. Sowohl die angewendete Ionenenergie als auch die eintreffende Stromdichte verbesserte die Zerstörfestigkeit der aufwachsenden Aluminiumoxidsysteme. Darüber hinaus wurde im Hinblick auf kürzere Wellenlängen eine Antireflexbeschichtung für 266 nm analysiert. Die laserinduzierten Zerstörungen ließ sich in diesen Fall auf die intrinsischen Leistungsfestigkeiten der Beschichtungsmaterialien zurückführen.

Im Rahmen zukünftiger Weltraummissionen sollen Anwendungsbereiche der ionenbasierten Partikelvermeidung identifiziert werden. Im Gegensatz zur Substratoberfläche durchzogen die Zerstörungsvorläufer das Schichtmaterial der ultravioletten Vergütungssysteme. Zusätzlich zu den Antireflexschichten lassen sich in Folge dessen sowohl hochreflektierende Spiegel als auch polarisierende Laserkomponenten berücksichtigen. Die Defektvermeidung wurde im Rahmen dieser Arbeit auf Grundlage ultravioletter Anwendungswellenlängen charakterisiert. Eine Übertragung im Hinblick auf langwellige Spektralbereiche erfordert in Folge dessen zusätzliche Schichtexperimente. Ungeachtet dessen kann unter Zuhilfenahme der beaufschlagten Dünnschichtsysteme ein Pulsdauerbereich von 10 ps bis 100 ps abgedeckt werden. Ausschlaggebend ist in diesem Zusammenhang der partikelinduzierte Zerstörmechanismus der Dünnschichtsysteme. Zusammenfassend beinhaltet die ionenbasierte Defektvermeidung einen breiten Anwendungsbereich im Hinblick auf die Lidarsysteme zukünftiger Weltraummissionen.

# LITERATURVERZEICHNIS

---

- [1] FOSTER, Adam S. ; GEJO, F. L. ; SHLUGER, A. L. ; NIEMINEN, Risto M.:  
Vacancy and interstitial defects in hafnia.  
In: *Physical Review B* 65 (2002), Nr. 17, S. 174117
- [2] LANGDON, B. ; PATEL, D. ; KROUS, E. ; ROCCA, J. J. ; MENONI, C. S. ;  
TOMASEL, F. ; KHOLI, S. ; MCCURDY, P. R. ; LANGSTON, Peter ;  
OGLOZA, Albert:  
Influence of process conditions on the optical properties HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> thin films  
for high power laser coatings.  
In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2007* Bd. 6720 International  
Society for Optics and Photonics, 2008, S. 67200X
- [3] PATEL, D. ; WANG, Y. ; LAROTONDA, M. ; LOVEWELL, J. ; JENSEN, J. ;  
HSIAO, K. J. ; KROUS, E. ; ROCCA, J. J. ; MENONI, C. S. ; TOMASEL,  
F. u. a.:  
Assessing the impact of atomic oxygen in the damage threshold and stress  
of Hafnia films grown by ion beam sputter deposition.  
In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2006* Bd. 6403 International  
Society for Optics and Photonics, 2007, S. 640314
- [4] VOSSEN, John L. ; KERN, Werner:  
*Thin film processes / edited by John L. Vossen, Werner Kern.*  
Academic Press New York, 1978. –  
ISBN 0127282505
- [5] KERN, Werner:  
*Thin film processes II.* Bd. 2.  
Elsevier, 2012
- [6] BRINSMAID, Doris S. ; KEENAN, William J. ; KOCH, George J. ; PARSONS,  
William F.:  
*Method of producing titanium dioxide coatings.*  
März 5 1957. –

- US Patent 2,784,115
- [7] MAX, Auwärter:  
*Process for the manufacture of thin films.*  
Januar 5 1960. –  
US Patent 2,920,002
- [8] HASS, Georg ; SALZBERG, Calvin D.:  
Optical properties of silicon monoxide in the wavelength region from 0.24 to  
14.0 microns.  
In: *JOSA* 44 (1954), Nr. 3, S. 181–187
- [9] KOLBE, Jürgen ; KESSLER, H. ; HOFMANN, T. ; MEYER, Franz ; SCHINK,  
Harald ; RISTAU, Detlev:  
Optical properties and damage thresholds of dielectric UV/VUV coatings  
deposited by conventional evaporation, IAD, and IBS.  
In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1991* Bd. 1624 International  
Society for Optics and Photonics, 1992, S. 221–236
- [10] HAEFER, R. A.:  
*Oberflächen- und Dünnschicht-Technologie, Teil 1 Beschichtungen von  
Oberflächen.*  
1987
- [11] THIELSCH, R. ; GATTO, A. ; HEBER, J. ; KAISER, N.:  
A comparative study of the UV optical and structural properties of  
SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and HfO<sub>2</sub> single layers deposited by reactive evaporation,  
ion-assisted deposition and plasma ion-assisted deposition.  
In: *Thin Solid Films* 410 (2002), Nr. 1-2, S. 86–93
- [12] TIKHONRAVOV, Alexander V. ; TRUBETSKOV, M. K. ; SULLIVAN, Brian T. ;  
DOBROWOLSKI, J. A.:  
Influence of small inhomogeneities on the spectral characteristics of single  
thin films.  
In: *Applied optics* 36 (1997), Nr. 28, S. 7188–9198
- [13] RISTAU, Detlev ; EHLERS, Henrik:  
Thin Film Optical Coatings.  
In: *Springer Handbook of Lasers and Optics.*  
Springer, 2012, S. 401–424
- [14] MATTOX, D. M.:  
Film deposition using accelerated ions.  
In: *Electrochemical Technology (U.S.) Absorbed by J. Electrochem. Soc.* Vol:  
2 (1964), 9

