

**Entwicklung und Anwendung eines Messsystems
zur Bestimmung des totalen Streulichts
von optischen und technisch rauhen Oberflächen
und Schichten**

Dissertation

**zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)**

vorgelegt der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Ilmenau

von Dipl.-Ing. Stefan Glied
geboren am 04.01.1968

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. Horst Truckenbrodt
2. Prof. Dr. rer. nat. habil. Karl Hehl
3. Dr. rer. nat. Angela Duparré

Tag der Einreichung: 03.12.2002

Tag der Verteidigung: 09.10.2003

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielstellung	1
2	Theoretische Grundlagen	5
2.1	Streugeometrie und Streulichtgrößen	5
2.2	Bandweitenbegrenzung des Streulichts	8
2.3	Zusammenhang zwischen Streulicht und Oberflächentopographie	9
2.4	Problem der Rückseitenstreuung an transparenten Proben	11
3	Streulichtmesstechnik	13
3.1	Überblick über Streulichtmessverfahren	13
3.1.1	Einteilung der Streulichtmessverfahren	13
3.1.2	Winkelaufgelöste Streulichtmessung	13
3.1.3	Totale / total integrierende Streulichtmessung	15
3.1.3.1	Einleitung	15
3.1.3.2	Coblentzkugel	17
3.1.3.3	Ulbrichtkugel	20
3.1.4	Zusammenfassung	24
3.1.5	Abgewandelte Arten der Streulichtmessung	25
3.2	Wahl der verwendeten Messprinzipien und Wellenlängen	26
3.3	Vergleich mit anderen Streulichtmessanordnungen / Stand der Technik	28
3.3.1	Einteilung	28
3.3.2	Beschreibung einzelner Literaturstellen	29
3.3.3	Zusammenfassung und Bewertung	34
3.4	Weitere Messverfahren zur Bestimmung von Mikrotopografieparametern	39
4	Beschreibung des TS-Messsystems	41
4.1	Einleitung	41
4.2	Gesamtaufbau	41
4.3	Beleuchtungseinheit	43
4.3.1	Prinzipieller Aufbau	43
4.3.2	Beleuchtungseinheit mit UV-VIS-Lasern	44
4.3.3	Beleuchtungseinheit mit Deuteriumlampe	49
4.3.4	Beleuchtungseinheit mit Quecksilberdampfbogenlampe	52
4.3.5	Beleuchtungseinheit mit NIR-Laser	53
4.3.6	Beleuchtungseinheit mit MIR-Laser	54
4.4	Detektionseinheit	56
4.4.1	Prinzipieller Aufbau	56
4.4.2	Detektionseinheit für den UV-VIS-Bereich	57
4.4.3	Detektionseinheit für den NIR-Bereich	59
4.4.4	Detektionseinheit für den MIR-Bereich	60
4.4.5	Abbildungsverhalten einer Coblentzkugel	60
4.5	Ansteuereinheit	64
4.6	Auswerteeinheit	66
4.7	Inbetriebnahme einer Messanordnung und Messablauf	68
4.8	Auswertung der Messergebnisse	69
4.9	Fehlerbetrachtung	72
4.9.1	Überblick über mögliche Fehlerquellen	72

4.9.2	Bestimmung der einzelnen Fehlerquellen	73
4.9.2.1	Instabilitäten einer Messanordnung	73
4.9.2.2	Modulationsfehler des Messstrahls sowie des Referenzsignals	79
4.9.2.3	Fehler bei der Bestimmung der Abschwächerwerte	81
4.9.2.4	Übertragungsfehler der Coblenzkugel	83
4.9.2.5	Streunormalfehler	84
4.9.2.6	Probenabhängigkeit des Untergrundsignals	86
4.9.2.7	Fehler durch Übersteuerung des Detektors	88
4.9.2.8	Elektronisches Rauschen	89
4.9.3	Gesamtfehler	90
4.10	Erreichte Sensitivitäten	91
4.11	VUV-TS-Messanordnung	91
5	Normen zur TS-/TIS-Messung	95
5.1	Einleitung	95
5.2	Norm ASTM F 1048-87	95
5.3	ISO-Normungsprojekt EUREKA-EUROLASER CHOCLAB	96
5.3.1	Einführung	96
5.3.2	Überblick ISO 13696	96
5.3.3	Nationales Round-Robin-Experiment	98
5.3.4	Internationales Round-Robin-Experiment	102
6	Anwendungsbeispiele	103
6.1	Einleitung	103
6.2	Untersuchungen an superpolierten Si-Wafern	103
6.3	Bewertung optischer Oberflächen	105
6.4	Untersuchungen an optischen Schichtsystemen	110
6.5	Untersuchungen an technisch rauhen Oberflächen	114
6.6	Erste Messungen bei 157 nm	118
7	Zusammenfassung und Ausblick	121
8	Erklärung von häufig verwendeten Symbolen und Abkürzungen	123
9	Literaturverzeichnis	125

1 Einleitung und Zielstellung

Lokale Variationen des Brechungsindex in Festkörpern und an deren Oberflächen führen dazu, dass ein Teil des Lichts aus seiner durch Reflexions- und Brechungsgesetz beschriebenen Ausbreitungsrichtung abgelenkt wird ([Jakobs, 1998 b]). Dieses abgelenkte Licht wird als Streulicht bezeichnet, das z.B. an Grenzflächen- bzw. Volumeninhomogenitäten oder an Partikeln entsteht.

Je nach dem Ort, an dem die Lichtstreuung auftritt, wird sie in Grenzflächen- und Volumenstreuung unterteilt. Die Inhomogenität, die die Grenzflächenstreuung hervorruft, kann in Rauheit und lokale Defekte unterteilt werden. Die Rauheit ist eine großflächige, nicht lokal begrenzte Oberflächeninhomogenität. Lokale Defekte können z.B. Kratzer und Löcher sein.

In der Optik tritt Lichtstreuung einerseits als Verlustfaktor auf, der zu einer Intensitätsminderung im Hauptstrahlengang führt, und andererseits als Störlicht, das die Abbildungseigenschaften des optischen Systems negativ beeinflusst. Die herausragende Bedeutung von optischen Technologien als Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts ([Siegel, 2000]) erfordert eine für diese Systeme angepasste Überwachung der Qualität der einzelnen Komponenten und des optischen Gesamtsystems. Dafür ist eine Kontrolle der Lichtstreuung von entscheidender Bedeutung. Diese Kontrolle kann einerseits indirekt durch Messverfahren erfolgen, die die Ursachen der Lichtstreuung erfassen (z.B. AFM¹, optische oder mechanische Profilometrie) und andererseits direkt über die Messung des Streulichts. Die direkte Erfassung des Streulichts hat dabei den Vorteil, dass dieses nicht über Streulichtmodelle berechnet werden muss. Dies ist insbesondere bei optischen Schichten von vorteilhaft, da hierbei neben den Materialeigenschaften und der Oberflächenrauheit auch die Rauheiten der Grenzflächen zwischen den Einzelschichten und die Volumenstreuung jeder einzelnen Schicht einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe des Streulichtes haben können und Streulichtberechnungen aus Rauheitsmessungen sich deshalb sehr komplex und mehrdeutig gestalten. Die Rauheit der Grenzflächen kann zudem verschiedene Korrelationszustände aufweisen, die je nach vorliegendem Fall das Streulicht in seiner Wirkung vermindern oder verstärken ([Church, 1979], [Elson, 1983], [Stover, 1995], [Duparré, 1995]). In optischen Systemen für den sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich ist in der Regel die Oberflächen- bzw. Grenzflächenstreuung die Hauptquelle der Lichtstreuung ([Amra, 1993 b], [Duparré, 1995]).

Die Messung des Streulichts bietet über die Kontrolle eines Verlustfaktors hinaus den generellen Vorteil einer berührungslosen und zerstörungsfreien Messmethode für die Qualitätsprüfung von Oberflächen und Beschichtungen für optische und nichtoptische Anwendungen. Neben der Detektion der eigentlichen Verlustgröße Streulicht können über das Streulicht unter bestimmten Bedingungen Aussagen über die Oberflächenrauheit ([Stover, 1995], [J. Bennett, 1999]) oder in Spezialfällen über weitere Oberflächenparameter ([Baumgart, 1998], [Lewis, 1998]) gewonnen werden. Durch eine Verschiebung der Probe zum Beleuchtungsstrahl kann auch die lokale Variation des Streulichts erfasst werden. Auf diese Weise lassen sich Aussagen zu lokalen Defekten auf Oberflächen (z.B. Kratzer, Löcher, Kontaminationen) oder im Materialvolumen (z.B. Einschlüsse) treffen.

Es lassen sich zwei grundlegende Varianten der Streulichtmessung von Oberflächen unterscheiden:

¹ Atomic Force Microscopy

- winkelaufgelöste Streulichtmessung (ARS²-Messung) und
- totale bzw. totalintegrierende Streulichtmessung (TS³-Messung bzw. TIS⁴-Messung).

Bei der ARS-Messung wird das von einem Probenort ausgehende Streulicht in Abhängigkeit vom Streuwinkel erfasst. Bei der TS-Messung wird das von dem Probenort ausgehende Streulicht mittels eines sammelnden Elementes auf einen Detektor abgebildet und somit als ein Signal erfasst. Die TS-Messung hat gegenüber der ARS-Messung folgende Vorteile:

- gutes Signal-Rausch-Verhältnis,
- schnelle Erfassung des gesamten Streulichts eines Probenortes,
- schnelle Erfassung großer Probenbereiche,
- einfachere Handhabung,
- schnelle Signalauswertung und
- robuster Aufbau.

In der vorliegenden Arbeit wird ein neues, selbstentwickeltes Messsystem zur sensitiven, großflächigen und schnellen Bestimmung des totalen Streulichts in Rückwärts- und Vorwärtsrichtung in einem weit ausgedehnten Wellenlängenbereich vorgestellt. Mit diesem Messsystem, das sich aus mehreren Messanordnungen zusammensetzt, können Superpolituren genauso wie technisch raue Oberflächen bei optimiertem technischen Aufwand untersucht werden. Insbesondere zur Vermessung von Superpolituren und schwach streuenden Antireflexschichtsystemen ist die Realisierung eines großen Signal-Rausch-Verhältnisses essentiell. Durch eine Vielzahl von implementierten Lichtquellen im Bereich von 193 nm bis 10,6 μm kann die für den jeweiligen Einsatzfall am besten geeignete Quelle gewählt werden. Zugleich besteht die Möglichkeit, optische Bauelemente bei ihrer Einsatzwellenlänge zu untersuchen. Das Einsatzspektrum umfasst Substrate und Beschichtungen für Optiken im UV⁵- bis IR⁶-Wellenlängenbereich sowie technisch raue Oberflächen.

Bei der Entwicklung des vorgestellten TS-Messsystems wurde eine permanente Anpassung an die bei der Lithographieentwicklung aktuell verwendete Wellenlänge vorgenommen. Zur Zeit werden Lithographieanlagen bei der Wellenlänge 157 nm entwickelt. Dies macht die dementsprechende Ausdehnung des Wellenlängenbereichs der TS-Messung dringend erforderlich. Da bedingt durch die Absorption von Sauerstoff, Wasser und Kohlendioxid bei der Wellenlänge 157 nm die Messungen nicht mehr in Luftatmosphäre erfolgen können und außerdem die Verwendung eines Excimerlasers neuartige Messbedingungen verursacht, musste für den VUV-Wellenlängenbereich das oben beschriebene Messsystem erweitert werden. Es wurde eine TS-Messanordnung konzipiert und realisiert, die bei den Wellenlängen 157 nm und 193 nm eingesetzt werden kann. Diese Eigenentwicklung, die in einem Vakuumkammersystem aufgebaut wurde, kann wahlweise unter Vakuumbedingungen oder in Stickstoffatmosphäre betrieben werden.

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt gegliedert: Zunächst erfolgt ein Überblick über die Grundlagen wie Streulichtgeometrie und -größen (Kapitel 2). Hier wird ebenfalls der Zusammenhang

² **A**nge **R**esolved **S**cattering

³ **T**otal **S**cattering

⁴ **T**otal **I**ntegrated **S**cattering

⁵ **U**ltraviolett

⁶ **I**nfrarot

zwischen Streulicht und Oberflächentopografie sowie das Problem der Rückseitenstreuung an transparenten Proben behandelt. Danach folgt ein Überblick über die prinzipiellen Streulichtmesstechniken (ARS und TS) und Varianten der TS-Messung mit Coblenz- und Ulbrichtkugel. Anhand dieser Betrachtungen erfolgt die Wahl des verwendeten Messprinzips und der Lichtquellen. Daran schließt sich eine detaillierte Diskussion des internationalen Standes der Technik zu TS-Messanordnungen mit Einordnung des in dieser Arbeit realisierten TS-Messsystems an. Es folgt ein Vergleich mit Messverfahren zur Bestimmung von Mikrotopografieparametern (Kapitel 3). Anschließend wird das selbstentwickelte TS-Messsystem im Gesamtaufbau sowie dessen Einzelkomponenten beschrieben und eine Fehlerdiskussion durchgeführt. Es folgt ein Ausblick auf die vom Autor entwickelte VUV⁷-TS-Messanordnung (Kapitel 4). Eine ausführliche Beschreibung wurde in [Glied, 2002] veröffentlicht.

Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von TS-Messungen zur Qualitätsprüfung von Substraten und Beschichtungen wurde die Normung der TS-Messungen notwendig, um einen belastbaren Vergleich von Messergebnissen unterschiedlicher Messanordnungen zu gewährleisten. Aus diesem Grund werden der aktuelle Stand der Normung von TS-Messungen sowie laufende Normungsaktivitäten und das Mitwirken des Fraunhofer IOF an dieser Entwicklung diskutiert. Anhand eines innerhalb der aktuellen Normungsaktivitäten durchgeführten Round-Robin-Experimentes werden Messergebnisse des in dieser Arbeit realisierten TS-Messsystems mit anderen TS-Messanordnungen verglichen (Kapitel 5). Danach erfolgen anhand von Anwendungsbeispielen die Demonstration der Einsatzbreite des TS-Messsystems und an ausgesuchten Anwendungen ein Vergleich mit anderen Messverfahren (Kapitel 6). Abschließend werden eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit und ein Ausblick auf zukünftige Arbeitsschwerpunkte gegeben (Kapitel 7).

⁷ **V**akuum **U**ltraviolett

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Streugeometrie und Streulichtgrößen

Licht, das auf eine Grenzfläche eines Objektes unter einem Winkel Θ_i fällt, wird unter einem Winkel Θ_r reflektiert (Reflexionsgesetz) und unter einem Winkel Θ_t gebrochen (Brechungsgesetz) [Hecht, 1994]. Die Leistung des einfallenden, des reflektierten sowie des gebrochenen Lichtes werden mit P_i , P_r sowie P_t bezeichnet.

Als Streulicht werden die Lichtanteile bezeichnet, die nicht dem Reflexions- bzw. Brechungsgesetz entsprechend von der beleuchteten Grenzfläche ausgehen. Der Winkel, unter dem das Streulicht in Bezug zur Probennormalen betrachtet wird, heißt Streuwinkel Θ_s , der Winkelversatz zwischen Streuebene und Einfallsebene wird als Azimutwinkel ϕ_s bezeichnet. Die Leistung P_s des gestreuten Lichtes bezieht sich auf das Raumwinkelement $\Delta\Omega$, das sich zwischen Apertur des Messsystems und Beleuchtungspunkt auf der Grenzfläche aufspannt.

In Abb. 2.1 sind die Winkelbeziehungen für den Fall der Betrachtung des Streulichtes in Reflexionsrichtung dargestellt. Bei der Streulichtbetrachtung in Transmissionsrichtung bezieht sich die Angabe des Streuwinkels Θ_s auf die Probennormalen in Transmissionsrichtung.

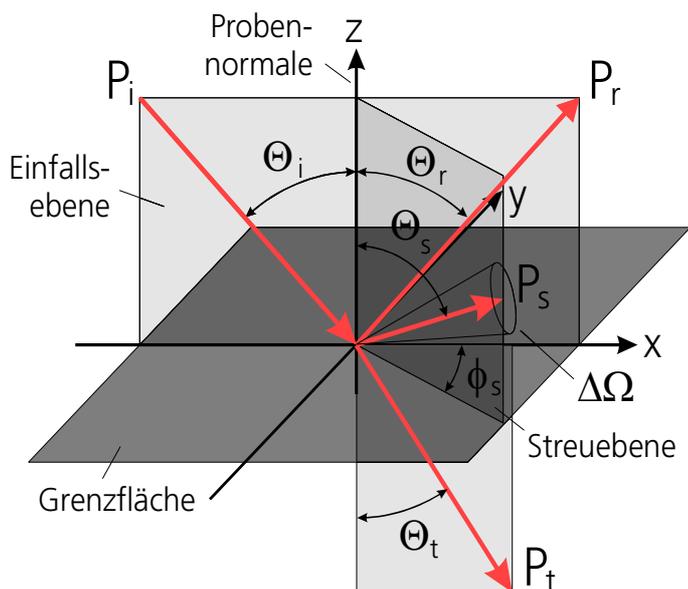


Abb. 2.1: Darstellung der Winkelbeziehung bei der Streuung einer Lichtwelle in Reflexionsrichtung

Das Verhältnis zwischen der in ein Raumwinkelement $\Delta\Omega$ gestreuten Leistung P_s und der Einfallleistung P_i in Abhängigkeit vom Streuwinkel Θ_s und Azimutwinkel ϕ_s wird als Indikatrix bezeichnet und ist wie folgt definiert:

$$\text{Indikatrix}(\Theta_s, \phi_s) = \frac{P_s(\Theta_s, \phi_s)}{P_i} \quad (2.1)$$

Das Verhältnis zwischen gestreuter Leistung P_s in Reflexionsrichtung und der Einfallleistung P_i

normiert auf das Raumwinkelement $\Delta\Omega$ und den Streuwinkel Θ_s wird BRDF⁸ genannt ([Stover, 1995]):

$$BRDF(\Theta_s, \varphi_s) = \frac{dP_s(\Theta_s, \varphi_s)}{P_i d\Omega \cos\Theta_s} \approx \frac{P_s(\Theta_s, \varphi_s)}{P_i \Delta\Omega \cos\Theta_s}. \quad (2.2)$$

Insbesondere durch die Normierung auf das Raumwinkelement $\Delta\Omega$ eignet sich die BRDF zum Vergleich von Messungen, die an verschiedenen winkelaufgelösten Streulichtmessaanordnungen durchgeführt wurden. Analog zur BRDF wurde die BTDF⁹ für die Streuung in Transmissionsrichtung definiert. Als Oberbegriff zur BRDF und BTDF wurde die BSDF¹⁰ ohne Festlegung der betrachteten Streulichtrichtung definiert.

Häufig ist nicht die Winkelabhängigkeit des gestreuten Lichtes, sondern das totale, von der Grenzfläche in eine Richtung gestreute Licht von Interesse. Das Verhältnis TS zwischen der innerhalb eines Winkelbereiches von $\Theta_{s,min}$ bis $\Theta_{s,max}$ gestreuten Lichtleistung P_s und der Einfallleistung P_i wird wie folgt definiert ([ISO/FDIS 13696, 1999]):

$$TS = \frac{P_s}{P_i}. \quad (2.3)$$

Die Größe des minimal erfassbaren Streuwinkels $\Theta_{s,min}$ ist laut ISO¹¹/FDIS¹² 13696 mit $\leq 2^\circ$ und die des maximal erfassbaren Streuwinkels $\Theta_{s,max}$ mit $\geq 85^\circ$ definiert. Die totale Streuung in Reflexionsrichtung (auch als Rückwärtsstreuung bezeichnet) wird dabei als TS_R und die in Transmissionsrichtung (auch als Vorwärtsstreuung bezeichnet) als TS_T bezeichnet. In einigen früheren Veröffentlichungen (z. B. [Schmitt, 1991], [Gliech, 1996], [Kadkhoda, 1997]) wurde die totale Streuung auch mit S bezeichnet.

Durch Integration der BSDF im Streuwinkelbereich von $\Theta_{s,min}$ bis $\Theta_{s,max}$ und über den Azimutwinkel φ_s lässt sich die totale Streuung auch aus der winkelabhängigen Messung bestimmen:

$$TS = \int_0^{2\pi} \int_{\Theta_{s,min}}^{\Theta_{s,max}} BSDF(\Theta_s, \varphi_s) \sin\Theta_s \cos\Theta_s d\Theta_s d\varphi_s. \quad (2.4)$$

Bei isotropen Grenzflächen ist die BSDF nur vom Streuwinkel Θ_s und nicht vom Azimutwinkel φ_s abhängig, wodurch sich die Berechnung der totalen Streuung vereinfacht:

⁸ **B**idirectional **R**eflectance **D**istribution **F**unction

⁹ **B**idirectional **T**ransmission **D**istribution **F**unction

¹⁰ **B**idirectional **S**catter **D**istribution **F**unction

¹¹ **I**nternational **O**rganization for **S**tandardization

¹² **F**inal **D**raft **I**nternational **S**tandard

$$TS = 2\pi \int_{\Theta_{s,min}}^{\Theta_{s,max}} BSDF(\Theta_s) \sin\Theta_s \cos\Theta_s d\Theta_s. \quad (2.5)$$

Neben der Definition der totalen Streuung TS als Verhältnis der gestreuten Leistung P_s zur Einfallleistung P_i ist die totale integrale Streuung TIS als Verhältnis der gestreuten Leistung P_s zur gesamten reflektierten Leistung definiert ([ASTM F 1048-87, 1987]):

$$TIS = \frac{P_s}{P_r + P_s}. \quad (2.6)$$

Als gesamte reflektierte Leistung wird dabei die Summe von reflektierter Leistung P_r und Rückwärtsstreuleistung P_s bezeichnet. Als Bezeichnung für TIS wurde z.B. auch S_{TIS} ([Schmitt, 1991]) verwendet.

Bei schwach streuenden Grenzflächen kann davon ausgegangen werden, dass die gestreute Leistung P_s gegenüber der reflektierten Leistung P_r vernachlässigbar klein ist, wodurch sich die Definition der totalen integrierten Streuung unter Hinzuziehung des Reflexionsvermögens R der Grenzfläche vereinfacht:

$$TIS \approx \frac{P_s}{P_r} = \frac{P_s}{R P_i}, \quad P_r \gg P_s. \quad (2.7)$$

Die Beziehung zwischen der totalen Streuung TS und der totalen integrierten Streuung TIS lautet für den allgemeinen Fall und den für schwach streuende Proben

$$\text{a) } TIS = \frac{1}{1 + \frac{R}{TS_R}}, \quad (2.8)$$

$$\text{b) } TIS = \frac{TS_R}{R}, \quad P_r \gg P_s.$$

Das Reflexionsvermögen R kann für unbeschichtete Grenzflächen direkt aus dem komplexen Brechungsindex des Bulkmaterials berechnet werden ([Hecht, 1994]), wobei n für den Realteil (auch Brechungsindex genannt) und k für den Imaginärteil (Absorptionskonstante) des komplexen Brechungsindex steht. Für den senkrechten Lichteinfall auf der Probenoberfläche lautet die Beziehung

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}, \quad \Theta_i = 0^\circ, \quad (2.9)$$

und lässt sich für absorptionsfreie Materialien vereinfachen zu

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}, \quad \Theta_i = 0^\circ, \quad k = 0. \quad (2.10)$$

2.2 Bandweitenbegrenzung des Streulichts

Wie in [Stover, 1995] dargestellt wird, kann eine saubere, reflektierende Grenzfläche als Zusammensetzung von sinusförmigen Oberflächen mit verschiedenen Frequenzen aufgefasst werden. Die Richtung der durch die Beugung an einem solchen Sinusgitter (Abb. 2.2) hervorgerufenen Beugungsordnungen kann in Abhängigkeit von der Lichtwellenlänge wie folgt beschrieben werden:

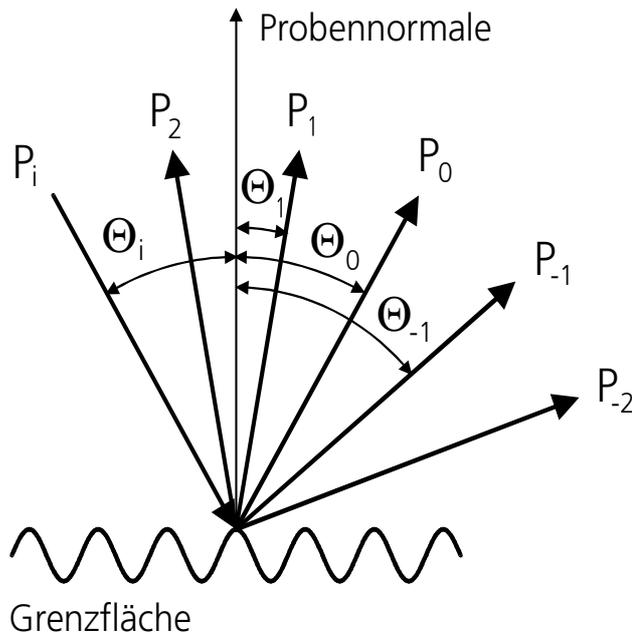


Abb. 2.2: Beugung an einem Sinusgitter (Darstellung der -2-ten bis 2-ten Beugungsordnung)

$$\sin \Theta_n = \sin \Theta_i + n f \lambda, \quad (n \in \mathbb{G}). \quad (2.11)$$

Hierbei steht Θ_i für den Einfallswinkel, unter dem die Lichtwelle mit der Wellenlänge λ auf ein Sinusgitter mit der Ortsfrequenz f trifft. Die Richtungen der verschiedenen Beugungsordnungen n werden dabei durch Θ_n beschrieben.

Bei Grenzflächen, bei denen die Amplitude der Rauheit vielfach kleiner als die verwendete Lichtwellenlänge λ ist, liegt der überwiegende Teil der gebeugten Leistung in den ± 1 -ten Beugungsordnungen ([J. Bennett, 1999], [Stover, 1995]). Diese Einschränkung ist z.B. bei allen gängigen Polituren in der Optik (bei Verwendung der Einsatzwellenlänge dieser Optiken als Messwellenlänge) erfüllt.

Da mittels einer Streulichtmessanordnung nur Streulicht innerhalb eines gewissen Streuwinkelbereiches $[\Theta_{s,\min}, \Theta_{s,\max}]$ erfasst werden kann, ergeben sich somit die Grenzen (auch Bandweitenbegrenzungen genannt) des detektierbaren Spektrums von Ortsfrequenzen $[f_u, f_o]$ bzw. Ortswellenlängen $[\lambda_u, \lambda_o]$ in Abhängigkeit der Lichtwellenlänge λ :

$$\begin{aligned} f_u &= \frac{1}{\lambda_o} = \frac{\sin \Theta_{s,\min} - \sin \Theta_i}{\lambda}, \\ f_o &= \frac{1}{\lambda_u} = \frac{\sin \Theta_{s,\max} - \sin \Theta_i}{\lambda}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Die Bandweitenbegrenzung gilt für alle mittels Streulichtmesstechnik erfassten Streulichtsignale. Das Wissen um die Begrenzung der detektierten Ortsfrequenzen ist wichtig beim Vergleich verschiedener Streulichtmessapparaturen, beim Vergleich von Messungen bei verschiedenen Lichtwellenlängen und beim Vergleich der Streulichtmessergebnisse mit anderen Messverfahren (siehe Abschn. 3.4).

2.3 Zusammenhang zwischen Streulicht und Oberflächentopographie

Aus den Streulichtmessergebnissen lassen sich direkt statistische Parameter zur Beschreibung der Topographie unbeschichteter, glatter Oberflächen ableiten. Das Kriterium einer glatten Oberfläche und somit die Grundbedingung für den Einsatz der folgenden Gleichungen ist dann erfüllt, wenn die RMS¹³-Rauheit σ der Oberfläche um ein Vielfaches kleiner als die Messwellenlänge λ ist ([Elson, 1983], [Stover, 1995], [J. Bennett, 1999]).

Die Beziehung zwischen dem totalen integrierten Streulicht TIS und der RMS-Rauheit σ der Oberfläche lässt sich unter Beachtung der Bedingung, dass die Korrelationslänge τ_c der Oberfläche vielfach größer als die Messwellenlänge λ ist, wie folgt angeben ([Elson, 1983]):

$$TIS = \left(\frac{4 \pi \sigma \cos \Theta_i}{\lambda} \right)^2. \quad (2.13)$$

Da in der vorliegenden Arbeit nur Einfallswinkel Θ_i nahe 0° betrachtet werden, vereinfacht sich die Beziehung zu

$$TIS = \left(\frac{4 \pi \sigma}{\lambda} \right)^2. \quad (2.14)$$

Unter Beachtung der Beziehung von TS zu TIS (Gl. 2.8) kann somit anhand einer RMS-Oberflächenrauheit σ die totale Rückwärtsstreuung TS_R einer unbeschichteten, glatten Oberfläche

¹³ **Root Mean Square** - quadratischer Mittenwert

unter Kenntnis des Reflexionsvermögens bestimmt bzw. die RMS-Rauheit aus der totalen Rückwärtsstreuung berechnet werden:

$$TS_R = R \left(\frac{4 \pi \sigma}{\lambda} \right)^2, \quad (2.15)$$

$$\sigma = \frac{\lambda}{4 \pi \sigma} \sqrt{\frac{TS_R}{R}}. \quad (2.16)$$

Die Betrachtung der Vorwärtsstreuung TS_T in Abhängigkeit von der RMS-Rauheit einer Oberfläche wurde in [Carniglia, 1979] vorgenommen:

$$TS_T = T \left[2 \pi \frac{\sigma}{\lambda} (n-1) \right]^2. \quad (2.17)$$

Anstelle des Reflexionsvermögens der Grenzfläche geht bei dieser Beziehung das Transmissionsvermögen und zusätzlich der Brechungsindex mit ein.

Bei den bisherigen Betrachtungen hat die Oberflächenrauheit und der Streulichtwert immer exakt die Bandweitenbegrenzungen der Ausgangsgröße. Das bedeutet, dass eine aus der totalen Streulichtmessung berechnete RMS-Rauheit einer Grenzfläche die Bandweitenbegrenzung hat, die bei der totalen Streulichtmessung vorlagen.

Um allgemeingültigere Aussagen über die statistische Oberflächenrauheit treffen zu können, eignet sich die Verwendung des Rauheitsspektrums PSD¹⁴, das angibt, mit welchem Anteil eine Rauheitskomponente der Ortsfrequenz f zur gesamten Oberflächenrauheit beiträgt. Die PSD steht in direkter Beziehung zur BRDF ([Stover, 1995])

$$BRDF = \frac{16 \pi^2}{\lambda^2} \cos \Theta_i \cos \Theta_s Q PSD(f_x, f_y). \quad (2.18)$$

Hier steht Q für einen optischen Faktor, der vom Brechungsindex des Materials sowie von Polarisation und Richtung des eingestrahlt und gestreuten Lichts abhängig ist. Die Variablen f_x und f_y stehen für die Ortsfrequenzen in X- und Y-Richtung der zweidimensionalen PSD.

Eine direkte Ableitung der PSD aus TS-Messungen ist aufgrund der fehlenden Streuwinkelinformation nicht möglich. In [Heber, 1996] wurde ein Lösungsansatz vorgestellt, bei dem die totale Streuung spektral vermessen und anhand des Wellenlängenverlaufes eine PSD berechnet wurde. Da das in dieser Arbeit realisierte Messsystem mit diskreten Wellenlängen betrieben wird, konnte dieser Ansatz, der eine spektrale Auflösung von wenigen Nanometern verlangt, nicht weiterverfolgt werden.

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde von einer einfachen Grenzfläche zwischen Luft und Substratmaterial ausgegangen. Sollten sich Schichten bzw. Schichtsysteme auf der Oberfläche

¹⁴ **P**ower **S**pectral **D**ensity

des Substrates befinden, müssten erst die Streulichteinflüsse der Grenzflächen sowie die Volumenstreuung voneinander getrennt werden, bevor Rückschlüsse auf die Grenzflächenrauheit mittels Streulichtmessung möglich sind. In [Pichlmaier, 1997] ist die Trennung von Streulichteinflüssen bei Einfach- und Zweifachschichten anhand von ARS-Messungen vorgestellt worden. Aufgrund der hinsichtlich Polarisationszustand und Detektionswinkel ausgesuchten Beleuchtungs- und Detektionsbedingungen lassen sich diese Ergebnisse nicht auf TS-Messungen übertragen.

Die Problematik des Einflusses der Rückseitenstreuung bei transparenten Proben auf die gemessene Rückstreuung einer Probe wird im folgenden Abschnitt behandelt.

2.4 Problem der Rückseitenstreuung an transparenten Proben

Bei der im vorigen Abschnitt betrachteten Beziehung zwischen der totalen Streuung und der Oberflächenrauheit (Gl. 2.16) wurde davon ausgegangen, dass die totale Streuung einer einzelnen Oberfläche bestimmbar ist. Dies trifft unmittelbar nur für den Fall zu, bei dem die Messwellenlänge vom Probenmaterialien stark absorbiert wird. Bei transparenten Proben tritt neben der Streuung an der Vorderseite der Probe auch eine Streuung an der Rückseite auf.

Laut [Kienzle, 1993] (ebenso in [Kienzle, 1994 b]) setzen sich die Anteile der totalen integralen Rückstreuung der Vorder- und der Rückseite einer transparenten, unbeschichteten Probe nach Gl. 2.19 zusammen, wobei TIS_R^I die totale integrale Rückstreuung der Vorder- und TIS_R^{II} die der Rückseite ist (R : Reflexionsvermögen der Grenzflächen, n : Brechungsindex des Substratmaterials),

$$TS_R = R TIS^I + R (1 - R)^2 n^2 TIS^{II}. \quad (2.19)$$

Die Streuung der Rückseite trägt somit um den Faktor $(1-R)^2 n^2$ stärker zur Gesamtrückstreuung der Probe TS_R als die Streuung der Vorderseite bei. Es wurden Mehrfachreflexionen und Mehrfachstreuungen sowie die Vorwärtsstreuung des einfallenden bzw. reflektierten Strahls an der Vorderseite vernachlässigt.

Unter Beachtung der Beziehung zwischen der totalen Streuung TS und der total integrierenden Streuung TIS für schwachstreuende Oberflächen (Gl. 2.8) ergibt sich

$$TS_{R,mess} = TS_R^I + (1 - R)^2 n^2 TS_R^{II}. \quad (2.20)$$

Unter der Annahme, dass die Messung der totalen Rückstreuung zweimal durchgeführt wird, wobei einmal die Probenseite I dem Strahl zugewandt ist (Messung a mit Ergebnis $TS_{R,a}$) und das andere Mal die Probenseite II (Messung b mit Ergebnis $TS_{R,b}$), ergibt sich Gl. 2.21. In Abb. 2.3 sind die Positionen der Probe zum Beleuchtungsstrahl dargestellt.

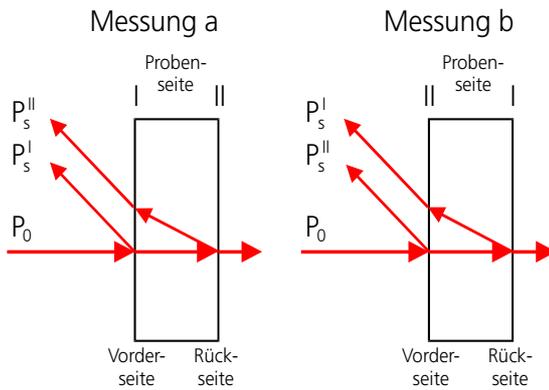


Abb. 2.3: Darstellung der Probenposition bei der Messung a und b zur Trennung der totalen Vorder- und Rückseitenstreuung

$$\begin{aligned} TS_{R,a} &= TS_R^I + (1-R)^2 n^2 TS_R^{II} \\ TS_{R,b} &= TS_R^{II} + (1-R)^2 n^2 TS_R^I \end{aligned} \quad (2.21)$$

Für die totale Rückstreuung der Vorder- und der Rückseite ergibt sich folglich:

$$\begin{aligned} TS_R^I &= \frac{TS_{R,a} - (1-R)^2 n^2 TS_{R,b}}{(1-R)^4 n^4}, \\ TS_R^{II} &= \frac{TS_{R,b} - (1-R)^2 n^2 TS_{R,a}}{(1-R)^4 n^4}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Somit ist es möglich, die totale Streuung der Vorder- und die der Rückseite mittels zweier totaler Streulichtmessungen voneinander zu trennen. Dieses Verfahren ist nur anwendbar, wenn sich die Streuung beider Flächen nicht um Größenordnungen unterscheidet, da andernfalls der Streulichtbeitrag der geringer streuenden Oberfläche durch die Streulichtschwankungen der höher streuenden Oberfläche überdeckt wird.

Unter der Annahme, dass die Vorder- und die Rückseite einer Probe die gleiche RMS-Rauheit und somit auch die gleiche totale Rückstreuung $TS_R^{I,II}$ aufweisen, ergibt sich als Sonderfall der Gl. 2.20 die Gl. 2.23 bzw. umgestellt die Gl. 2.24:

$$TS_{R,mess} = (1 + (1-R)^2 n^2) TS_R^{I,II}, \quad (2.23)$$

$$TS_R^{I,II} = \frac{TS_{R,mess}}{1 + (1-R)^2 n^2}. \quad (2.24)$$

Unter Kenntnis des Brechungsindex n des Probenmaterials und somit auch des Reflexionsvermögens R (Gl. 2.10) lässt sich somit die totale Rückstreuung einer einzelnen Probenseite auch anhand einer einzigen Messung an einer transparenten Probe bestimmen.

3 Streulichtmesstechnik

3.1 Überblick über Streulichtmessverfahren

3.1.1 Einteilung der Streulichtmessverfahren

Es gibt zwei Hauptvarianten, das Streulicht von festen Körpern zu messen:

- winkelaufgelöste Streulichtmessung (ARS-Messung) und
- totale bzw. totalintegrierte Streulichtmessung (TS-Messung bzw. TIS-Messung).

Im Folgenden werden die Prinzipien der beiden Varianten erläutert.

3.1.2 Winkelaufgelöste Streulichtmessung

Bei einer winkelaufgelösten Streulichtmessung (ARS-Messung) wird das Streulicht, das von einer Probe ausgeht, mit einem Detektor mit einem kleinen Raumwinkelement $\Delta\Omega$ gemessen. Durch Relativbewegungen zwischen Detektor, Probe und einfallenden Lichtstrahl können verschiedene Arten von Streuverteilungsfunktionen gemessen werden. In [Weigel, 1991] wurden die grundsätzlichen Varianten der ARS-Messanordnungen diskutiert. Hierbei wird zwischen eindimensionalen und zweidimensionalen Messanordnungen unterschieden. Eine zweidimensionale ARS-Messanordnung ist dadurch gekennzeichnet, dass der Detektor bezüglich des Streuwinkels Θ_s und des Azimutwinkels ϕ_s zur Probe ohne Änderung des Einfallswinkels Θ_i frei positioniert werden kann. Bei einer eindimensionalen Messanordnung ist eine unabhängige Einstellung der drei Winkel nicht möglich, da sich aufgrund der konstruktiven Begebenheiten der Messanordnung immer ein Winkel durch die Wahl von zwei der oben genannten Winkeln ergibt.

Bei der am Fraunhofer IOF Jena betriebenen ARS-Messanordnung handelt es sich um eine eindimensionale Messanordnung ([Duparré, 2000], [Neubert, 1994]), die bei einer Vielzahl von Wellenlängen (UV, VIS¹⁵, NIR¹⁶) eingesetzt werden kann. In Abb. 3.1 ist die ARS-Messanordnung mit Strahlengang und Detektoranordnung schematisch dargestellt. Der prinzipielle Aufbau einer ARS-Messanordnung entspricht dabei dem einer TS-Messanordnung (siehe Abschn. 4). Sie setzt sich ebenfalls aus Beleuchtungseinheit (mit Strahlquelle und Strahlaufbereitung), Detektionseinheit (mit Probenpositionierung und Detektorsystem) sowie Ansteuer- und Auswerteeinheit zusammen.

Die Detektoranordnung bewegt sich in einer Kreisbahn um die Probe, wobei der einfallende Strahl um einen Winkel von $0,5^\circ$ aus der Detektionsebene verkippt wurde und somit die Detektoranordnung den einfallenden Strahl bei einem Streuwinkel von $\Theta_s = 0^\circ$ nicht abschattet.

¹⁵ Visuell

¹⁶ Nahes Infrarot

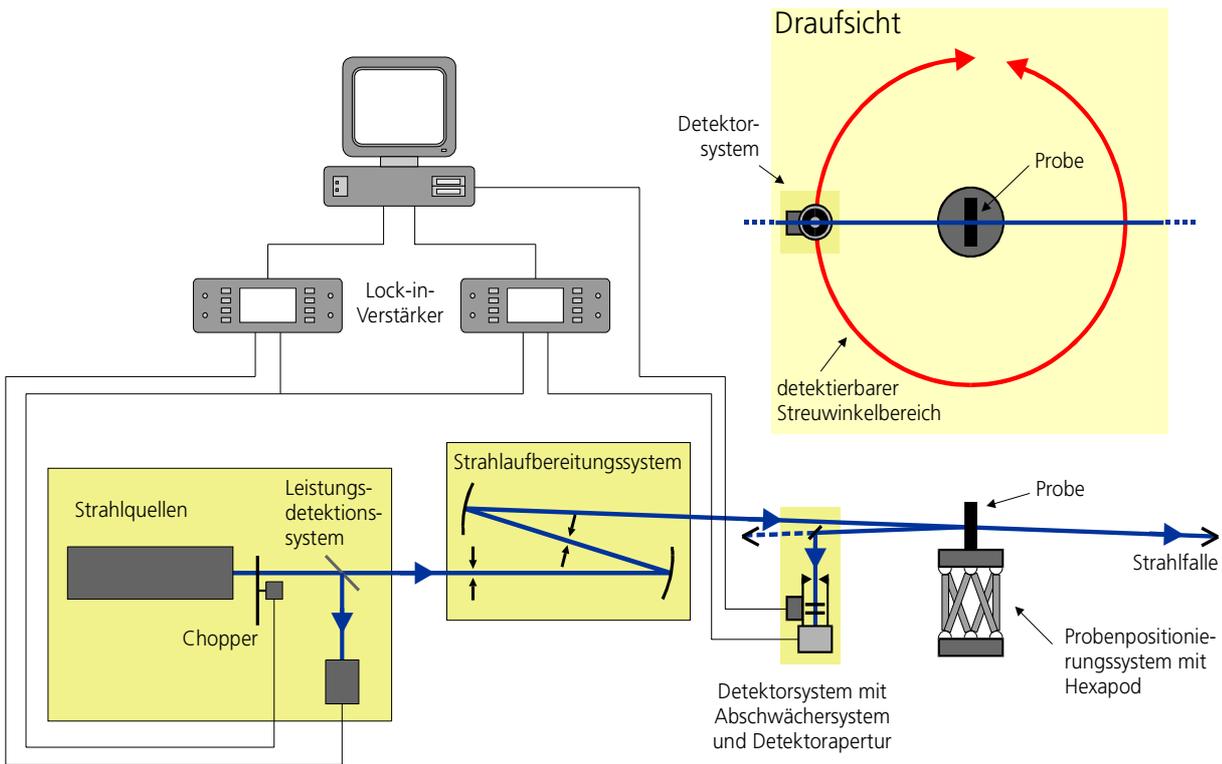


Abb. 3.1: Schematische Darstellung der ARS-Messanordnung im Fraunhofer IOF Jena

In Abb. 3.2 ist der prinzipielle Aufbau der Bewegungsbaugruppen der Detektionseinheit einer zweidimensionalen ARS-Messanordnung [Weigel, 1991] dargestellt. Aufgrund einer Vielzahl von Drehverstellern kann die Detektoranordnung jede beliebige Position zur Probe einnehmen.

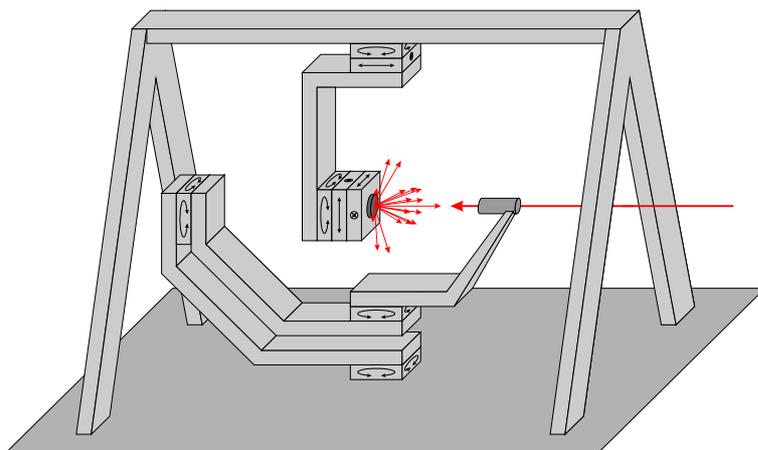


Abb. 3.2: Prinzipieller Aufbau der Bewegungsbaugruppen der Detektionseinheit einer zweidimensionalen ARS-Messanordnung nach [Weigel, 1991]

Weitere Beschreibungen eindimensionaler ARS-Messanordnungen, bei denen sich der Beleuchtungsstrahl in oder nahe der Detektionsebene befindet, sind in [Amra, 1993 a], [Kienzle, 1994 c], [Delplancke, 1997] und [Newell, 1997] zu finden. Zweidimensionale Streulichtmessanordnungen, bei denen der Detektor jede beliebige Position einnehmen kann, werden in [Bjuggren,

1997], [Truckenbrodt, 1992] (auch in [Weigel, 1991]) und [Mattsson, 1994] beschrieben.

Die prinzipiell mit einer ARS-Messanordnung erfassbaren Streulichtverteilungsfunktionen sind in Tab. 3.1 zusammengefasst.

Bezeichnung	variabler Parameter	Anwendung
Indikatrixmessung	Streuwinkel Θ_s	Messung der Streuverteilung
Azimummessung	Azimumwinkel φ_s	Anisotropiemessung
Probenazimummessung	Probenwinkel α	
Oberflächenscan	Verschiebeweg x oder y	Bewertung der Oberflächenhomogenität
Polarisationsmessung	Einstrahl- oder Detektorpolarisation	Bestimmung der Polarisations-eigenschaften
Reflexions- oder Beugungsmessung	Einfallswinkel Θ_i und Streuwinkel Θ_s mit $\Delta\Theta_s = 2\Delta\Theta_i$	Messung des direkten Reflexes oder von Beugungsordnungen in Abhängigkeit des Einfallswinkels

Tab. 3.1: Möglichkeiten der Erfassung von ARS-Streulichtverteilungsfunktionen

Die in Tab. 3.1 aufgeführten Streulichtmessvarianten lassen sich für bestimmte Aufgaben kombinieren. So kann z.B. durch die Kombination der Indikatrix- mit der Azimummessung das gesamte, von einem Probenort ausgehende Streulicht als zweidimensionale Streulichtverteilung detektiert werden sowie durch Kombination von Indikatrix und Oberflächenscan der Verlauf einer Indikatrix ortsabhängig bestimmt werden.

Anwendungsbeispiele für ARS-Messanordnungen wurden unter anderen in [Amra, 1994], [Duparré, 1994 a], [Duparré, 1997 c], [Elson, 1993], [Jakobs, 1998 a] und [McKnight, 2001] vorgestellt.

3.1.3 Totale / total integrierende Streulichtmessung

3.1.3.1 Einleitung

Bei einer Anordnung zur Messung des totalen bzw. total integrierten Streulichts (TS- bzw. TIS-Messung) befindet sich vor dem Detektor ein sammelndes Element, welches das Streulicht aus verschiedenen Streuwinkeln unter dem Verlust der Streuwinkelabhängigkeit zusammenfasst. Somit wird das Raumwinkelsegment des Detektors vergrößert und man kann mittels einer Messung das gesamte, in Rückwärts- und / oder Vorwärtsrichtung (Reflexions- und / oder Transmissionsrichtung) gestreute Licht eines großen Winkelbereichs erfassen. Als Integrations-element wird entweder eine Coblentzkugel (abbildende Halbkugel) oder eine Ulbrichtkugel (integrierende Kugel) verwendet. Da das gesamte Streulicht zu einem Messsignal zusammengefasst wird, ergibt sich im Gegensatz zur ARS-Messung ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis und eine schnellere Signalauswertung. Durch eine Verschiebung des Beleuchtungsfleckes auf der

Probenposition (Abscannen der Probe) ist eine schnelle Erfassung des gesamten Streulichtes auch großer Probenbereiche möglich. Es lassen sich robuste, einfach zu handhabende Aufbauten entwickeln.

Bis vor einigen Jahren wurde in der Literatur keine Unterscheidung zwischen Messanordnungen zur Bestimmung der totalen Streuung und denen zur Bestimmung der totalen integralen Streuung vorgenommen. Beide wurden unabhängig von ihrer Fähigkeit, die spekulare reflektierte Leistung P_r detektieren zu können, als TIS-Messanordnung bezeichnet. Erst durch die Einführung des Begriffes der totalen Streuung TS innerhalb der Normungsaktivitäten bei der Erstellung des Standards ISO 13696 [ISO/FDIS 13696, 1999] wurde auch begonnen, die Messanordnungen eindeutig als TS- bzw. TIS-Messanordnung zu bezeichnen.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Streulichtmessanordnungen handelt es sich ausschließlich um TS-Messanordnungen. Gleichwohl gelten die in diesem Kapitel gemachten allgemeinen Aussagen zu TS-Messanordnungen auch für TIS-Messanordnungen.

Entsprechend der Streulichtmessung in Rückwärts- und / oder Vorwärtsrichtung ergeben sich somit die in Abb. 3.3 dargestellten prinzipiellen Möglichkeiten des Einsatzes von TS-Messanordnungen.

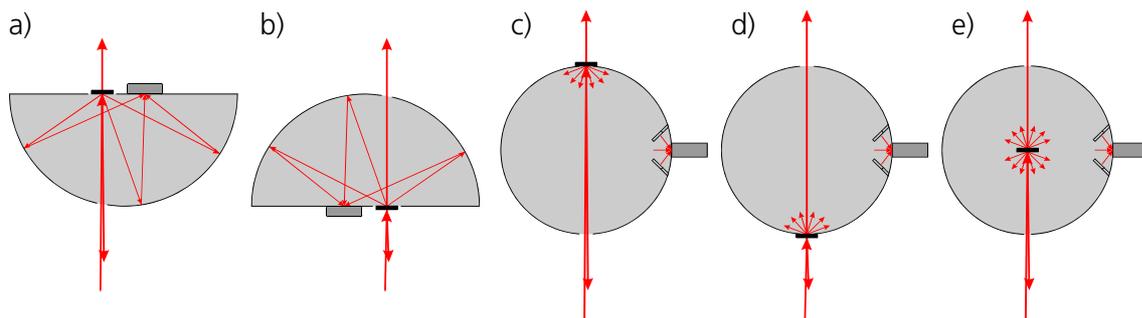


Abb. 3.3: Möglichkeiten der Erfassung des totalen Streulichtes: mittels Coblenzkugel in a) Rückwärtsrichtung oder b) Vorwärtsrichtung; mittels Ulbrichtkugel in c) Rückwärtsrichtung, d) Vorwärtsrichtung oder e) Rückwärts- und Vorwärtsrichtung

Mittels beider TS-Messplatzanordnungen kann Streulicht in Rückwärts- und / oder Vorwärtsrichtung detektiert werden. Bei Verwendung einer Ulbrichtkugel besteht die Möglichkeit, durch die Platzierung der Probe in die Kugelmittle Streulicht in Rückwärts- und Vorwärtsrichtung gleichzeitig zu detektieren.

Bei den weiteren Betrachtungen wird auf Unterschiede bei der Streulichtmessung in Rückwärts- und Vorwärtsrichtung an den entsprechenden Stellen hingewiesen. Sollten die jeweiligen Betrachtungen gleich oder äquivalent zwischen den beiden Streulichtmessrichtungen sein, werden die Betrachtungen am Beispiel für die Messung in Rückwärtsstreurichtung durchgeführt.

3.1.3.2 Coblenzkugel

Das Integrationsprinzip der Coblenzkugel besteht in der Abbildung des Streulichtes von der Probe innerhalb eines festen Winkelbereiches auf einen Detektionspunkt. Diese Abbildung kann im Idealfall durch einen hohlen, innenseitig hochreflektierend beschichteten Halbellipsoiden bei punktförmiger Probenbeleuchtung erreicht werden. Die Konstruktion dieses Halbellipsoids muss durch Teilung eines Ellipsoids entlang der großen Hauptachse (Rotationsachse) erfolgen, da sich dann die beiden geometrischen Brennpunkte in der Teilungsebene des Ellipsoids befinden. Liegt dann der Beleuchtungsfleck der Probe in einem der Brennpunkte, so wird das gesamte Streulicht in den anderen Brennpunkt, an dessen Stelle sich der Detektor befinden sollte, abgebildet (Abb. 3.4).

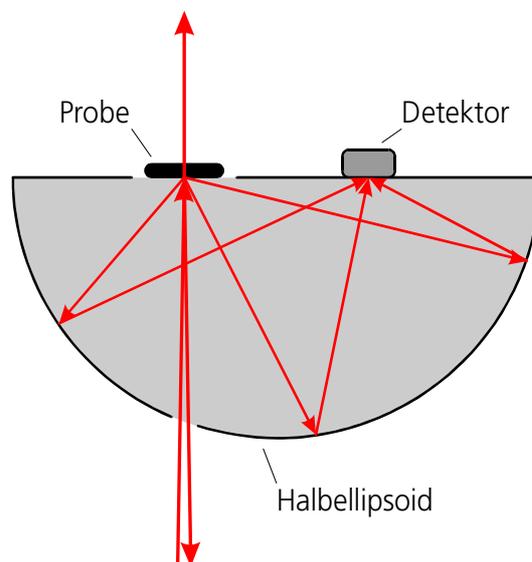


Abb. 3.4: Abbildung einer Coblenzkugel in Halbellipsoidform

Bei quasisenkrecht einfallendem Lichtstrahl auf der Probe, d.h. Einfallswinkel $\Theta_i \approx 0^\circ$, fallen bei der Messung in Rückwärtsstreuung die Eintrittsöffnung für den Lichtstrahl und die Austrittsöffnung für den Reflex zusammen. Die am Detektor messbare Lichtleistung P_{Det} lässt sich aus der Streulichtleistung P_s und dem Reflexionskoeffizienten der Coblenzkugelbeschichtung R_{CK} berechnen (Gl. 3.1).

$$P_{\text{Det}} = P_s R_{\text{CK}} \quad (3.1)$$

Als Schichtmaterial ist Aluminium verbreitet, da es innerhalb eines großen Spektralbereiches (UV bis IR) ein hohes Reflexionsvermögen R (100 nm - 560 nm: $R \approx 92\%$, 560 nm - 1 μm : $R > 86\%$, 1 μm - 30 μm : $R > 95\%$ [Palik, 1985]) aufweist. Durch die in Reaktion des Aluminiums mit dem Luftsauerstoff entstehende Al_2O_3 -Schicht kann in den VUV-/DUV¹⁷-Wellenlängenbereichen eine teilweise erhebliche Reduzierung des Reflexionsvermögens auftreten.

¹⁷ Deep Ultraviolet

Licht, das nicht direkt vom Beleuchtungsfleck innerhalb der Coblenzkugel ausgeht, wird nicht auf den Detektor abgebildet. Somit wird auch das durch die Luftstreuung am einfallenden oder reflektierten Strahl erzeugte Streulicht nur in unmittelbarer Nähe der Probenoberfläche auf den Detektor abgebildet.

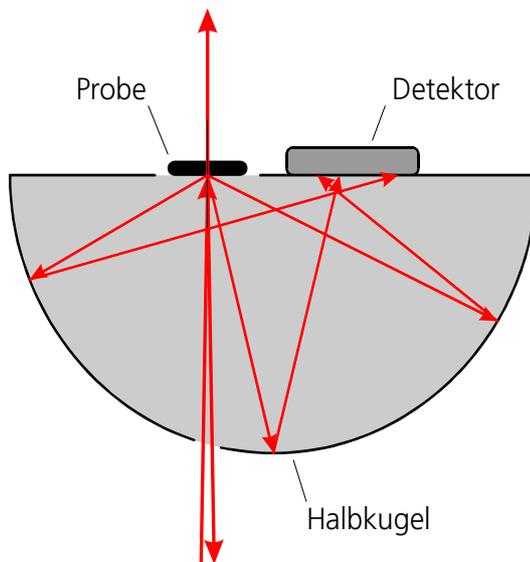


Abb. 3.5: Abbildung einer Coblenzkugel in Halbkugelform

Auf eine erfolgreiche Herstellung eines solchen Halbellipsoiden konnte in der Literatur bisher nur in [Bjuggren, 1996] und [Saito, 2001] verwiesen werden. Die Gründe hierfür sind bei den hohen Anforderungen an die Oberflächenrauigkeit und Formtoleranz zu suchen, da sich insbesondere die Nachbearbeitung des nicht rotationssymmetrischen Halbellipsoiden als sehr kompliziert und kostenintensiv erweist. Zudem geht bei einer nicht punktförmigen Probenbeleuchtung (z.B. Strahldurchmesser 1 mm) nicht das gesamte Streulicht von dem Brennpunkt des Halbellipsoiden aus, wodurch der Fokuspunkt zu einem Fokusfleck mit erheblich größeren lateralen Dimensionen aufgeweitet wird. Deshalb wird eine Halbkugel verwendet, da hier auf kommerziell gefertigte Körper zurückgegriffen werden kann. Diese Halbkugel bildet das gestreute Licht am Detektorort nicht als Fokuspunkt, sondern als einen Fokusfleck ab (Abb. 3.5). Um diesen Fleck so klein wie möglich zu halten, müssen sich Probe und Detektor soweit wie möglich in der Kugelmitte befinden.

In Abschn. 4.4.5 wird das Abbildungsverhalten bei den eingesetzten Coblenzkugeln dargestellt und mit denen von Halbellipsoiden unter Betrachtung der Beleuchtungsfleckgröße und des sich daraus ergebenden Fokusfleckdurchmessers D_{Fokus} verglichen.

Der detektierbare Streuwinkelbereich wird in erster Linie durch die Größe der Austrittsöffnung d_{Aus} im Verhältnis zum Abstand l_{Aus} zur Probe und von der Höhe h_{Halter} des Probenhalterrands im Verhältnis zur kleinsten Entfernung l_{Halter} zwischen Probenhalter und Beleuchtungsfleck beschränkt (Abb. 3.6 und 3.7).

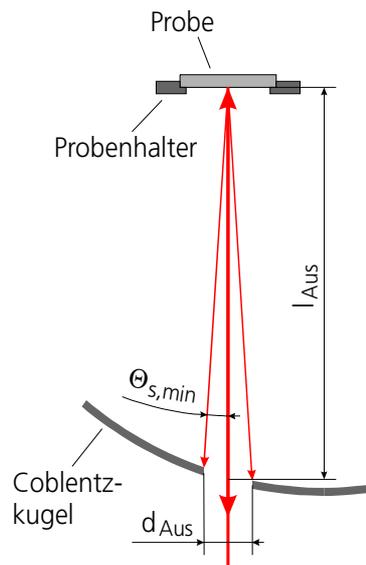


Abb. 3.6: Größen zur Bestimmung des minimal detektierbaren Streuwinkels

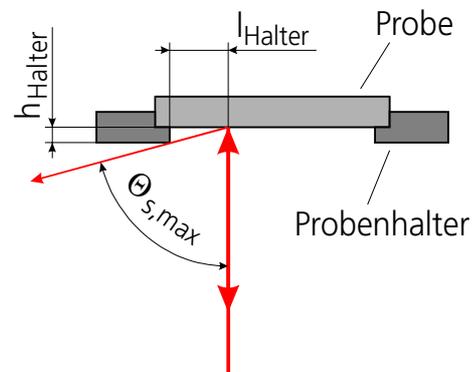


Abb. 3.7: Größen zur Bestimmung des maximal detektierbaren Streuwinkels

In Gl. 3.2 ist dargestellt, wie sich der minimal detektierbare Streuwinkel $\Theta_{s,\min}$ und der maximal detektierbare Streuwinkel $\Theta_{s,\max}$ aus den oben angeführten Größen ergibt.

$$\Theta_{s,\min} = \arctan \frac{d_{Aus}}{2 l_{Aus}}, \quad (3.2)$$

$$\Theta_{s,\max} = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{h_{Halte}}{l_{Halte}}.$$

Als Bezug für den minimal detektierbaren Streuwinkel $\Theta_{s,\min}$ ist somit die Austrittsöffnung des reflektierten (bei Messung in Reflexionsrichtung) bzw. transmittierten (bei Messung in Transmissionsrichtung) spekularen Strahls definiert, für den maximal detektierbaren Streuwinkel $\Theta_{s,\max}$ hingegen die Probennormalen. Da die Richtung des spekularen Strahl bei nicht senkrechtem Lichteinfall von der Probennormalen verschieden ist, unterscheidet sich somit in diesem Fall das Bezugssystem für die beide Winkelangaben. Zur Verdeutlichung sind in den Abb. 3.8 und 3.9 die Bezugssysteme für die Angaben des minimal detektierbaren Streuwinkel $\Theta_{s,\min}$ und des maximal detektierbaren Streuwinkel $\Theta_{s,\max}$ dargestellt.

Der mittels einer Coblenzkugel detektierbare Streuwinkelbereich kann auch durch Abbildung des Streulichtes auf die aktive Fläche und durch den Öffnungswinkel des Detektors eingeschränkt werden. Die Größe des Detektors muss dem Fokusfleck, der durch die Abbildung des Streulichtes auf die Detektorposition entsteht, angepasst werden. Die Berechnung des Abbildungsverhaltens in Zusammenhang mit der benötigten Detektorfläche und -öffnungswinkel wird ebenfalls in Abschn. 4.4.5 dargestellt.

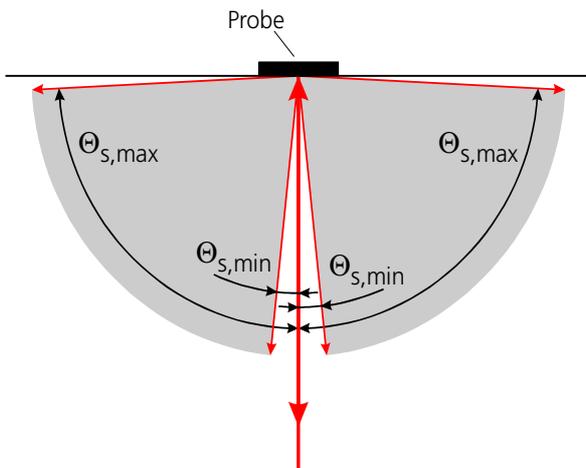


Abb. 3.8: Darstellung der Bezugssysteme für minimal und maximal detektierbaren Streuwinkel ($\Theta_{s,min}$ bzw. $\Theta_{s,max}$) bei senkrechtem Einfall

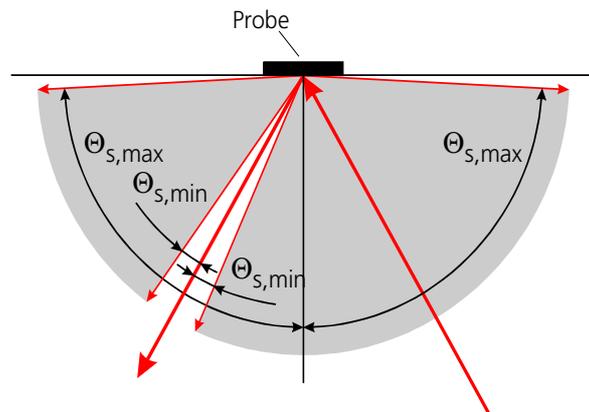


Abb. 3.9: Darstellung der Bezugssysteme für minimal und maximal detektierbaren Streuwinkel ($\Theta_{s,min}$ bzw. $\Theta_{s,max}$) bei nicht senkrechtem Einfall

Um einen möglichst großen Öffnungswinkel und eine homogene Ausleuchtung des Detektors zu erreichen, kann vor dem Detektor eine Streuscheibe bzw. eine kleine Ulbrichtkugel platziert werden ([Gliech, 1996], [Kadkhoda, 2000 c], [Gliech, 2002])

3.1.3.3 Ulbrichtkugel

Eine Ulbrichtkugel besteht aus einer hohlen, innenseitig diffusstreuenden Vollkugel (Abb. 3.10). Das von einer Probe ausgehende Streulicht wird von der hochstreuenden Schicht auf der gesamten Innenfläche der Ulbrichtkugel homogen verteilt. Der Detektor kann aufgrund der gleichmäßigen Ausleuchtung an jeder Stelle an der Ulbrichtkugelinnenfläche angebracht werden, wobei Baffles verhindern müssen, dass Licht direkt von der Probe oder der Eintrittsöffnung auf den Detektor treffen kann. Da das gesamte Licht, das auf die Ulbrichtkugelinnenwand gelangt, homogen verteilt wird, wird auch das durch Luftstreuung am einfallenden oder reflektierten Strahl erzeugte Streulicht detektiert. Um diesen Effekt, der zu einer Erhöhung des Untergrundsignals führt, zu minimieren, kann die Ulbrichtkugel in einer speziellen Atmosphäre (z.B. in Helium oder Stickstoff) oder im Vakuum betrieben werden. Da ein Betrieb im Vakuum zu kostenaufwendig ist und eine Stickstoff-Atmosphäre ein höheres Untergrundsignal erzeugt, wird bei der Vermessung wenigstreuender Proben die Ulbrichtkugel mit Helium gespült ([Kienzle, 1993], [Kadkhoda, 1995]).

Die am Detektor ermittelte Leistung P_{Det} entspricht der Streulichtleistung P_s der Probe unter Berücksichtigung der Leistungsverluste durch aus Eintritts- und Probenöffnung (Ports) austretenden Lichtes sowie durch die Absorption an der Ulbrichtkugelinnenwand. Diese Beziehung ist durch Gl. 3.3 [Labsphere, 1996] definiert. Hierbei ist $f_{p,x}$ das Verhältnis zwischen der Fläche des Ports $A_{p,x}$ zur Ulbrichtkugelinnenfläche A_{UK} . Die Summe aus Reflexions- und Rückstreuvermögen (im folgenden Gesamtreflexionsgrad genannt) wurde für die Ports mit $\rho_{p,x}$ und für die Ulbrichtkugelinnenwand mit ρ_{UK} bezeichnet.

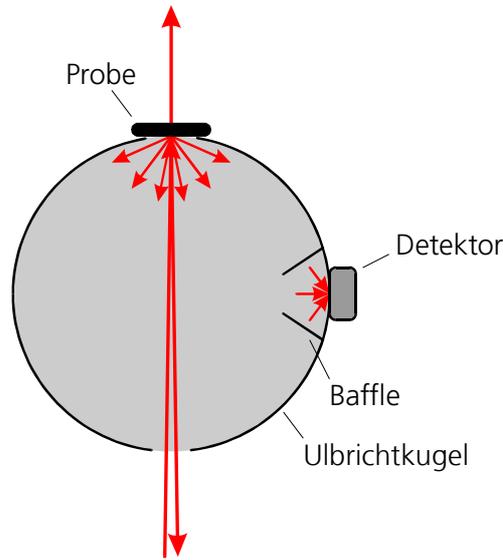


Abb. 3.10: Prinzipskizze einer Ulbrichtkugel

$$P_{Det} = P_S \frac{f_{Det} T_{Det}}{1 - \rho_{UK} \left(1 - \sum_{i=0}^N f_{P,i} \right) - \sum_{i=0}^N \rho_{P,i} f_{P,i}} , \quad (3.3)$$

$$f_{P,x} = \frac{A_{P,x}}{A_{UK}} .$$

Der Dividend von Gl. 3.3 beschreibt, wie groß der Anteil der Detektorportfläche in Bezug auf die Kugelfläche ist (f_{Det}), und wie viel Licht durch diese Fläche dringen kann (T_{Det}). Die Summe $\sum f_{p,i}$ in Gl. 3.3 gibt das Verhältnis der Gesamtportfläche zur Ulbrichtkugelinnenfläche an, die Summe $\sum \rho_{p,i} f_{p,i}$ die anteilige Gesamtreflexion der Portfläche.

Eine zur Messung der Rückwärtsstreuung unter einem Einfallswinkel von nahe 0° verwendete Ulbrichtkugel besitzt häufig drei runde Ports (siehe Abb. 3.10): einen Strahlein- und -austrittsport (ρ_{Aus} , d_{Aus}), einen Probenport (ρ_{Probe} , d_{Probe}) und einen Detektorport (ρ_{Det} , T_{Det} , d_{Det}). Unter der Beachtung, dass kein Licht vom Strahlein- und -austrittsport wieder in die Kugel reflektiert wird ($\rho_{Aus} = 0$), lässt sich Gl. 3.4 ableiten (d_{UK} - Ulbrichtkugellinnendurchmesser):

$$P_{Det} = P_S \frac{f_{Det} T_{Det}}{1 - \rho_{UK} (1 - (f_{Aus} + f_{Probe} + f_{Det})) - \rho_{Probe} f_{Probe} - \rho_{Det} f_{Det}} , \quad (3.4)$$

$$f_{P,x} = \frac{1}{4} \left(\frac{d_{P,x}}{d_{UK}} \right)^2 .$$

Die Übertragung des Streulichtes zum Detektor ist somit auch eine Funktion des Gesamtrefle-

xionsgrades ρ_{Probe} . Für eine reale Ulbrichtkugel ($d_{\text{UK}} = 250 \text{ mm}$, $\rho_{\text{UK}} = 0,98$, $\rho_{\text{Aus}} = 0$, $d_{\text{Aus}} \approx 18 \text{ mm}$, $\rho_{\text{Det}} \approx 0,1$, $\tau_{\text{Det}} \approx 0,9$, $d_{\text{Det}} = 14 \text{ mm}$, $d_{\text{Probe}} = 25 \text{ mm}$) ergibt sich ein in Abb. 3.11 dargestellter Verlauf des Übertragungsverhältnisses $P_{\text{Det}}/P_{\text{S}}$.

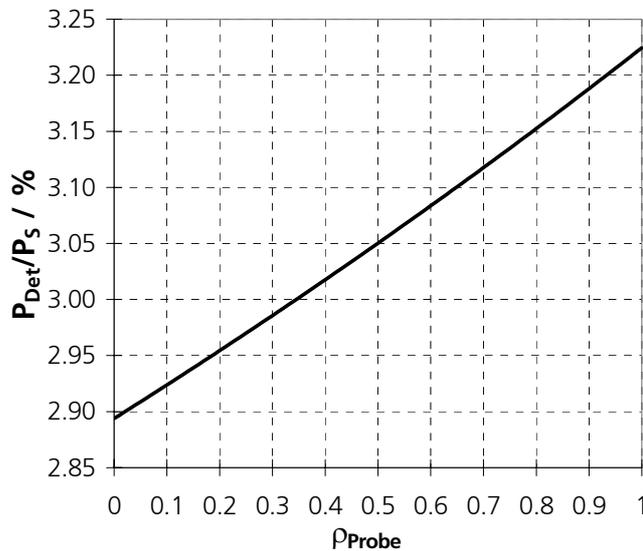


Abb. 3.11: Übertragungsverhältnis der betrachteten Ulbrichtkugel in Abhängigkeit vom Gesamtreflexionsgrad einer Probe

Wie aus Abb. 3.11 ersichtlich ist, beträgt das Übertragungsverhältnis dieser Ulbrichtkugel bei einer sehr stark streuenden Probe (z.B. 99%-Streunormal) 3,22% und bei einer schwachstreuenden Probe (z.B. antireflexbeschichtetes Glassubstrat, superpolierter Si-Wafer) 2,89%. Unter diesen Bedingungen ändert sich das Übertragungsverhältnis relativ um mehr als 10%. Bei einem Streuvermögen der Kugelinnenwand ρ_{UK} von 99% steigt die Abweichung des Übertragungsverhältnisses auf über 17% an. Diese Abhängigkeit ist bei der Auswertung der Messergebnisse zu beachten.

In Abb. 3.12 wurde das Übertragungsverhältnis der Ulbrichtkugel in Abhängigkeit des Streuvermögens der Kugelinnenwand aufgetragen. Es wurden die gleichen Einstellungen wie zur Berechnung des in Abb. 3.11 gezeigten Funktionsverlaufs verwendet. Für die Probe wurde ein Gesamtreflexionsgrad $\rho_{\text{Probe}} = 0,35$ (Si-Wafer bei 632,8 nm [Palik, 1985]) angenommen.

Die drei von der Firma Labsphere angebotenen Streumaterialien für Ulbrichtkugeln im VIS würden für die betrachtete Ulbrichtkugel die in Tab. 3.2 angeführten Übertragungsverhältnisse besitzen.

Diese verfügbaren Wandmaterialien haben einen eingeschränkteren spektralen Einsatzbereich als die der Coblenzkugelbeschichtung (z.B. Aluminium: Einsatzwellenlängenbereich 100 nm bis 30 μm , siehe Abschn. 3.1.3.2). Wie aus Tab. 3.3 und Tab. 3.4 ersichtlich ist, stehen für verschiedene Spektralbereiche verschiedene Materialien zur Verfügung.

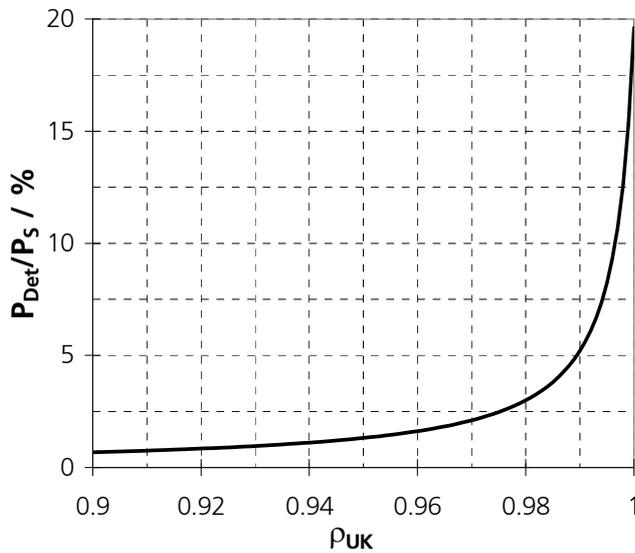


Abb. 3.12: Übertragungsverhältnis der betrachteten Ulbrichtkugel in Abhängigkeit vom Gesamtreflexionsgrad der Kugelinnenwand

Material	ρ_{UK}	P_{Det} / P_s
Duraflect™	0.96	1,6%
Spectrafect™	0.98	3,0%
Spectralon™	0.99	5,2%

Tab. 3.2: Streuvermögen [Labsphere, 1994] und sich daraus ergebendes Übertragungsverhältnis an von der Firma Labsphere angebotenen Ulbrichtkugelmaterien (VIS)

Material	Wellenlängenbereich
Bariumsulfat	350 nm - 1,4 μ m
Magnesiumoxid	250 nm - 8,0 μ m
Polytetrafluoroethylen	200 nm - 2,5 μ m
matte Goldschicht	700 nm - 20 μ m

Tab. 3.3: Auswahl von Ulbrichtkugelmaterien mit ihren Einsatzwellenlängen nach [ISO/FDIS 13696, 1999]

Material	Wellenlängenbereich
Duraflect™	350 nm - 1,4 μ m
Spectrafect™	250 nm - 8,0 μ m
Spectralon™	200 nm - 2,5 μ m
Infragold™	700 nm - 20 μ m
Infragold-LF™	MIR - FIR

Tab. 3.4: Auswahl von Ulbrichtkugelmaterien mit ihren Einsatzwellenlängen nach [Labsphere, 1994]

Bei Wellenlängen unterhalb von 200 nm steht kein geeignetes Wandmaterial für Ulbrichtkugeln zur Verfügung. Auch das bis ca. 200 nm einsetzbare Polytetrafluoroethylen (bzw. Spectralon) ist aufgrund von erhöhter Absorption und des dadurch hervorgerufenen Degradationsverhaltens als Wandmaterial für den Einsatz als sammelndes Element nicht geeignet. Als Diffusor vor dem Detektor einer Coblenzkugel konnte Spectralon aufgrund der dort auftretenden geringeren Leuchtdichte bis zu einer Wellenlänge von 193 nm mit Erfolg eingesetzt werden

Bei der Ulbrichtkugel wird der erfassbare Winkelbereich nur durch die Öffnung des Austrittsports und durch den Probenhalter begrenzt (Abb. 3.6 und 3.7, Gl. 3.2). Eine zusätzliche Begrenzung des Winkelbereiches durch die Kugelgeometrie, wie bei der Coblenzkugel durch das Abbildungsverhalten bedingt, existiert nicht. Aufgrund der homogenen Ausleuchtung der Kugelinnenfläche schränkt ein kleiner Detektoröffnungswinkel den erfassbaren Winkelbereich nicht ein, sondern führt nur zu einer Verminderung der detektierten Lichtleistung.

3.1.4 Zusammenfassung

Im Vergleich zu einer ARS-Messanordnung stehen bei einer TS-Messanordnung weniger Parameter zur Verfügung, die während der Messung frei verändert werden können. Aus der Literatur sind TS-Messanordnungen mit eindimensionaler ([Kadkhoda, 1995], [Chao, 1990]) oder zweidimensionaler Probenverschiebung (Messanordnungen aus diese Arbeit), Probendrehung ([Schmitt, 1991]) oder Wellenlängenänderung ([Roos, 1988 a], [Rönnow, 1994]) bekannt.

Ein detaillierter Literaturvergleich zu TS-Messanordnungen ist in Abschn. 3.3 zu finden.

Die vorgestellten Messprinzipien unterscheiden sich in Leistungsfähigkeit und Anwendungsbereich erheblich. Eine Zusammenstellung der oben angesprochenen Vorteile der einzelnen Messprinzipien ist in Tab. 3.5 (Vergleich ARS- und TS-/TIS-Messanordnung) und Tab. 3.6 (Vergleich Coblenz- und Ulbrichtkugelmessanordnung) zu finden.