- [15] MOHAN, S. ; KRISHNA, M. G.:  
A review of ion beam assisted deposition of optical thin films.  
In: *Vacuum* 46 (1995), Nr. 7, S. 645–659
- [16] MÜLLER, Karl-Heinz:  
Monte Carlo calculation for structural modifications in ion-assisted thin film deposition due to thermal spikes.  
In: *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 4 (1986), Nr. 2, S. 184–188
- [17] TARGOVE, James D. ; MACLEOD, H. A.:  
Verification of momentum transfer as the dominant densifying mechanism in ion-assisted deposition.  
In: *Applied optics* 27 (1988), Nr. 18, S. 3779–3781
- [18] MALHERBE, J. B. ; HOFMANN, S. ; SANZ, J. M.:  
Preferential sputtering of oxides: A comparison of model predictions with experimental data.  
In: *Applied surface science* 27 (1986), Nr. 3, S. 355–365
- [19] ROBIC, J. Y. ; LEPLAN, H. ; PAULEAU, Y. ; RAFIN, B.:  
Residual stress in silicon dioxide thin films produced by ion-assisted deposition.  
In: *Thin Solid Films* 290 (1996), S. 34–39
- [20] McNALLY, J. J. ; AL-JUMAILY, G. A. ; WILSON, S. R. ; McNEIL, J. R.:  
Ion Beam Assisted Deposition Of Optical Thin Films-Recent Results.  
In: *Southwest Conf on Optics' 85* Bd. 540 International Society for Optics and Photonics, 1985, S. 479–486
- [21] KIENEL, Gerhard ; RÖLL, Klaus:  
*Vakuumbeschichtung: Verfahren und Anlagen.*  
Springer-Verlag, 2013
- [22] WEI, David T.:  
Ion beam interference coating for ultralow optical loss.  
In: *Applied optics* 28 (1989), Nr. 14, S. 2813–2816
- [23] ARONOWITZ, Frederick:  
The laser gyro.  
In: *Laser applications* (1971)
- [24] STUHLINGER, Ernst:  
*Ion propulsion for space flight.*  
McGraw-Hill New York, 1964

- [25] WEHNER, G. K. ; ROSENBERG, D.:  
Angular distribution of sputtered material.  
In: *Journal of Applied Physics* 31 (1960), Nr. 1, S. 177–179
- [26] OECHSNER, H.:  
Sputtering – a review of some recent experimental and theoretical aspects.  
In: *Applied physics* 8 (1975), Nr. 3, S. 185–198
- [27] WEI, David T. ; KAUFMAN, Harold R. ; LEE, Cheng-Chung:  
*Ion beam sputtering*.  
Marcel Dekker, New York, 1995
- [28] HUMMEL, Rolf E. ; GUENTHER, Karl H.:  
*Handbook of optical properties: thin films for optical coatings*. Bd. 1.  
CRC Press, 1995
- [29] WINDISCHMANN, Henry:  
Intrinsic stress in sputter-deposited thin films.  
In: *Critical Reviews in Solid State and Material Sciences* 17 (1992), Nr. 6,  
S. 547–596
- [30] TABATA, Akimori ; MATSUNO, Noriaki ; SUZUOKI, Yasuo ; MIZUTANI,  
Teruyoshi:  
Optical properties and structure of SiO<sub>2</sub> films prepared by ion-beam  
sputtering.  
In: *Thin Solid Films* 289 (1996), Nr. 1-2, S. 84–89
- [31] D'HEURLE, F. M.:  
Aluminum films deposited by rf sputtering.  
In: *Metallurgical and Materials Transactions B* 1 (1970), Nr. 3, S. 725–732
- [32] ROSSNAGEL, S. M. ; SITES, J. R.:  
X-ray photoelectron spectroscopy of ion beam sputter deposited SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>,  
and Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.  
In: *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and  
Films* 2 (1984), Nr. 2, S. 376–379
- [33] REMPE, G. ; THOMPSON, R. J. ; KIMBLE, H. J. ; LALEZARI, Ramin:  
Measurement of ultralow losses in an optical interferometer.  
In: *Optics letters* 17 (1992), Nr. 5, S. 363–365
- [34] STARKE, Andreas ; SCHINK, Harald ; KOLBE, Jürgen ; EBERT, Johannes:  
Laser-induced damage thresholds and optical constants of ion-plated and  
ion-beam-sputtered Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and HfO<sub>2</sub> coatings for the ultraviolet.  
In: *Optical Thin Films and Applications* Bd. 1270 International Society for  
Optics and Photonics, 1990, S. 299–305



- [35] KÄRTNER, F. X. ; MATUSCHEK, N. ; SCHIBLI, T. ; KELLER, U. ; HAUS, H. A. ; HEINE, C. ; MORF, R. ; SCHEUER, V. ; TILSCH, M. ; TSCHUDI, T.:  
Design and fabrication of double-chirped mirrors.  
In: *Optics letters* 22 (1997), Nr. 11, S. 831–833
- [36] LEE, Cheng-Chung ; TANG, Chien-Jen ; WU, Jean-Yee:  
Rugate filter made with composite thin films by ion-beam sputtering.  
In: *Applied optics* 45 (2006), Nr. 7, S. 1333–1337
- [37] HASS, Georg:  
*Struktur und Optik aufgedampfter Metallschichten*, JA Barth, Diss., 1938
- [38] MOVCHAN, B. A. ; DEMCHISHIN, A. V.:  
Structure and properties of thick condensates of nickel, titanium, tungsten, aluminum oxide and zirconium dioxide in vacuum.  
In: *Fiz. Metal. Metalloved.* 28: 653-60 (Oct 1969). (1969)
- [39] KAISER, Norbert:  
Review of the fundamentals of thin-film growth.  
In: *Applied Optics* 41 (2002), Nr. 16, S. 3053–3060
- [40] THORNTON, John A.:  
Influence of apparatus geometry and deposition conditions on the structure and topography of thick sputtered coatings.  
In: *Journal of Vacuum Science and Technology* 11 (1974), Nr. 4, S. 666–670
- [41] THORNTON, John A.:  
The microstructure of sputter-deposited coatings.  
In: *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 4 (1986), Nr. 6, S. 3059–3065
- [42] MESSIER, R. ; GIRI, A. P. ; ROY, R. A.:  
Revised structure zone model for thin film physical structure.  
In: *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 2 (1984), Nr. 2, S. 500–503
- [43] GROVENOR, C. R. M. ; HENTZELL, H. T. G. ; SMITH, D. A.:  
The development of grain structure during growth of metallic films.  
In: *Acta Metallurgica* 32 (1984), Nr. 5, S. 773–781
- [44] BARNA, Péter B. ; ADAMIK, Miklós:  
Growth mechanisms of polycrystalline thin films.  
In: *Science and technology of thin films*.  
World Scientific, 1995, S. 1–28