ARS-Messanordnung	TS-/TIS-Messanordnung
<ul style="list-style-type: none"> - freie Einstellung der Einstrahl- und Detektionsparameter hinsichtlich Winkel und Polarisation - detaillierte Erfassung vieler Streuinformationen von einem Probenort 	<ul style="list-style-type: none"> - gutes Signal-Rausch-Verhältnis - schnelle Erfassung des gesamten Streulichts eines Probenortes - schnelle Erfassung großer Probenbereiche - einfachere Handhabung - schnelle Signalauswertung - robuster Aufbau möglich

Tab. 3.5: Darstellung der Vorteile von ARS- und TS-/TIS-Messanordnungen

Ulbrichtkugelmessanordnung	Coblenzkugelmessanordnung
<ul style="list-style-type: none"> - einfachere Justage - Möglichkeit, Streulicht in Rückwärts- und Vorwärtsrichtung gleichzeitig zu messen 	<ul style="list-style-type: none"> - besseres Signal-Rausch-Verhältnis - großes einsetzbares Wellenlängenspektrum bei gleicher Coblenzkugelbeschichtung - geringerer Einfluss der Luftstreuung / keine Notwendigkeit der He-Spülung

Tab. 3.6: Darstellung der Vorteile von Ulbricht- und Coblenzkugelmessanordnungen

3.1.5 Abgewandelte Arten der Streulichtmessung

Neben den zuvor beschriebenen Streulichtmessprinzipien (ARS und TS/TIS) werden noch abgewandelte Arten der Streulichtmessung zur Lösung spezieller Aufgabenstellungen eingesetzt. An dieser Stelle sollen nur einige Prinzipien zur Streulichtmessung kurz erwähnt werden. Wenn nicht anders angegeben, handelt es sich bei den zu vermessenden Proben um Festkörper.

Ein Messprinzip zur schnellen Erfassung zweidimensionaler Streulichtverteilungen verwendet eine große Anzahl von Detektoren, die in einer Ebene um die Probe angeordnet sind. Bei dem Defect Scattering Measurement Device (DSMD) [Truckenbrodt, 1992] wurden 44 Dioden viertelkreisförmig angeordnet und erfassen so das Streulicht in einer Indikatrizenhälfte. Durch eine schrittweise 360°-Drehung der Detektoranordnung um die Probennormale kann eine komplette zweidimensionale Streulichtverteilung gemessen werden. Nach dem gleichen Prinzip arbeitet auch die in [Cao, 1991] vorgestellte Messanordnung. Hierbei sind 87 Glasfaserkabel halbkreisförmig angeordnet und lassen sich um die Probenebene kippen. Ähnliche Messprinzipien wurden auch in [Rothe, 1994] und [Weigel, 1995] vorgestellt.

Die in [Bawolek, 1993] vorgestellte Messanordnung misst die Streulichtverteilung direkt mit einem Detektor, der aus 32 halbkreisförmigen und 32 keilförmigen Photodioden besteht, wodurch sich schnell Aussagen über die Streulichtverteilung und die Anisotropie der Probe treffen lassen. In [Mann, 2000] (ebenso in [Apel, 2001]) wird mittels einer Coblentzkugel das gestreute Licht auf einen orts aufgelösten Detektor so abgebildet, dass sich anhand dieser Messung Aussagen über die Winkelverteilung des Streulichts machen lassen.

Ein anderes Prinzip wird in [Dai, 1991] beschrieben. Hierbei erfasst eine CCD¹⁸-Kamera durch Abbildung des auf eine matte Glasscheibe gefallenen Streulichts eine zweidimensionale Streulichtverteilung. Mittels einer speziellen Anordnung der Fotodioden innerhalb eines Array wird das Streulicht in [Truckenbrodt, 1998] detektiert. In [Truckenbrodt, 1997] wird mittels eines Strahlteilers das Streulicht auf zwei Empfänger aufgeteilt, wobei der eine die radiale und der andere die azimutale Lichtverteilung detektiert. Durch direkte Abbildung des Streulichtes durch eine Linse auf ein Fotodiodenarray wird in [Thurn, 1983] eine zweidimensionale Streulichtverteilung gemessen. Das gleiche Prinzip wird in [Hielscher, 1997] zur Vermessung von Zellgewebe eingesetzt. In [Nefedov, 1997] wird das Streulicht von Flüssigkeiten mittels Linse auf einen homogenen Detektor abgebildet und somit integral erfasst.

Eine andere Methode zur Streulichtmessung in Flüssigkeiten [Maffione, 1997] arbeitet mit einem stark aufgefächerten Beleuchtungsstrahl und einem ebenfalls stark aufgefächerten Detektionsgebiet. Hierbei überlappen sich das Beleuchtungs- und das Detektionsgebiet so, dass von einem großen Volumen das angeregte Streulicht integral erfasst werden kann.

Unter Verwendung einer Ulbrichtkugel arbeitet eine Messanordnung zur Erfassung der gestörten Totalreflexion ([Oertmann, 1983]). Diese Messanordnung wird zur Bewertung von Polierprozessen an optischen Gläsern eingesetzt. Eine Coblentzkugel wird in [Wang, 1994] zur Bewertung von Streuverlusten in Wellenleitern eingesetzt. In [Demuschewski, 1993] wird ein Maskenbankinspektionssystem vorgestellt, das Streulicht in Reflexions- sowie in Transmissionsrichtung mittels elliptischer Streulichtempfänger detektiert.

Bei einem als US-Patent geschützten System zur TIS-Messung von Oberflächen [Schiff, 1997] wird eine abgewandelte Ulbrichtkugel zur Erfassung des Streulichtes verwendet. Gegenüber den

¹⁸ Charge Coupled Device

aus dem Literaturstand bekannten Ulbrichtkugelmessanordnungen unterscheidet sich dieses System durch einen absorbierenden, ringförmigen Bereich, der sich auf der Ulbrichtkugelinne wand um den Probenport befindet (Hauptanspruch). Dieser absorbierende Bereich dient dazu, den Einfluss der Streustrahlung zu unterdrücken, die durch das Beleuchtungssystem in die Ulbrichtkugel eingestrahlt wird. Des Weiteren wurde eine Variante vorgestellt, bei der der Austrittsport vergrößert wurde und das Streulicht der Probe, das durch den vergrößerten Austrittsport tritt, mittels eines Hohlspiegels auf einen anderen Empfänger gelenkt wird. Da der spekulare Reflex, bedingt durch eine Öffnung in dem Hohlspiegel, nicht erfasst wird, kann das Streulicht innerhalb zweier getrennter Bandweitengrenzen detektiert werden.

3.2 Wahl der verwendeten Messprinzipien und Wellenlängen

Als Aufgabe stand die Entwicklung eines Messsystems, das geeignet ist, Proben durch Streulichtmessungen innerhalb kurzer Zeit großflächig zu charakterisieren. Es sollten hierbei Superpolituren genauso wie technisch raue Oberflächen bei möglichst geringem technischen Aufwand untersucht werden können. Zugleich sollte die Möglichkeit bestehen, eine große Auswahl von Proben bei ihrer Einsatzwellenlänge zu untersuchen. Das Einsatzspektrum sollte Substrate und Beschichtungen für Optiken im VIS- und UV-Wellenlängenbereich, insbesondere die in der Lithographieentwicklung verwendeten Wellenlängenbereiche, umfassen.

Um die Proben großflächig in einer kurzen Zeit zu charakterisieren, wurde ein TS-Messsystem aufgebaut, das mit einem zweidimensionalen Probenpositioniersystem ausgerüstet wurde. Aufgrund des Einsatzes auch bei der DUV-Wellenlänge 193 nm und des Zieles, auch an Superpolituren Streulicht ohne großen technischen Aufwand (z.B. He-Spülung) messen zu können, kam nur das Coblentzkugelprinzip als Integrationsprinzip in Frage.

Bedingt durch das große Spektrum der zu untersuchenden Proben (Superpolituren bis zu technisch rauhen Oberflächen) hinsichtlich Oberflächenrauigkeiten und Korrelationslängen musste auch ein großer Wellenlängenbereich ausgesucht werden. Um eine möglichst einfache Handhabung bei gleichzeitig hoher Strahldichte und guten Möglichkeiten der Strahlformung und Rauschunterdrückung zu gewährleisten, wurde eine Reihe von CW¹⁹-Laserlichtquellen ausgewählt. Neben der Standardwellenlänge des HeNe-Lasers (632,8 nm) fiel die Wahl auf einen HeCd-Laser mit 325 nm und einen Ar⁺-Laser mit den Hauptwellenlängen 488 nm und 514,5 nm. Für die Untersuchung von technisch rauhen Oberflächen mit Oberflächenrauigkeiten von einigen 100 nm bis hin zu wenigen Mikrometern wurde ein CO₂-Laser mit einer Wellenlänge von 10,6 µm ausgewählt.

Diese Auswahl deckte auch einen großen Anteil der für die Probenmessungen bei den jeweiligen Einsatzwellenlängen benötigten Wellenlängen ab. Bedingt durch die Anforderung, auch an Bauelementen bei den jeweils in der Lithographieentwicklung verwendeten Wellenlängen Streulicht messen zu können, wurde der Einsatz von Lichtquellen bei 248 nm und 193 nm im Laufe des Bearbeitungszeitraumes der vorliegenden Arbeit notwendig. Da bei diesen Wellenlängen keine CW-Laserlichtquellen verfügbar sind, wurde eine Quecksilberdampfboogenlampe für die Wellenlängen 248 nm (und zugleich auch 365 nm) und eine Deuteriumlampe für 193 nm

¹⁹ Continuous Wave

eingesetzt.

Eine weitere Wellenlänge (HeNe-Laser bei 1,15 μm) wurde zur Untersuchung von Streueigenschaften an nodulären Defekten ([Guenther, 1982]) geplant. Obwohl Lichtquelle, Optik und Detektor angeschafft wurden, konnte diese Wellenlänge aufgrund der hohen Auslastung des Messsystems und der ständigen Anpassung der Wellenlängen an die Erfordernisse der Lithographieentwicklung nicht installiert und erprobt werden.

Bedingt durch die jüngste Entwicklung in der Lithographie zum Einsatz der Wellenlänge 157 nm wird z.Z. auch das TS-Messsystem für diese Wellenlänge erweitert. Diese im Rahmen des BMBF²⁰-Projektes EUREKA-EUROLASER CHOCLAB II geförderte Entwicklung ist nicht mehr Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Im Abschn. 4.11 werden ein Ausblick auf die Anforderungen an diese TS-Messanordnung definiert, einige zu erwartende Probleme angerissen und die konstruktive Umsetzung der zum Betrieb notwendigen Vakuumkammer vorgestellt. Erste, vorläufige Resultate beim Einsatz dieser Messanordnung werden in Abschn. 6.6 vorgestellt. Eine ausführliche Beschreibung dieser Messanordnung wurde in [Gliech, 2002] veröffentlicht.

Zu Beginn der Arbeiten lag der Schwerpunkt des Interesses an totalen Streulichtmessungen bei Untersuchungen in Rückwärtsrichtung. Aus diesem Grund wurde anfangs die Messung des Streulichtes ausschließlich in Rückwärtsrichtung geplant. In den letzten Jahren wuchs auf Seiten von Industriepartnern, u.a. bedingt durch den Einsatz immer kürzerer Einsatzwellenlängen in der Lithographie, zunehmend der Wunsch nach einer Möglichkeit der Messung des totalen Streulichtes auch in Vorwärtsrichtung. Aus diesem Grund wurde die Detektionseinheit in ein robustes und einfach zu bedienendes Umschwenk- und Arretiersystem eingesetzt ([Gliech, 1999 b]), das einen schnellen Wechsel zwischen der Streulichtmessung in Vorwärtsrichtung und der in Rückwärtsrichtung unter Beibehaltung der Strahlparameter am Probenort ermöglicht (siehe Abschn. 4.4.2).

Für Messungen zum Vergleich von TS-Messanordnungen im Rahmen eines Round-Robin-Experimentes innerhalb des ISO-Normungsprojektes EUREKA-EUROLASER CHOCLAB, Standard ISO 13696 [ISO/FDIS 13696, 1999] wurde zusätzlich eine Ulbrichtkugelmessanordnung versuchsweise aufgebaut ([Wuttig, 1999]). Aufgrund der schon oben angesprochenen hohen Auslastung des Messsystems und der ständigen Anpassung der Wellenlängen an die Erfordernisse der Lithographieentwicklung konnten keine umfassenden Vergleichsmessungen durchgeführt werden. Vergleiche mit anderen TS-Messanordnungen erfolgten mittels der im ISO-Normungsprojekt durchgeführten Round-Robin-Experimente (Abschn. 5.3.3 und 5.3.4).

²⁰ Bundesministerium für Bildung und Forschung

3.3 Vergleich mit anderen Streulichtmessaanordnungen / Stand der Technik

3.3.1 Einteilung

Seit 1986 wurden von 16 Firmen bzw. Forschungsinstituten Beschreibungen zu insgesamt 21 TS-/TIS-Messaanordnungen zur Streulichtbestimmung von Festkörperoberflächen veröffentlicht, die als sammelndes Element eine Ulbricht- oder Coblenzkugel verwenden. Eine Beschreibung der einzelnen Messaanordnungen mit Angabe der veröffentlichten technischen Parameter sowie konstruktiven bzw. funktionalen Besonderheiten ist in Abschn. 3.3.2 zu finden. Eine Zusammenfassung und Bewertung der aufgeführten Messaanordnungen wird in Abschn. 3.3.3 vorgenommen. In diesem Abschnitt wurde auch eine Gesamtübersicht über die wichtigsten technischen Parameter, soweit in den Literaturstellen angegeben, in Tab. 3.7 (Seiten 36 und 37) zusammengetragen. In dieser Tabelle wurden zum Vergleich der Parameter die beiden für die total integrierende bzw. totale Streulichtmessung relevanten Normen ASTM²¹ F 1048-87 ([ASTM F 1048-87, 1987]) und ISO 13696 ([ISO/FDIS 13696, 1999]) mit aufgenommen. Eine ausführliche Beschreibung der Normen erfolgt in Abschn. 5. Die Messaanordnungen, die im Zuge des Normungsvorhabens ISO 13696 an den beiden Round-Robin-Experimenten (Abschn. 5.3.3 und 5.3.4) teilgenommen hatten und zu denen in den letzten 15 Jahren keine technischen Beschreibungen gefunden wurden, wurden ebenfalls mit in die Betrachtungen und die Übersicht (Tab. 3.7) mit aufgenommen. Auf kommerziell verfügbare Spektralphotometer, die mit einem sammelnden Element prinzipiell auch zur TS-Messung genutzt werden können, wird an dieser Stelle nicht eingegangen, da bei diesen Aufbauten das Untergrundsignal im Bereich von $TS \approx 0,1\%$ bis $0,01\%$ liegt ([Roos, 1988 a], [PerkinElmer, 1993]) und sich somit nicht für die Vermessung von normalpolierten Substraten oder Proben mit wenigstreuenden Schichtsystemen eignet. Einsatzbereiche für solche TS-Aufbauten sind z.B. oxidierte Kupferspiegel ([Roos, 1988 b], [Roos, 1988 c]).

Zum Vergleich der Messaanordnungen wurden neben den Eigenschaften des Integrationskörpers (Art, Einfallswinkel Θ_i und erfassbarer Winkelbereich $[\Theta_{s,\min}, \Theta_{s,\max}]$) auch die Lichtquellen und deren verwendete Wellenlängen sowie die Detektoren angegeben. Der minimale Winkel $\Theta_{s,\min}$ des erfassbaren Winkelbereiches gibt an, ab welchem Winkel, bezogen auf den reflektierten Strahl, das Streulicht detektiert wird. Der maximale Winkel $\Theta_{s,\max}$ gibt an, bis zu welchem Winkel, bezogen auf die Probennormale, das Streulicht detektiert werden kann. Bei quasisenkrechttem Einfallswinkel Θ_i fallen der reflektierte Strahl und die Probennormale aufeinander. Bei stark abweichendem Einfallswinkel Θ_i ([Schmitt, 1991], [Bjuggren, 1996]) sind die beiden unterschiedlichen Bezugssysteme bei der Berechnung der detektierbaren Raumwellenlängen zu beachten. Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der Messaanordnungen wurden die elektronische Rauschgrenze, das Untergrundsignal und der kleinste detektierte Streuwert TS_{\min} angegeben. Die elektronische Rauschgrenze beschreibt das elektronische Rauschen (hauptsächlich Detektor und Verstärkerelektronik) im Verhältnis zur einfallenden Leistung und wird bei ausgeschalteter oder abgeblockter Lichtquelle gemessen. Der so je nach Detektorart ermittelte Spannungs- bzw. Stromwert wird ins Verhältnis zum Spannungs- bzw. Stromsignal gesetzt, der sich bei einer vollständigen Streuung der einfallenden Leistung an einer Probe ergeben würde. Das Untergrundsignal ist der Streuwert, der gemessen wird, wenn sich keine Probe in der Probenaufnahme befindet. Der Lichtstrahl durchläuft somit ungehindert den Integrationskörper, und es wird das Licht detektiert, das als Störlicht in den Integrationskörper gelangt. Der kleinste

²¹ American Society for Testing and Materials

gemessene Streuwert gibt den Wert an, der als Messbeispiel für die Empfindlichkeit der Messanordnung in der jeweiligen Literaturstelle veröffentlicht wurde. Er wurde entweder direkt als TS-Wert oder als kleinste zu messende Oberflächenrauheit σ an einer speziellen Probe angegeben.

3.3.2 Beschreibung einzelner Literaturstellen

Die Norm ASTM F 1048-87 ([ASTM F 1048-87, 1987]) (siehe Abschn. 5.2) beinhaltet nicht direkt die Standardisierung von Streulichtmessungen, sondern die von TIS-Messungen zur Bestimmung von Oberflächenrauheiten von optischen, opaken Oberflächen. Neben dem Verwendungszweck werden mit diesem Standard auch die Beleuchtungsquelle (HeNe-Laser mit 632,8 nm), das sammelnde Element (Coblentzkugel) und die Erfassung des spekularen Reflexes der Probe vorgeschrieben.

Die Norm ISO 13696 in der Fassung als FDIS [ISO/FDIS 13696, 1999] beschreibt den grundsätzlichen Aufbau einer TS-Messanordnung und deren Einsatz, ohne z.B. genaue Festlegungen hinsichtlich der zu verwendenden Lichtquelle zu machen. Als Integrationskörper wurden sowohl die Ulbricht- als auch die Coblentzkugel aufgenommen. In Abschn. 5.3.2 wird näher auf die einzelnen Bestandteile des Standards und Aktivitäten zu dessen Gestaltung eingegangen.

Vom Surface Evaluation Laboratory, Institute of Optical Research in Stockholm, Schweden wurden im betrachteten Zeitraum zwei TS-Messanordnungen veröffentlicht.

Die in [Mattsson, 1988] vorgestellte Messanordnung entspricht den Spezifikationen der Norm ASTM F 1048-87 ([ASTM F 1048-87, 1987]). Bei einem erfassbaren Winkelbereich von $2,3^\circ - 80^\circ$ wurde eine elektronische Rauschgrenze von 0,2 ppm bezüglich der einfallenden Intensität erreicht. Zum eigentlichen Untergrundsignal wurden keine Angaben gemacht. Als Beispiel für die Empfindlichkeit der Messanordnung wurde der aus dem Streulicht errechnete RMS-Rauheitswert $\sigma = 0,44 \text{ \AA}$ an einem Si-Wafer angegeben. Unter Verwendung von Gl. 2.14 und dem Reflexionskoeffizienten $R = 34,8\%$ [Palik, 1985] lässt sich ein Streuwert $TS = 0,27 \text{ ppm}$ für diese Si-Oberfläche berechnen. Diese Messanordnung wurde ebenfalls in [J. Bennett, 1989] vorgestellt.

Ebenfalls unter der Leitung von Mattsson entstand eine TS-Messanordnung, die mit einem CO_2 -Laser bei einer Wellenlänge von $10,6 \text{ \mu m}$ betrieben wird ([Bjuggren, 1996]). Als Integrationskörper wird hierbei eine Coblentzkugel in Halbellipsoidenform verwendet. Diese wurde aus einem Aluminiumvollkörper hergestellt und mittels Diamantdrehen endbearbeitet. Die Länge der großen Ellipsenachsen beträgt 288 mm und die der kleinen 270 mm. Der Beleuchtungsfleck befindet sich ca. 50 mm außerhalb des Ellipsoidenmittelpunktes. Durch eine Vielzahl von Portöffnungen im Integrationskörper können insgesamt fünf verschiedene Einfallswinkel in einem Bereich von $2,6^\circ$ bis 75° realisiert werden. Das Streulicht wird in einem Winkelbereich von $2,7^\circ - 75^\circ$ erfasst. Die nicht benötigten Öffnungen können durch Einsätze so verschlossen werden, dass sich auf der Innenseite des Ellipsoiden eine geschlossene Fläche ergibt. Das erreichte Untergrundsignal wurde mit $TS = 200 \text{ ppm}$ angegeben. Die Beleuchtungseinheit, bestehend aus Laser und Strahlaufbereitung, kann auch für eine ARS-Messanordnung verwendet werden. Hierbei wird der Integrationskörper mit einem drehbaren ARS-Detektor vertauscht. Als Empfänger wird ein pyroelektrischer Detektor eingesetzt. Der RMS-Rauheitswert, in dem die Messanordnung eingesetzt werden kann, wurde mit 50 nm bis 2 \mu m angegeben.

Eine spektroskopisch arbeitende TS-Messanordnung wurde im Department of Technology der

Universität Uppsala in Schweden aufgebaut und u.a. in [Rönnow, 1994] beschrieben. Bei dieser Messanordnung wurde nicht ein Spektralphotometer mit einem Integrationskörper erweitert, sondern es wurde eine eigenständige Beleuchtungseinheit konzipiert, die speziell auf die Strahlanforderungen einer TS-Messanordnung zugeschnitten war. Als Beleuchtungseinheit steht eine Quecksilber-Lampe zur Verfügung, bei der die Messwellenlänge im Bereich von 400 - 1000 nm mittels eines Monochromators ausgewählt werden kann. Das Streulicht kann mittels einer Coblentzkugel im Winkelbereich von $2,5^\circ$ - 70° gesammelt werden. Durch Drehung der Coblentzkugel kann das Streulicht entweder in Reflexions- oder in Transmissionsrichtung gemessen werden. Als Untergrundsignal wird für den gesamten Spektralbereich ein Streuwert $TS < 10$ ppm angegeben. Weitere Beschreibungen dieser Messanordnung sowie Anwendungsbeispiele finden sich in [Rönnow, 1993], [Rönnow, 1995] und [Rönnow, 1996].

In [Schmitt, 1991] wird eine Messanordnung beschrieben, die mit einer Ulbrichtkugel bei einer Wellenlänge von 632,8 nm arbeitet und bei der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Flugführung in Braunschweig eingesetzt wird. Die Messanordnung wurde so konzipiert, dass sich ein Einfallswinkel Θ_i von 30° ergibt und die Probe sich um den Beleuchtungsfleck drehen kann. Durch diese Probendrehung ändert sich die Orientierung von evtl. lateralen Probeninhomogenitäten, wie z.B. Kratzer oder Polierspuren, die durch das sich bei der Probendrehung ändernde Streulicht aufgespürt werden können. Durch eine Blende direkt vor der Probe wird das von der Probenrückseite reflektierte Licht unterdrückt. Die elektronische Rauschgrenze wurde mit kleiner 0,2 ppm angegeben und das Untergrundsignal mit 1 ppm. Aus dem angegebenen Ortswellenlängenbereich von 633 nm bis $16,5 \mu\text{m}$ lässt sich der erfasste Winkelbereich mit $2,2^\circ$ bis 90° bestimmen. Weitere Beschreibungen dieser Messanordnung sind in [Schmitt, 1988 a], [Schmitt, 1988 b] und [Schmitt, 1989] zu finden.

Im Department of Correlation Optics der Universität von Chernovtsy in der Ukraine wurde eine TS-Messanordnung aufgebaut, die mit einer Ulbrichtkugel und einem HeNe-Laser bei einer Wellenlänge von 632,8 nm arbeitet ([Angelsky, 1992]). Das von der Probe reflektierte Licht kann gleichzeitig auch interferometrisch untersucht werden. Angaben bezüglich des erfassten Winkelbereichs und der erreichten Messgenauigkeiten wurden nicht gemacht.

Die in [Kienzle, 1993] vorgestellte Messanordnung des Instituts für angewandte Physik an der Technischen Hochschule Darmstadt arbeitet ebenfalls mit einem HeNe-Laser bei 632,8 nm. Die verwendete Ulbrichtkugel erfasst die totale Rückwärtsstreuung in einem Winkelbereich von $1,9^\circ$ - 82° . Das elektronische Rauschen wird mit $TS < 0,01$ ppm angegeben. Um die Streuung des einfallenden Strahles an Luftmolekülen zu verhindern, kann die Ulbrichtkugel mit Helium gespült werden. Durch diese Maßnahme ließ sich das Untergrundsignal von $TS = 1,02$ ppm auf $TS = 0,07$ ppm senken. Somit konnte auch der kleinste Streuwert $TS_r = 0,64$ ppm an einem beidseitig superpolierten Quarzsubstrat gemessen werden. Die gleiche Messanordnung kann auch als ARS-Messanordnung verwendet werden. Hierzu muss die Ulbrichtkugel entfernt und ein um den Probenort schwenkbarer Detektor angebracht werden. Die Lichtquelle mit Strahlreinigung wird dabei nicht verändert. In [Kienzle, 1994 a] ist ebenfalls eine Beschreibung dieser Messanordnung mit weiteren Anwendungen zu finden.

In der durch [R. Schuhmann, 1996] beschriebenen TS-Messanordnung der LINOS Photonics GmbH in Göttingen wird eine Ulbrichtkugel verwendet. Diese detektiert das Streulicht in einem Winkelbereich von 2° bis 82° . Als Lichtquelle wird ein HeNe-Laser bei einer Wellenlänge von 632,8 nm genutzt. Das Untergrundsignal wurde mit $TS < 5$ ppm angegeben. Diese Messanordnung nahm an den Round-Robin-Experimenten im Rahmen des Normungsvorhabens ISO 13696 teil (vgl. Abschn. 5.3.3 und 5.3.4).

An der in [Reng, 1996] beschriebenen TS-Messaanordnung der Lasertechnik, Laser- und Medizin-Technologie gGmbH aus Berlin wurden ebenfalls Messungen innerhalb der Round-Robin-Experimente zum Normungsvorhaben ISO 13696 vorgenommen (siehe Abschn. 5.3.3 und 5.3.4). Als Integrationskörper wurde eine Ulbrichtkugel verwendet, die in einem Winkelbereich von $2,7^\circ$ bis 87° arbeitet. Das Untergrundsignal wurde mit $TS < 5$ ppm angegeben.

Die Melles Griot Technical Optics, Ltd., Isle of Man aus Großbritannien beteiligte sich an dem internationalen Round-Robin-Experiment zum Normungsvorhaben ISO 13696 (siehe Abschn. 5.3.4) mit einer TS-Messaanordnung mit Ulbrichtkugel ([Kadkhoda, 1995]). Diese hatte einen Durchmesser von 250 mm bei einem Einfallswinkel von $\approx 5^\circ$. Der HeNe-Laser erzeugte auf der Probe einen Beleuchtungsfleck von $\varnothing 1$ mm bei einem Untergrundsignal von 9 ppm.

Die vom Surface and Microanalysis Science Division, National Institute of Standards and Technology in Gaithersburg, USA vorgestellte TIS-Messaanordnung verwendet einen auf $9 \mu\text{m}$ fokussierten Laserstrahl (632,8 nm), um die Rückwärtsstreuung der Probenoberflächen mit einer hohen Ortsauflösung erfassen zu können ([Lorincik, 1997 a]). Die Oberfläche kann mittels eines Piezoscanners, an dem die Probe befestigt ist, mit bis zu 256×256 Messpunkten in einem Gebiet von $512 \times 512 \mu\text{m}^2$ gescannt werden. Als sammelndes Element wird eine Coblenzkugel mit einem Durchmesser von 132 mm verwendet. Bedingt durch die Eintrittsöffnung von $\varnothing 8$ mm beträgt der minimal erfasste Streuwinkel $3,5^\circ$. Der maximal erfasste Winkelbereich wird mit ca. 82° angegeben, ist aber durch die zu kleine Detektorfläche auf ca. 40° eingeschränkt. Die niedrigste RMS-Rauheit, die mit dieser Messaanordnung erfasst werden kann, wurde mit 0,05 nm angegeben. Das entspricht unter der Berücksichtigung des Reflexionsvermögens von 34,8% [Palik, 1985] einem TS-Wert von 0,34 ppm (Gl. 2.14). Unter den gleichen Bedingungen wurde das Äquivalent zur elektronischen Rauschgrenze mit 0,02 nm angegeben, was einem TS-Wert von 0,08 ppm entspricht.

Eine TS-Messaanordnung, die mit einer gepulsten Lichtquelle arbeitet, wurde in [Izawa, 1991] vorgestellt (Showa Optical Co., Ltd., Yokohama, Japan). Als Beleuchtungsquelle wird hier ein KrF-Laser mit einer Wellenlänge von 248 nm bei einer Impulslänge von 15 ns eingesetzt. Als Integrationskörper wird eine Coblenzkugel mit einem erfassbaren Winkelbereich von $1,2^\circ - 27^\circ$ verwendet. Durch eine Drehung der Coblenzkugel um ca. 54° um ihren Mittelpunkt kann ein Winkelbereich von $27^\circ - 81^\circ$ erfasst werden, der dann nicht mehr symmetrisch zum reflektierten Strahl ist. Anisotropien der Proben würden somit bei verschiedenen Probenorientierungen zur Coblenzkugel andere Ergebnisse liefern. Über die erreichten Empfindlichkeiten wurden keine Angaben gemacht.

In [Saito, 2001] und [Matsumoto, 2001] wird eine TS-Messaanordnung beschrieben (ASET Hiratsuka Research Center, Hiratsuka, Japan), die mit einem Excimerlaser bei der Wellenlänge 157 nm sowie mit einer Coblenzkugel als sammelndes Element arbeitet. Die Coblenzkugel hat die Form eines Ellipsoiden mit den Abmaßen 200 mm (große Ellipsenachse) und 193,6 mm (kleine Ellipsenachse). Die Messaanordnung kann sowohl die Rückwärts- als auch die Vorwärtsstreuung detektieren. Als Einfallswinkel stehen 0° , 45° und 70° zur Verfügung. Der erfasste Winkelbereich wurde mit 2° bis 85° angegeben. Die einzige Empfindlichkeitsangabe der Messaanordnung wurde über den Signal-Rausch-Abstand der Detektoren für Messwert- und Referenzerfassung abgeleitet. Danach sollte dieser groß genug sein, um einen TS-Wert von rund 100 ppm messen zu können. Der niedrigste veröffentlichte TS-Wert wurde an CaF_2 -Substraten mit $TS \approx 500$ ppm gemessen.

Bei der Jenoptik L. O. S. GmbH, Jena, wird zur TS-Messung eine Ulbrichtkugel mit $\varnothing 220$ mm

eingesetzt ([U. Schuhmann, 2001], [Kadkhoda, 2000 a]). Da die Laserlichtquellen der sich dort auch befindenden ARS-Messanordnung ([Weigel, 1991]) mitgenutzt werden können, ergibt sich ein Messwellenlängenbereich von 325 nm bis 1064 nm. Das Untergrundsignal wurde bei 632,8 nm mit 1,4 bis 4 ppm bei einer elektronischen Rauschgrenze von $< 0,01$ ppm angegeben.

Eine TIS-Messanordnung mit einem großen Spektrum an Lichtquellen wird in [H. Bennett, 1978] (auch in [Kadkhoda, 2000 a]) beschrieben. Bei dieser Messanordnung des Michelson Laboratory, Naval Air Warfare Center in China Lake, USA, können 6 Laserlichtquellen in einem Bereich von 325 nm bis 10,6 μm eingesetzt werden. Als Integrationskörper stehen zwei Coblentzkugeln zur Auswahl, die das Streulicht entweder in Transmissions- oder in Reflexionsrichtung auf einen Detektor abbilden. Welche der beiden Coblentzkugeln verwendet werden soll, kann über einen Umlenkspiegel eingestellt werden. Das Untergrundsignal wurde mit 20 ppm angegeben.

In [Apel, 2000 a] und [Apel, 2000 b] wurde eine TS-Messanordnung des Laser Laboratoriums Göttingen e.V. vorgestellt, mit der es möglich ist, auch TIS-Messungen durchzuführen, bei denen das spekulare reflektierte Licht mittels eines pyroelektrischen Detektors ermittelt werden kann. Die verwendete Coblentzkugel hat einen Durchmesser von 220 mm und ist innen mit einer Al-Schicht versehen worden. Der Abstand des Beleuchtungsflecks auf der Probe zum Mittelpunkt der Coblentzkugel beträgt 33 mm. Neben der Rückwärtsstreuung kann über eine Umlenkung des Strahls um die Coblentzkugel auch die Vorwärtsstreuung detektiert werden. Für die Strahlumlenkung um die ortsfeste Coblentzkugel wird eine zusätzliche Strahlaufbereitung in Form einer Linse verwendet. Die Einstrahlbedingungen hinsichtlich Laserstrahldurchmesser, -divergenz und -intensität sind somit nicht mehr mit denen bei der Messung der Rückwärtsstreuung identisch. Als Lichtquelle wird ein Excimer-Laser mit den Wellenlängen 248 nm (KrF, Pulsdauer 30 ns) und 193 nm (ArF, Pulsdauer 14 ns) verwendet. Der Beleuchtungsfleck auf der Probe hat eine Größe von ca. $0,7 \cdot 0,7 \text{ mm}^2$. Der erfassbare Winkelbereich wurde nicht angegeben. Zumindest der minimal detektierbare Streuwinkel $\Theta_{s,\text{min}}$ lässt sich mit $1,3^\circ$ aus der Angabe des Coblentzkugeldurchmessers (220 mm) und des Durchmessers der Eintrittsöffnung (5 mm) berechnen (Gl. 3.2). Als Detektor wird eine Si-Photodiode verwendet. Die Untergrundsignale wurden für die Rückwärtsstreuung mit 0,8 ppm bei 248 nm und 27 ppm bei 193 nm und für die Vorwärtsstreuung mit 43 ppm bei 193 nm angegeben.

Ebenfalls vom Laser Laboratorium Göttingen e.V. wurde in [Görling, 2001] eine Messanordnung vorgestellt, die zur Erfassung der totalen Streuung bei 193 nm eine Ulbrichtkugel verwendet. Die Innenseite der Ulbrichtkugel ist dabei mit einem nicht näher benannten Quantenkonverter-Material beschichtet, der die von der Probe kommende Streustrahlung (193 nm) in Strahlung mit einer höheren Wellenlänge umwandelt. Diese soll dann ebenfalls vom Quantenkonverter-Material, das dann als Lambert-Strahler arbeiten sollte, homogen in der Ulbrichtkugel verteilt und von einer Photodiode detektiert werden. Die Probenposition befindet sich in der Kugelmittle, so dass die Summe von totaler Rückwärts- und Vorwärtsstreuung ermittelt wird. Über die erreichten Empfindlichkeiten wurden keine Angaben gemacht.

Mit einer Ulbrichtkugel arbeitet die in [Kadkhoda, 1995] vorgestellte TS-Messanordnung des Laser Zentrum Hannover e.V., die das Streulicht bis zu einem Winkel von 88° detektiert. Der minimale erfassbare Winkel $\Theta_{s,\text{min}}$ kann durch 4 verschiedene Portblenden in einem Bereich von $1,15^\circ$ bis $3,43^\circ$ eingestellt werden. Als Beleuchtungsquellen stehen neben einem HeNe-Laser mit 632,8 nm auch ein HeNe-Laser mit 545 nm und ein Nd:YAG-Laser mit $1,064 \mu\text{m}$ zur Verfügung. Das Untergrundsignal wird mit $TS = 1,4$ ppm angegeben und lässt sich durch He-Spülung der Ulbrichtkugel auf $TS = 0,46$ ppm senken.

Ebenfalls im Laser Zentrum Hannover e.V. wurde eine weitere TS-Messanordnung für die Erfassung der Rückwärtsstreuung bei 193 nm und 157 nm aufgebaut ([Kadkhoda, 1999 a],

[Kadkhoda, 2000 c]). Für diese Wellenlängen wird eine Coblenzkugel als sammelndes Element mit einem Durchmesser von 260 mm verwendet. Die Innenwand der Coblenzkugel wurde mit einer Al-Schicht mit MgF_2 -Schutzschicht beschichtet. Bei 193 nm wird eine Ulbrichtkugel als Diffuser und bei 157 nm eine Streuscheibe vor dem PMT²² eingesetzt. Der erfasste Winkelbereich wird mit $2^\circ - 85^\circ$ bei 193 nm und mit $2^\circ - 40^\circ$ bei 157 nm angegeben. Als Strahlquellen kommen wahlweise eine Hohlkathodenlampe (193 nm) oder eine Deuteriumlampe (193 nm und 157 nm) jeweils mit einem Strahldurchmesser < 3 mm am Probenort zum Einsatz. Die Wellenlängenselektion erfolgt mittels eines Gittermonochromators. Die gesamte Messanordnung kann wahlweise an Luft (nur 193 nm) oder mit He- bzw. N_2 -Spülung betrieben werden. Ein Betrieb im Vakuum ist bis $2 \cdot 10^{-4}$ mbar möglich.

Das in dieser Arbeit vorgestellte und selbstentwickelte TS-Messsystem besteht aus drei, körperlich getrennten Messanordnungen jeweils für den UV-/VIS-, den NIR-/MIR²³- und den VUV-/DUV-Wellenlängenbereich. Jede dieser Messanordnungen wurde getrennt in die Tab. 3.7 aufgenommen. Die Unterteilung in drei einzelne Messanordnungen ist aus folgenden Gründen notwendig:

- Bedingt durch eine vollständig andere Strahlführung und Optik bei der Strahlaufbereitung sowie des Detektionssystems bot es sich an, eine separate Messanordnung für den NIR-/MIR-Wellenlängenbereich aufzubauen, da somit die erheblichen Umrüstzeiten beim Wechsel zwischen den beiden Wellenlängenbereichen entfallen.
- Durch die Absorption an Sauerstoff ist der Einsatz einer vollständig gekapselten Messanordnung bei der Wellenlänge 157 nm notwendig. Hierbei sollte neben einer Spülung mit Stickstoff auch die Möglichkeit bestehen, im Vakuum zu messen. Aus diesem Grund wurde eine TS-Messanordnung in einem Vakuumkammersystem aufgebaut. Um den Anschluss an Messungen in Luftatmosphäre zu gewährleisten, sollte die Wellenlänge 193 nm neben der UV-/VIS-Messanordnung auch in der gekapselten Messanordnung möglich sein. Zusätzlich ist eine Senkung des Untergrundsignals beim Einsatz im Vakuum auch bei 193 nm zu erwarten.

Der Durchmesser der eingesetzten und mit Aluminium beschichteten Coblenzkugeln beträgt 350 mm. Der erfasste Winkelbereich beträgt 2° bis 85° (VUV-VIS) und $2,5^\circ$ bis 85° (IR). Der maximal erfassbare Streuwinkel im VUV-DUV ist noch nicht gesichert. Neben der Messung der Rückwärtsstreuung kann auch im VUV-VIS-Bereich wahlweise die Vorwärtsstreuung erfasst werden. Die Änderung der Detektionsrichtung erfolgt mittels der Drehung der gesamten Detektionseinheit um die Probenebene, so dass die Einstrahlbedingungen am Probenort unverändert bleiben. Eine ausführliche Beschreibung des Messsystems mit einem Ausblick auf die VUV-TS-Messanordnung befindet sich in Abschn. 4.

²² Photomultiplier

²³ Mittleres Infrarot

3.3.3 Zusammenfassung und Bewertung

In Tab. 3.7 (Seiten 36 und 37) wurden die Eigenschaften der in Abschn. 3.3.2 angeführten Messanordnungen zusammenfassend dargestellt. Zu jeder Messanordnung wurde die Art des sammelnden Elements und dessen Parameter, die Lichtquellen und die verwendeten Wellenlängen sowie erreichten Beleuchtungsfleckgrößen und die eingesetzten Detektoren angegeben. Als Bewertungskriterien dienen die elektronische Rauschgrenze, das Untergrundsignal und der minimal detektierte Streuwert. Vervollständigt wird die Übersicht durch die Angabe von evtl. Optionen und den verwendeten Literaturstellen.

Ein Überblick über alle eingesetzten Messwellenlängen der vorgestellten TS-/TIS-Messanordnungen ist in Abb. 3.13 zu sehen.

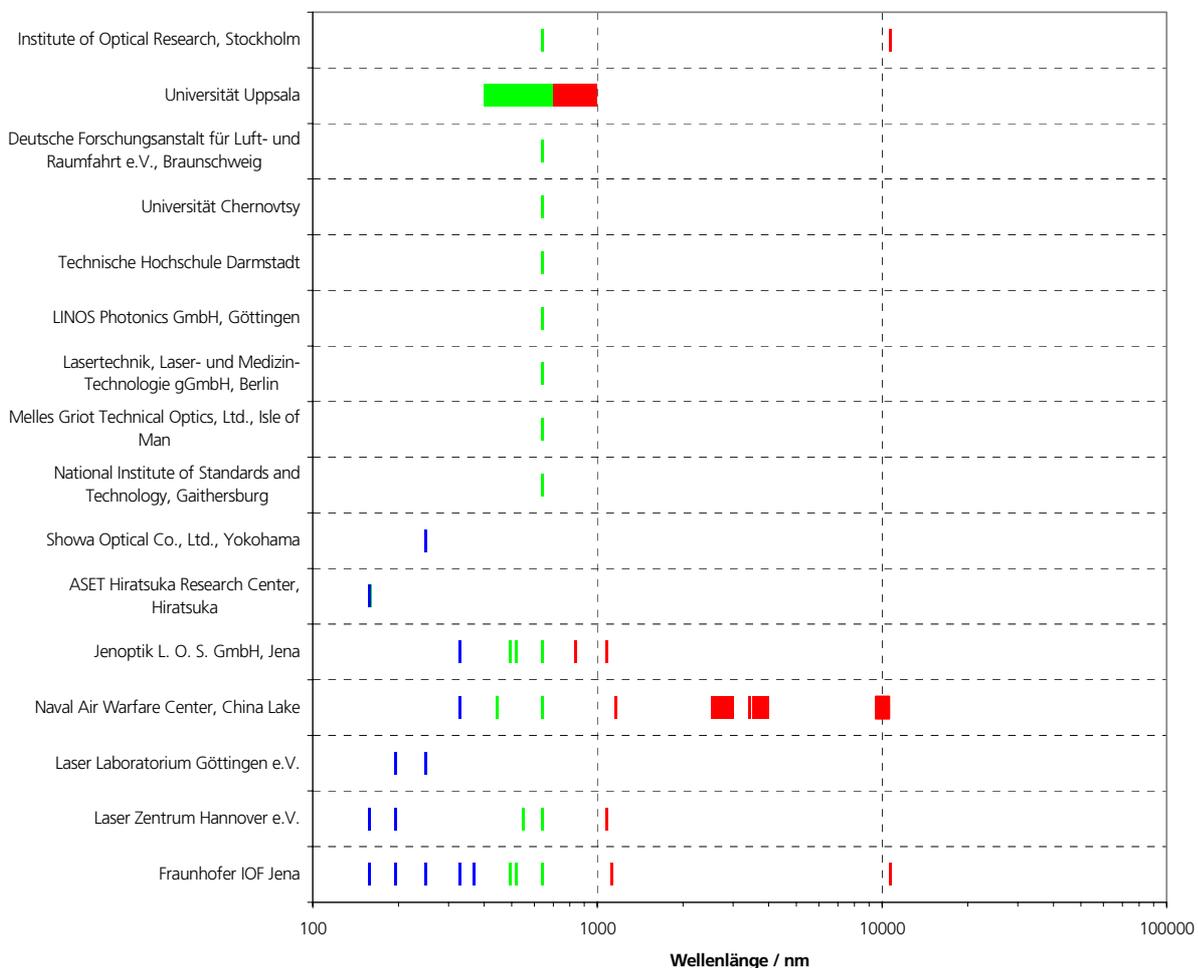


Abb. 3.13: Messwellenlängen, die in den vorgestellten TS-/TIS-Messanordnungen verwendet werden (siehe Tab. 3.7)

Anhand dieser Übersicht wird deutlich, dass eine große Anzahl der TS-Messanordnungen bei 632,8 nm betrieben werden. Insgesamt 8 Messanordnungen arbeiten ausschließlich bei dieser Wellenlänge. Eine Messanordnung arbeitet mit einem kontinuierlich verstellbaren Wellenlängenspektrum, bei dem auch die 633 nm enthalten sind. Die Messanordnungen der Showa Optical

Co., des ASET Hiratsuka Research Center und des Laser Laboratoriums Göttingen sind die einzigen, die ausschließlich bei UV-Wellenlängen eingesetzt werden. Die vom Institute of Optical Research, von der Jenoptik L. O. S., vom Naval Air Warfare Center, vom Laser Zentrum Hannover und vom Fraunhofer IOF vorgestellten Messanordnungen sind die einzigen, die mehrere Lichtquellen verwenden. Hierbei bieten die in dieser Arbeit realisierten Messanordnungen das größte Wellenlängenspektrum (157 nm bis 10,6 μm). Ein ähnlich großes Wellenlängenspektrum wird ansonsten nur von der TS-Messanordnung des Naval Air Warfare Center mit 325 nm bis 10,6 μm und von zwei ARS-Messanordnungen mit 325 nm bis 10,6 μm (Jenoptik L. O. S. aus [Weigel, 1991], [U. Schuhmann, 1997]) und mit 458 nm bis 10,6 μm (Ecole National Supérieure de Physique de Marseille²⁴ aus [Amra, 1993 a]) verwendet.

In Abb. 3.14 wurde das sich aus den verwendeten Lichtwellenlängen und dem erfassbaren Winkelbereich ergebende Raumwellenlängenspektrum (Gl. 2.12) für die vorgestellten Messanordnungen dargestellt.

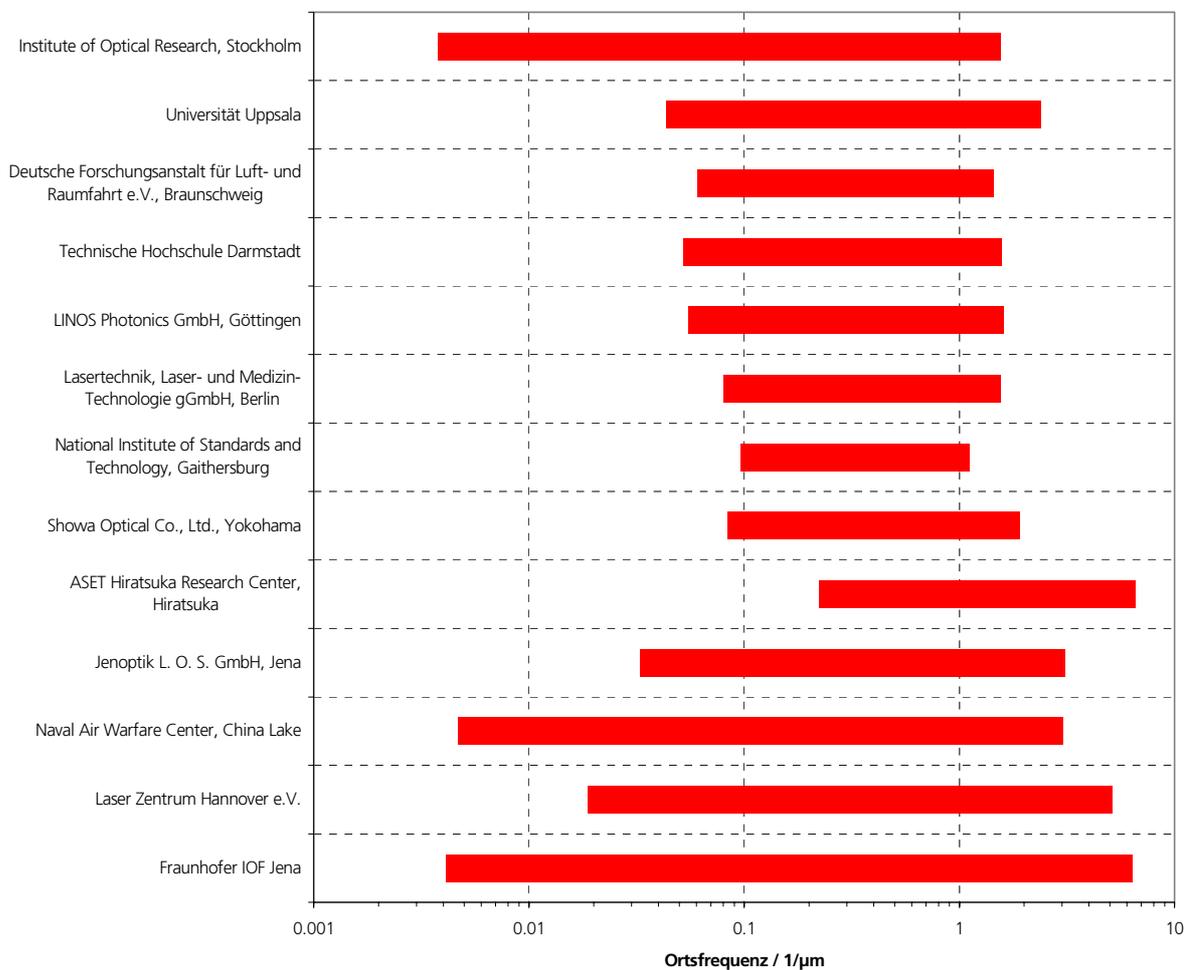


Abb. 3.14: Ortsfrequenzspektrum, das mittels der vorgestellten TS-/TIS-Messanordnungen detektiert werden kann (siehe Tab. 3.7)

²⁴ Domaine Universitaire de Sainte Jerome, Marseille, Frankreich

Institut / Firma, Land	sammelndes Element ^{a)}	TS _T / TS _R	Einfalls- winkel Θ_i	erfassbarer Winkel- bereich $\Theta_{s,min}$ - $\Theta_{s,max}$	Lichtquellen, Beleuchtungsfleckgröße
	CK	TS _R	$\approx 0^\circ$	$< 5^\circ - > 70^\circ$	HeNe-Laser, 632,8 nm
	UK / CK	TS _T / TS _R		$2^\circ - 85^\circ$	Laser oder andere Strahlungsquellen
Surface Evaluation Laboratory, Institute of Optical Research, Stockholm, Schweden	CK	TS _R	$\approx 0^\circ$	$2,3^\circ - 80^\circ$	HeNe-Laser, 632,8 nm
	CK ^{b)} , $\varnothing 288 \text{ mm}^{\text{c)}}$ / $270 \text{ mm}^{\text{d)}}$	TS _R	$2,6^\circ, 30^\circ,$ $45^\circ, 60^\circ,$ 75°	$2,7^\circ - 75^\circ$	CO ₂ -Laser, 10,6 μm , $\varnothing 1 \text{ mm}$
Department of Technology, Uni- versität Uppsala, Schweden	CK, $\varnothing 252 \text{ mm}$	TS _T / TS _R	$\approx 0^\circ$	$2,5^\circ - 70^\circ$	Hg-Lampe, 400 - 1000 nm
Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Flugführung, Braunschweig	UK, $\varnothing 250 \text{ mm}$	TS _R	30°	$2,2^\circ - 90^{\text{e)}}$	HeNe-Laser, 632,8 nm
Department of Correlation Optics, Universität Chernovtsy, Ukraine	UK	TS _R	0°		HeNe-Laser, 632,8 nm
Institut für angewandte Physik, Technische Hochschule Darmstadt	UK, $\varnothing 152 \text{ mm}$	TS _R	8°	$1,9^\circ - 82^\circ$	HeNe-Laser, 632,8 nm
LINOS Photonics GmbH, Göttin- gen	UK, $\varnothing 150 \text{ mm}$	TS _R	$< 1,5^\circ$	$2^\circ - 82^\circ$	HeNe-Laser, 632,8 nm, $\varnothing 1,5 \text{ mm}$
Lasertechnik, Laser- und Medizin- Technologie gGmbH, Berlin	UK, $\varnothing 150 \text{ mm}$	TS _R	$< 1,5^\circ$	$2,9^\circ - 70^\circ$	HeNe-Laser, 632,8 nm, $\varnothing 1,5 \text{ mm}$
Melles Griot Technical Optics, Ltd., Ilse of Man, Großbritannien	UK, $\varnothing 250 \text{ mm}$	TS _R	$\approx 5^\circ$		HeNe-Laser, 632,8 nm, $\varnothing 1 \text{ mm}$
Surface and Microanalysis Science Division, National Institute of Standards and Technology, Gait- hersburg, USA	CK, $\varnothing 132 \text{ mm}$	TS _R	$\approx 0^\circ$	$3,5^\circ - 40^\circ$	HeNe-Laser, 632,8 nm, $\varnothing 9 \mu\text{m}$
Showa Optical Co., Ltd., Yokoha- ma, Japan	CK, $\varnothing 200 \text{ mm}$	TS _R	$\approx 0^\circ$	$1,2^\circ - 27^\circ$ bzw. 27° $- 81^{\text{g)}}$	KrF-Laser, 248 nm, Pulsdauer 15 ns
ASET Hiratsuka Research Center, Hiratsuka, Japan	CK, $\varnothing 200 \text{ mm}^{\text{c)}}$ / $193,6 \text{ mm}^{\text{d)}}$	TS _T / TS _R	$0^\circ, 45^\circ,$ 70°	$2^\circ - 85^\circ$	Excimer-Laser, 157 nm, $\varnothing 1,0 - 2,5 \text{ mm}$
Jenoptik L. O. S. GmbH, Jena	UK, $\varnothing 220 \text{ mm}$	TS _R	$\approx 0,2^\circ$	$2^\circ - 85^\circ$	HeNe-Laser, 632,8 nm, $\varnothing 1 \text{ mm}$; vorbereitet für HeCd-Laser, 325 nm; Ar ⁺ -Laser, 488 / 514,5 nm; Laserdiode, 830 nm; Nd:YAG-Laser, 1,064 μm
Michelson Laboratory, Naval Air Warfare Center, China Lake, USA	CK, $\varnothing 220 \text{ mm}$	TS _T / TS _R	$\approx 0,5^\circ$	$2,85^\circ - 80,0^\circ$	HeCd-Laser, 325 / 441,6 nm; HeNe-Laser, 632,8 nm, $\varnothing 1 \text{ mm}$; HeNe-Laser, 1,15 / 3,39 μm ; HF/DF-Laser, 2,5 - 3,0 μm / 3,5 - 4,0 μm ; CO ₂ -Laser, 9,5 - 10,6 μm
Laser Laboratorium Göttingen e.V.	CK, $\varnothing 220 \text{ mm}$	TS _T / TS _R	$\approx 0^\circ$	$1,3^{\text{e)}}$ - ...	Excimer-Laser, 248 nm (Pulsdauer 30 ns), 193 nm (Pulsdauer 14 ns) / $\varnothing 0,7 \text{ mm}^2$
	UK ^{h)}	TS _T + TS _R	$\approx 0^\circ$		Excimer-Laser, 193 nm
Laser Zentrum Hannover e.V.	UK, $\varnothing 250 \text{ mm}$	TS _T + TS _R , TS _R	$3,44^\circ$ (TS _T + TS _R), $< 3^\circ$ (TS _R)	$1,15^\circ \dots 3,42^{\text{h)}}$ - 88°	HeNe-Laser, 545 nm; HeNe-Laser; 632,8 nm; Nd:YAG-Laser, 1,064 μm
	CK, $\varnothing 260 \text{ mm}$	TS _R	3°	193 nm: $2^\circ - 85^\circ,$ 157 nm: $2^\circ - 40^\circ$	Hohlkathodenlampe, 193 nm, $\varnothing < 3 \text{ mm}$; D ₂ -Lampe, 193 / 157 nm, $\varnothing < 3 \text{ mm}$
Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik Jena	CK, $\varnothing 350 \text{ mm}$	TS _T / TS _R	$0,5^\circ$	$2^\circ - 85^\circ$	HeCd-Laser, 325 nm; Ar ⁺ -Laser, 488 / 514,5 nm; HeNe-Laser, 632,8 nm, \varnothing ca. 0,5 mm; D ₂ -Lampe, 193 nm, $\varnothing 4-5 \text{ mm}$; Hg-Lampe, 248 / 365 nm, $\varnothing 0,7 \text{ mm}$
	CK, $\varnothing 350 \text{ mm}$	TS _R	$0,5^\circ$	$2,5^\circ - 85^\circ$	CO ₂ -Laser, 10,6 μm , $\varnothing 1 \text{ mm}$, vorbereitet für HeNe- Laser, 1,15 μm
	CK, $\varnothing 350 \text{ mm}$	TS _T / TS _R	$0,5^\circ$	$2^\circ - 85^{\text{k)}}$	D ₂ -Lampe, 193 / 157 nm; Excimer-Laser 193 / 157 nm

Tab. 3.7: Übersicht über die Veröffentlichungen von TS-/TIS-Messanordnungen und Standardisierungsmaßnahmen seit 1986

Detektoren	elektronische Rauschgrenze	Untergrundsignal	minimal gemessener Streuwert an einer Probe	Bemerkungen, Optionen	Informationen aus Literaturstelle
Si-photovol. Detektor				Erfassung des spekularen Reflexes	ASTM F 1048-87 ISO/FDIS 13696, 1999
Photodiode	TS = 0,2 ppm		Si-Wafer: $TS_R \approx 0,27 \text{ ppm}^{e)}$		[Mattsson, 1988]
Pyroelektrischer Detektor		TS = 200 ppm			[Bjuggren, 1996]
Photodiode		TS < 10 ppm	Si-Wafer: $TS_R \approx 25 \text{ ppm}$		[Rönnow, 1994]
	TS = 0,2 ppm	TS = 1 ppm	BK7: $TS_R = 1,6 \text{ ppm}$		[Schmitt, 1991]
Photodetektor					[Angelsky, 1992]
Si-Photodiode	TS < 0,01 ppm	TS = 0,07 ppm ^{f)}	Quarzglas: $TS_R = 0,64 \text{ ppm}^{f)}$	He-Spülung	[Kienzle, 1993]
		TS < 5 ppm			[R. Schuhmann, 1996], [Kadkhoda, 2000 a]
		TS < 5 ppm			[Reng, 1996], [Kadkhoda, 2000 a]
		TS = 9 ppm			[Kadkhoda, 2000 a]
Photodetektor	TS $\approx 0,08 \text{ ppm}^{e)}$		Si-Wafer: $TS_R \approx 0,34 \text{ ppm}^{e)}$		[Lorincik, 1997]
PMT			Al ₂ O ₃ /SiO ₂ -HR-System: $TS_R = 950 \text{ ppm}$		[Izawa, 1991]
Si-Photodiode			CaF ₂ : $TS_R \approx 500 \text{ ppm}$		[Saito, 2001] [Matsumoto, 2001]
PMT	TS < 0,01 ppm	TS(632,8 nm) = 1,4 - 4 ppm			[U. Schuhmann, 2001], [Kadkhoda, 2000 a]
		$TS_R(632,8 \text{ nm}) = 20 \text{ ppm}$		Erfassung des spekularen Reflexes	[H. Bennett, 1978], [Kadkhoda, 2000 a]
Si-Photodiode	TS = 0,8 ppm	$TS_R(248 \text{ nm}) = 0,8 \text{ ppm}$, $TS_R(193 \text{ nm}) = 27 \text{ ppm}$, $TS_R(193 \text{ nm}) = 43 \text{ ppm}$	CaF ₂ : $TS_R(248 \text{ nm}) = 23 \text{ ppm}$	Erfassung des spekularen Reflexes	[Apel, 2000 a], [Apel, 2000 b]
Photodiode					[Görling, 2001]
PMT (VIS), Photodiode (NIR)	TS < 0,02 ppm	TS = 1,4 ppm, TS = 0,46 ppm ^{h)}	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂ -HR-System: $TS_R(545 \text{ nm}) = 3,7 \text{ ppm}$	He-Spülung	[Kadkhoda, 1995 a], [Kadkhoda, 2000 a]
PMT		TS(193 nm) < 30 ppm ⁱ⁾ , TS(157 nm/193 nm) $\approx 15 \text{ ppm}^{j)}$	Suprasil: $TS_R(157 \text{ nm}) = 835 \text{ ppm}$	He-/N ₂ -Spülung, Unterdruck bis 2×10^{-4} mbar	[Kadkhoda, 1999 a], [Kadkhoda, 2000 d]
PMT	TS(632,8 nm) < 0,01 ppm	TS(632,8 nm) $\approx 0,05 \text{ ppm}$	Si-Wafer: $TS_R(632,8 \text{ nm}) = 0,25 \text{ ppm}$		Gliech, diese Arbeit
HgCdTe (MIR), PMT (NIR)	TS $\approx 0,8 \text{ ppm}$	TS $\approx 4 \text{ ppm}$	Al-Schicht: $TS_R = 800 \text{ ppm}$		
PMT		$TS_i \approx 1 \text{ ppm}$	CaF ₂ : $TS_i(193 \text{ nm}) = 70 \text{ ppm}$	He-/N ₂ -Spülung, Unterdruck < 1×10^{-5} mbar	[Gliech, 2002]

Legende: a) CK - Coblentzkugel, UK - Ulbrichtkugel, b) in Ellipsoidenform, c) große Ellipsenachsen, d) kleine Ellipsenachsen, e) aus angegebenen Werten abgeleitet, f) mit He-Spülung, g) gilt nur für einen eingeschränkten Azimutwinkelbereich, h) über Portblenden einstellbar, i) an Luft, j) im Vakuum, k) angestrebter Wert, l) mit Quantenkonverter-Beschichtung

Die Messanordnungen, bei denen die Angabe zum erfassten Winkelbereich nicht oder nicht vollständig angegeben wurde, konnten in Abb. 3.14 nicht berücksichtigt werden. Entsprechend den Aussagen zu den eingesetzten Wellenlängen, wird auch hier mit dem im Rahmen dieser Arbeit selbstentwickelten Messsystem das größte Raumwellenlängenspektrum abgedeckt.

In Abb. 3.15 wurden, sofern angegeben, die erreichten elektronischen Rauschgrenzen und das Untergrundsignal bei der Wellenlänge 632,8 nm der vorgestellten Messanordnungen dargestellt.

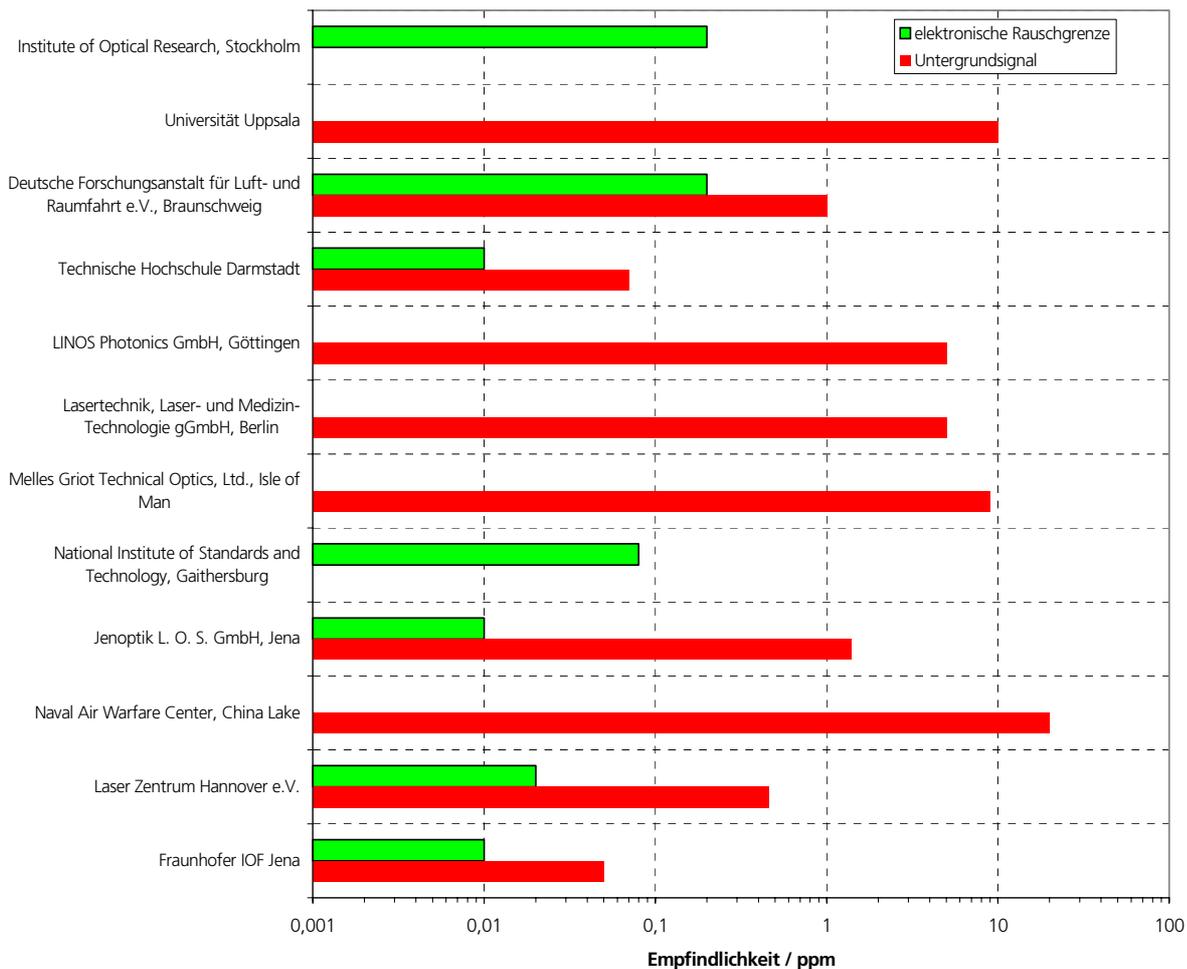


Abb. 3.15: Vergleich der von den vorgestellten Messanordnungen erreichten Empfindlichkeiten bei der Wellenlänge 632,8 nm (siehe Tab. 3.7)

Hierbei ist festzustellen, dass nur die in dieser Arbeit realisierte Coblenzkugelmessanordnung zusammen mit den Messanordnungen der Technischen Hochschule Darmstadt, der Jenoptik L. O. S. und des Laser Zentrums Hannover eine elektronische Rauschgrenze von 0,01 - 0,02 ppm aufweisen. Das Untergrundsignal von der in dieser Arbeit vorgestellten Messanordnung mit 0,05 ppm wurde nur von der Technischen Hochschule Darmstadt mit 0,07 ppm annähernd erreicht. Die Messanordnungen der Technischen Hochschule Darmstadt und des Laser Zentrums Hannover mussten, bedingt durch den Einsatz einer Ulbrichtkugel, für die Messung des Untergrundsignals mit He gespült werden.

3.4 Weitere Messverfahren zur Bestimmung von Mikrotopografieparametern

Neben der Streulichtmesstechnik gibt es noch eine Reihe anderer Verfahren, über die Mikrotopografieparameter von Oberflächen oder Schichten bestimmt werden können. Hierbei handelt es sich z.B. um

- Rasterkraftmikroskopie (AFM),
- mechanische Profilometrie und
- optische Profilometrie.

An dieser Stelle soll nur auf die Verfahren eingegangen werden, die später auch zum Vergleich mit den TS-Messungen (Abschn. 6) herangezogen wurden. Das sind Rasterkraftmikroskopie und die mechanische Profilometrie. Ausführliche Betrachtungen zu diesem Thema sind in [J. Bennett, 1985], [J. Bennett, 1992] und [J. Bennett, 1999] zu finden.

Bei beiden Verfahren handelt es sich um Verfahren zur Oberflächenmessung, so dass keine Volumeninformationen von Bulk- oder Schichtmaterial oder Informationen von tieferliegenden Grenzflächen im Schichtsystem erfasst werden. Durch eine spezielle Probenbehandlung wie z.B. Probenquerschnitte (Brüche) lassen sich dennoch Volumeninformationen gewinnen ([Ruppe, 1994], [Duparré, 1996 b]).

Bei dem Vergleich der durch die verschiedenen Verfahren ermittelten RMS-Rauheiten muss die Bandweitenbegrenzung, innerhalb der das Messverfahren die RMS-Rauheit ermittelt hat, beachtet werden.

Nach dem Sampling-Theorem ergeben sich die untere f_u und die obere Grenzfrequenz f_o nach folgender Beziehung ([Jakobs, 1998 b]):

$$\begin{aligned} f_u &= \frac{1}{L}, \\ f_o &= \frac{N}{2L}. \end{aligned} \tag{3.5}$$

Hierbei ist L die Scanlänge und N die Anzahl der Messpunkte innerhalb der Scanlänge.

So ergeben sich z.B. für einen AFM-Scan mit 512 Messpunkten innerhalb einer Scanlänge von $1 \mu\text{m}$ bzw. $10 \mu\text{m}$ die Grenzfrequenzen $f_u \approx 1 \mu\text{m}^{-1}$ und $f_o \approx 256 \mu\text{m}^{-1}$ bzw. $f_u \approx 0,1 \mu\text{m}^{-1}$ und $f_o \approx 25,6 \mu\text{m}^{-1}$.

Bedingt durch die Faltung des Oberflächenprofils mit dem Radius der Messspitze kann eine zusätzliche Einschränkung der oberen Grenzfrequenz auftreten. Die folgende Gleichung gibt an, bis zu welcher oberen Grenzfrequenz ein sinusförmiges Profil der Amplitude a mit einer Messspitze mit dem Radius r_{Spitze} exakt nachgebildet werden kann ([J. Bennett, 1999]):

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{a r_{\text{Spitze}}}}. \tag{3.6}$$

Diese Beziehung wird auch zur Abschätzung der oberen Grenzfrequenz für reale Oberflächen verwendet ([Jakobs, 1998 b]). Für eine AFM-Spitze mit einem Radius von ca. 10 nm ergibt sich somit für polierte Oberflächen ($a \approx 1 \text{ nm}$) bzw. eine beschichtete Oberfläche ($a \approx 5 \text{ nm}$) eine obere Grenzfrequenz von $50 \mu\text{m}^{-1}$ bzw. $22 \mu\text{m}^{-1}$ ([Jakobs, 1998 b]). Bei einer superpolierten Oberfläche (z.B. Si-Wafer) wurde unter der Annahme, dass die Rauheit 10-mal niedriger ist als die einer polierten Fläche, die Amplitude mit $a \approx 0,1 \text{ nm}$ angenommen. Die sich daraus ergebende obere Grenzfrequenz würde dann $160 \mu\text{m}^{-1}$ betragen.

In Abb. 3.16 sind die erfassten Ortsfrequenzen für die mechanische Profilometrie (Scanlänge 1 mm mit 1000 Messpunkten) und verschiedene AFM-Messungen im Vergleich mit TS-Messungen (erfasster Winkelbereich 2° bis 85°) bei verschiedenen Wellenlängen dargestellt. Aufgrund der erfassten Ortsfrequenzen sollte ein Vergleich von TS-Messungen bei $10,6 \mu\text{m}$ mit Messergebnissen der mechanischen Profilometrie und bei 193 nm mit AFM-Messungen erfolgen.

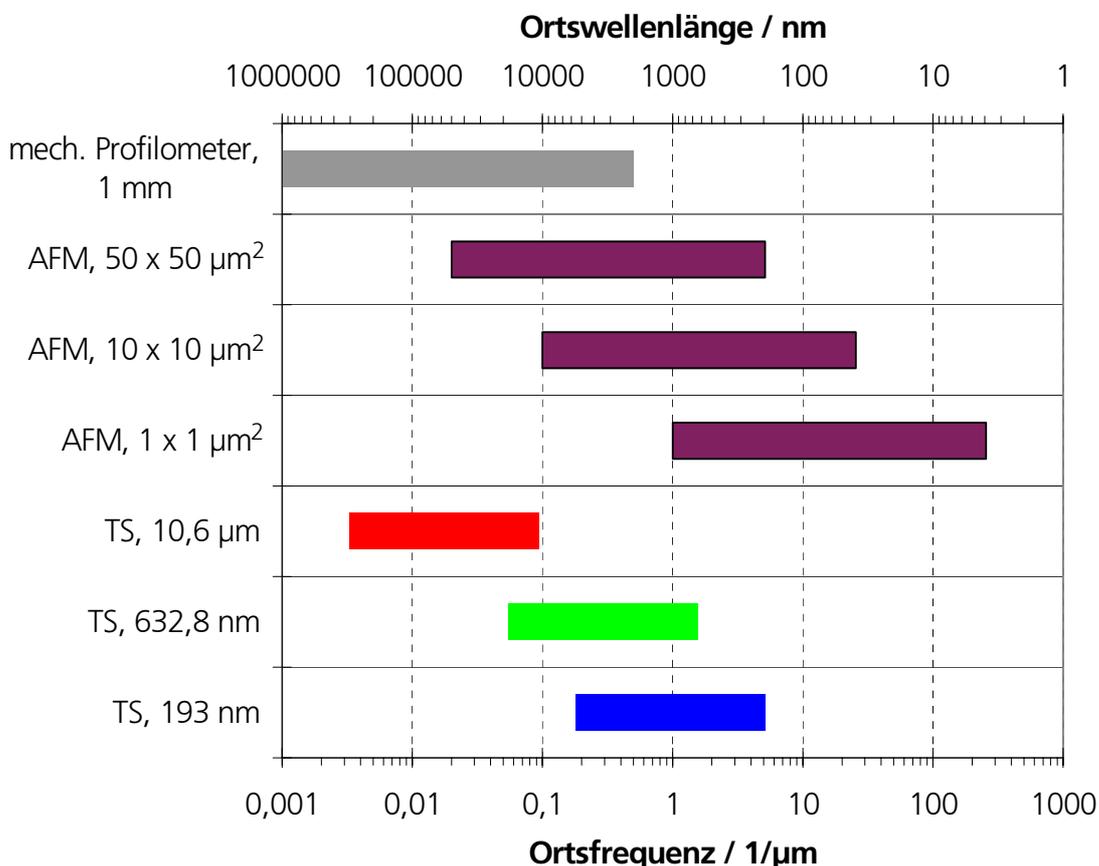


Abb. 3.16: Erfasster Ortsfrequenzbereich bei mechanischer Profilometrie (Scanlänge 1 mm, 1000 Messpunkte), bei AFM-Messungen mit verschiedenen Scangrößen und bei TS-Messungen mit unterschiedlichen Wellenlängen

4 Beschreibung des TS-Messsystems

4.1 Einleitung

Mittels des TS-Messsystems sollen optische Komponenten bei ihren Einsatzwellenlängen vermessen werden können, es soll ein großes Ortswellenlängenspektrum erfasst werden und die Möglichkeit bestehen, neben normalpolierten Oberflächen auch superpolierte und technisch raue Oberflächen vermessen zu können.

Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit ein TS-Messsystem entwickelt, das sowohl im UV-, VIS- als auch im IR-Wellenlängenbereich eingesetzt werden kann. Es stehen eine Reihe von Laserlichtquellen und Lampen zur Verfügung, die den Einsatz von Einzelwellenlängen im Bereich von 193 nm bis hin zu 10,6 μm erzeugen können. Wie schon in Abschn. 3.2 dargelegt, wurde als Integrationselement eine Coblentzkugel gewählt. Da zur homogenen Ausleuchtung des Empfängers eine Ulbrichtkugel aus Spectralon Anwendung findet, konnte nicht das gesamte Wellenlängenspektrum in einem einzigen Aufbau integriert werden (siehe Abschn. 3.1.3.3). Deshalb wurden drei einzelne Messanordnungen aufgebaut: eine für den Wellenlängenbereich von 193 nm bis 632,8 nm (UV/VIS), eine andere für die Wellenlänge 10,6 μm (MIR) und eine für TS-Messungen bei 157 nm und 193 nm im Vakuum oder in Stickstoffatmosphäre. Mittels dieser Aufbauten kann das gestreute Licht einer Probe im Winkelbereich von 2° bis 85° (UV/VIS) bzw. 2,5° bis 85° (MIR) bei einem Einfallswinkel von nahe 0° gemessen werden. Wie schon in Abschn. 3.2 dargestellt, wurde der Aufbau der geplanten Messwellenlänge von 1,15 μm (NIR-HeNe-Laser) aufgrund der hohen Auslastung des Messsystems und der ständigen Anpassung der Wellenlängen an die Erfordernisse der Lithographieentwicklung nicht installiert und erprobt. Ein Ausblick auf die geplante Beleuchtungs- und Detektionseinheit ist in den Abschn. 4.3.5 und 4.4.3 zu finden.

Im Folgenden werden die TS-Messanordnungen, basierend auf dem Coblentzkugelprinzip, für den UV-/VIS-/MIR-Wellenlängenbereich näher betrachtet (Abschn. 4.2 bis 4.9) und in Abschn. 4.10 u.a. die erreichten Sensitivitäten zusammenfassend dargestellt. In Abschn. 4.11 wird ein Ausblick auf die Besonderheiten der VUV-TS-Messanordnung gegeben.

4.2 Gesamtaufbau

Das gesamte TS-Messsystem (mit Ausnahme der VUV-Messanordnung) wurde auf schwingungs- gedämpften optischen Tischen aufgebaut. Der Aufbau für den UV-/VIS-Wellenlängenbereich befindet sich unter einer Laminarbox der Reinraumklasse 100 und steht in einem Reinraum der Klasse 10000 ([Fed Std 209E, 1992]).

Die TS-Messanordnungen setzen sich prinzipiell aus vier Komponenten zusammen (siehe Abb. 4.1):

- Beleuchtungseinheit,
- Detektionseinheit,
- Ansteuereinheit und
- Auswerteeinheit.