- [45] HABASHI, Fathi:  
Historical introduction to refractory metals.  
In: *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 22 (2001), Nr. 1, S. 25–53
- [46] STOLZ, Christopher J. ; WEINZAPFEL, Carolyn L. ; RIGATTI, Amy L. ; OLIVER, Jim B. ; TANIGUCHI, Jason ; BEVIS, Ron P. ; RAJASANSI, Jasbir S.:  
Fabrication of meter-scale laser resistant mirrors for the National Ignition Facility: a fusion laser.  
In: *Advances in Mirror Technology for X-Ray, EUV Lithography, Laser, and Other Applications* Bd. 5193 International Society for Optics and Photonics, 2004, S. 50–59
- [47] RUH, Robert ; CORFIELD, Peter W. R.:  
Crystal structure of monoclinic hafnia and comparison with monoclinic zirconia.  
In: *Journal of the American Ceramic Society* 53 (1970), Nr. 3, S. 126–129
- [48] KHOSHMAN, Jebreel M. ; KORDESCH, Martin E.:  
Optical properties of a-HfO<sub>2</sub> thin films.  
In: *Surface and Coatings Technology* 201 (2006), Nr. 6, S. 3530–3535
- [49] JANKE, Dieter:  
Oxygen probes based on calcia-doped hafnia or calcium zirconate for use in metallic melts.  
In: *Metallurgical Transactions B* 13 (1982), Nr. 2, S. 227–235
- [50] BLOCH, Felix:  
Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern.  
In: *Zeitschrift für Physik* 52 (1929), Nr. 7-8, S. 555–600
- [51] JIANG, Hong ; GOMEZ-ABAL, Ricardo I. ; RINKE, Patrick ; SCHEFFLER, Matthias:  
Electronic band structure of zirconia and hafnia polymorphs from the GW perspective.  
In: *Physical Review B* 81 (2010), Nr. 8, S. 085119
- [52] HOLLEMAN, A. F. ; WIBERG, E. ; WIBERG, N.:  
*Lehrbuch der anorganischen Chemie.*  
de Gruyter, 1995. –  
ISBN 9783110126419
- [53] FOSTER, Adam S. ; SHLUGER, A. L. ; NIEMINEN, Risto M.:  
Mechanism of interstitial oxygen diffusion in hafnia.

- In: *Physical review letters* 89 (2002), Nr. 22, S. 225901
- [54] LOWDERMILK, W. H. ; MILAM, D.:  
Graded-index antireflection surfaces for high-power laser applications.  
In: *Applied Physics Letters* 36 (1980), Nr. 11, S. 891–893
- [55] KAISER, Norbert ; UHLIG, Hein ; SCHALLENBERG, Uwe B. ; ANTON, Bernhard ; KAISER, Ute ; MANN, Klaus R. ; EVA, Eric:  
Very high damage threshold  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  dielectric coatings for excimer lasers.  
In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1993* Bd. 2114 International Society for Optics and Photonics, 1994, S. 325–335
- [56] WEICHELT, B. ; VOSS, A.:  
*Innovative Disklaser-Module: Charakterisierung von Laserkristallen, Beschichtungen und Disklaser-Modulen, Kurzbezeichnung: DiskModul: Abschlussbericht zum Innonet-Projekt.*  
Univ., Inst. für Strahlwerkzeuge, 2011
- [57] PERKINELMER INSTRUMENTS LLC (Hrsg.):  
*Lambda 800/900 User's Guide.*  
PerkinElmer Instruments LLC, 10 2001
- [58] DIECKMANN, M.:  
*Spektrum: Software for optical interference coatings.*  
2002. –  
Laser Zentrum Hannover e.V., [www.lzh.de](http://www.lzh.de)
- [59] SELLMEIER, Wolfgang:  
Zur Erklärung der abnormen Farbenfolge im Spectrum einiger Substanzen.  
In: *Annalen der Physik und Chemie* 219 (1871), S. 272–282
- [60] LORENZ, Lorentz:  
Ueber die refractionsconstante.  
In: *Annalen der Physik* 247 (1880), Nr. 9, S. 70–103
- [61] LORENTZ, Hendrik A.:  
Ueber die Beziehung zwischen der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes und der Körperdichte.  
In: *Annalen der Physik* 245 (1880), Nr. 4, S. 641–665
- [62] DUFEK, Martin ; HAYLES, Mike:  
*The Quanta FEG 200, 400, 600 User's Operation Manual.*  
1 st.  
FEI Company, 3 2003

- [63] WILLAMOWSKI, Uwe:  
*Standardisierbare Verfahren zur präzisen Charakterisierung des Absorptions-, Reflexions- und Transmissionsgrads optischer Komponenten*, Diss., 1998
- [64] ISO CENTRAL SECRETARY:  
Optics and photonics – Lasers and laser-related equipment – Test method for absorptance of optical laser components / International Organization for Standardization.  
Version: 2019.  
<https://www.iso.org/standard/69228.html>.  
Geneva, CH, 2019 (ISO 11551:2019). –  
Standard
- [65] ISO CENTRAL SECRETARY:  
Optics and optical instruments – Test methods for radiation scattered by optical components / International Organization for Standardization.  
Version: 2002.  
<https://www.iso.org/standard/22670.html>.  
Geneva, CH, 2002 (ISO 13696:2002). –  
Standard
- [66] KADKHODA, P. ; SAKIEW, W. ; GÜNSTER, S. ; RISTAU, D.:  
Fast total scattering facility for 2D inspection of optical and functional surfaces.  
In: *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI* Bd. 7389  
International Society for Optics and Photonics, 2009, S. 73890S
- [67] DIECKMANN, Manfred:  
*Hochleistungs-Beschichtungen für den Nd-Laser in der industriellen Anwendung*, Diss., 1994
- [68] FRANZEN, Alexander:  
*ComponentLibrary*.  
Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License, 2006.  
–  
<http://www.gwoptics.org/contact/>
- [69] ITO, Toshihide ; MAEDA, Motohiro ; NAKAMURA, Kazuhiko ; KATO, Hiromitsu ; OHKI, Yoshimichi:  
Similarities in photoluminescence in hafnia and zirconia induced by ultraviolet photons.  
In: *Journal of applied physics* 97 (2005), Nr. 5, S. 054104
- [70] CIAPPONI, Alessandra ; WAGNER, Frank R. ; PALMIER, Stéphanie ; NATOLI, Jean-Yves ; GALLAIS, Laurent:

- Study of luminescent defects in hafnia thin films made with different deposition techniques.  
In: *Journal of Luminescence* 129 (2009), Nr. 12, S. 1786–1789
- [71] LECLERC, N. ; PFLEIDERER, C. ; WOLFRUM, J. ; GREULICH, K. ; LEUNG, W. P. ; KULKARNI, M. ; TAM, A. C.:  
Transient absorption and fluorescence spectroscopy in fused silica induced by pulsed KrF excimer laser irradiation.  
In: *Applied physics letters* 59 (1991), Nr. 26, S. 3369–3371
- [72] GILMOZZI, Roberto ; SPYROMILIO, Jason:  
The European extremely large telescope (E-ELT).  
In: *The Messenger* 127 (2007), Nr. 11, S. 3
- [73] RISTAU, Detlev ; EHLERS, Henrik ; GROSS, Tobias ; LAPPSCHIES, Marc:  
Optical broadband monitoring of conventional and ion processes.  
In: *Applied optics* 45 (2006), Nr. 7, S. 1495–1501
- [74] GUENSTER, Stefan ; RODRIGUEZ, Christina C. ; ALIG, Thimotheus ; JUPÉ, Marco ; EMMERT, Luke ; RISTAU, Detlev ; RUDOLPH, Wolfgang:  
Frequency tripling mirror based on optical interference coatings.  
In: *Optical Interference Coatings* Optical Society of America, 2016, S. WE–3
- [75] FARNSWORTH, H. E. ; SCHLIER, R. E. ; GEORGE, T. H. ; BURGER, R. M.:  
Application of the Ion Bombardment Cleaning Method to Titanium, Germanium, Silicon, and Nickel as Determined by Low-Energy Electron Diffraction.  
In: *Journal of Applied Physics* 29 (1958), Nr. 8, S. 1150–1161
- [76] HARPER, James M. E.:  
Ion beam etching.  
In: *Plasma etching*.  
Elsevier, 1989, S. 391–423
- [77] STARKE, Kai:  
Kompakte und effiziente Laser mit Leistungen über 60mW bei 355nm für die Lebenswissenschaften und andere Applikationen: Teilvorhaben: Erforschung kontaminationsarmer Extraktionsgittersysteme für hochfrequenzangeregte Ionenquellen: Abschlussbericht Programm ‘EUROSTARS’, getragen durch EUREKA Programm und die Europäische Gemeinschaft (Version 1.0) / Cutting Edge Coatings GmbH.  
2015. –  
Forschungsbericht

- [78] BEHRISCH, Rainer:  
Festkörperzerstäubung durch Ionenbeschuß.  
In: *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften*.  
Springer, 1964, S. 295–443
- [79] SIGMUND, Peter:  
Theory of sputtering. I. Sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets.  
In: *Physical review* 184 (1969), Nr. 2, S. 383
- [80] NORGATE, P. ; HAMMOND, V. J.:  
Ion beam etching.  
In: *Physics in Technology* 5 (1974), Nr. 3, S. 186
- [81] FLUCK, E. ; HEUMANN, K. G.:  
*Periodensystem der Elemente*.  
Wiley VCH Verlag GmbH, 2017. –  
ISBN 9783527343263
- [82] LAEGREID, Nils ; WEHNER, G. K.:  
Sputtering yields of metals for Ar<sup>+</sup> and Ne<sup>+</sup> ions with energies from 50 to 600 eV.  
In: *Journal of Applied Physics* 32 (1961), Nr. 3, S. 365–369
- [83] KAMIMURA, Tomosumi ; MORI, Yusuke ; SASAKI, Takatomo ; YOSHIDA, Hidetsugu ; OKAMOTO, Takayuki ; YOSHIDA, Kunio:  
Ion etching of fused silica glasses for high-power lasers.  
In: *Japanese journal of applied physics* 37 (1998), Nr. 9R, S. 4840
- [84] ISO CENTRAL SECRETARY:  
Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser-induced damage threshold – Part 1: Definitions and general principles / International Organization for Standardization.  
Version: 2011.  
<https://www.iso.org/standard/43001.html>.  
Geneva, CH, 2011 (ISO 21254-1: 2011). –  
Standard
- [85] ISO CENTRAL SECRETARY:  
Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser-induced damage threshold – Part 2: Threshold determination / International Organization for Standardization.  
Version: 2011.  
<https://www.iso.org/standard/43002.html>.

- Geneva, CH, 2011 (ISO 21254-2: 2011). –  
Standard
- [86] ISO CENTRAL SECRETARY:  
Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser-induced damage  
threshold – Part 3: Assurance of laser power (energy) handling capabilities  
/ International Organization for Standardization.  
Version: 2011.  
<https://www.iso.org/standard/43003.html>.  
Geneva, CH, 2011 (ISO 21254-3: 2011). –  
Standard
- [87] ISO CENTRAL SECRETARY:  
Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser-induced damage  
threshold – Part 4: Inspection, detection and measurement / International  
Organization for Standardization.  
Version: 2011.  
<https://www.iso.org/standard/43004.html>.  
Geneva, CH, 2011 (ISO 21254-4: 2011). –  
Standard
- [88] POITRAS, Daniel ; DOBROWOLSKI, J. A. ; CASSIDY, Tom ; MOISA, Simona:  
Ion-beam etching for the precise manufacture of optical coatings.  
In: *Applied optics* 42 (2003), Nr. 19, S. 4037–4044
- [89] POITRAS, Daniel ; DOBROWOLSKI, J. A. ; CASSIDY, Tom ; MOISA, Simona:  
Ion-beam etching for the precise manufacture of optical coatings: erratum.  
In: *Applied optics* 42 (2003), Nr. 28, S. 5749–5749
- [90] ALVISI, M. ; DI GIULIO, M. ; MARRONE, S. G. ; PERRONE, M. R. ;  
PROTOPAPA, M. L. ; VALENTINI, A. ; VASANELLI, L.:  
HfO<sub>2</sub> films with high laser damage threshold.  
In: *Thin Solid Films* 358 (2000), Nr. 1-2, S. 250–258
- [91] GALLAIS, Laurent ; CAPOULADE, Jérémie ; NATOLI, Jean-Yves ;  
COMMANDRÉ, Mireille ; CATHELINAUD, Michel ; KOC, Cian ; LEQUIME,  
Michel:  
Laser damage resistance of hafnia thin films deposited by electron beam  
deposition, reactive low voltage ion plating, and dual ion beam sputtering.  
In: *Applied optics* 47 (2008), Nr. 13, S. C107–C113
- [92] PATEL, D. ; LANGSTON, P. ; MARKOSYAN, A. ; KROUS, E. M. ; LANGDON,  
B. ; FURCH, F. ; REAGAN, B. ; ROUTE, R. ; FEJER, M. M. ; ROCCA,  
J. J. u. a.:

- SiO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> multilayers: impact of process parameters and stack geometry on the optical and structural properties.  
In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2008* Bd. 7132 International Society for Optics and Photonics, 2008, S. 71320L
- [93] EMILIANI, G. ; SCAGLIONE, S.:  
Properties of silicon and aluminum oxide thin films deposited by dual ion beam sputtering.  
In: *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 5 (1987), Nr. 4, S. 1824–1827
- [94] ROSSNAGEL, S. M. ; CUOMO, J. J.:  
Ion beam bombardment effects during films deposition.  
In: *Vacuum* 38 (1988), Nr. 2, S. 73–81
- [95] JOHANSSON, B. O. ; SUNDGREN, J.-E. ; HELMERSSON, U. ; HIBBS, M. K.:  
Structure of reactively magnetron sputtered Hf-N films.  
In: *Applied Physics Letters* 44 (1984), Nr. 7, S. 670–672
- [96] ALIG, Thimotheus ; JENSEN, Lars ; RISTAU, Detlev:  
Fluorescence studies on optical coatings.  
In: *Advances in Optical Thin Films VI* Bd. 10691 International Society for Optics and Photonics, 2018, S. 1069127
- [97] YOON, S. G. ; KIM, Y. T. ; KIM, H. K. ; KIM, M. J. ; LEE, H. M. ; YOON, D. H.:  
Comparision of residual stress and optical properties in Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films deposited by single and dual ion beam sputtering.  
In: *Materials Science and Engineering: B* 118 (2005), Nr. 1-3, S. 234–237
- [98] BRINCKERHOFF, William B. ; PINNICK, Veronica T. ; VAN AMEROM, Friso H. W. ; DANELL, Ryan M. ; AREVALO, Ricardo D. ; ATANASSOVA, Martina S. ; LI, Xiang ; MAHAFFY, Paul R. ; COTTER, Robert J. ; GOESMANN, Fred u. a.:  
Mars Organic Molecule Analyzer (MOMA) mass spectrometer for ExoMars 2018 and beyond.  
In: *Aerospace Conference, 2013 IEEE* IEEE, 2013, S. 1–8
- [99] SCHILLINGER, Marc ; MORANCAIS, Didier ; FABRE, Frederic ; CULOMA, Alain J. F.:  
ALADIN: the LIDAR instrument for the AEOLUS mission.  
In: *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VI* Bd. 4881 International Society for Optics and Photonics, 2003, S. 40–52



- [100] RIEDE, Wolfgang ; SCHROEDER, Helmut ; BATAVICIUTE, Gintare ; WERNHAM, Denny ; TIGHE, Adrian ; PETTAZZI, Federico ; ALVES, Jorge:  
Laser-induced contamination on space optics.  
In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2011* Bd. 8190 International Society for Optics and Photonics, 2011, S. 81901E
- [101] DESHAZER, L. G. ; NEWNAM, B. E. ; LEUNG, K. M.:  
Role of coating defects in laser-induced damage to dielectric thin films.  
In: *Applied Physics Letters* 23 (1973), Nr. 11, S. 607–609
- [102] PAPERNOV, S. ; SCHMID, A. W.:  
Correlations between embedded single gold nanoparticles in SiO<sub>2</sub> thin film and nanoscale crater formation induced by pulsed-laser radiation.  
In: *Journal of Applied Physics* 92 (2002), Nr. 10, S. 5720–5728
- [103] RIEDE, Wolfgang ; ALLENSPACHER, Paul ; LAMMERS, Melanie ; WERNHAM, Denny ; CIAPPONI, Allesandra ; HEESE, Clemens ; JENSEN, Lars ; MÄDEBACH, Heinrich ; SCHRAMEYER, S. ; RISTAU, D.:  
From ground to space: how to increase the confidence level in your flight optics.  
In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2013* Bd. 8885 International Society for Optics and Photonics, 2013, S. 88850D
- [104] STOLZ, Christopher J. ; THOMAS, Michael D. ; GRIFFIN, Andrew J.:  
BDS thin film damage competition.  
In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2008* Bd. 7132 International Society for Optics and Photonics, 2008, S. 71320C
- [105] VEECO INSTRUMENTS INC. (Hrsg.):  
*12 cm RF Ion Source Technical Manual*.  
Veeco Instruments Inc., 2002
- [106] QIU, S. R. ; WOLFE, Justin E. ; MONTERROSA, Anthony M. ; STEELE, William A. ; TESLICH, Nick E. ; FEIT, Michael D. ; PISTOR, Thomas V. ; STOLZ, Christopher J.:  
Impact of substrate surface scratches on the laser damage resistance of multilayer coatings.  
In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2010* Bd. 7842 International Society for Optics and Photonics, 2010, S. 78421X
- [107] JUŠKEVIČIUS, K. ; BUZELIS, R. ; KIČAS, S. ; TOLENIS, T. ; DRAZDYS, R. ; BATAVIČIŪTĖ, G. ; PUPKA, Egidijus ; SMALAKYS, L. ; MELNINKAITIS, A.:  
Investigation of subsurface damage impact on resistance of laser radiation of fused silica substrates.

- In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2013* Bd. 8885 International Society for Optics and Photonics, 2013, S. 888529
- [108] RIEDE, Wolfgang ; ALLENSPACHER, Paul ; JENSEN, Lars ; JUPÉ, Marco:  
Analysis of the air-vacuum effect in dielectric coatings.  
In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2008* Bd. 7132 International Society for Optics and Photonics, 2008, S. 71320F
- [109] JENSEN, L. ; JUPÉ, M. ; MÄDEBACH, H. ; EHLERS, H. ; STARKE, K. ; RISTAU, D. ; RIEDE, W. ; ALLENSPACHER, P. ; SCHROEDER, H.:  
Damage threshold investigations of high-power laser optics under atmospheric and vacuum conditions.  
In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2006* Bd. 6403 International Society for Optics and Photonics, 2007, S. 64030U
- [110] PORTAL, S. ; RUBIO-ROY, Miguel ; CORBELLA, C. ; VALLVÉ, M. A. ; IGNES-MULLOL, J. ; BERTRAN, E.:  
Influence of incident ion beam angle on dry etching of silica sub-micron particles deposited on Si substrates.  
In: *Thin Solid Films* 518 (2009), Nr. 5, S. 1543–1548
- [111] MENAPACE, Joseph A. ; PENETRANTE, Bernie ; MILLER, Phil E. ; PARHAM, Tom ; NICHOLS, Mike ; PETERSON, John ; GOLINI, Don ; SLOMBA, Al:  
Combined advanced finishing and UV-laser conditioning for producing UV-damage-resistant fused silica optics.  
In: *Optical Fabrication and Testing* Optical Society of America, 2002, S. OMB4
- [112] NESS, Dale C. ; STREATER, Alan D.:  
A laser preconditioning process for improving the laser damage threshold, and the search for subtle laser damage from long-duration laser exposure for IBS thin films.  
In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2007* Bd. 6720 International Society for Optics and Photonics, 2007, S. 67200R
- [113] KOZLOWSKI, M. R. ; WOLFE, C. R. ; STAGGS, M. C. ; CAMPBELL, J. H.:  
Large area laser conditioning of dielectric thin film mirrors.  
In: *Laser Induced Damage in Optical Materials: 1989*.  
ASTM International, 1990
- [114] MANN, K. ; WOLFF-ROTTKE, B. ; MU, F. u. a.:  
Cleaning of optical surfaces by excimer laser radiation.  
In: *Applied surface science* 96 (1996), S. 463–468