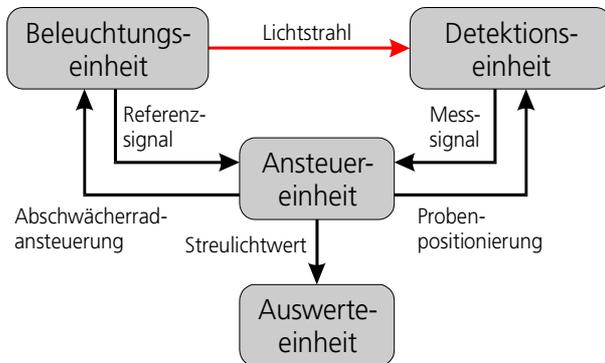


Abb. 4.1: Zusammenwirken der Komponenten einer TS-Messanordnung

In der Beleuchtungseinheit wird das zur Messung verwendete Licht einer bestimmten Wellenlänge erzeugt. Da ausschließlich CW-Lichtquellen verwendet werden, wird das Licht für eine spätere, phasenempfindliche Verstärkung durch die Ansteuereinheit moduliert und für die Detektionseinheit mittels einer Strahlformung aufbereitet. In der Detektionseinheit wird das an einer Probe erzeugte Streulicht mittels eines Integrationselementes auf einen Empfänger gelenkt und dort in ein elektrisches Signal umgewandelt. Die Ansteuereinheit verstärkt das elektrische Signal der Detektionseinheit phasenempfindlich, nimmt die Messwerte auf und steuert die Probenpositionierung an. Die Auswerteeinheit dient der Aufbereitung der Messwerte und erleichtert somit eine Auswertung der Streulichtmessung. Da diese Auswertung von der eigentlichen Messwertaufnahme losgekoppelt ist, muss sie weder orts- noch zeitgleich mit der eigentlichen Messung erfolgen.

In Abb. 4.2 ist das in dieser Arbeit entwickelte TS-Messsystem schematisch dargestellt.

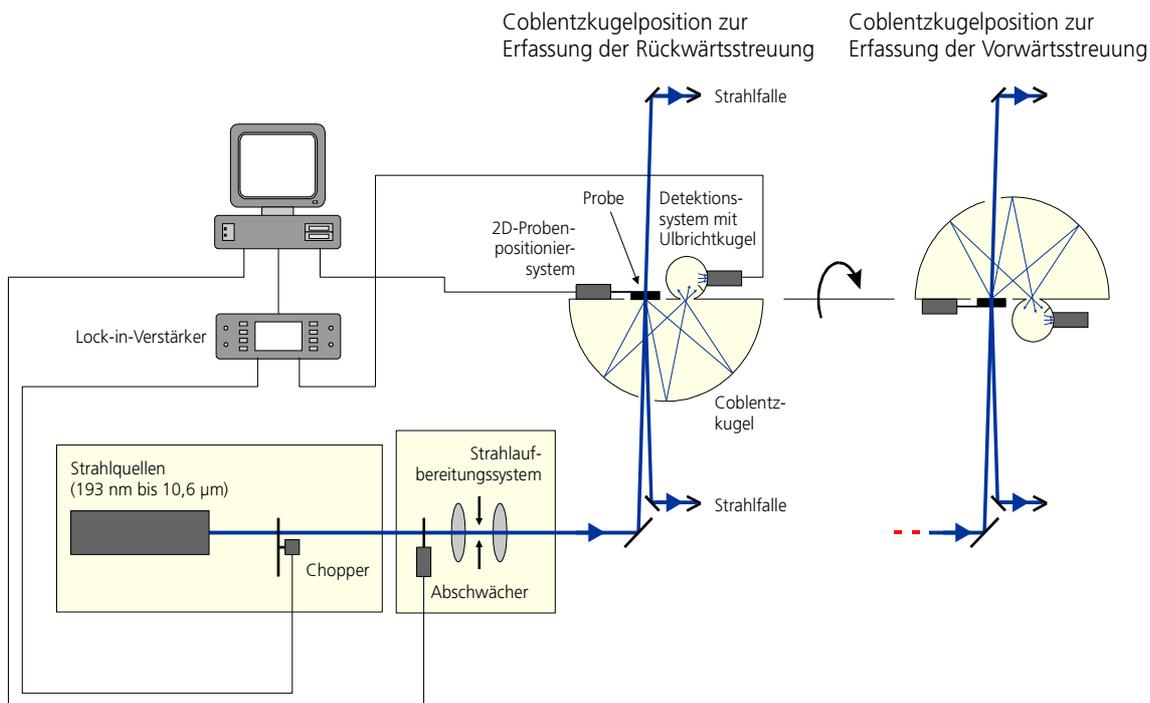


Abb. 4.2: Schematische Darstellung des in dieser Arbeit realisierten TS-Messsystems

In den folgenden Abschnitten wird näher auf die einzelnen Komponenten der TS-Messanordnungen eingegangen.

4.3 Beleuchtungseinheit

4.3.1 Prinzipieller Aufbau

Die Beleuchtungseinheit setzt sich aus vier Einzelkomponenten zusammen (siehe Abb. 4.3):

- Lichtquelle,
- Strahlmodulation,
- Strahlabschwächung und
- Strahlformung.

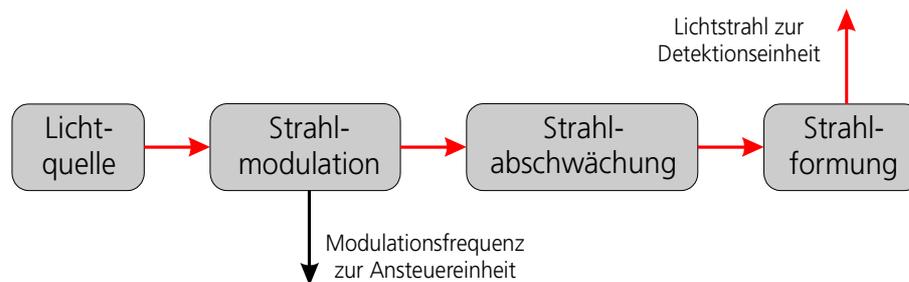


Abb. 4.3: Einzelkomponenten der Beleuchtungseinheit

Die Beleuchtungseinheit dient in erster Linie der Erzeugung des für die Streulichtmessung notwendigen Lichtstrahls mit einer bestimmten Wellenlänge. Hierbei wird als Lichtquelle entweder ein Laser oder eine Lampe verwendet. Um die Strahlqualität zu verbessern und somit das Untergrundsignal in der Detektionseinheit zu senken (vgl. Abschn. 4.9.2.6), muss der Strahl vor der Einstrahlung in die Detektionseinheit noch geformt bzw. gereinigt werden. Diese Strahlformung muss der jeweiligen Lichtquelle und der Messwellenlänge angepasst werden. Ebenfalls in der Strahlformung erfolgt die Umlenkung des Lichtstrahls, da die Einfallsrichtung in die Detektionseinheit senkrecht von unten nach oben gewählt wurde (vgl. Abschn. 4.4.1). Um das eigentliche Messsignal in der Ansteuereinheit mittels Lock-in-Verstärkertechnik phasenempfindlich verstärken zu können, muss der Strahl moduliert werden. Die Modulationsfrequenz ist prinzipiell von der Lichtquelle und dem jeweiligen Empfänger der Detektionseinheit abhängig. Trotzdem zeigte sich, dass bei allen eingesetzten Lichtquellen eine Modulationsfrequenz von ca. 820 Hz geeignet war. Um eine Übersteuerung des Empfängers der Detektionseinheit zu verhindern (vgl. Abschn. 4.9.2.7), muss die Intensität des Lichtstrahls an die Empfängersensitivität und das Streuvermögen der zu untersuchenden Probe angepasst werden. Die dazu verwendete Strahlabschwächung ist von der Messwellenlänge abhängig.

In den folgenden Abschnitten werden die verwendeten Arten von Beleuchtungseinheiten vorgestellt.

4.3.2 Beleuchtungseinheit mit UV-/VIS-Lasern

Der Aufbau der Beleuchtungseinheit mit UV-/VIS-Lasern ist in Abb. 4.4 dargestellt.

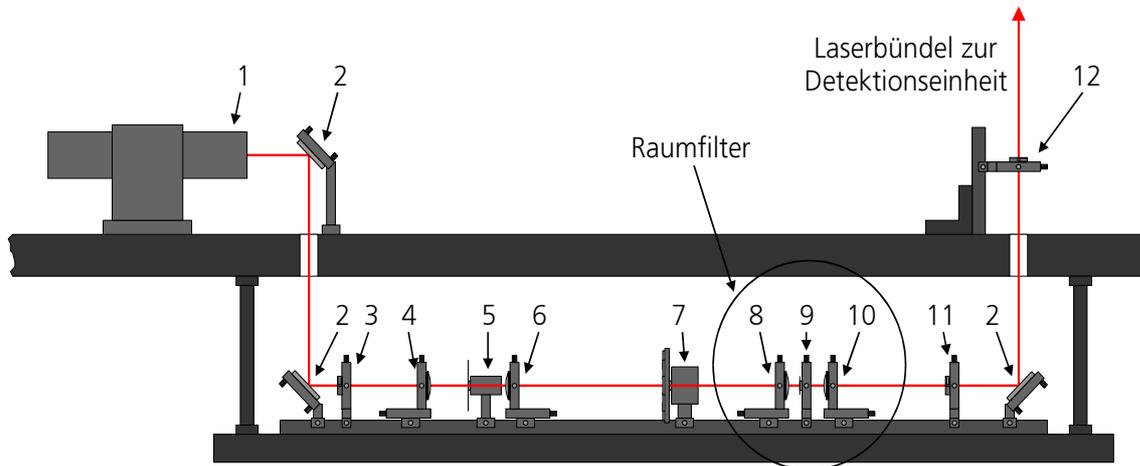


Abb. 4.4: Beleuchtungseinheit mit UV-/VIS-Lasern, 1 - Laser, 2 - Umlenkspiegel, 3 - Irisblende 1, 4 - Chopperlinse 1, 5 - Chopper, 6 - Chopperlinse 2, 7 - Abschwächerrad, 8 - Raumfilterlinse 1, 9 - Pinhole, 10 - Raumfilterlinse 2, 11 - Irisblende 2, 12 - Irisblende 3

Als Lichtquellen stehen für diese Beleuchtungseinheit ein HeCd-Laser, ein Ar⁺-Laser und ein HeNe-Laser zur Verfügung. Alle Laser senden Licht im TEM₀₀-Mode²⁵ aus. Die Parameter der Laser sind in Tab. 4.1 aufgeführt.

Laser	Wellenlänge λ	Laserstrahldurchmesser D	Strahldivergenz α (Vollwinkel)	nominielle Laserleistung P
HeCd	325 nm	0,8 mm	1,2 mrad	0,5 mW
Ar ⁺²⁶	488,0 nm 514,5 nm	0,61 mm	1,0 mrad	37,0 mW 24,0 mW
HeNe	632,8 nm	0,76 mm	1,06 mrad	5,0 mW

Tab. 4.1: UV-/VIS-Laser und deren Parameter

Wie in Abb. 4.4 zu sehen ist, lenken die Umlenkspiegel den Laserstrahl erst unter die optische Bank und dann senkrecht von unten in die Detektionseinheit. Dieser Strahlengang wurde gewählt, um einen möglichst langen optischen Weg zwischen letztem optischen Bauelement

²⁵ Transversale **e**lektrische und **m**agnetische Moden mit **0** in x- und **0** in y-Richtung quer zum Laserstrahl austretenden transversalen Schwingungskontenlinien [Hecht, 1994]

²⁶ Die Leistungsangaben des Ar⁺-Lasers beziehen sich auf eine Plasmaröhrenstrom von 8 A. Weitere Wellenlängen des Ar⁺-Lasers sind 457,9 nm, 465,8 nm, 476,5 nm, 496,5 nm und 501,7 nm.

(letztem Umlenkspiegel) und der Probe in der Detektionseinheit zu erhalten. Diese Wegverlängerung von 320 mm auf 970 mm verkleinert das Raumwinkelsegment, das sich zwischen der Einfallsoffnung der Detektionseinheit und dem letzten optischen Bauelement (sowie aller anderen Bauelemente) aufspannt, um den Faktor 9,2 (vgl. Abschn. 4.9.2.6). Diese Raumwinkelsegmentverkleinerung führt zu einer Senkung des Untergrundsignals. Als erster Umlenkspiegel wird aus Kostengründen und aufgrund des hohen Reflexionsvermögens im gesamten benötigten Wellenlängenspektrum ($R > 90\%$, [Palik, 1985]) ein Al-Spiegel verwendet. Für die beiden anderen Umlenkspiegel werden zur Senkung des Untergrundsignals superpolierte Si-Wafer eingesetzt, da diese aufgrund der Politurgüte nur geringes Streulicht erzeugen. Das Reflexionsvermögen der Si-Wafer ist im UV-VIS-Wellenlängenbereich mit Werten zwischen 69% und 35% ([Palik, 1985]) für die vorgestellte Messanordnung noch hoch genug, um eine hohe Sensitivität zu erreichen.

Die Irisblende 1 dient zur ersten, einfachen Strahlbereinigung. Sie wurde so eingestellt, dass sie den Laserstrahl selber nicht beschneidet, aber Störlichtanteile, die aus dem vorhergehenden Strahlengang stammen, ausblendet. Diese Störlichtanteile sind:

- andere Lichtwellenlängen, die der Laser erzeugt und die einen höherdivergenten Strahl aufweisen,
- am Laseraustrittsfenster gestreutes Licht und
- Streulicht von den ersten beiden Umlenkspiegeln.

Als nächste Stufe der Strahlbereinigung wird ein Raumfilter eingesetzt. In einem Raumfilter wird der Laserstrahl mittels einer Linse in eine kleine, dünne Kreisblende (Pinhole) fokussiert und danach durch eine zweite Linse wieder parallelisiert (Abb. 4.5). Die Brennpunkte beider Linsen liegen dabei in der Mitte des Pinholes.

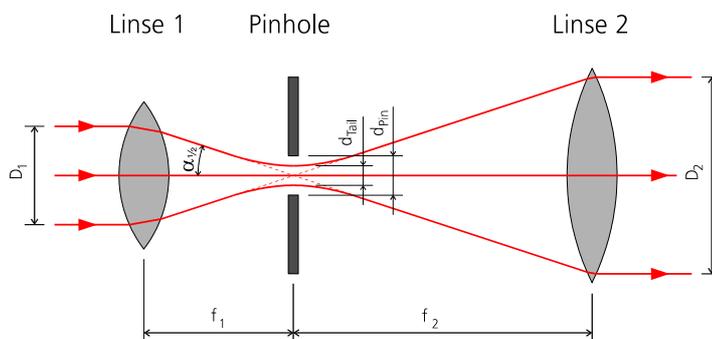


Abb. 4.5: Aufbau eines Raumfilters

Strahlanteile mit gleicher Wellenlänge, die nicht parallel zum Hauptstrahl verlaufen, werden vor dem Pinhole seitlich versetzt fokussiert. Strahlanteile mit unterschiedlicher Wellenlänge werden aufgrund der Dispersion der Linse vor (kürzere Wellenlänge) bzw. nach (längere Wellenlänge) dem Pinhole gebündelt. Um die zuvor beschriebenen Effekte so optimal wie möglich ausnutzen zu können, sollte der Pinholedurchmesser d_{pin} so klein wie möglich sein. Um den Einfluss der Beugung der Laserstrahlteile am Pinhole zu verringern, sollte der Pinholedurchmesser d_{pin} das Zwei- bis Dreifache des Tailendurchmessers d_{tail} betragen. Der Tailradius r_{tail} eines divergenten Laserstrahls ist als Funktion der Wellenlänge λ und des Divergenzwinkels $\alpha_{1/2}$ definiert (Gl. 4.1) [Saleh, 1991]:

$$r_{Tail} = \frac{\lambda}{\pi \alpha_{1/2}}. \quad (4.1)$$

Wird diese Taille durch die Fokussierung des Laserstrahls mit einem Durchmesser D_1 durch eine Linse der Brennweite f_1 erzeugt, so ergibt sich (Gl. 4.2) [Saleh, 1991]. Hierbei muss der durch die Brennweite der Linse hervorgerufene Divergenzwinkel $\alpha_{1/2}$ vielfach größer als die Divergenz des auf die Linse einfallenden Laserstrahls sein:

$$d_{Tail} \approx \frac{4 \lambda f_1}{\pi D_1}. \quad (4.2)$$

Somit ergeben sich die in Tabelle 4.2 aufgelisteten Pinholedurchmesser d_{pin} . Die Brennweite der Linse 1 f_1 beträgt bei diesem Aufbau 25 mm, der Laserstrahldurchmesser D_1 ca. 1 mm.

Wellenlänge λ	berechneter Tailendurchmesser d_{Tail}	verwendeter Pinholedurchmesser d_{pin}
325 nm	10,3 μm	25 μm
457,9 nm 514,5 nm	14,6 μm 16,4 μm	50 μm
632,8 nm	20,1 μm	50 μm

Tab. 4.2: Verwendete Pinholedurchmesser d_{pin} in Abhängigkeit der Wellenlänge ($f_1 = 25$ mm)

Durch das Verhältnis der Brennweiten der beiden Raumfilterlinsen f_1 und f_2 wird das Verhältnis zwischen Ein- und Ausgangslaserstrahldurchmesser D_1 und D_2 bestimmt (Gl. 4.3):

$$D_2 = D_1 \frac{f_2}{f_1}. \quad (4.3)$$

Zusätzlich kann durch eine leichte Defokussierung der zweiten Linse der Laserstrahldurchmesser am Probenort eingestellt werden. Da diese Defokussierung immer einen leicht konvergenten Strahl erzeugen sollte (siehe Abschn. 4.4.1), muss der Laserstrahl durch den Raumfilter aufgeweitet werden. Hierbei hat sich eine Verdoppelung des Durchmessers D_2 gegenüber dem Durchmesser D_1 als ausreichend erwiesen. Die Brennweite der Linse 2 beträgt somit 50 mm.

Als dritte und letzte Stufe der Strahlbereinigung folgen die Irisblenden 2 und 3. Sie beschneiden (wie die Irisblende 1) den Laserstrahl nicht, blenden aber weitere Störlichtanteile aus. Diese Störlichtanteile sind insbesondere Streulicht von der zweiten Linse der Raumfilteranordnung und dem dritten Umlenkspiegel.

Die Notwendigkeit dieser Strahlbereinigung lässt sich mit Hilfe einer Schneidenmessung nachweisen. In Abb. 4.6 ist das Prinzip einer solchen Schneidenmessung dargestellt.

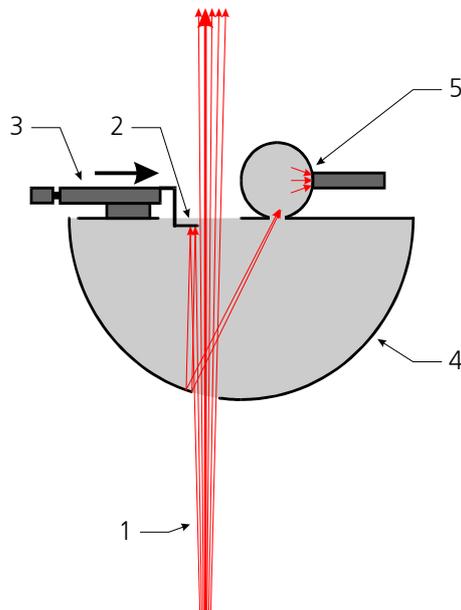


Abb. 4.6: Darstellung einer Schneidenmessung zur Bestimmung des Einflusses der Strahlreinigung auf das Untergrundsignal, 1 - Laserstrahl mit Störlichtanteil, 2 - Schneide, 3 - Probenverschiebung, 4 - Coblenzkugel, 5 - Detektionssystem

Bei der Schneidenmessung wird eine scharfe Schneide seitlich in das Strahlenbündel an der Probenposition in der Coblenzkugel mit Hilfe der Probenpositionierung gefahren. Trifft ein Teil des Strahlenbündels die Schneide bzw. die Schneidenkante, so wird das Licht in die Coblenzkugel reflektiert bzw. gestreut und von dort in das Detektionssystem abgebildet. Die detektierte Lichtleistung in Abhängigkeit von der Schneidenposition erlaubt dann Rückschlüsse auf die Größe und Intensität der jeweiligen Störlichtanteile.

Das Ergebnis einer solchen Schneidenmessung unter Verwendung einer Bruchkante eines superpoliertem Si-Wafers ist in Abb. 4.7 dargestellt. Der Durchmesser des Laserstrahls betrug 1 mm. Das bei dieser Messung detektierte konstante Untergrundsignal von $2,5 \cdot 10^{-7}$ war auf eine noch nicht vollständig optimierte Strahlfalle zurückzuführen und konnte später noch erheblich gesenkt werden.

Es wurden drei verschiedene Strahlereinigungsverfahren getestet:

- 1) ohne Irisblende 3 und ohne Pinhole in der Raumfilteranordnung,
- 2) mit Irisblende 3 und ohne Pinhole in der Raumfilteranordnung und
- 3) mit Irisblende 3 und mit Pinhole in der Raumfilteranordnung.

Die Position, bei der die Schneide beginnt, den Laserstrahl direkt zu beschneiden, ist durch einen sehr schnellen Anstieg der detektierten Lichtleistung gekennzeichnet und liegt bei allen drei getesteten Strahlereinigungsverfahren bei einer Schneidenposition von ca. 9,5 mm. Bei den vorhergehenden Schneidenpositionen wird das gemessene Signal nur durch die Reflexion bzw. Streuung des Störlichtanteils um den Messstrahl am Si-Wafer bestimmt. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass hinsichtlich der Breite der Störstrahlung als auch dessen Intensität eine erhebliche Verbesserung erzielt werden konnte. Wie zu erwarten war, konnte mit dem schrittweisen Einsatz von Blende und Pinhole eine drastische Verringerung des Störlichtanteils erreicht werden. Da dieses Störlicht zur Erhöhung des Untergrundsignals durch Reflexion an der Probenoberfläche wesentlich beiträgt, lassen sich hochsensitive Messungen somit nur unter Verwendung einer Kombination von Blenden und Raumfilteranordnung durchführen.

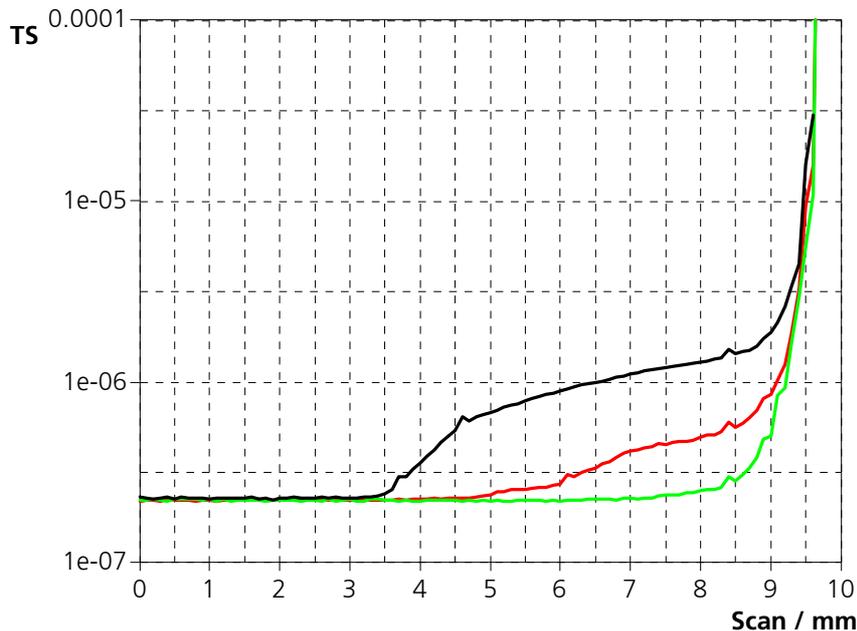


Abb. 4.7: Messung des Einflusses von Blende 3 und Raumfilterpinhole im Strahlengang auf das Untergrundsignal bei 632,8 nm; obere Kurve: ohne Blende und Raumfilter; mittlere Kurve: nur mit Blende, aber ohne Raumfilter; untere Kurve: mit Blende und Raumfilter

Solche oder ähnliche Raumfilteranordnungen werden auch in anderen TS-Messanordnungen eingesetzt: z.B. [Kienzle, 1993] und [Kadkhoda, 1995 a].

Für die VIS-Wellenlängen werden bei der Raumfilteranordnung breitbandentspiegelte Glaslinsen und für die Wellenlänge 325 nm schmalbandig entspiegelte Quarzlinsen eingesetzt.

Zur Strahlmodulation wird ein Chopper verwendet. Um ein möglichst gutes Signal-Rausch-Verhältnis zu erhalten, ist es notwendig, den Laserstrahldurchmesser im Verhältnis zur Größe der Öffnungen im Chopperblatt zu verkleinern (siehe Abschn. 4.9.2.2). Dieses wird durch die Fokussierung des Laserstrahls durch eine Linse auf das Chopperblatt erreicht. Mittels einer zweiten Linse gleicher Brennweite wird der Laserstrahl ohne Durchmesseränderung wieder parallelisiert. Da beide Linsen aus unbeschichtetem Quarzglas bestehen, können sie im gesamten betrachteten Wellenlängenbereich eingesetzt werden. Die Brennweite beider Linsen im vorgestellten Aufbau beträgt 50 mm.

Um die Leistung des in die Detektionseinheit einfallenden Strahles an das Streuvermögen der jeweiligen Probe anzupassen, muss der Strahl abgeschwächt werden. Hierbei findet ein Satz Transmissionsabschwächer Anwendung, der sich auf einem selbstkonstruierten, schrittmotor-gesteuerten Abschwächerrad befindet. Dieses Abschwächerrad kann bis zu acht Abschwächer mit einem Durchmesser von 1" (25,4 mm) aufnehmen. Die Auswahl der jeweils notwendigen Abschwächerposition erfolgt durch die Ansteuereinheit. Die verwendeten Abschwächer bestehen aus metallisch beschichteten Quarzplatten und lassen sich somit im UV, VIS und NIR einsetzen. Es stehen Abschwächer mit einer angegebenen optischen Dichte von 1, 2, 3 und 4 (d.h. Transmissionsvermögen von 10%, 1%, 0,1% und 0,01%) zur Verfügung. Durch eine unbesetzte Öffnung im Abschwächerrad kann der Lichtstrahl diese Anordnung auch ohne Abschwächung passieren. Die vollständige Blockung des Strahlenganges kann durch ein Blindstück erfolgen.

Mittels dieser Strahlauflbereitung konnten für alle Wellenlängen Strahlprofile, wie in Abb. 4.8

exemplarisch für 632,8 nm dargestellt, erzielt werden. Der Laserstrahldurchmesser beträgt 0,45 mm. Die Intensitätsverteilung entspricht einer 97%igen Gaußverteilung. Dieses sowie die folgenden Laserstrahlprofile wurden mit dem Strahlanalyse-System LBA100A der Firma Spiricon ermittelt.

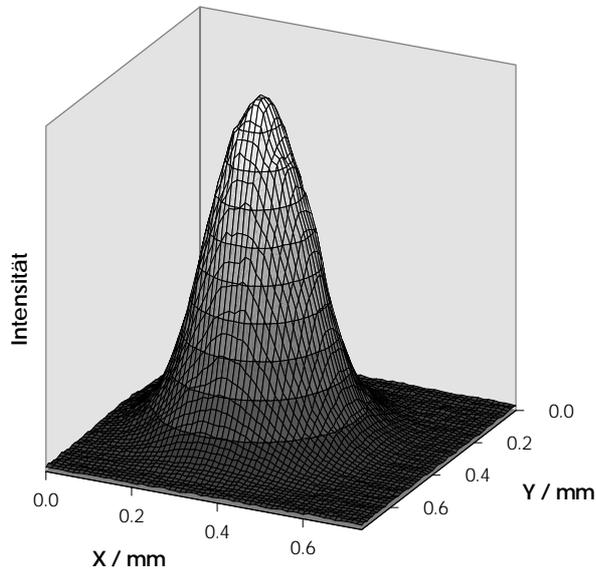


Abb. 4.8: Laserstrahlprofil am Probenort bei der Wellenlänge 632,8 nm

4.3.3 Beleuchtungseinheit mit Deuteriumlampe

Eine Beleuchtungseinheit mit Deuteriumlampe wird zur Erzeugung des Lichtes mit einer Wellenlänge von 193 nm verwendet. In Abb. 4.9 ist der Aufbau dieser Beleuchtungseinheit dargestellt.

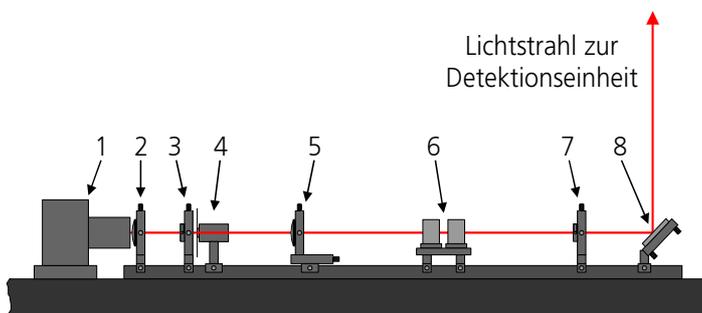


Abb. 4.9: Beleuchtungseinheit mit Deuteriumlampe, 1 - Deuteriumlampe, 2 - Linse 1, 3 - Irisblende 1, 4 - Chopper, 5 - Linse 2, 6 - Reflexionsfiltersatz, 7 - Irisblende 2, 8 - Umlenkspiegel

Die verwendete 30 W-Deuteriumlampe sendet Licht in einem Wellenlängenbereich von ca. 160 nm bis ca. 800 nm aus. Zur Wellenlängenselektion wird ein Reflexionsfiltersatz, bestehend aus vier 45° Reflexionsfiltern, eingesetzt. Der selbstentwickelte Reflexionsfilterhalter ermöglicht neben der Halterung der Filter auch die Verkippung des Filters 1 zur Höhenkorrektur

sowie die Drehung des Filters 4 zur Seitenkorrektur des Messstrahls (Abb. 4.10).

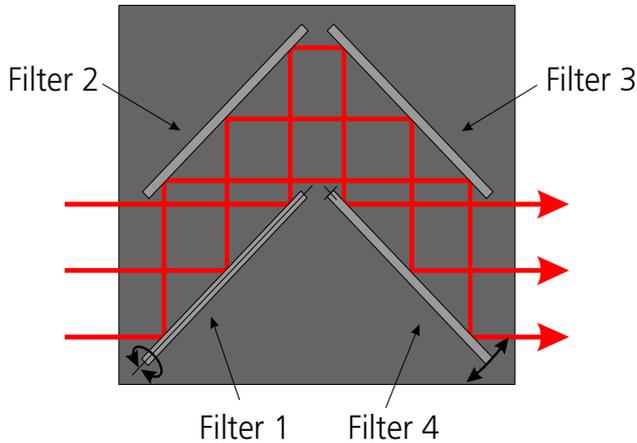


Abb. 4.10: Reflexionsfilterhalter (Draufsicht)

Jeder der Filter besitzt bei einer Wellenlänge von ca. 193 nm ein Reflexionsmaximum (ca. 90%) und absorbiert die anderen Wellenbereiche. Nach den vier Reflexionsfiltern ergibt sich ein maximales Durchlassvermögen bei 192,2 nm von ca. 64% (Abb. 4.11). Aufgrund der spektralen Verteilung der Deuteriumlampenstrahlung, die in diesem Wellenlängenbereich einen Abfall zu den kürzeren Wellenlängen aufweist ([Kadkhoda, 2000 b]), verschiebt sich das Leistungsmaximum beim Einsatz dieser Filterkombination und einer Deuteriumlampe hin zu 193 nm. Durch den relativ breitbandigen Spektralverlauf der Reflexionsfilteranordnung wird ein Lichtstrahl mit einer Wellenlänge von ca. $193 \text{ nm} \pm 6 \text{ nm}$ (Abfall auf die halbe Intensität) erzeugt.

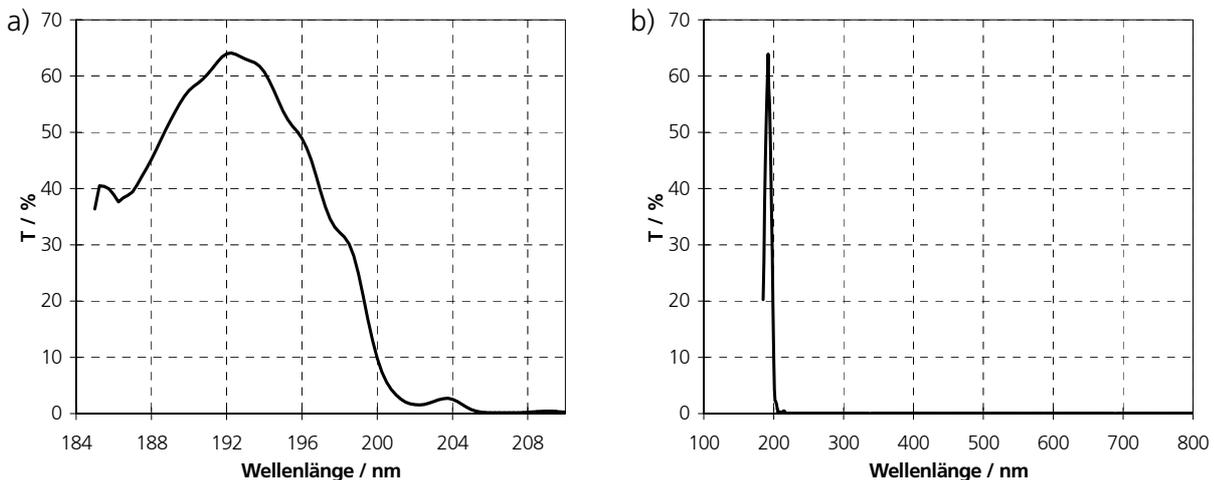


Abb. 4.13: Durchlassvermögen der Reflexionsfilteranordnung im Bereich von 185 - 210 nm (a) und 185 - 800 nm (b)

Die Strahlformung unterscheidet sich grundsätzlich von der, die bei den Laserlichtquellen genutzt wird. Der Lichtstrahl, den die Deuteriumlampe mittels des 0,5 mm Leuchtbogens aussendet, wird über eine optische Abbildung geformt. Als erstes erfolgt mittels der ersten Linse ($f = 75 \text{ mm}$) eine Abbildung des Leuchtbogens auf die erste Irisblende. Über diese Blende kann

die Größe des Leuchtfleckes eingestellt werden. Die Größe des optimalen Blendendurchmessers (möglichst große Lichtleistung bei möglichst kleinem Durchmesser) liegt bei ca. 1,3 mm. Dieser Leuchtfleck wird über die zweite Linse ($f = 250$ mm) auf den Austrittsport abgebildet. Der sich ergebende Beleuchtungsfleckdurchmesser auf der Probe liegt bei 4 - 5 mm. Die zweite Irisblende beschneidet den Strahl nicht und dient nur der Blockung von Streulicht, das von den davor liegenden optischen Bauelementen erzeugt wird. Beide Linsen haben eine beidseitige Antireflexbeschichtung für die Wellenlänge 193 nm.

Zur Strahlmodellierung wird ein Chopper verwendet, der direkt hinter der ersten Irisblende platziert wurde, da dort der Strahldurchmesser am kleinsten ist (siehe Abschn. 4.9.2.2).

Da die Intensität der mittels dieser Beleuchtungseinheit erzeugten Strahlung von $193 \text{ nm} \pm 6 \text{ nm}$ sehr gering ist und die Bauelemente der Detektionseinheit in diesem Wellenlängenbereich nur noch eine geringe Empfindlichkeit aufweisen, kann auf eine zusätzliche Anpassung der Intensität am Probenort mittels Abschwächern verzichtet werden.

Zur Strahlumlenkung wird ein superpolierter Si-Wafer eingesetzt.

Aufgrund der optischen Abbildung des Lampenbogens konnte kein langer optischer Weg zwischen dem letzten Umlenkspiegel und dem Detektionssystem wie beim Einsatz der Laser (siehe Abschn. 4.3.2) verwendet werden.

Das Strahlprofil am Probenort (Abb. 4.14) ist aufgrund der Abbildung des nicht kreisförmigen Leuchtbogens der Deuteriumlampe leicht elliptisch.

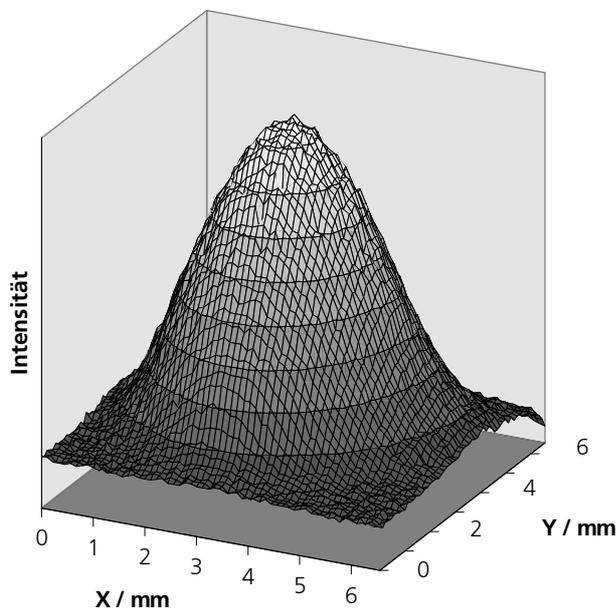


Abb. 4.14: Strahlprofil am Probenort bei der Wellenlänge 193 nm

Der Durchmesser des Strahles beträgt zwischen 4 und 5 mm. Die Intensitätsverteilung entspricht einer 94%igen Gaußverteilung.

Bei der in [Kadkhoda, 2000 c] vorgestellten TS-Messanordnung konnte aufgrund einer kürzeren Distanz zwischen letzter Linse und Probenposition ein Strahldurchmesser von kleiner 3 mm

erreicht werden.

4.3.4 Beleuchtungseinheit mit Quecksilberdampfbohlenlampe

Die Beleuchtungseinheit mit Quecksilberdampfbohlenlampe wird zur Erzeugung von zwei Messwellenlängen (248 nm und 365 nm) verwendet. Der Aufbau der Beleuchtungseinheit für die beiden Wellenlängen unterscheidet sich nur hinsichtlich der verwendeten Wellenlängenselektionen. In Abb. 4.15 ist der Aufbau für die Wellenlänge 248 nm dargestellt.

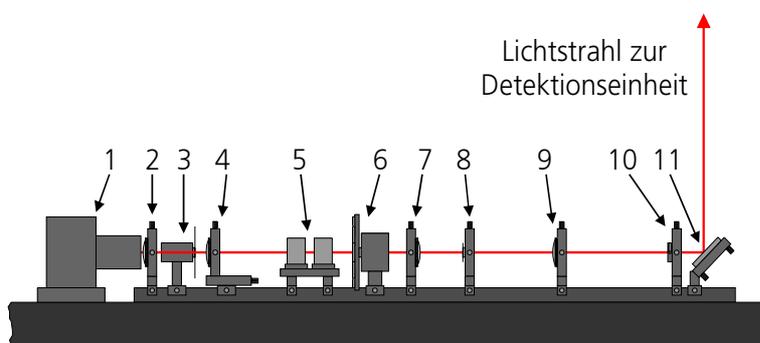


Abb. 4.15: Beleuchtungseinheit mit Quecksilberdampfbohlenlampe (248 nm), 1 - Quecksilberdampfbohlenlampe, 2 - Chopperlinse 1, 3 - Chopper, 4 - Chopperlinse 2, 5 - Reflexionsfiltersatz, 6 - Abschwächerrad, 7 - Linse 1, 8 - Lochblende, 9 - Linse 2, 10 - Irisblende, 11 - Umlenkspiegel

Die eingesetzte 100 W-Quecksilberdampfbohlenlampe sendet Licht im Bereich von ca. 220 nm bis 2,5 μm aus. Zur Selektion der Wellenlänge 248 nm wird ein Reflexionsfiltersatz verwendet, dessen vier Reflexionsfilter in der gleichen Vorrichtung, wie schon in Abschn. 4.3.3 (Abb. 4.10) vorgestellt, gehalten werden. Jeder Reflexionsfilter besitzt ein Reflexionsmaximum von ca. 95% bei der Wellenlänge 248 nm und absorbiert die anderen Wellenlängenbereiche. Somit ergibt sich für die gesamte Reflexionsfilteranordnung ein Durchlassvermögen von ca. 81%. Durch den breitbandigen Spektralverlauf der Reflexionsfilteranordnung wird ein Strahl von ca. 248 nm \pm 5 nm (Abfall auf die halbe Intensität) erzeugt.

Die Selektion der Wellenlänge 365 nm erfolgt über einen Transmissionsfilter, der aus drei verkitteten Gläsern besteht. Die beiden äußeren Gläser bestehen aus BK7 und das mittlere Glas aus UG11. Die Wellenlängenbegrenzung erfolgt über den spektralen Lampenverlauf der Quecksilberdampfbohlenlampe, die bei 365 nm eine sehr hohe schmale Leistungsspitze besitzt ([L.O.T., 2000]). Bedingt durch den Transmissionsverlauf der Gläser wird durch die BK7-Gläser ([Schott, 2000]) die kurzwellige Strahlung und durch das UG11 ([Schott, 1999]) die langwellige Strahlung um diese Leistungsspitze herum abgeschnitten. Somit konnte ein Durchlassvermögen von ca. 78% erzielt werden.

Aufgrund der hohen Ausgangsleistung der Quecksilberdampfbohlenlampe (100 W) und deren kleinem Leuchtfeld (0,25 x 0,25 mm²) konnte eine von der Beleuchtungseinheit mit Deuteriumlampe abweichende Strahlformung eingesetzt werden. Ziel war es hierbei, einen kleineren Beleuchtungsfleck des Strahls auf der Probe zu erhalten.

Dies konnte durch den Einsatz einer Aperturblende erreicht werden. Hierbei wird mittels einer

Linse ($f = 75 \text{ mm}$) ein Bild des Leuchtbogens der Lampe erzeugt und in der Bildebene eine Lochblende platziert. Da die Lochblende mit $100 \text{ }\mu\text{m}$ Durchmesser kleiner ist als das erzeugte Bild (ca. $\varnothing 2 \text{ mm}$), beschneidet sie das Bild erheblich und stellt daraus für den weiteren Strahlenverlauf einen runden Ausschnitt zur Verfügung. Dieser wird durch eine zweite Linse ($f = 150 \text{ mm}$) auf den Austrittsport der Coblenzkugel abgebildet.

Das am Lochblendenrand entstehende Beugungslicht wird durch eine Irisblende ausgeblendet.

Um die Strahlmodellierung bei einem möglichst kleinen Strahldurchmesser durchführen zu können (siehe Abschn. 4.9.2.2), wird das Chopperblatt in das Bild des Lampenbogens, das durch die Chopperlinse 1 ($f = 75 \text{ mm}$) erzeugt wird, platziert. Mittels der Chopperlinse 2 ($f = 25 \text{ mm}$) wird der Strahl parallelisiert.

Das sich ergebende Strahlprofil bei 248 nm ist in Abb. 4.16 dargestellt. Das Strahlprofil bei 365 nm entspricht dem bei 248 nm und weist ebenfalls einen Durchmesser von ca. $0,7 \text{ mm}$ an der Probenposition auf. Die Intensitätsverteilung entspricht einer 86%igen Gaußverteilung.

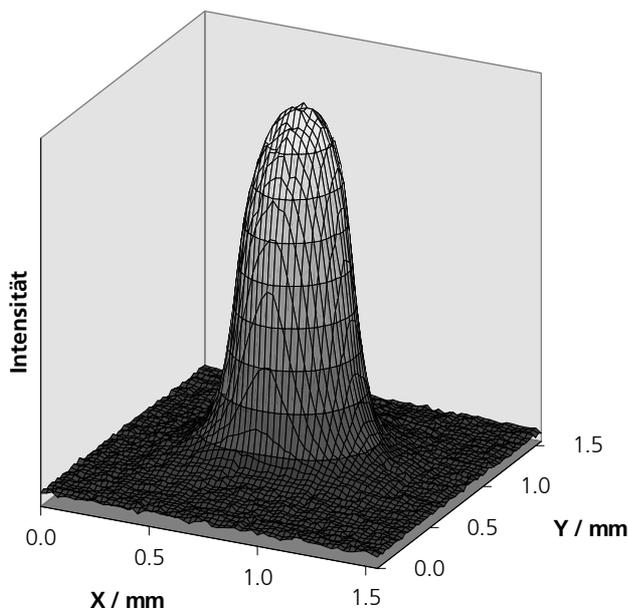


Abb. 4.16: Strahlprofil bei 248 nm

4.3.5 Beleuchtungseinheit mit NIR-Laser

Wie schon in Abschn. 4.1 dargestellt, wird an dieser Stelle nur ein Ausblick auf die geplante Beleuchtungseinheit bei der Messwellenlänge von $1,15 \text{ }\mu\text{m}$ gegeben. Die Beleuchtungseinheit ist vom Prinzip her der mit den UV-VIS-Lasern (vgl. Abschn. 4.3.2) sehr ähnlich (Abb. 4.17).

Neben dem verwendeten Laser und den Unterschieden in den wellenlängenabhängigen Komponenten (Linsen, Pinholedurchmesser) besteht der größte Unterschied in dem Fehlen der Strahlumlenkung unter die optische Bank. Dieses Prinzip zur Verkleinerung des Raumwinkelseg-

menten zwischen letztem optischen Bauelement und der Coblenzkugel würde sich aus Platzgründen nicht anwenden lassen.

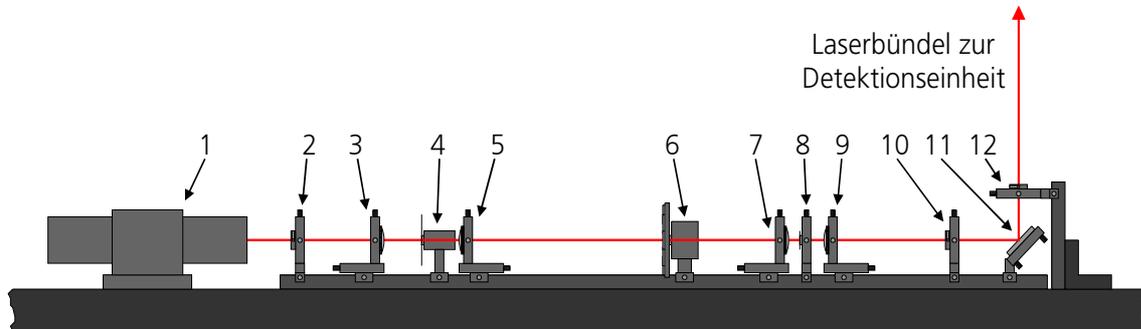


Abb. 4.17: Beleuchtungseinheit mit NIR-Lasern, 1 - Laser, 2 - Irisblende 1, 3 - Chopperlinse 1, 4 - Chopper, 5 - Chopperlinse 2, 6 - Abschwächerrad, 7 - Raumfilterlinse 1, 8 - Pinhole, 9 - Raumfilterlinse 2, 10 - Irisblende 2, 11 - Umlenkspiegel, 12 - Irisblende 2

Als Lichtquelle wurde ein HeNe-Laser angeschafft, der eine Wellenlänge von $1,15 \mu\text{m}$ bei einer nominellen Leistung von $2,6 \text{ mW}$ mit einer Divergenz von $1,6 \text{ mrad}$ besitzt.

Bei der Raumfilteranordnung mit Quarzlinzen der Brennweite $f_1 = 25 \text{ mm}$ und $f_2 = 50 \text{ mm}$ könnte ein Taillendurchmesser d_{Tail} von ca. $37 \mu\text{m}$ erreicht werden. Der Pinholedurchmesser d_{Pin} würde $100 \mu\text{m}$ betragen. Die zweite Linse sollte wieder so justiert werden, dass der Fokuspunkt des Laserstrahls zwischen der Probenoberfläche und Austrittsport liegt (vgl. Abschn. 4.4.1).

Die Strahlmodulation mittels Chopper und Abschwächung des Laserstrahls mittels Abschwächerrad sollten den in Abschn. 4.3.2 (Beleuchtungseinheit mit UV/VIS-Lasern) entsprechen.

4.3.6 Beleuchtungseinheit mit MIR-Laser

Bei der Beleuchtungseinheit mit MIR-Laser wird ein CO_2 -Laser mit einer Wellenlänge von $10,6 \mu\text{m}$ und einer Ausgangsleistung von gemessenen $6,4 \text{ W}$ verwendet. Der Laserstrahldurchmesser an dem Strahlaustrittsfenster des Lasers beträgt $3,8 \text{ mm}$ und die Divergenz $3,6 \text{ mrad}$.

Aus Sicherheitsgründen wird für die Justage der Beleuchtungseinheit ein Pilotlaser (HeNe, $\lambda = 632,8 \text{ nm}$) verwendet. Der Gesamtaufbau dieser Beleuchtungseinheit ist in Abb. 4.18 zu sehen.

Der Pilotlaser wird mittels des ersten Umlenkspiegels und des Einkoppelspiegels in den Strahlengang des CO_2 -Lasers gekoppelt. Als Umlenkspiegel wird hierbei ein Al-Spiegel und als Einkoppelspiegel eine beschichtete ZnSe-Platte verwendet. Die ZnSe-Platte ist auf der dem CO_2 -Laser zugewandten Seite für $10,6 \mu\text{m}$ entspiegelt und besitzt auf der anderen Seite eine Antireflexschicht für $10,6 \mu\text{m}$, die für $632,8 \text{ nm}$ hochreflektierend ist. Aufgrund der hohen Ausgangsleistung des CO_2 -Lasers wurde auf Transmissionsabschwächer verzichtet. Beide Prinzipien der Transmissionsabschwächer (Abschwächung durch Absorption oder durch Reflexion) erwiesen sich nicht als günstig. Bei der Abschwächung durch Absorption konnte kein Material gefunden werden, das bei dieser hohen Einfallleistung eine ausreichende Dämpfung (optische Dichte ca.

1) bei gleichzeitiger Langzeitstabilität aufweist. Die Transmissionsabschwächung durch Reflexion hat den Nachteil, dass ein energiereicher Reflex erzeugt wird, der durch eine separate Strahlenfalle beseitigt werden muss.

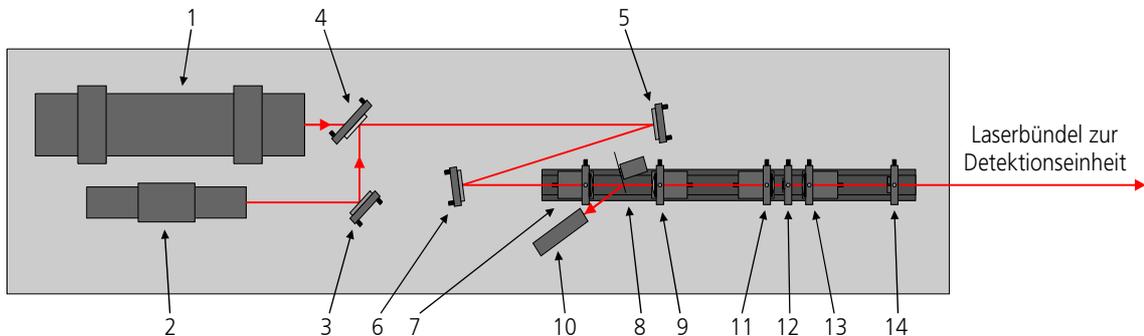


Abb. 4.18: Beleuchtungseinheit mit MIR-Laser (Draufsicht), 1 - CO₂-Laser, 2 - HeNe-Laser, 3 - Umlenkspiegel 1, 4 - Einkoppelspiegel, 5 - Reflexionsstrahlabschwächer 1, 6 - Reflexionsstrahlabschwächer 2, 7 - Chopperlinse 1, 8 - Chopper, 9 - Chopperlinse 2, 10 - Strahlenfalle, 11 - Raumfilterlinse 1, 12 - Pinhole, 13 - Raumfilterlinse 2, 14 - Irisblende 2 (nicht gezeichnet: 15 - Umlenkspiegel)

Als Abschwächer wurden Reflexionsabschwächer entwickelt, die aus einem 5 mm dicken Quarzglassubstrat bestehen. Diese besitzen auf der einen Seite eine halbseitige, optisch dichte Al-Schicht und wurden quer zur Strahlrichtung verschiebbar montiert, so dass der CO₂-Laserstrahl entweder die Al-Schicht oder das Quarzsubstrat trifft. Auf der Al-Schicht wird der Strahl aufgrund des hohen Reflexionsvermögens (98,9% [Palik, 1985]) verlustarm reflektiert. Auf dem Quarzsubstrat wird der Strahl nur an der ersten Substratoberfläche reflektiert (14,5% [Palik, 1985]) und dann im Substrat absorbiert. Somit ergibt sich eine theoretische Abschwächung des reflektierten Strahls zwischen beiden Positionen von ca. 14,6%. Bei Versuchen konnte eine Abschwächung von 11,6% bzw. 11,7% ermittelt werden. Um den Rückseitenreflex des Pilotlaserstrahls zu vermeiden, wurde die Rückseite der Quarzsubstrate mittels Sandbestrahlung aufgeraut.

Die Modulation des Laserstrahls erfolgt ebenfalls mittels eines Choppers, der sich in der Brennebene zwischen zwei ZnSe-Linsen (Brennweite jeweils 50 mm) befindet. Der Reflex des CO₂-Strahls am Chopperblatt wird durch eine selbstentwickelte Strahlenfalle eliminiert.

Zur Strahlbereinigung wird wieder eine Raumfilteranordnung eingesetzt. Bei der Verwendung von für 10,6 µm entspiegelten ZnSe-Linsen der Brennweite $f_1 = 25$ mm und $f_2 = 50$ mm ergibt sich ein Taillendurchmesser d_{Tail} von 112 µm. Der verwendete Pinholedurchmesser d_{Pin} beträgt 350 µm. Die zweite Linse wird wieder so justiert, dass der Fokuspunkt des Laserstrahls zwischen der Probenoberfläche und dem Austrittsport liegt (vgl. Abschn. 4.4.1).

Die Strahlumlenkung in die Coblenzkugel erfolgt mittels eines Al-Spiegels. Der Beleuchtungsfleckdurchmesser am Probenort beträgt ca. 1 mm und hat damit die gleiche Abmessung wie der Durchmesser der in [Bjuggren, 1996] vorgestellten TS-Messanordnung.

4.4 Detektionseinheit

4.4.1 Prinzipieller Aufbau

Die Detektionseinheit setzt sich aus vier Einzelkomponenten zusammen (Abb. 4.19):

- sammelndes Element (in diesem Fall Coblenzkugel),
- Empfänger,
- Probenpositioniereinheit mit Probenhalter und
- Strahlfallen für spekulär reflektierten und transmittierten Strahlanteil.

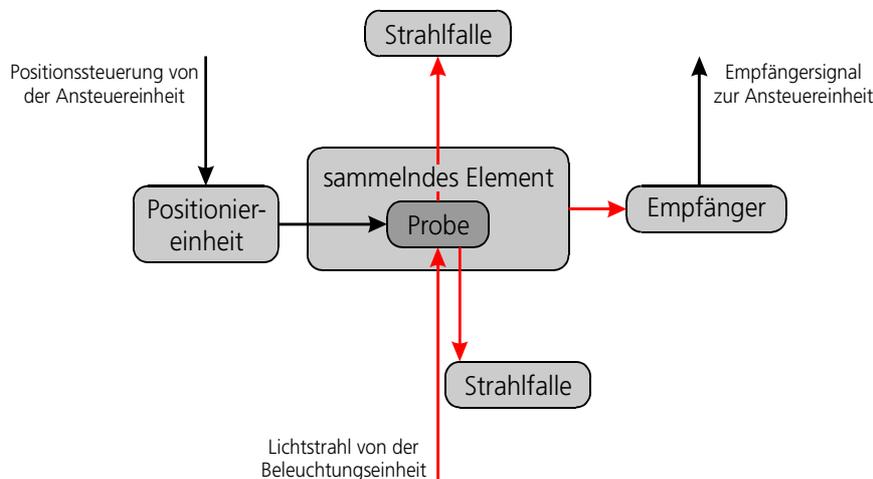


Abb. 4.19: Einzelkomponenten der Detektionseinheit

Das sammelnde Element bildet das von dem Beleuchtungsfleck auf der Probe ausgehenden Streulicht über den gesamten Integrationsbereich in Reflexions- bzw. Transmissionsrichtung auf den Empfänger ab. Hierbei muss der an der Probe spekulär reflektierte Strahlanteil des von der Beleuchtungseinheit kommenden Lichtstrahls ebenso das Integrationselement ungehindert verlassen können, wie der von der Probe transmittierte Strahlanteil. Diese beiden Strahlanteile werden durch Strahlfallen eliminiert. Der Empfänger wandelt die empfangene Lichtleistung in ein proportionales Spannungssignal, welches zur Ansteuereinheit übertragen wird. Die Probenpositionierung dient zur Halterung und Lagejustierung der Probe zum einfallenden Strahl. Die Probe kann zur Messung von ein- oder zweidimensionalen Streuverteilungsfunktionen in Abhängigkeit vom Beleuchtungsort quer zur Strahlrichtung ein- oder zweidimensional bewegt werden.

Während der Messung liegt die Probe horizontal in der Probenhalterung und wird bei der Messung in Reflexionsrichtung nur durch die Schwerkraft gehalten, weshalb auf eine Festspannung der Probe in der Probenhalterung verzichtet werden kann. Bei der Messung in Transmissionsrichtung kommt ein modifizierter Probenhalter zum Einsatz, der den sicheren und lagestabilen Sitz der Probe gewährleistet.

Der von der Beleuchtungseinheit kommende Lichtstrahl muss in die Nähe der Austrittsöffnung des Integrationskörpers fokussiert werden, um eine exakte Begrenzung des mittels des Integrationskörpers erfassten minimalen Streuwinkels zu ermöglichen.

4.4.2 Detektionseinheit für den UV-/VIS-Bereich

Der Aufbau der Detektionseinheit basierend auf der Coblenzkugel im UV-/VIS-Bereich ist in Abb. 4.20 dargestellt.

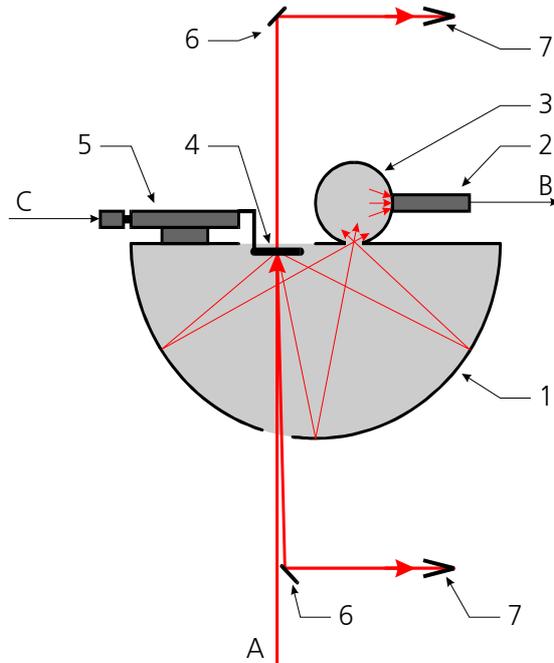


Abb. 4.20: Detektionseinheit basierend auf Coblenzkugel im UV-/VIS-Bereich (Darstellung der totalen Streulichtmessung in Reflexionsrichtung), A - Lichtstrahl von der Beleuchtungseinheit, B - Empfängersignal zur Ansteuereinheit, C - Positionssteuerung von der Ansteuereinheit, 1 - Coblenzkugel, 2 - Photomultiplier, 3 - Ulbrichtkugel, 4 - Probe mit Probenhalter, 5 - zweidimensionale Probenpositioniereinheit, 6 - Umlenkspiegel für Strahlfallen, 7 - Strahlfallen

Das Integrationselement besteht hierbei aus einer eigenkonstruierten Coblenzkugel mit einem Innenradius von 175 mm und einer innenseitigen Al-Schicht als Spiegelbelag. Die Al-Schicht besitzt ein ausreichend großes Reflexionsvermögen im UV-/VIS-Wellenlängenbereich. Der Abstand des Beleuchtungsflecks auf der Probe vom Coblenzkugelmittelpunkt beträgt 30 mm. Das Strahleintrittsloch (identisch mit dem Austrittsöffnung für den spekulär reflektieren bzw. transmittierten Strahl) besitzt einen Durchmesser von ca. 13 mm, wodurch sich ein Nahwinkelbereich für das erfassbare Streulicht von 2° ergibt. Die Integrationsgrenze im Fernwinkelbereich liegt bei 85° .

Als eigentlicher Empfänger wird ein UV-sensitiver Photomultiplier (auch SEV^{27} genannt) vom Typ R1463 (Hamamatsu) mit einem Einsatzwellenlängenbereich von 185 nm bis 850 nm verwendet. Vor diesem befindet sich eine Spectralon-Ulbrichtkugel mit einem Innendurchmesser von 2" (50,8 mm). Diese dient dazu, den Photomultiplier einerseits homogen auszuleuchten und andererseits das Gesichtsfeld der Empfängeranordnung zu vergrößern. Zwischen Ulbrichtkugel und Empfänger befindet sich ein Shutter, der bei Bedarf elektronisch geregelt den Empfänger abschatten kann. Somit kann ein Überblitzen der empfindlichen Photomultiplier während Justagearbeiten und Probenwechsel verhindert werden. Diese Detektionseinheit wird für den Wellenlängenbereich von 193 nm bis 632,8 nm eingesetzt. Der Einfallswinkel kann mit ca. $0,5^\circ$ als quasi senkrecht betrachtet werden.

²⁷ Sekundärelektronenvervielfacher

Die Positioniereinheit kann eine Probe von einem Durchmesser bis zu 2" (50,8 mm) aufnehmen und diese in einem Gebiet von 50 x 50 mm² zweidimensional verschieben.

Die selbstentwickelten Strahlenfallen bestehen aus jeweils zwei, spitz zueinander zulaufenden polierten Schwarzglasscheiben, in die die zu eliminierenden Strahlen mittels eines Umlenkspiegels gelenkt werden.

Die Detektionseinheit wurde so konstruiert, dass zum Wechsel der Streulichtmessrichtung alle Elemente (mit Ausnahme der Strahlenfallen) um 180° um die Probenebene gedreht werden können. Somit ist eine wahlweise Erfassung des Streulichts in Transmissions- bzw. Reflexionsrichtung möglich. In beiden Positionen wird die Konstruktion durch ein Arretiersystem reproduzierbar lagestabil gehalten. Aus der Literatur sind zwei TS-Messanordnungen bekannt ([Rönnow, 1994], [Saito, 2001]), bei denen der Wechsel der Streulichtmessrichtung ebenfalls durch eine Drehung der Coblenzkugel durchgeführt wird. Bei keiner ist jedoch die Möglichkeit einer Arretierung der Coblenzkugel in den jeweiligen Messpositionen beschrieben. Diese, durch [Gliech, 1999 b] als Gebrauchsmuster geschützte, Arretierung der Coblenzkugel ermöglicht einen schnellen Wechsel der jeweiligen Messposition im nicht arretierten Zustand bei gleichzeitiger sehr exakter Lagefixierung im arretierten Zustand.

In Abb. 4.4 wurde der Dreh- und Arretiermechanismus schematisch dargestellt.

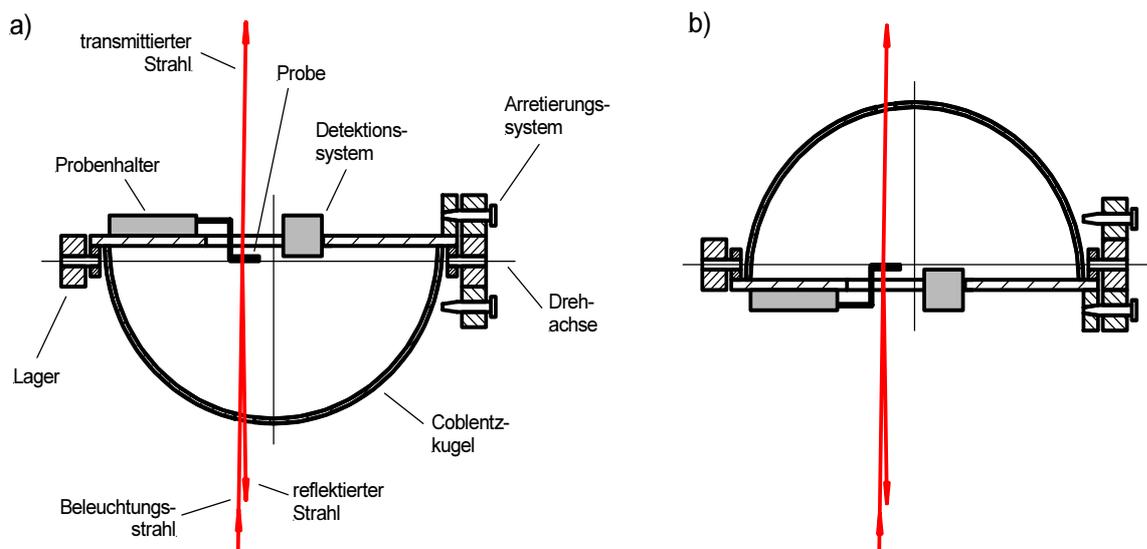


Abb. 4.21: Schematischer Aufbau der Detektionseinheit mit Arretierungseinrichtung (ohne Strahlenfallen): Coblenzkugel in Position zur Messung der Rückwärtsstreuung (a) bzw. Vorwärtsstreuung (b)

Die Realisierung des Aufbaus ist in Abb. 4.22 zu sehen. Die Coblenzkugel ist in dieser Abbildung in Transmissionsrichtung gedreht. Eine Arretieraufnahme ist an der rechten Bildmitte zu erkennen.

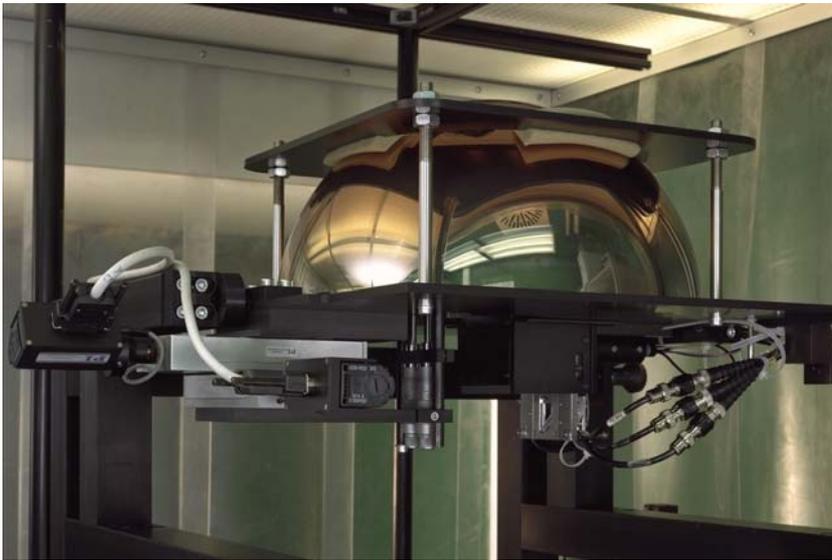


Abb. 4.22: Detektionssystem mit in Transmissionsrichtung gedrehter Coblenzkugel

Andere, von der Drehung der Coblenzkugel abweichende Varianten der Messung von Vorwärts- und Rückwärtsstreuung wurden in [H. Bennett, 1978] und [Apel, 2000 a] beschrieben. In [H. Bennett, 1978] wurden zwei gleiche Aufbauten mit jeweils einer Coblenzkugel verwendet, zwischen denen mittels eines Umlenkspiegels ausgewählt werden konnte. Bei dieser Variante ist jedoch ein Umsetzen der Probe von der einen in die andere Coblenzkugel beim Messrichtungswechsel notwendig. Mit einer Coblenzkugel arbeitet die in [Apel, 2000 a] beschriebene Messanordnung. Der Wechsel zwischen den Streulichtmessrichtungen erfolgt hier mittels der Strahlumlenkung auf die andere Seite der Coblenzkugel. Dadurch verändert sich der Strahlweg erheblich, was wiederum den Einsatz zusätzlicher Strahlformung erfordert. Dadurch ändert sich neben dem Strahlprofil und der Beleuchtungsfleckposition auf der Probe auch die eingestrahlte Leistung. Beide Varianten haben gemeinsam, dass die Messbedingungen nicht gleich gehalten werden können und ein schneller, unkomplizierter Wechsel der Streulichtmessrichtung nicht möglich ist.

4.4.3 Detektionseinheit für den NIR-Bereich

Es war geplant, die unter Abschn. 4.4.2 vorgestellte Detektionseinheit auch für den Einsatz der Wellenlänge $1,15 \mu\text{m}$ zu verwenden. Als einzige Modifikation wäre ein Wechsel des Photomultipliers auf den Typ R5108 (Hamamatsu) mit dem Einsatzwellenlängenbereich von 400 nm bis 1200 nm notwendig geworden.

Alle weiteren Komponenten inklusive der Ulbrichtkugel zur Detektorausleuchtung können unverändert weiterverwendet werden.

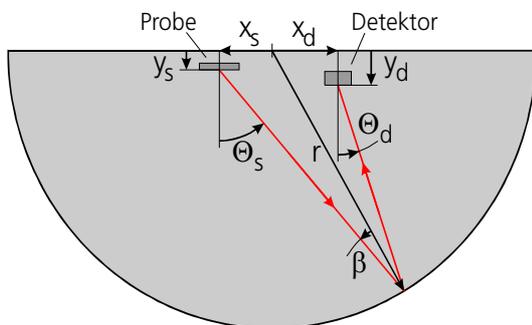
4.4.4 Detektionseinheit für den MIR-Bereich

Die Wahl einer separaten Detektionseinheit für den MIR-Bereich ist in der Wellenlängenabhängigkeit der zur Empfängerausleuchtung notwendigen Ulbrichtkugel begründet, da die in der UV-VIS-Messanordnung verwendete Ulbrichtkugel aus Spectralon nicht im MIR-Wellenlängenbereich verwendet werden kann (siehe Abschn. 3.1.3.3). Die diffuse Reflexionsschicht im Inneren der 3"-Ulbrichtkugel ist eine Eigenherstellung, die auf goldbeschichteten Korundkörnern beruht. Als Empfänger steht für die Wellenlänge von $10,6 \mu\text{m}$ ein stickstoffgekühlter HgCdTe-Detektor (Typ KMPC 11-4-J1, Hersteller Kolmar Technologies) zur Verfügung. Die Eintrittsöffnung der Coblentzkugel besitzt mit ca. 15 mm einen größeren Durchmesser als die im UV-VIS-Bereich eingesetzte Coblentzkugel. Dies war notwendig, da sich die Strahlereinigung und Justage des Laserstrahls bei dieser Wellenlänge als sehr schwierig erwiesen haben. Der minimal detektierbare Streuwinkel liegt bei $2,5^\circ$ und somit im Bereich der anderen TS-Messanordnungen bei $10,6 \mu\text{m}$. In [Bjuggren, 1996] wurden $2,7^\circ$ und in [H. Bennett, 1978] $2,85^\circ$ als minimal detektierbare Streuwinkel angegeben.

4.4.5 Abbildungsverhalten einer Coblentzkugel

Für den Einsatz einer Coblentzkugel und die Dimensionierung des Empfängers hinsichtlich Detektionsfläche und Öffnungswinkel ist eine exakte Berechnung des Abbildungsverhaltens der Coblentzkugel Voraussetzung. Im ersten Schritt soll die Abbildung zur Veranschaulichung nur in der Ebene betrachtet werden, in der sich Probe, Detektor und Kugelachse befinden. Danach erfolgt die vollständige, dreidimensionale Berechnung der Abbildung. Weitere Berechnungen zum Abbildungsverhalten von Coblentzkugeln sind in [Lorincik, 1997 b] und [Kadkhoda, 2000 c] zu finden.

Der Fokusfleckdurchmesser D_{Fokus} lässt sich anhand der Reflexionsbedingungen innerhalb einer Coblentzkugel in der Ebene von Probe, Detektor und Kugelachse nach Gl. 4.4 bestimmen. Die Beziehungen der einzelnen Größen wurden in Abb. 4.23 dargestellt. Evtl. Abschattungen durch die Probe oder den Detektor wurden nicht berücksichtigt.



$$\sin \beta = \frac{x_s + y_s \tan \Theta_s}{r} \cos \Theta_s$$

$$\Theta_d = \Theta_s - 2\beta$$
(4.4)

$$x_d = r \frac{\sin \beta}{\cos \Theta_d} + y_d \tan \Theta_d$$

$$D_{\text{Fokus}} = x_{d,\text{max}} - x_{d,\text{min}}$$

Abb. 4.23: Darstellung der Einflussgrößen bei der Berechnung des Fokusdurchmessers einer Coblentzkugel

Hierbei steht x_s für den Mittenversatz der Probe zum Kugelmittelpunkt und y_s für den Höhenversatz, Θ_s für den aktuell betrachteten Streuwinkel, r für den Radius der Coblenzkugel, β für den Einfallswinkel auf der Kugeloberfläche und Θ_d für den Einfallswinkel an der Detektorposition. Somit lässt sich der Mittenversatz des betrachteten Strahlendurchstoßpunktes x_d in Abhängigkeit des Höhenversatzes des Detektors y_d bestimmen. Als Bezugspunkt wurde der Halbkugelmittelpunkt gewählt.

Der mittels einer Coblenzkugel detektierbare Streuwinkelbereich kann auch durch die aktive Fläche und den Öffnungswinkel des Detektors eingeschränkt werden. Die Größe des Detektors muß dem Fokusfleck, der durch die Abbildung des Streulichtes auf die Detektorposition entsteht, angepasst werden. Bei einer Coblenzkugel mit einem Radius r und einer definierten Beleuchtungsfleckposition x_s, y_s kann für einen definierten Höhenversatz des Detektors y_d die Fokusfleckgröße D_{Fokus} für einen Winkelbereich $[\Theta_{s,\text{min}}, \Theta_{s,\text{max}}]$ durch Gl. 4.4 berechnet werden. Der Fokusfleckdurchmesser D_{Fokus} entspricht der minimalen Größe der aktiven Detektorfläche. In Abb. 4.24 wurde für den Streuwinkel Θ_s in einem Bereich von -89° bis 89° der Mittenversatz x_d bei einem Coblenzkugelradius $r = 175$ mm, einer Probenposition $x_s = 30$ mm und $y_s = 0$ mm und einer Detektorhöhenversatz $y_d = 0$ mm dargestellt. In Abb. 4.25 ist der Verlauf des Winkels Θ_d zu sehen, unter dem das unter dem Winkel Θ_s gestreute Licht auf den Detektor gelangt.

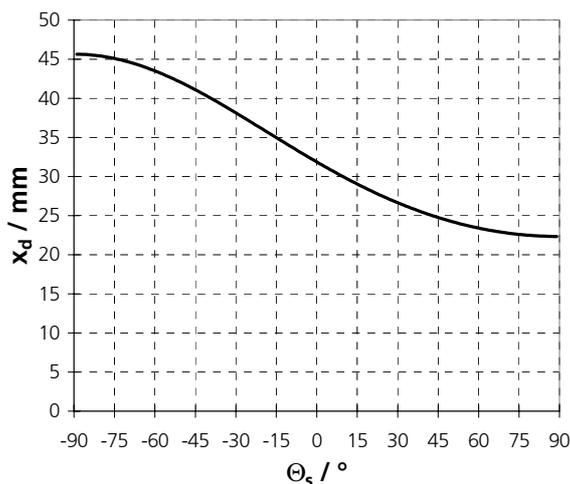


Abb. 4.24: Berechnung des Mittenversatzes x_d , unter dem das unter einem Winkel Θ_s gestreute Licht den Detektor erreicht

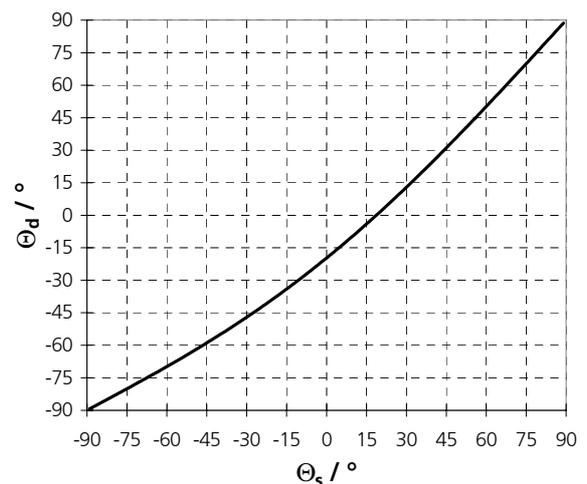


Abb. 4.25: Berechnung des Winkels Θ_d , unter dem das bei einem Winkel Θ_s gestreute Licht den Detektor erreicht

Der Detektor muss somit mindestens einen Durchmesser von 24 mm haben und 34 mm vom Mittelpunkt der Kugel angebracht sein, um einem Streuwinkelbereich von -85° bis 85° zu erfassen. Gleichzeitig muss der Detektor einen Öffnungswinkelbereich von $-86,7^\circ$ bis $83,3^\circ$ aufweisen, um das Licht des gesamten Streuwinkelbereiches zu erfassen. Da solch ein großer Detektoröffnungswinkel bei handelsüblichen Detektoren (z.B. Photomultipliern) nicht angeboten wird, muss entweder die Beschränkung des erfassbaren Winkelbereiches durch den Detektor hingenommen werden ([Rönnow, 1994], [Mattsson, 1988]) oder der Detektoröffnungswinkel durch technische Hilfsmittel vergrößert werden. Ein solches Hilfsmittel stellt die Verwendung einer Ulbrichtkugel zwischen Detektor und Coblenzkugel dar. Diese Lösung wird in dieser Arbeit verwendet und wird auch in [ISO/FDIS 13696, 1999] vorgeschlagen.