- 
- [115] LEIDERER, Paul ; BONEBERG, Johannes ; DOBLER, Volker ; MOSBACHER, Mario ; MÜNZER, H.-J. ; CHAOUI, Nouari ; SIEGEL, Jan ; SOLIS, J. ; RODRIGUEZ, Carmen N. A. ; FOURRIER, T. u. a.:  
Laser-induced particle removal from silicon wafers.  
In: *High-Power Laser Ablation III* Bd. 4065 International Society for Optics and Photonics, 2000, S. 249–259
- [116] BARTELS, Nils ; ALLENSPACHER, Paul ; RIEDE, Wolfgang:  
Laser conditioning of UV anti-reflective optical coatings for applications in aerospace.  
In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials 2018: 50th Anniversary Conference* Bd. 10805 International Society for Optics and Photonics, 2018, S. 108051Q
- [117] STOLZ, Christopher J. ; CAPUTO, Mark ; GRIFFIN, Andrew J. ; THOMAS, Michael D.:  
BDS thin film UV antireflection laser damage competition.  
In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2010* Bd. 7842 International Society for Optics and Photonics, 2010, S. 784206
- [118] PASCHEL, S. ; BALASA, I. ; JENSEN, L. O. ; CHENG, X. ; WANG, Z. ; RISTAU, D.:  
Laser-induced pit formation in UV-antireflective coatings.  
In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials 2018: 50th Anniversary Conference* Bd. 10805 International Society for Optics and Photonics, 2018, S. 108051N
- [119] NEGRES, Raluca A. ; NORTON, Mary A. ; CROSS, David A. ; CARR, Christopher W.:  
Growth behavior of laser-induced damage on fused silica optics under UV, ns laser irradiation.  
In: *Optics Express* 18 (2010), Nr. 19, S. 19966–19976
- [120] *Recalculation and re-optimization modul for optical broad band monitoring BBM.*  
Laser Zentrum Hannover, Hollerithallee 8, 30419 Hannover, Germany, . –  
ReCalc-Version 15.22b: 09.12.2020



# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

---

2.01	Schematischer Aufbau einer thermischen Verdampfungsanlage . . .	7
2.02	Aufbau einer Anlage zur Ionenstrahlgestützten Deposition . . . . .	9
2.03	Schematischer Aufbau einer Ionenstrahlputteranlage . . . . .	12
2.04	Aufbau einer mit Radiofrequenz betriebenen Ionenquelle . . . . .	13
2.05	Wachstumsprozesse beim Ionenstrahlputterverfahren . . . . .	15
2.06	Strukturzonenmodell nach Movchan und Demchishin . . . . .	17
2.07	Strukturzonenmodell nach Thornton . . . . .	18
2.08	Strukturzonenmodell nach Messier . . . . .	19
2.09	Kristallsysteme von Hafniumdioxid . . . . .	21
2.10	Defektinduzierte Energieniveaus in monoklinem Hafniumdioxid . . .	23
3.01	Konstruktionszeichnung der Ionenstrahlputteranlage . . . . .	27
3.02	Schematische Anordnung der partiellen Zerstäubung . . . . .	28
3.03	Spektraler Brechwertverlauf der Materialmischungen . . . . .	30
3.04	Mischungsverhältnisse in Abhängigkeit der Materialposition . . . .	33
3.05	Energiedispersives Röntgenspektrum der Hafniumdioxidschicht . . .	35
3.06	Verifizierung der Mischungsverhältnisse nach Lorentz-Lorenz . . . .	37
3.07	Kalorimetrische Absorptionsmessung einer Hafniumdioxidschicht . .	38
3.08	Absorptionskoeffizienten als Funktion der Photonenenergie . . . . .	39
3.09	Absorptionsverhalten der wärmebehandelten Materialmischungen .	40
3.10	Rückwärtiges Streulichtaufkommen einer Hafniumdioxidschicht . . .	43
3.11	Defektanalyse einer Hafniumoxidschicht im Streulichtmessplatz . . .	44
3.12	Rückwärtige Streuverluste der binären Materialkombinationen . . .	45
3.13	Schematischer Messaufbau zur Photolumineszenzspektroskopie . . .	46
3.14	Photolumineszenzspektrum der Hafniumdioxidschicht . . . . .	47
3.15	Photolumineszenzspektren der binären Materialkombinationen . . .	49
3.16	Schematische Darstellung des komplexen Umlenkspiegels . . . . .	51
3.17	Schematische Anordnung der optischen Breitbandmonitorierung . .	53
3.18	Breitbandige Transmissionsspektren der Resonatorspiegel . . . . .	54
3.19	Transmissionsspektren des infraroten Dünnpolarisators . . . . .	55

3.20	Dunkelfeldmikroskopie der ultravioletten Laserkomponente . . . . .	56
3.21	Histogramm zur Defektanalyse der komplexen Mehrschichtsysteme .	57
4.01	Schematischer Versuchsaufbau der einschichtigen Ätzexperimente .	60
4.02	Trajektorien einer simulierten Ionenextraktion . . . . .	63
4.03	Kaskadierte Stoßprozesse unter senkrechtem Ionenbombardement .	64
4.04	Transmissionsspektren der ionengeätzten Hafniumdioxidschicht . . .	68
4.05	Sputtereffizienzen der unterschiedlichen Beschichtungsmaterialien .	69
4.06	Steigungsfaktoren der linearisierten Sputtereffizienzen . . . . .	71
4.07	Schematischer Ablauf der sequentiellen Ionenbeaufschlagung . . . .	72
4.08	Transmissionsspektrum der ionengeätzten Spiegelbeschichtung . . .	73
4.09	Laserinduzierte Zerstörschwelle der geätzten Spiegelbeschichtung . .	74
5.01	Röntgendiffraktometrie an einer gestützten Hafniumdioxidschicht .	78
5.02	Energieabhängigkeit der ionengestützten Hafniumdioxidschicht . . .	81
5.03	Stromabhängigkeit der ionengestützten Hafniumdioxidschicht . . . .	82
5.04	Lumineszenzspektrum einer ionengestützten Hafniumdioxidschicht .	83
5.05	Brechungsindizes der reaktiv gestützten Hafniumdioxidsysteme . . .	84
5.06	Absorptionsverluste der reaktiv gestützten Hafniumdioxidsysteme .	85
5.07	Streulichtverluste der reaktiv gestützten Hafniumdioxidsysteme . .	86
5.08	Schematische Zeichnung des dualen Zerstäubungssystems . . . . .	87
5.09	Fertigungstoleranzen einer ultravioletten Antireflexschicht . . . . .	88
5.10	Partikelanalyse des konventionellen Vergütungssystems . . . . .	89
5.11	Laserinduzierte Zerstörungen einer konventionellen Entspiegelung .	90
5.12	Schematischer Aufbau der Stützquellenhalterung . . . . .	91
5.13	Abtragsverteilungen von ausgewählten Prozesskonfigurationen . . .	92
5.14	Schematische Darstellung der Defektausblendung . . . . .	93
5.15	Zerstörungsdichten der vorbehandelten Dünnschichtsysteme . . . .	94
5.16	Zerstörungsdichte in Abhängigkeit der beaufschlagten Energie . . .	95
5.17	Zerstörungsdichte in Abhängigkeit der beaufschlagten Stromstärke .	95
5.18	Schematischer Aufbau der laserbasierten Schichtexperimente . . . .	97
5.19	Zerstörungsdichte in Abhängigkeit der eingestrahlten Energie . . . .	98
5.20	Zerstörungsdichte in Abhängigkeit der eingestrahlten Pulsanzahl . .	98
5.21	Stufenartiger Rasterscantest der ultravioletten Antireflexschicht . .	99
5.22	Zerstörungsmorphologie am Beispiel der Referenzbeschichtung . . .	100
5.23	Antireflexschichten für 266 nm im Rasterscantest . . . . .	101
5.24	Zerstörungsmorphologien des konventionellen Referenzsystems . . .	102
5.25	Zerstörungsmorphologien der beaufschlagten Antireflexschicht . . .	103
5.26	Spektrale Charakterisierung der Antireflexbeschichtungen . . . . .	104

# TABELLENVERZEICHNIS

---

2.01	Prozesseigenschaften der reaktiven Verdampfung . . . . .	8
2.02	Prozesseigenschaften der Ionenstrahlgestützten Deposition . . . . .	10
2.03	Prozesseigenschaften des Ionenstrahlputterns . . . . .	16
2.04	Materialeigenschaften von Hafniumdioxid . . . . .	21
3.01	Prozessparameter der einschichtigen Materialmischungen . . . . .	29
3.02	Diskrete Brechungsindizes der Materialmischungen . . . . .	31
3.03	Mischungsverhältnisse entsprechend Lorentz-Lorenz-Modell . . . . .	32
3.04	Ausgewählte Massenanteile der Hafniumdioxidschicht . . . . .	36
3.05	Mischverhältnisse der energiedispersiven Röntgenspektroskopie . . . . .	36
3.06	Absorptionskoeffizienten der verwendeten Ausgangsmaterialien . . . . .	41
3.07	Rückwärtige Streuverluste der gesputterten Ausgangsmaterialien . . . . .	44
3.08	Charakteristiken im Lumineszenzspektrum von Hafniumdioxid . . . . .	48
3.09	Spektrale Anforderungen des komplexen Resonatorspiegels . . . . .	51
3.10	Entwurfseigenschaften der ultravioletten Laserkomponenten . . . . .	52
4.01	Technische Spezifikationen der sekundären Ionenstrahlquelle . . . . .	61
4.02	Prozessbedingungen der physikalischen Ätzexperimente . . . . .	62
4.03	Absolute Atommassen der verwendeten Elemente . . . . .	65
4.04	Herstellungparameter der oxidischen Dünnschichtsysteme . . . . .	66
4.05	Herstellungparameter der fluoridischen Dünnschichtsysteme . . . . .	67
4.06	Schwellenenergien der ionengeätzten Beschichtungsmaterialien . . . . .	70
4.07	Ausgewählte Eigenschaften der modifizierten Spiegelbeschichtung . . . . .	74
5.01	Schichteigenschaften von dualgesputterten Hafniumdioxidssystemen . . . . .	79





# LEBENS LAUF

---

## Persönliche Angaben

Name Thimotheus Alig  
Geboren am 31. August 1987 in Langenhagen  
Nationalität deutsch  
Familienstand ledig

## Beruflicher Werdegang

seit 07/2013 **Wissenschaftlicher Mitarbeiter,**  
*Laser Zentrum Hannover e.V.*

## Ausbildung

10/2010-02/2013 **Master of Science Physik,**  
*Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Hannover.*  
Masterarbeit Charakterisierung und Unterdrückung der Strahlgeometrie-  
fluktuationen des fasergekoppelten 35W Lasers für das AEI  
10m Prototypinterferometer

10/2007-12/2010 **Bachelor of Science Physik,**  
*Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Hannover.*  
Bachelorarbeit Aufbau einer Frequenzverdopplung für die Realisierung eines  
optischen Gitters bei der magischen Wellenlänge von Magne-  
sium

08/2004-06/2007 **Allgemeine Hochschulreife,**  
*bbs/me Otto-Brenner-Schule, Hannover.*

### Wissenschaftliche Veröffentlichungen

- 2021 *Zeitschriftenartikel* ALIG, Thimotheus ; BARTELS, Nils ; ALLENSPACHER, Paul ; BALASA, Istvan ; BÖNTGEN, Tammo ; RISTAU, Detlev ; JENSEN, Lars: **Prevention of laser damage precursors in spaceborne ultraviolet antireflection coatings**. In: Optics Express 29 (2021), Nr. 10, S. 14189–14200

*Vortrag mit Artikel in Konferenzbericht* ALIG, Thimotheus ; BARTELS, Nils ; BALASA, Istvan ; BÖNTGEN, Tammo ; RISTAU, Detlev ; JENSEN, Lars: **Mitigating damage precursors to improve the laser resistance of ion beam sputtered antireflective coatings**. In: International Conference on Space Optics - ICSO 2020 Bd. 11852 International Society for Optics and Photonics, 2021, S. 118521D

*Artikel in Konferenzbericht* BARTELS, Nils ; ALLENSPACHER, Paul ; ALIG, Thimotheus ; BALASA, Istvan ; SCHRÖDER, Helmut ; TAUBE, Gabriele ; RIEDE, Wolfgang: **Laser-induced damage and contamination testing for the next generation of LIDAR space optics**. In: International Conference on Space Optics - ICSO 2020 Bd. 11852 International Society for Optics and Photonics, 2021, S. 1185260

- 2020 *Vortrag mit Artikel in Konferenzbericht* ALIG, Thimotheus ; BARTELS, Nils ; ALLENSPACHER, Paul ; BALASA, Istvan ; BÖNTGEN, Tammo ; RISTAU, Detlev ; JENSEN, Lars: **Increasing the laser induced damage resistance of ultraviolet antireflective coatings by mitigation of damage precursors**. In: Advanced Solid State Lasers Optical Society of America, 2020, S. AW1A–6

*Vortrag* ALIG, Thimotheus ; MÄDEBACH, Heinrich ; BARTELS, Nils ; ALLENSPACHER, Paul ; BALASA, Istvan ; BÖNTGEN, Tammo ; RISTAU, Detlev ; JENSEN, Lars: **Damage precursor mitigation towards enhanced laser resistance of ultraviolet antireflective coatings**. In: Laser-induced Damage in Optical Materials 2020 Bd. 11514 International Society for Optics and Photonics, 2020, S. 115140Z