Die räumliche Berechnung des Abbildungsverhaltens einer Coblenzkugel erfolgt analog zu den in Gl. 4.4 vorgestellten. Als Eingangsparameter kommen zusätzlich noch die Verschiebung der Probe und des Detektors in z-Richtung hinzu. Diese werden bei den folgenden Betrachtungen immer auf 0 gesetzt. Als Aufgabe stand nicht nur die Berechnung des Abbildungsverhaltens, sondern auch die Optimierung der Lage von Probe und Detektor in der Coblenzkugel. Das selbstentwickelte Computerprogramm ermöglicht, ausgehend von einer Coblenzkugel (wahlweise in sphärischer oder Ellipsoidenform) mit einem vorgegebenen Radius sowie vorgegebener Probenposition in x-Richtung und Detektorgröße, die x-/y-Positionen für den Detektor und y-Position für die Probe zu berechnen, bei denen das gesamte Streulicht in einem Winkelbereich von $\pm 85^\circ$ auf die Detektoröffnung trifft. Da der Beleuchtungsfleck auf der Probe ebenfalls eine Ausdehnung besitzt, wurde die Berechnung für die vier Endpunkte des Beleuchtungsflecks in x-/y-Richtung durchgeführt. In Abb. 4.26 und 4.27 sind die möglichen y-Positionen für Probe y_s und Detektor y_D einmal für einen Beleuchtungsfleck mit 1 mm Durchmesser und einen mit 4 mm Durchmesser dargestellt. Der Durchmesser der Coblenzkugel betrug 350 mm und der Abstand des Beleuchtungsflecks vom Kugelmittelpunkt 30 mm.

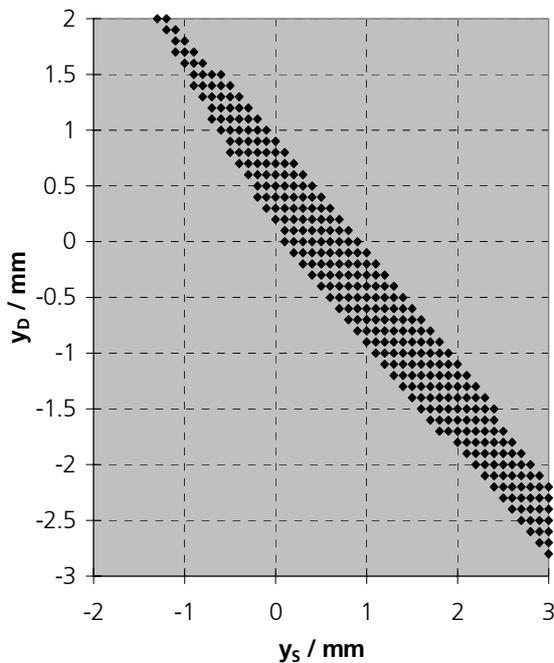


Abb. 4.26: Mögliche y-Positionen von Probe und Detektor zur vollständigen Erfassung des Streulichts im Winkelbereich bis 85° ; Beleuchtungsfleckdurchmesser 1 mm

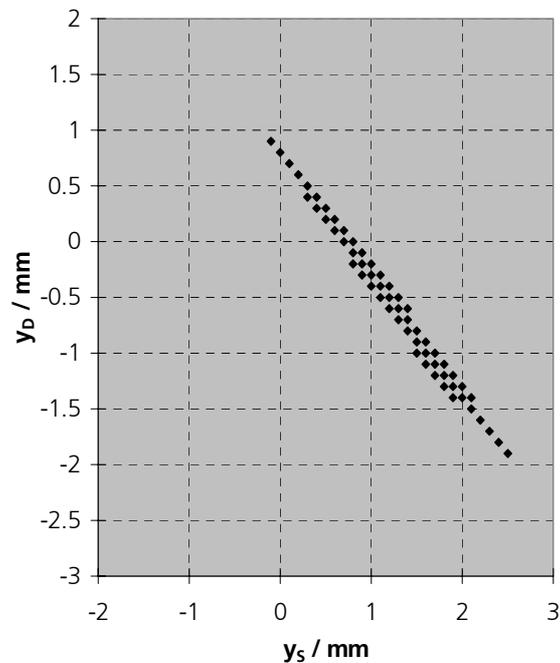


Abb. 4.27: Gleiche Abbildung wie Abb. 4.26 nur mit Beleuchtungsfleckdurchmesser 4 mm

Es ist deutlich zu erkennen, dass bei einem Beleuchtungsfleck mit 4 mm Durchmesser die Anforderungen sowohl an die Justage von Proben- und Detektorposition als auch an die Formhaltigkeit der Coblenzkugel wesentlich höher sind.

Die Form der Abbildung der vier Randstrahlen ist in Abb. 4.28 und 4.29 für die oben verwendete Coblenzkugel bei zwei ausgesuchten Proben- und Detektorpositionen zusammen mit der Detektoröffnung dargestellt. Ein zusammenhängender Kurvenverlauf kennzeichnet den Durchlauf des Azimutwinkels bei konstantem Streuwinkel. Die Berechnungen erfolgten in Schritten von 0° bis 85° in 5° -Schritten und für den Azimutwinkel von 0° bis 360° in 15° -

Schritten.

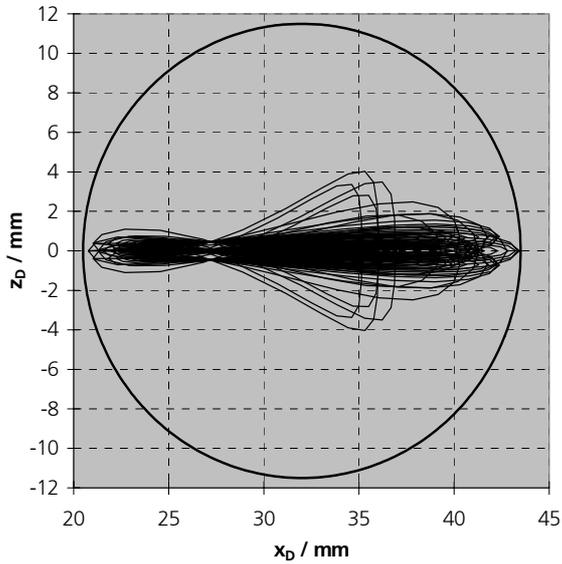


Abb. 4.28: Abbildung der Randstrahlen an der Detektorposition; Verschiebung der Probe $y_s = 1,1$ mm und des Detektors $y_d = -1$ mm; Beleuchtungsfleckdurchmesser 1 mm

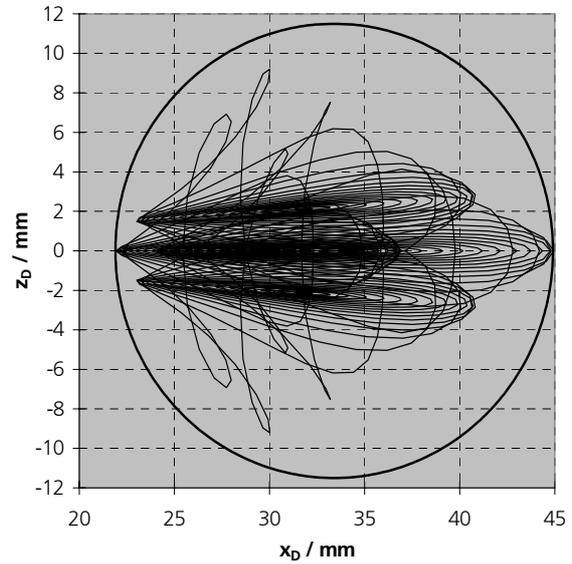


Abb. 4.29: Abbildung der Randstrahlen an der Detektorposition; Verschiebung der Probe $y_s = 1,5$ mm und des Detektors $y_d = -1$ mm; Beleuchtungsfleckdurchmesser 4 mm

In beiden Fällen konnte gezeigt werden, dass eine vollständige Erfassung des Streulichts mittels einer Detektoröffnung mit einem Durchmesser von 23 mm möglich ist.

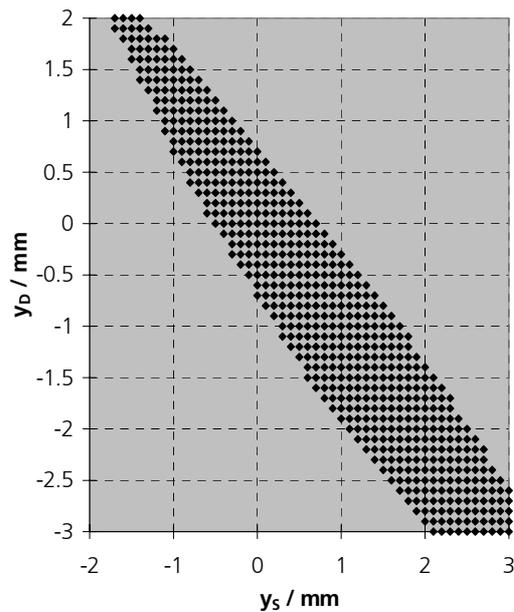


Abb. 4.30: Gleiche Abbildung wie Abb. 4.27 nur mit Co-blentzkugel in Ellipsenform

Bei Verwendung eines Ellipsoiden als sammelndes Element anstelle einer Kugel ist der Bereich

der y -Positionen, bei denen eine vollständige Abbildung des Streulichts erfolgt, wesentlich größer. In Abb. 4.30 ist dieser Fall für einen Beleuchtungsfleck mit 4 mm Durchmesser dargestellt. Die anderen Parameter wurden zu denen in Abb. 4.27 gleich gelassen. Es ist festzustellen, dass sich neben der Breite des Bereiches der vollständigen Abbildung auch die Lage verschoben hat. War die Position $y_d = 0$ mm und $y_s = 0$ mm vorher nicht im Bereich enthalten, so ist sie es jetzt.

In Abb. 4.31 und Abb. 4.32 sind die Abbildungen der Randstrahlen eines 4 mm großen Beleuchtungstrahls zusammen mit einer Detektoröffnung von 23 mm (mittig auf die Position $x_d = 30$ mm ausgerichtet) dargestellt. Als Positionen für Probe und Detektor in y -Richtung wurde in Abb. 4.31 die Nullposition gewählt und bei Abb. 4.32 die Position $y_s = 1,1$ mm und $y_d = -1$ mm.

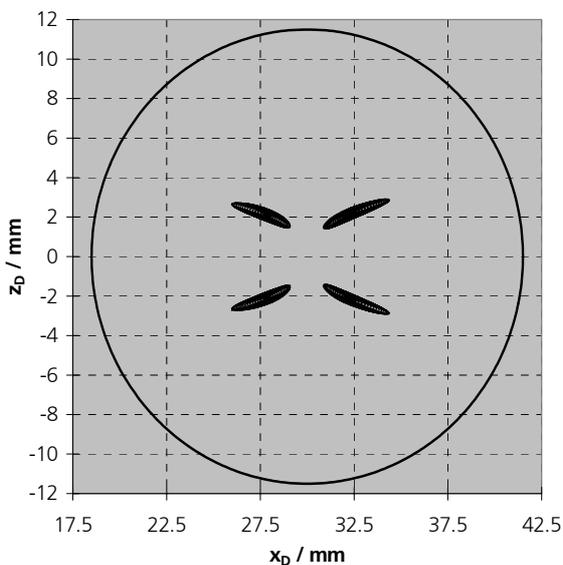


Abb. 4.31: Abbildung der Randstrahlen an der Detektorposition (elliptische Coblenzkugel); Verschiebung der Probe $y_s = 0$ mm und des Detektors $y_d = 0$ mm; Beleuchtungsfleckdurchmesser 4 mm

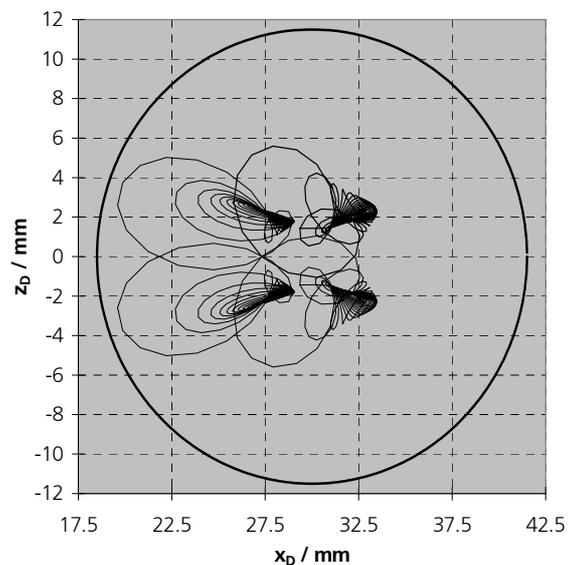


Abb. 4.32: Abbildung der Randstrahlen an der Detektorposition (elliptische Coblenzkugel); Verschiebung der Probe $y_s = 1,1$ mm und des Detektors $y_d = -1$ mm; Beleuchtungsfleckdurchmesser 4 mm

Die Größe der benötigten Detektoröffnung ist bei Verwendung einer elliptischen Coblenzkugel kleiner, aber es erfolgt aufgrund der räumlichen Ausdehnung des Beleuchtungsflecks auf der Probe keine Abbildung in einen Fokuspunkt. Die Größe der Detektoröffnung muss zur vollständigen Erfassung des Streulichts dann mindestens $9 \cdot 6 \text{ mm}^2$ bzw. $14 \cdot 12 \text{ mm}^2$ betragen.

4.5 Ansteuereinheit

Die Ansteuereinheit besteht aus folgenden Elementen (Abb.4.33):

- einem Lock-in-Verstärker,
- einem Computer mit entsprechender Ansteuersoftware und
- einem Oszillograph.

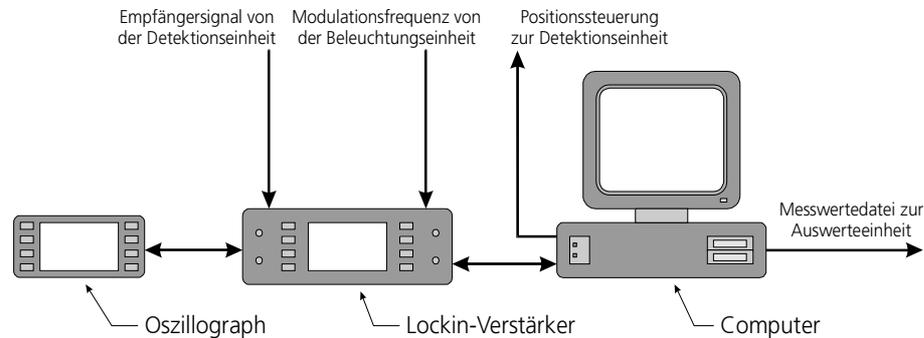


Abb. 4.33: Komponenten der Ansteuereinheit

Der Lock-in-Verstärker (Modell EG&G 7220) separiert und verstärkt die Frequenz des Empfängersignals, das die gleiche Modulationsfrequenz wie der Chopper mit einer vorgegebenen Phasenverschiebung hat. Um das Messsignal noch unempfindlicher gegen Rauschstörgrößen zu machen, kann es über einen bestimmten einstellbaren Zeitraum (die Zeitkonstante) integriert werden. Somit wird das eigentliche Messsignal von Signalen anderer Quellen getrennt. Eine ausführliche Betrachtung des Lock-in-Prinzips ist in [Kadkhoda, 1995] zu finden. Die Signalform wird während der Messung von einem Oszillographen angezeigt und kann separat kontrolliert werden.

Die selbstentwickelte Ansteuersoftware übernimmt das Messsignal als Spannungswert vom Lock-in-Verstärker und berechnet anhand der gespeicherten Kalibrierungsdaten sowie der aktuellen Abschwächerwerte den TS-Wert. Die TS-Werte werden in einer Messwertdatei zusammengefasst und der Auswertereinheit zur Verfügung gestellt. Das Programmsystem arbeitet hierbei so flexibel, dass eine Auswertung einer Messung auch dann möglich ist, wenn eine weitere Messserie aufgenommen wird.

Das Programmsystem steuert während einer Messung folgende Hardwarekomponenten des TS-Messsystems an:

- den Lock-In-Verstärker zur Messwertübernahme, Empfindlichkeitsregelung und Einstellung der Zeitkonstanten,
- das Abschwächersystem zur Regelung der Einfallintensität auf der Probe,
- der Detektorshutter zur Blindschaltung des PMT in den Messpausen und
- das Probenpositioniersystem zur definierten Verschiebung der Probe zum Beleuchtungsstrahl.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Beleuchtung der Anzeige einiger Hardwarekomponenten während des Messbetriebs durch das Programmsystem abzuschalten, um Störlichteinflüsse zu minimieren.

Mittels des Probenpositioniersystems sind während einer Messung folgende Probenverschiebungen möglich:

- ein Linienscan, bei dem nur eine Achse der Probenpositionierung verändert wird,
- ein Kreuzscan, bei dem nacheinander zwei senkrecht zueinander stehende Linienscans

- durchgeführt werden,
- ein Flächenscan innerhalb eines Rechteckgebietes und
 - ein Flächenscan innerhalb eines elliptischen Probengebietes.

Die Bewegung während der Messwertaufnahme kann dabei hinsichtlich Länge, Anzahl der Messpositionen und Messpositionsabstand (wobei sich einer der Werte jeweils durch die drei anderen ergibt) in beide Achsenrichtungen unabhängig eingestellt werden. Die Positioniergenauigkeit der eingesetzten Linearversteller beträgt in jede Achsenrichtung 2 μm .

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, eine beliebige Anzahl der oben beschriebenen Messabläufe zu definieren und entweder als Einzelmessung oder als Mehrfachmessung, bestehend aus mehreren Einzelmessungen, durchführen zu lassen. Der Vorteil besteht darin, dass man z.B. mittels eines Kreuzscans einen Überblick über die Höhe und laterale Verteilung des Streulichts erhalten kann und danach, ohne die Scanparameter neu eingeben zu müssen, ein Flächenscan durchgeführt werden kann. Eine weitere mögliche Anwendung besteht in der Durchführung von mehreren hochauflösenden Flächenscans an verschiedenen Probenpositionen, wobei nur einmal vor der Durchführung die Scanparameter für alle Flächenscans eingestellt werden müssen. Die Scans werden danach automatisch hintereinander durchgeführt, so dass innerhalb dieses Zeitraums keine weiteren Eingaben notwendig sind.

Die automatische Ansteuerung einer Probenposition während einer Messung kann in zwei Varianten erfolgen:

- die Position wird angefahren und die Probe angehalten, der Messwert wird aufgenommen und danach wird die nächsten Position angesteuert oder
- die Probe wird mit konstanter Geschwindigkeit verfahren und bei Erreichen einer definierten Probenposition wird der Messwert aufgenommen, ohne die Probenbewegung zu unterbrechen.

Bei der zweiten Variante wird die Probenbewegung nur unterbrochen, wenn der Empfindlichkeitsbereich des Lock-in-Verstärkers angepasst oder eine neue Abschwächereinstellung vorgenommen werden muss.

Die Zeiten für die reine Messwertaufnahme sind anhängig von der eingestellten Anzahl der Messpositionen und der Scanart sowie der Art der Messwertaufnahme. Typische Zeiten für einen Linienscan von 101 Messwerten sind z.B. 10 s und für einen Flächenscan mit 10201 Messwerten 17 min.

4.6 Auswerteeinheit

Die Auswerteeinheit besteht aus einem Computer mit einer speziell zur Darstellung und Auswertung von totalintegrierten Streulichtmessungen entwickelten Software (Abb. 4.34).

In einem Diagramm kann eine beliebige Anzahl von Linienscans angezeigt werden, die mit einer Legende versehen werden können. Flächenscans können in jede beliebige Ansicht gedreht werden und mit einem streuwertabhängigen Farbverlauf versehen werden. Neben einer separaten Höhenskala kann auch hier eine Legende angezeigt werden. Neben den Mess-

bedingungen kann die Legende auch Bemerkungen und statistische Parameter enthalten. Es kann wahlweise eine dezimale oder logarithmische Skalierung der Achsen eingestellt werden.

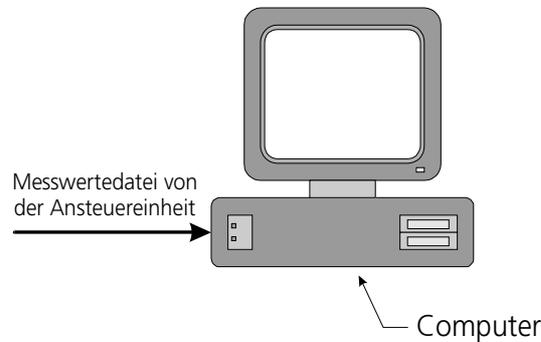


Abb. 4.34: Darstellung der Auswerteeinheit

Die Auswertesoftware unterstützt sowohl die Bearbeitung und Visualisierung von Linienscans und Kreuzscans als auch von Flächenscans in rechteckigen und elliptischen Flächenbereichen.

Es ist möglich, sich neben einer beliebigen Anzahl von Linien- oder Flächenscans in verschiedenen Fenstern innerhalb des Programms auch Textfenster z.B. mit einer Probenliste oder einer Zusammenfassung von statistischen Parametern anzeigen zu lassen. Die automatische Generierung des Textfensters mit den statistischen Parametern aus den geöffneten Linien- oder Flächenscans ist möglich. Als statistische Parameter werden von der Auswerteeinheit folgende Werte automatisch berechnet ([Bronstein, 1989]):

- Minimum und Maximum des TS-Wertes,
- arithmetischer und geometrischer Mittelwert und
- Standardabweichung und Symmetrie.

Eine beliebige Anzahl von Fenstern mit Linien- oder Flächenscans bzw. Textfenstern können in einem Layout zusammengefasst und gedruckt werden. Es besteht hierbei die Möglichkeit, mehrere Fenster über- und nebeneinander auf einem Blatt darzustellen. Die Anordnung der Fenster kann genauso wie jedes Fenster für sich abgespeichert werden, so dass der Ausdruck in dieser Anordnung zu jeder Zeit wiederholt werden kann.

Es besteht die Möglichkeit, die Messdaten im ASCII²⁸-Format zu exportieren und aus einem ASCII-Format auch wieder zu importieren. Spalten- und Zeilentrenner können dabei beliebig vorgegeben werden.

Linien- und Flächenscans können auch als Bitmap oder im WMF²⁹-Format als File oder ins Clipboard exportiert werden.

Um eine flexible Nutzung der Auswerteeinheit sowohl zeitgleich zur Messwertaufnahme als auch getrennt davon zu ermöglichen, wurden die Softwareteile der Ansteuer- und Auswerteeinheit in einem Programm realisiert. Dieses Programm kann zur Messwerterfassung im On-Line-

²⁸ American Standard Code for Information Interchange

²⁹ Windows Metafile Format

Modus gestartet werden. Im Off-Line-Modus wird nur eine Auswertung der Messergebnisse erlaubt und die Ansteuerhardware nicht angesprochen. Dieses Vorgehen erlaubt die sichere Nutzung des Programms, ohne andere Hardwarekomponenten zu beeinträchtigen.

4.7 Inbetriebnahme einer Messanordnung und Messablauf

Zur Inbetriebnahme muss die Messanordnung initialisiert und anschließend kalibriert werden.

Bei der Initialisierung des Lock-in-Verstärkers wird die Kommunikation zwischen Computer und Verstärker eingestellt und überprüft, und es werden die aktuellen Einstellungen des Lock-in-Verstärkers dem Computer zur Verfügung gestellt. Bei der Initialisierung der Probenpositionierereinheit muss die Position der Endlagenschalter jeder Bewegungsrichtung ermittelt werden. Diese Prozedur ist notwendig, da bei einer sehr hohen Verfahrgeschwindigkeit bzw. bei einer hohen Auslastung von Microsoft Windows® die Endlagenschalter überfahren werden könnten. Die Positionsbestimmung erfolgt mit einer geringen Verfahrgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Verhinderung der Abarbeitung aller anderen Anwendungen unter Microsoft Windows.

Nach der Inbetriebnahme muss die Messanordnung für die gewünschte Wellenlänge kalibriert werden, indem jeweils ein Spannungswert für einen 0%- und einen 100%-Streuwert ermittelt wird.

Bei der Messung des Nullwertes wird die Lichtquelle abgeschirmt und somit, bei entsprechender Verdunkelung des Labors, das elektronische Rauschsignal gemessen. Diese Messung setzt sich aus einer einstellbaren Anzahl von Einzelmessungen zusammen. Aus diesen Werten wird die effektive Rauschspannung $U_{\text{Rausch,eff}}$ (Standardabweichung), die maximale Rauschspannung $U_{\text{Rausch,Spitze}}$ (Abstand zwischen größtem und kleinsten Messwert) sowie die Offsetspannung U_{Off} (Mittelwert aller Werte) gebildet. Bei allen folgenden Messungen wird vom gemessenen Spannungswert die Offsetspannung U_{Off} abgezogen und überprüft, ob das Resultat größer als die doppelte effektive Rauschspannung $U_{\text{Rausch,eff}}$ ist. Sollte das nicht der Fall sein, wird der Benutzer vom Programm darauf hingewiesen. Bei der Ermittlung des zu 100%-Streuung äquivalenten Spannungswertes $U_{100\%}$ muss ein Streunormal mit bekanntem Streuvermögen verwendet werden. Als Streunormale werden kalibrierte, kommerziell erworbene Lambertstrahler verwendet (siehe Abschn. 4.9.2.5). Nach Anpassung der Abschwächer kann dann entweder das Streulicht an einer Stelle des Streunormals oder durch Mittelung über einen 1D- oder 2D-Scan des Streunormals ermittelt werden. Die Berechnung ergibt sich dann als (Gl. 4.5):

$$U_{100\%} = \frac{U_{\text{Mess}} - U_{\text{Off}}}{TS_{\text{Normal}} T_{\text{Abschw}}} . \quad (4.5)$$

Hierbei ist TS_{Normal} das bekannte Streuvermögen des Streunormals, U_{Mess} die gemessene Signalspannung und T_{Abschw} das Transmissionvermögen der verwendeten Abschwächer.

Nachdem die Messanordnung kalibriert wurde, müssen die Messparameter eingestellt werden. Dies umfasst die Art der Messung (Linien- oder Flächenscan) sowie die Schrittweite und -anzahl je Bewegungsrichtung. Nach der Anpassung der Abschwächereinstellung an die zu vermessende Probe kann mit der Messung begonnen werden. Es ist möglich, die Messung jederzeit an-

zuhalten bzw. fortzusetzen und abubrechen. Soll die Probe nur an einer Stelle vermessen werden, so ist es möglich, eine Messreihe in Abhängigkeit von der Zeit aufzunehmen. Hierbei ist das Zeitintervall zwischen zwei Messwerten beliebig einstellbar. Der Computer ist während der Messwertaufnahme für andere Aufgaben nicht gesperrt. Der Streuwert TS an der jeweiligen Messposition kann dann aus dem Messsignal U_{Mess} , dem Transmissionsvermögen der verwendeten Abschwächer T_{Abschw} und den bei der Kalibrierung gewonnenen Werten ermittelt werden (Gl. 4.6):

$$TS = \frac{U_{\text{Mess}} - U_{\text{Off}}}{U_{100\%} T_{\text{Abschw}}} . \quad (4.6)$$

Die eigentliche Messspannung U_{Mess} ist dabei der Mittelwert aus einer einstellbaren Anzahl von Einzelwerten, die alle an dieser Messposition hintereinander aufgenommen wurden.

4.8 Auswertung der Messergebnisse

Die Auswertung der Messergebnisse muss an die jeweilige Messaufgabe angepasst sein. Sollen bei einer einzelnen Probe Streulichtschwankungen (z.B. durch Kontamination verursacht) untersucht werden, so bietet sich eine räumliche Darstellung eines Flächenscans an. Nur in einer zweidimensionalen Darstellung können die Streuzentren jeweils in ihrem ganzen Ausmaß und ihrer Form dargestellt werden (Abb. 4.35). Eindimensionale Darstellungen eignen sich wiederum besser zum Vergleich von Streulichtverteilungen an mehreren Proben, da sich die verschiedenen Streuniveaus sofort in der Darstellung erkennen lassen (Abb. 4.36).

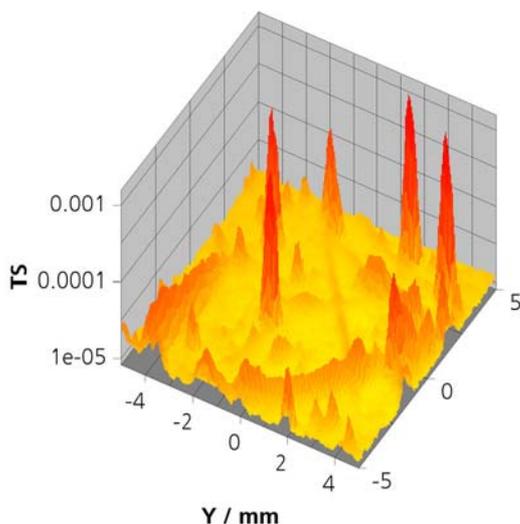


Abb. 4.35: 3D-Darstellung eines Flächenscans an einem SQ1-Substrat

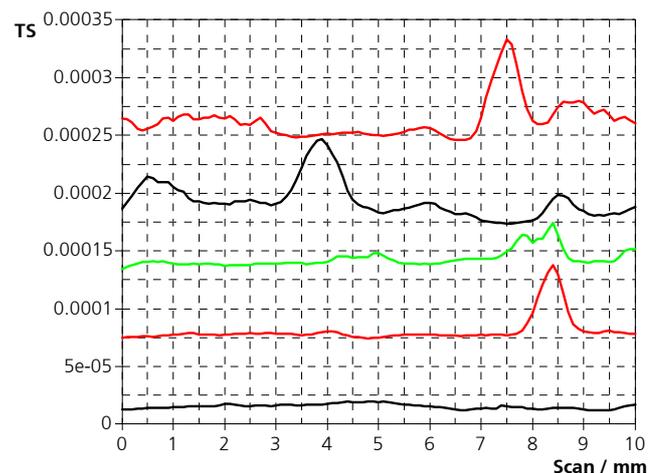


Abb. 4.36: Darstellung von Linienscans an Proben mit unterschiedlichen TS-Niveaus

Eine weitere Möglichkeit der Auswertung von Messergebnissen besteht in der Angabe eines

repräsentativen Wertes. Dies wird besonders bei einer großen Probenanzahl und tabellarischen Wertaufstellungen bevorzugt. Bei einer Messung ohne Probenverschiebung liefert der Mittelwert die gewünschte Aussage. Bei einer Messung mit Probenverschiebung (Linien- oder Flächenscan) erhält man eine Vielzahl von Streuwerten und muss aus diesen den "Grundstreuwert" ermitteln. Der Grundstreuwert ist der Wert, der das Streulichtniveau der Probe ohne einzelne Fluktuationen, hervorgerufen durch Defekte oder Kontaminationen, beschreibt. Dieser Wert kann in erster Näherung durch Betrachten der graphischen Darstellung ermittelt werden, wobei sich prinzipiell zweidimensionale Darstellungen zum Ablesen der Niveaus besser eignen als 3D-Darstellungen. Neben dem subjektiven Einfluss bei der Niveauermittlung, hervorgerufen durch die ablesende Person, ist dieses Vorgehen stark von der Auflösung und Skalierung der Darstellung abhängig. Die statistische Ermittlung dieses Wertes erweist sich als schwierig, da weder der arithmetische oder geometrische Mittelwert, Minima oder Maxima, mit oder ohne Einbeziehung der Standardabweichung die Streuwertverteilung hinreichend beschreiben. In den Abb. 4.37 und 4.38 wurden zwei Linienscans aus Abb. 4.35 separiert. Bei einem Scan (Abb. 4.37) sind starke lokale Schwankungen vorhanden, bei dem anderen (Abb. 4.38) nicht. In die Darstellungen wurden jeweils das Minimum und das Maximum sowie der arithmetische und geometrische Mittelwert eingetragen. In Tab. 4.3 wurden die berechneten statistischen Parameter an den beiden Scans aufgeführt.

Parameter	Scan mit lokalen Schwankungen	Scan ohne lokale Schwankungen
Minimum	$9,14 \cdot 10^{-6}$	$9,64 \cdot 10^{-6}$
Maximum	$5,13 \cdot 10^{-4}$	$1,44 \cdot 10^{-5}$
arithmetischer Mittelwert	$3,02 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$
geometrischer Mittelwert	$1,53 \cdot 10^{-5}$	$1,16 \cdot 10^{-5}$
Standardabweichung	$7,40 \cdot 10^{-5}$	$9,51 \cdot 10^{-7}$

Tab. 4.3: Statistische Parameter der Scans mit (Abb. 4.37) und ohne (Abb. 4.38) Schwankungen

Anhand der Schwankungen der Werte in Tab. 4.3 und der Darstellungen in Abb. 4.37 und 4.38 erkennt man, dass keiner dieser Parameter für beide Scans den oben beschriebenen Grundwert repräsentiert. Visuell bestimmt würde der Grundwert bei beiden Scans im Bereich von $1,1 \cdot 10^{-5}$ bis $1,2 \cdot 10^{-5}$ liegen. Dieser Wert entspricht den Mittelwerten des Scans ohne Schwankungen.

Eine weitere statistische Möglichkeit der Ermittlung des Grundwertes stellt die Auswertung des Histogramms dieser TS-Scans dar (Abb. 4.39 und 4.40) [ISO/FDIS 13696, 1999]. In diesem Histogramm ist die Anzahl der Messwerte, die im Intervall $[TS, TS+dTS)$ liegen, über TS abgetragen worden. Der Wert dTS ist dabei die Standardabweichung. In [Kadkhoda, 1995] wird gezeigt, daß die Angabe des Streuwertes TS, in dessen Intervall $[TS, TS+dTS)$ sich die meisten Messwerte befinden, als repräsentativer Wert für die Streulichtmessungen verwendet werden kann. Die Verteilung der Messwerte um diesen Wert TS kann durch die Streuwerte TS_u und TS_u angegeben werden, bei denen ein 10%iger Abfall der Messpunktzahl gegenüber der im Intervall $[TS, TS+dTS)$ zu verzeichnen ist.

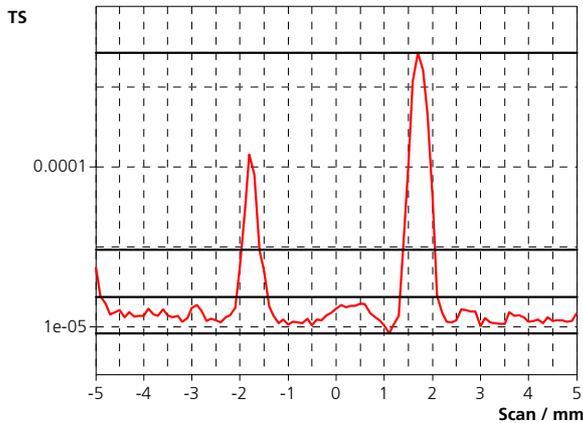


Abb. 4.37: Darstellung eines Linienscans aus Abb. 4.35 mit lokalen Schwankungen und daran berechneter statistischer Werte (von oben nach unten: Maximum, arithmetischer und geometrischer Mittelwert, Minimum), logarithmische Darstellung

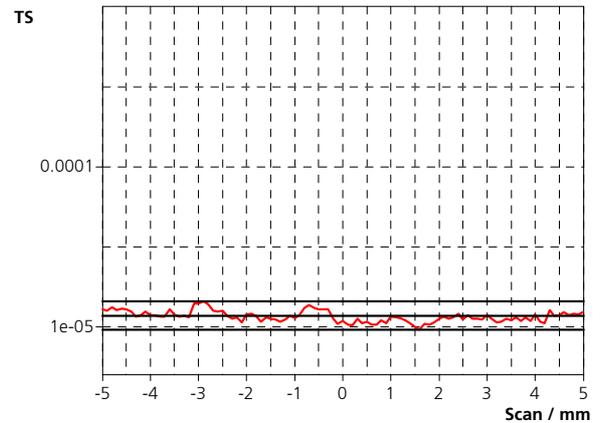


Abb. 4.38: Darstellung eines Linienscans aus Abb. 4.35 ohne lokale Schwankungen und daran berechneter statistischer Werte (von oben nach unten: Maximum, arithmetischer und geometrischer Mittelwert (identisch), Minimum), logarithmische Darstellung

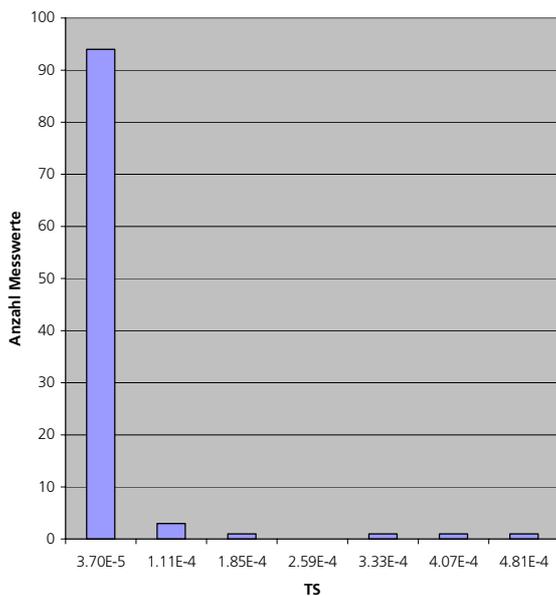


Abb. 4.39: Histogramm, bestimmt am Scan mit Schwankungen aus Abb. 4.37

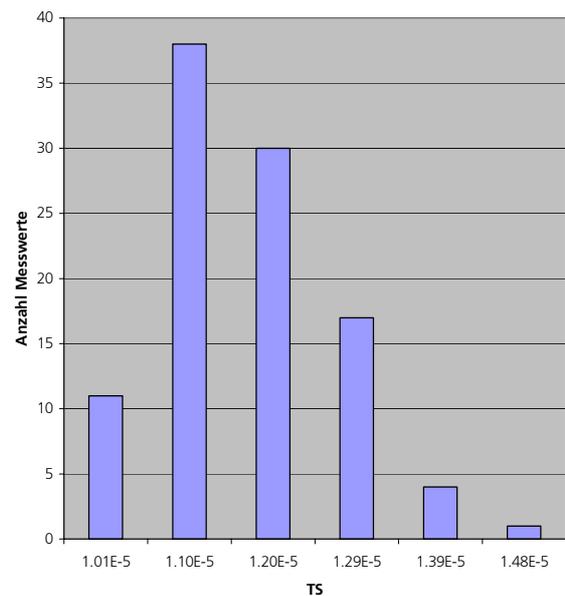


Abb. 4.40: Histogramm, bestimmt am Scan ohne Schwankungen aus Abb. 4.38

Die somit ermittelten Grundwerte liegen bei $3,70 \cdot 10^{-5}$ bzw. $1,10 \cdot 10^{-5}$ für die Scans mit und ohne Schwankungen. Nur der so ermittelte Grundwert am Scan ohne Schwankung liefert den visuell bestimmten Grundwert und somit die gleiche Aussage wie die vorher schon bestimmten Mittelwerte an diesem Scan.