- 2019 *Artikel in Konferenzbericht* BÖNTGEN, T. ; ALIG, T. ; BALASA, I. ; JENSEN, L. ; RISTAU, D.: **Advances in IBS coatings for space applications on the topics of curved surfaces and laser damage**. In: International Conference on Space Optics - ICSO 2018 Bd. 11180 International Society for Optics and Photonics, 2019, S. 1118045
- 2018 *Poster mit Artikel in Konferenzbericht* ALIG, Thimotheus ; JENSEN, Lars ; RISTAU, Detlev: **Fluorescence studies on optical coatings**. In: Advances in Optical Thin Films VI Bd. 10691 International Society for Optics and Photonics, 2018, S. 1069127
- 2017 *Vortrag* ALIG, Thimotheus ; JENSEN, Lars ; RISTAU, Detlev: **Electronic band structure investigations of ion beam sputtered HfO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> mixtures by photoluminescence spectroscopy**. The 4th Frontiers of Optical Coatings (FOC2017), International Conference on optical thin film and coating technology, Guangzhou, China, Oct 22 - Oct 26, 2017
- 2016 *Zeitschriftenartikel* MROHS, Marius ; JENSEN, Lars ; GÜNSTER, Stefan ; ALIG, Thimotheus ; RISTAU, Detlev: **Dual wavelength laser-induced damage threshold measurements of alumina/silica and hafnia/silica ultraviolet antireflective coatings**. In: Applied optics 55 (2016), Nr. 1, S. 104–109
- Poster mit Artikel in Konferenzbericht* ALIG, Thimotheus ; GÜNSTER, Stefan ; RISTAU, Detlev: **Photoluminescence of ion beam sputtered HfO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> mixtures**. In: Optical Interference Coatings Optical Society of America, 2016, S. ThC-4
- Artikel in Konferenzbericht* GÜNSTER, Stefan ; RODRIGUEZ, Christina ; ALIG, Thimotheus ; JUPÉ, Marco ; EMMERT, Luke ; RISTAU, Detlev ; RUDOLPH, Wolfgang: **Frequency tripling mirror based on optical interference coatings**. In: Optical Interference Coatings Optical Society of America, 2016, S. WE-3
- 2015 *Zeitschriftenartikel* ALIG, Thimotheus ; GÜNSTER, Stefan ; RISTAU, Detlev: **Etching behavior of optical thin films for different deposition techniques**. In: Thin Solid Films 592 (2015), S. 237–239

2012 *Zeitschriftenartikel* DAHL, Katrin ; ALIG, T. ; BERGMANN, G. ; BERTOLINI, A. ; BORN, M. ; CHEN, Y. ; CUMMING, A. V. ; CUNNINGHAM, L. ; GRÄF, C. ; HAMMOND, G. ; HEINZEL, G. ; HILD, S. ; HUTTNER, S. H. ; JONES, R. ; KAWAZOE, F. ; KÖHLENBECK, S. ; KÜHN, G. ; LÜCK, H. ; MOSSAVI, K. ; OPPERMANN, P. ; PÖLD, J. ; SOMIYA, K. ; VAN VEGGEL, A. A. ; WANNER, A. ; WESTPHAL, T. ; WILLKE, B. ; STRAIN, K. A. ; GOSSLER, S. ; DANZMANN, K.: **Status of the AEI 10 m prototype.** In: Classical and Quantum Gravity 29 (2012), Nr. 14, S. 145005

*Poster* Thimotheus ALIG for the AEI 10m Prototype Team: **Enlighten the AEI 10m Prototype Interferometer.** DPG-Frühjahrstagung der Sektion Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (SAMOP), Stuttgart, 12. - 16. März 2012

03.12.2021

Datum

  
Unterschrift

# DANKSAGUNG

---

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben. Für den konstruktiven Austausch im Rahmen der Betreuung bedanke ich mich sehr herzlich bei Prof. Dr. Detlev Ristau. Zusätzlich zu den Seminarvorträgen waren die Anregungen zu Konferenzbeiträgen und Zeitschriftenartikeln eine große Unterstützung. Ich danke Prof. Dr. Milutin Kovacev und Prof. Dr. Günter Bräuer für die Übernahme und den zeitlichen Aufwand des Korreferates. Dr. Dietmar Kracht, Dr. Lars Jensen und Tammo Böntgen danke ich für die Möglichkeit, diese Arbeit anfertigen zu können und das damit verbundene Vertrauen.

Für die gute Arbeitsatmosphäre während dieser Zeit danke ich den Mitgliedern der Abteilung Optische Komponenten. Istvan Balasa danke ich für die fachliche Begleitung im Rahmen der laserinduzierte Zerstörschwellenmessungen. Für die Hilfe bei der praktischen Umsetzung meiner Arbeit danke ich Eugen Buterus, Marc Neufert und Heinrich Mädebach. Mein besonderer Dank geht an Dr. Stefan Günster für den Einstieg in den Forschungsbereich und die inspirierende Zusammenarbeit. Bei allen Mitarbeitern des Laser Zentrums Hannover bedanke ich mich für die konkreten Hilfen.

Für die private Unterstützung bei dieser Arbeit danke ich meiner Familie und meinen Freunden.



# ERKLÄRUNGEN

---

Hiermit erkläre ich, die Regeln der geltenden Promotionsordnung zu kennen und eingehalten zu haben und mit einer Prüfung nach den Bestimmungen der Promotionsordnung einverstanden zu sein,

die Dissertation selbst verfasst zu haben (Selbständigkeitserklärung), keine Textabschnitte von Dritten oder eigener Prüfungsarbeiten ohne Kennzeichnung übernommen und alle benutzten Hilfsmittel und Quellen in der Arbeit angegeben zu haben,

Dritten weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Vermittlungstätigkeiten oder für die inhaltliche Ausarbeitung der Dissertation erbracht zu haben (d.h. die wissenschaftliche Arbeit ist weder in Teilen noch in Gänze von Dritten gegen Entgelt oder sonstige Gegenleistung erworben oder vermittelt worden),

die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine andere Prüfung eingereicht zu haben,

die gleiche oder eine in wesentlichen Teilen ähnliche Arbeit nicht bei einer anderen Fakultät oder bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht zu haben und keine andere Abhandlung als Dissertation anderswo eingereicht zu haben,

damit einverstanden zu sein, dass die Dissertation einer Überprüfung der Einhaltung allgemein geltender wissenschaftlicher Standards unterzogen wird.

03.12.2021

Datum

  
Unterschrift