Ein anderes Verfahren wird in [ISO/FDIS 13696, 1999] demonstriert. Das hier verwendete Prinzip besteht aus einer rekursiven Datenreduktion, gekoppelt mit abschließender Auswertung der

verbleibenden Streuwerte. Das Prinzip besteht dabei aus folgenden vier Schritten:

1. Berechnung des Mittelwertes \overline{TS} der Streuwerte.
2. Berechnung der Standardabweichung σ_s der Streuwerte.
3. Verwerfen der Streuwerte, die nicht im Intervall $[\overline{TS} - 2 \sigma_s, \overline{TS} + 2 \sigma_s]$ liegen. Die Schritte 1 bis 3 mit den reduzierten Streulichtwerten solange ausführen, bis entweder keine Daten mehr reduziert werden oder die Veränderung der Standardabweichung σ_s kleiner als der Faktor 10^{-4} ist.
4. Bestimmung des Grundstreuwertes der Probe durch Bildung des arithmetischen Mittelwertes.

In den Abb. 4.41 und 4.42 wurden die Scans mit und ohne Schwankung zusammen mit den durch Datenreduktion ermittelten Grundwerten dargestellt.

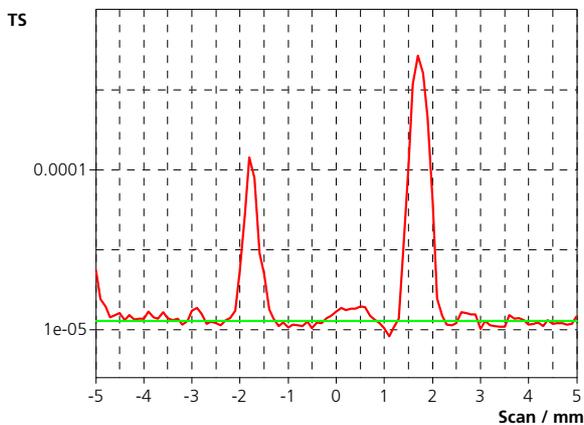


Abb. 4.41: Scan mit Schwankungen aus Abb. 4.37 mit durch Datenreduktion gewonnenem Grundwert

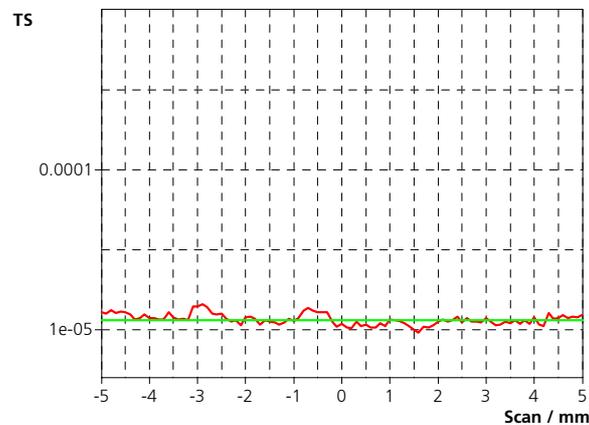


Abb. 4.42: Scan mit Schwankungen aus Abb. 4.38 mit durch Datenreduktion gewonnenem Grundwert

Diese Werte liegen bei $1,13 \cdot 10^{-5}$ bzw. $1,15 \cdot 10^{-5}$ für die Scans mit bzw. ohne Schwankungen und liegen somit im Bereich des visuell bestimmten Grundwertes. Der so bestimmte Grundwert des gesamten Fläschenscans (Abb. 4.35) beträgt $1,06 \cdot 10^{-5}$ und liegt somit in guter Näherung zu den Grundwerten der Einzelscans.

4.9 Fehlerbetrachtung

4.9.1 Überblick über mögliche Fehlerquellen

Jede der einzelnen Komponenten einer TS-Messanordnung birgt Fehlerquellen. Eine Auflistung der Fehlerquellen in Abhängigkeit der jeweiligen Komponente ihres Auftretens ist in Tab. 4.4 zu sehen.

Da die Fehler, die durch die Digitalisierung des Messsignals in der Ansteuereinheit mit 4 Stellen Genauigkeit und die digitale Weiterverarbeitung der Messwerte in der Ansteuer- sowie Auswerteeinheit mit 18 Stellen Genauigkeit erfolgen, verschwindend gering gegenüber den in Tab.

4.4 aufgeführten Fehlern sind, wird auf sie hier nicht weiter eingegangen.

Auf die Ursachen der angeführten Fehlerquellen und die Möglichkeiten der Fehlererkennung sowie Behebung oder Berechnung der Fehler wird im folgenden Kapitel eingegangen. Bei diesen Betrachtungen wird, wenn nicht anders ausgewiesen, von einer justierten, funktionsfähigen Messanordnung ausgegangen, die unter konstanten Außenbedingungen (Temperatur, Abdunkelung) betrieben wird.

Komponente der TS-Messanordnung	Fehlerquelle
Beleuchtungseinheit	Modulationsfehler des Messsignals sowie des Referenzsignals
	Fehler bei der Bestimmung der Abschwächerwerte
Beleuchtungs- und Detektionseinheit	Instabilitäten der Messanordnung (Lichtquelle und Detektor)
Detektionseinheit	Übertragungsfehler zwischen Beleuchtungsfleck, Coblenzkugel, Ulbrichtkugel und Empfänger
	Kalibrierungsfehler
	Probenabhängigkeit des Untergrundsignals
	Fehler durch Übersteuerung des Detektors
Detektions- und Ansteuereinheit	elektronisches Rauschen

Tab. 4.4: Fehlerquellen einer TS-Messanordnung

4.9.2 Bestimmung der einzelnen Fehlerquellen

4.9.2.1 Instabilitäten einer Messanordnung

Bei einer TS-Messanordnung kann es prinzipiell zu mehreren verschiedenen Arten von Instabilitäten kommen, die direkten Einfluss auf das Messsignal haben:

- Leistungs- und Lageinstabilität der Lichtquelle,
- Instabilität der Justage,
- Instabilität der Abschwächer,
- Instabilität des Detektors und
- Instabilität der Probe.

Die Lichtquelle kann Leistungs- sowie Lageinstabilitäten aufweisen. Bei der Leistungsinstabilität verändert sich die ausgestrahlte Lichtleistung in Abhängigkeit von der Zeit. Diese Änderungen wirken sich direkt auf die gemessene Streulichtleistung einer Probe aus, da diese proportional zur einfallenden Lichtleistung ist. Treten unakzeptabel hohe Leistungsinstabilitäten auf, lassen

sich diese durch eine Referenzmessung zeitgleich zur TS-Messung mit Hilfe eines separaten Referenzkanals kompensieren (z.B. [Kadkhoda, 1995], [Kienzle, 1993]). Bei der Lageinstabilität verändert sich die Strahlrichtung, und der Strahl ist nicht mehr oder nur noch unzureichend justiert. Durch diese Fehljustage tritt Beugung an den verwendeten Lochblenden auf, die einerseits die Leistung des eigentlichen Strahles schwächt und gleichzeitig Störlicht erzeugt. Dieses Störlicht kann dann ein höheres Untergrundsignal (vgl. Abschn. 4.9.2.6) erzeugen. Die Instabilität der Justage wird durch Temperaturschwankungen der Umgebung einer TS-Messanordnung hervorgerufen. Die damit verbundenen Längenausdehnungen der einzelnen Bestandteile der Messanordnung führen, genauso wie die Lageinstabilität der Lichtquelle, zu einer Dejustage der einzelnen Komponenten. Instabilitäten, hervorgerufen durch Temperaturschwankungen, konnten bei den in dieser Arbeit realisierten TS-Messanordnungen nicht festgestellt werden, da die Messanordnungen in klimatisierten Räumen aufgebaut wurden, die im ordnungsgemäßen Betrieb nur Temperaturschwankungen im zulässigen Bereich von wenigen Kelvin aufwiesen.

Die Instabilitäten der Abschwächer, der Probe und des Detektors bewirken jeweils, dass sich die Parameter der jeweiligen Elemente ändern. Dies sind bei dem Abschwächer der Abschwächerwert (Transmissions- bzw. Reflexionswert), bei der Probe der Streuwert und bei dem Detektor das Umwandlungsverhältnis zwischen der eingestrahlten Lichtleistung und dem Spannungs- bzw. Stromwert. Diese Effekte wirken sich jeweils direkt proportional zum Messsignal aus.

Die Instabilitäten lassen sich durch Langzeitmessung ermitteln. Hierbei wird die Messanordnung für eine Wellenlänge komplett justiert. Um einen definierten Ausgangszustand herzustellen, wird dann die Lichtquelle ausgeschaltet und solange gewartet, bis diese abgekühlt ist. Danach wird die Lichtquelle wieder eingeschaltet. Die Erfassung der Streulichtleistung einer Probe in Abhängigkeit der Zeit über einen längeren Zeitraum ermöglicht dann eine Aussage zur Stabilität der Messanordnung ab dem Einschaltvorgang.

In den Abb. 4.43 bis 4.45 sind die Langzeitmessungen bei 632,8 nm an einem 99%-Streunormal (Spectralon), einem Si-Wafer und einer hochstreuenden Probe (gedrehte Aluminiumfläche) in einem Zeitraum von 12 h dargestellt. Die Messwertaufnahme erfolgte jede Sekunde. Die Abbildungen sind jeweils so aufgebaut, dass einmal der interessante Bereich hinsichtlich der Detektorspannung vergrößert dargestellt wurde und zusätzlich ein Gesamtüberblick über die Messung als verkleinerte Abbildung eingefügt wurde.

Anhand der Abb. 4.43 bis 4.45 ist zu erkennen, dass nach ca. 1 bis 2 h die Messanordnung stabil arbeitet, sich jedoch ein Abfall bei der Bestrahlung des Spectralon-Streunormals über den Zeitraum von 12 h einstellte. Bei der Bestrahlung des Si-Wafers und der gedrehten Aluminiumoberfläche traten diese Effekte nicht auf, woraus sich schließen lässt, dass Schwankungen der Laserleistung nicht die Ursache sein können. Beim Spectralon-Streunormal verringert sich somit anscheinend innerhalb einer längeren Bestrahlung die totale Rückstreuung um ca. 3,3%. Eine 12 h später durchgeführte Wiederholung dieser Langzeitmessung zeigt das gleiche Verhalten hinsichtlich Detektorspannung und Abfall. Die totale Rückstreuung des Spectralon-Streunormals hat sich somit bei der Bestrahlung nicht dauerhaft geändert.

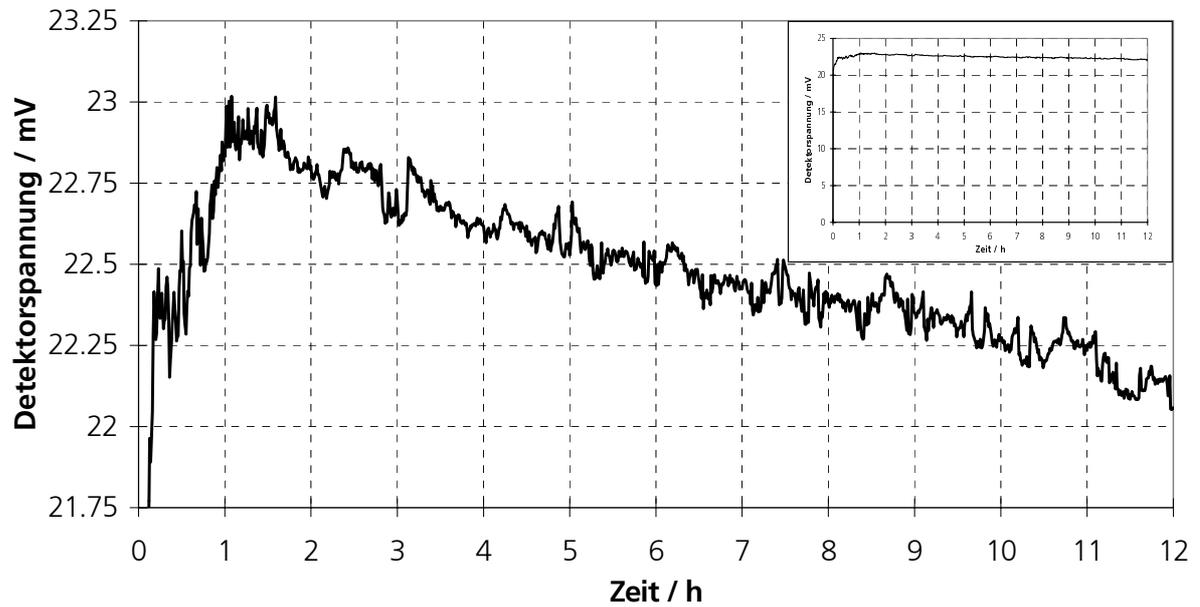


Abb. 4.43: Langzeitmessung mit HeNe-Laser (632,8 nm) an einem 99%-Streunormal

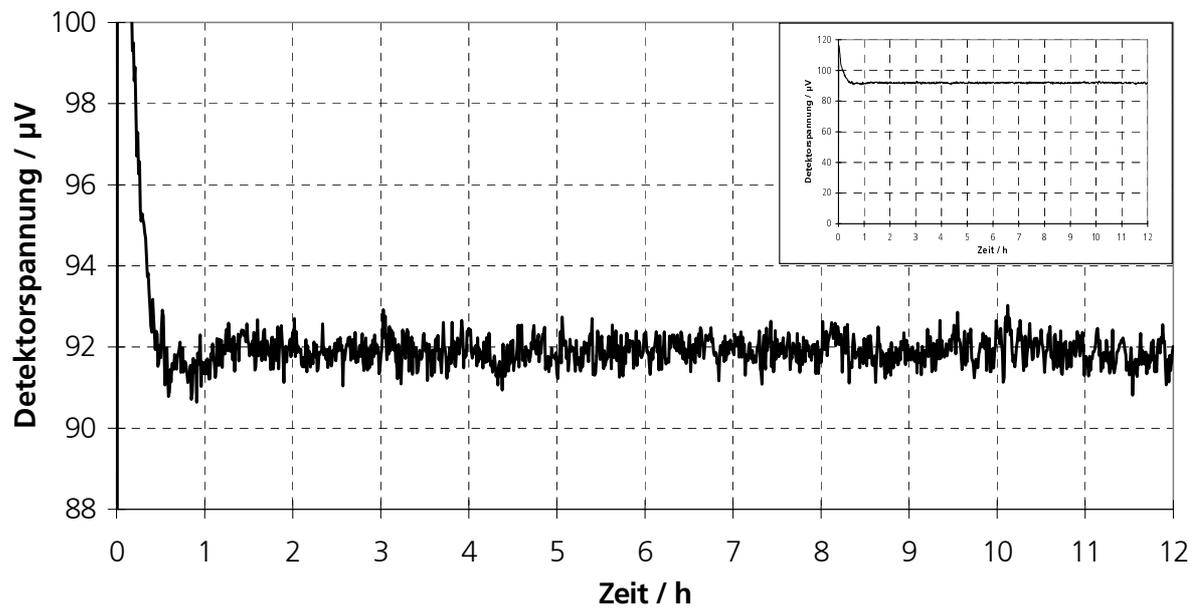


Abb. 4.44: Langzeitmessung mit HeNe-Laser (632,8 nm) an einem Si-Wafer

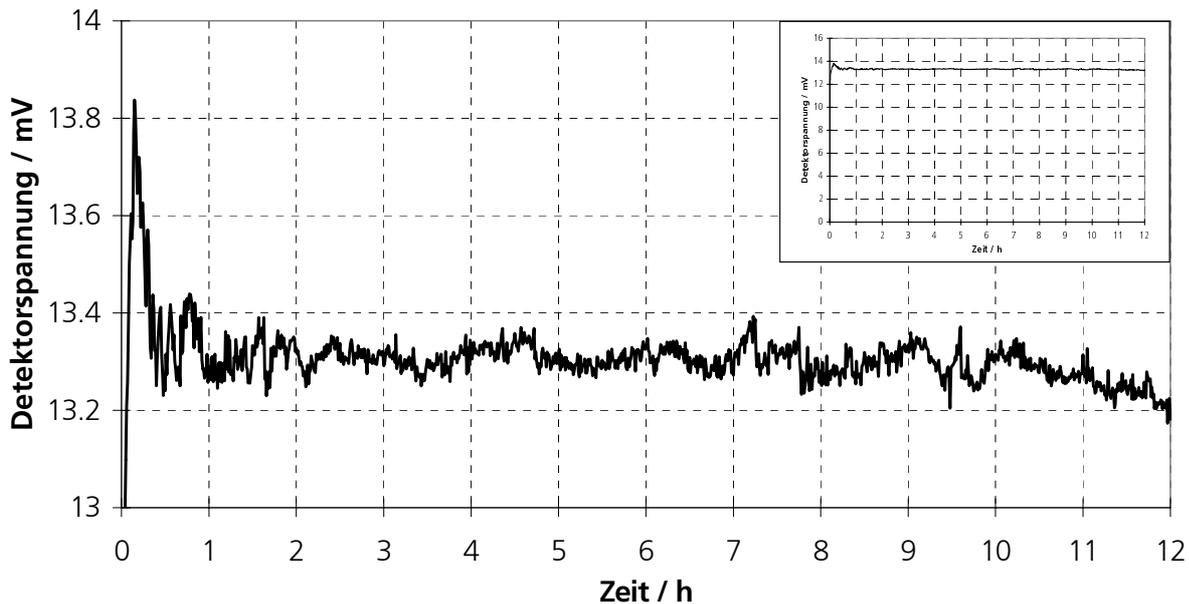


Abb. 4.45: Langzeitmessung mit HeNe-Laser (632,8 nm) an einer hochstreuenden Probe

Die relative Standardabweichung im Zeitabschnitt von 2 bis 12 h liegt bei 0,36% bzw. 0,24% für die Messung am Si-Wafer bzw. der gedrehten Al-Fläche. Die maximale Spitze-Spitze-Abweichung in einem beliebigen Zeitintervall von 1 h beträgt 2,0% bzw. 1,2%. Die Abweichungen sind beim Si-Wafer aufgrund des niedrigeren Detektorsignals und der somit größeren Einflüsse des elektronischen Rauschens höher als die bei der gedrehten Al-Fläche. Der Fehler, der durch Leistungsschwankungen des Lasers entsteht, beträgt somit maximal 1,2%. Nur dieser Fehler würde sich durch einen separaten Referenzkanal verringern lassen. Da dieser Fehler im Vergleich zu den anderen Messfehlern akzeptabel klein ist (siehe Abschn. 4.9.3), wurde auf dieses Vorgehen bei dieser Messanordnung verzichtet. Beim Einsatz neuer Lichtquellen muss diese Überlegung jedoch jeweils neu durchgeführt werden. Auch bei kleinen Messsignalen am Detektionssystem würde sich ein maximaler Fehler von 2% ergeben, wenn man nach ca. einer Stunde Messzeit eine erneute Kalibrierung bzw. Überprüfung der Kalibrierung der Messanordnung durchführt. Die maximale Spitze-Spitze-Abweichung der anderen Laserlichtquellen betrug nach der Einlaufzeit von maximal 2 h in einem Zeitintervall von 1 h maximal 2,9%.

Bei der Verwendung von Lampen als Lichtquellen treten, bedingt durch den Bildungsprozess des Leuchtbogens, ebenfalls Schwankungen auf ([L.O.T., 1995]). In Abb. 4.46 wurde die Langzeitmessung an einem Spectralon-Streunormal mit der Quecksilberdampfbohlenlampe bei 248 nm dargestellt. Nach einer Einlaufzeit von ca. 1,5 h tritt in einem Zeitintervall von 2 h eine maximale Spitze-Spitze-Abweichung von 2,2% auf. Danach brennt der Leuchtbogen für einen Zeitraum von ca. 2 h sehr unregelmäßig, bevor er einen neuen stabilen Zustand erreicht hat. Der Abfall der Detektorspannung ist wie bei Abb. 4.43 auf das Spectralon-Streunormal zurückzuführen und bei anderen Proben um ca. die Hälfte kleiner. Damit lässt sich wie schon bei der Bestrahlung mit 632,8 nm eine Veränderung der totalen Rückstreuung des Spectralon-Streunormals über einen längeren Bestrahlungszeitraum feststellen. Wie auch bei den Untersuchungen bei 632,8 nm stellte sich jedoch keine dauerhafte Veränderung des totalen Rückstreuwertes ein. Innerhalb des Zeitraums des unregelmäßigen Brennens des Leuchtbogens, was sich auch akustisch sehr gut wahrnehmen lässt, sollte keine Messung durchgeführt werden. Nach diesem Zeitraum und einer erneuten Kalibrierung ist dieses jedoch wieder möglich. Der Zeitpunkt des

ersten Auftretens eines solchen unregelmäßigen Brennens hängt sehr stark von der vorherigen Benutzungsdauer der Quecksilberdampfbogenlampe ab. Bei neuen Lampen tritt das unregelmäßige Brennen erst nach einem Zeitraum von über 8 h auf.

Bei einer Deuteriumlampe, die für die Erzeugung der Messwellenlänge 193 nm eingesetzt wird, treten ebenfalls Schwankungen, bedingt durch Veränderungen des Leuchtbogens, auf. Anders als bei der Quecksilberdampfbogenlampe wird in einem sehr kurzen Zeitraum ein anderer stabiler Lichtbogen erzeugt. Wie in Abb. 4.47 zu erkennen ist, wechselt der Leuchtbogen zwischen zwei stabilen Zuständen mit ca. 1% unterschiedlicher Lichtleistung. Bei Vernachlässigung des starken Abfalls der Detektorspannung sind die anderen Schwankungen der Deuteriumlampe im Vergleich zu den Leistungsänderungen beim Wechsel des Leuchtbogens zu vernachlässigen. Der starke Abfall der Detektorspannung ist nicht auf eine verminderte Leistungsabgabe der Lampe zurückzuführen, sondern auf eine starke und nicht reversible Veränderung der totalen Streuung des Spectralon-Streunormals. In Abb. 4.48 und 4.49 sind die Messungen der totalen Rückwärtsstreuung an dem Spectralon-Streunormal nach der Langzeitmessung bei 193 nm bei den Wellenlängen 248 nm und 632,8 nm dargestellt. Bei der Messung mit 248 nm ist eine deutliche Verringerung der totalen Rückwärtsstreuung in einem Bereich gemessen worden, der dem Beleuchtungsprofil bei 193 nm entspricht. Bei der Messung bei 632,8 nm konnte dieser Effekt an der gleichen Probenposition nicht erkannt werden. Die Langzeitbestrahlung bei 193 nm verändert somit die totale Rückstreuung des Spectralon-Streunormals bei 193 nm und zumindest auch bei 248 nm dauerhaft. Der relative Abfall der totalen Rückstreuung des Spectralon-Streunormals bei 193 nm betrug innerhalb eines Zeitraums von 1 h ca. 1,5%.

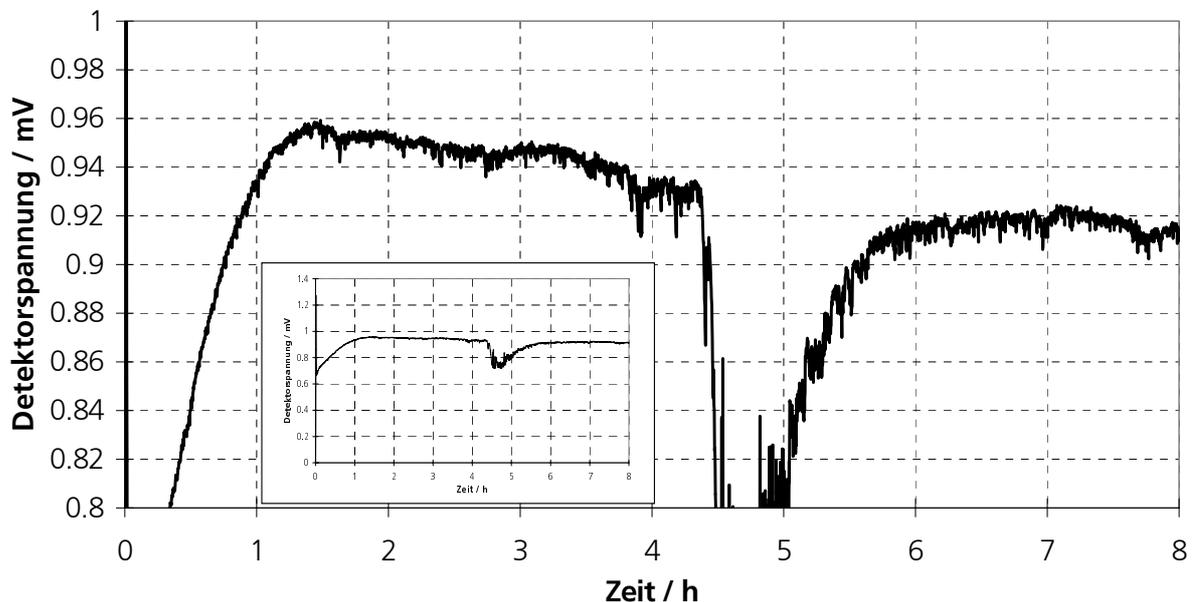


Abb. 4.46: Langzeitmessung mit Quecksilberdampfbogenlampe (248 nm) an einem Spectralon-Streunormal

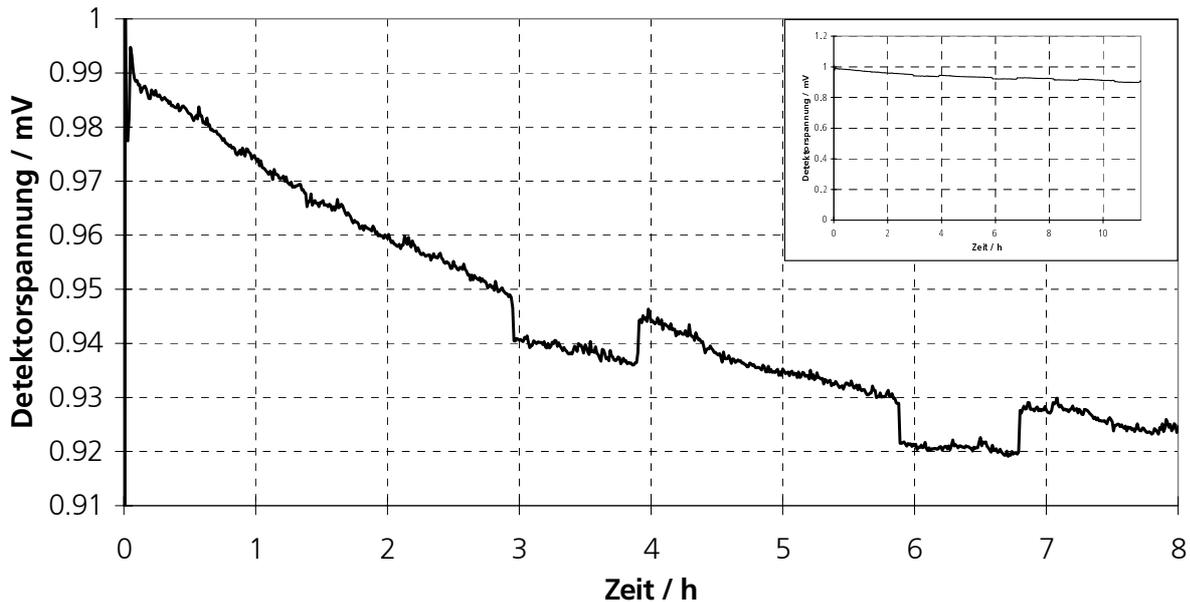


Abb. 4.47: Langzeitmessung mit Deuteriumlampe (193 nm) an einem 99%-Streunormal

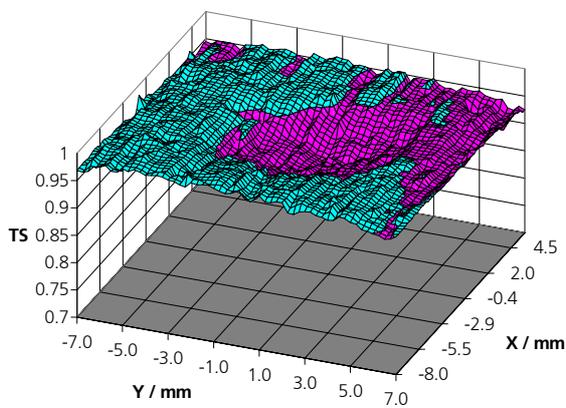


Abb. 4.48: Messung der totalen Rückwärtsstreuung bei 248 nm an dem Spectralon-Streunormal nach der Langzeitbestrahlung mit 193 nm

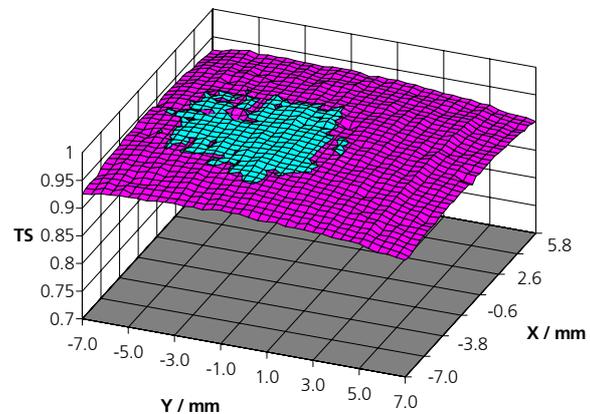


Abb. 4.49: Messung der totalen Rückwärtsstreuung bei 632,8 nm an dem Spectralon-Streunormal nach der Langzeitbestrahlung mit 193 nm

Wie schon bei den Laserlichtquellen sind auch die durch die Lampenlichtquellen verursachten Leistungsinstabilitäten gegenüber den anderen Messfehlern akzeptabel klein (siehe Abschn. 4.9.3), so dass auf einen separaten Referenzkanal verzichtet werden kann.

4.9.2.2 Modulationsfehler des Messstrahls sowie des Referenzsignals

Die Modulation des Messstrahls erfolgt durch den Chopper. Dieser besitzt eine rotierende Lochscheibe (Chopperblatt), die je nach Stellung den Strahl entweder blockt oder durchlässt. Durch eine Lichtschranke, die ebenfalls durch das Chopperblatt gesteuert wird, wird die momentane Modulationsfrequenz zur Choppersteuerung übertragen. Diese regelt die Motorgeschwindigkeit und stellt eine Referenzfrequenz für die Ansteuereinheit zur Verfügung. Eine konstante Modulationsfrequenz sowie Modulationsphase zwischen Referenzsignal und Detektorsignal sind notwendig, um eine wirkungsvolle, phasenempfindliche Verstärkung des Detektorsignals durchzuführen. Die Schwankungen der Modulationsfrequenz werden insbesondere durch Schwankungen der Motordrehzahl hervorgerufen. Die Modulationsphase wird hauptsächlich durch eine Falschlage der Chopperblattöffnungen und durch eine Exzentrizität des Chopperblattes gestört.

Um ein effektives Arbeiten des Lock-in-Verstärkers bei der phasenempfindlichen Messsignalverstärkung und somit ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis zu erhalten, sollten die Flanken der Messstrahlmodulation möglichst steil sein. Um diese Bedingung zu erfüllen, muss $F_{\text{Öff}}$, das Verhältnis zwischen Chopperblattöffnungsbreite B_{Chopp} und Messstrahldurchmesser D (Gl. 4.10), möglichst groß sein:

$$F_{\text{Öff}} = \frac{B_{\text{Chopp}}}{D} . \quad (4.10)$$

Inwieweit das Öffnungsverhältnis die sich ergebende Strahlmodulation beeinflusst, ist in Abb. 4.50 zu sehen.

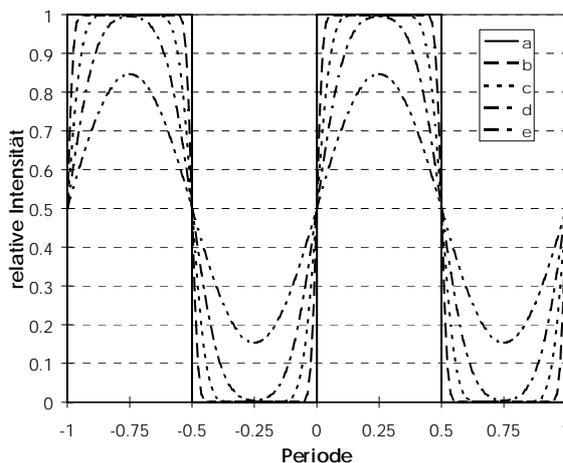


Abb. 4.50: Berechnete Modulation eines Strahl mit Gauß-Intensitätsverteilung in Abhängigkeit des Chopperöffnungsverhältnisses $F_{\text{Öff}}$: a) $F_{\text{Öff}} = \infty$, b) $F_{\text{Öff}} = 10$, c) $F_{\text{Öff}} = 4$, d) $F_{\text{Öff}} = 2$, e) $F_{\text{Öff}} = 1$

Für den Fall, dass der Strahldurchmesser $D = 0$ sein könnte, würde sich eine ideale Rechteckverteilung ergeben (Fall a). Je kleiner das Öffnungsverhältnis ist, desto mehr wird die Modulation an den Flanken verflacht und desto weniger Leistung besitzt der modulierte Strahl. Ist der Strahldurchmesser halb so groß wie die Chopperblattöffnungsbreite ($F_{\text{Öff}} = 2$), beträgt der Modulationspeak 99,5% der eingestrahlten Leistung. Bei noch kleineren Öffnungsverhältnissen kann der Strahl die Chopperblattöffnung nicht mehr vollständig durchdringen und beleuchtet

Öffnungsende und -anfang gleichzeitig. So wird bei einem Öffnungsverhältnis $F_{\text{Off}} = 1$ maximal nur noch 84% der eingestrahlenen Leistung durch die Chopperblatöffnung gelangen. Um diesen Effekt zu vermeiden und das Signal-Rausch-Verhältnis so günstig wie möglich zu gestalten, muss der Strahldurchmesser beim Chopperdurchgang so klein wie möglich sein.

Eine weitere Fehlerquelle bei der Strahlmodulation ist das Entstehen von gebeugtem Licht, das bei dem Durchtritt an den Ränder der Chopperblatöffnungen entsteht. Dieses gebeugte Licht kann als Störlicht (vgl. Abschn. 4.9.2.6) das Messergebnis verfälschen. Entscheidend ist hierbei, wie lange dieses Störlicht auftritt, d.h wie groß die Flankenanstiegszeit t_{Flank} im Verhältnis zur Modulationszeit t_{Mod} einer Periode ist. Dieses Verhältnis ist indirekt proportional zum Öffnungsverhältnis F_{Off} (Gl. 4.11):

$$\frac{t_{\text{Flank}}}{t_{\text{Mod}}} = \frac{1}{F_{\text{Off}}} \quad (4.11)$$

Das heißt, je größer das Öffnungsverhältnis ist, desto geringer ist die Zeit, in der Beugungserscheinungen das Messergebnis verfälschen können.

Aus den oben genannten Gründen wird für fast alle Beleuchtungseinheiten der TS-Messanordnungen der Strahl auf das Chopperblatt fokussiert. Nur bei der Beleuchtungseinheit mit Deuteriumlampe war dieses Vorgehen aus Platzgründen nicht möglich. Bei diesem Aufbau wurde der Chopper direkt hinter der ersten Irisblende platziert, da dort der Strahldurchmesser im Strahlengang am kleinsten ist. In Tabelle 4.5 sind die erreichten Messstrahldurchmesser D und die sich ergebenden Öffnungsverhältnisse F_{Off} für die verschiedenen Wellenlängen aufgelistet. Die Chopperblatöffnungsbreite B_{chopp} beträgt 8,1 mm.

Lichtquelle	Strahldurchmesser D an der Chopperposition	Öffnungsverhältnis F_{Off}
D_2 -Lampe	1,5 mm	5,4
Hg-Lampe	500 μm	16
HeCd-Laser	31 μm	260
Ar ⁺ -Laser (488 nm)	47 μm	170
HeNe-Laser (VIS)	60 μm	140
CO ₂ -Laser	340 μm	24

Tab. 4.5: Strahldurchmesser D der einzelnen Lichtquellen an der Chopperposition und sich daraus ergebende Öffnungsverhältnisse F_{Off}

4.9.2.3 Fehler bei der Bestimmung der Abschwächerwerte

Die Werte der Abschwächer können auf zwei verschiedenen Wegen ermittelt werden:

- ex-situ: außerhalb einer TS-Messanordnung z.B. mittels eines Spektralphotometers oder
- in-situ: innerhalb einer TS-Messanordnung durch Vergleichsmessungen.

Der Vorteil der Verwendung der ex-situ-Vermessung der Transmission- bzw. Reflexionsabschwächung liegt in der geringeren Fehlergrenze der verwendeten Messgeräte. Werden die Abschwächerwerte in-situ ermittelt, so werden automatisch die jeweiligen Parameter der Beleuchtungsquelle (wie Intensität und Korrelationslänge) entsprechend dem Anwendungsfall berücksichtigt. Bei der in-situ-Messung werden die Abschwächerwerte jeweils durch Vergleichsmessungen mit einem Abschwächer mit bekannter Abschwächung ermittelt.

Im UV-VIS-Bereich wird ein Abschwächerrad mit vier Transmissionsabschwächern, bestehend aus einem Quarzsubstrat mit dünner Metallschicht, verwendet. Das Transmissionsvermögen der Abschwächer wird als Transmissionsgrad τ [Haferkorn, 1981] oder als optische Dichte D [Spindler & Hoyer, 1990] angegeben (Gl. 4.12). Hierbei ist P die Lichtleistung unmittelbar vor der Eintrittsfläche der Probe und P'' die Lichtleistung unmittelbar hinter der Austrittsfläche der Probe:

$$\tau = \frac{P''}{P}, \quad D = \log_{10} \frac{1}{\tau}. \quad (4.12)$$

Die kommerziell erworbenen Abschwächer haben laut Herstellerangaben eine optische Dichte D von 1,0, 2,0, 3,0 und 4,0 im Wellenlängenbereich von 200 - 1800 nm.

Bei der in-situ-Bestimmung der Abschwächerwerte wird mit dem Abschwächer mit der geringsten optischen Dichte angefangen. Das Abschwächerrad wird in eine Position ohne Abschwächer bewegt und die Leistung des Messstrahls wird durch Verwendung zusätzlicher Abschwächer so angepasst, dass das an einer beliebigen, homogen streuenden Probe ausgesendete Streulicht den verwendeten Detektor optimal auslastet. Die so ermittelte relative Streuleistung der Probe $P_{\text{Ref},0}$ dient als Vergleichswert. Wird dann der zu vermessende Abschwächer in den Messstrahl gelegt, kann die relative Streuleistung mit diesem Abschwächer $P_{\text{Ab},1}$ gemessen werden. Durch Quotientenbildung der beiden Streuleistungen wird der Transmissionsgrad τ_1 und dessen Fehler $\Delta\tau_1$ des ersten Abschwächers ermittelt (Gl. 4.13):

$$\tau_1 = \frac{P_{\text{Ab},1}}{P_{\text{Ref},0}}, \quad \left| \frac{\Delta\tau_1}{\tau_1} \right| = \left| \frac{\Delta P_{\text{Ab},1}}{P_{\text{Ab},1}} \right| + \left| \frac{\Delta P_{\text{Ref},0}}{P_{\text{Ref},0}} \right|. \quad (4.13)$$

Bei der Vermessung der folgenden Abschwächer wird als Vergleichswert jeweils die relative Streuleistung unter Verwendung des gerade vermessenen Abschwächers nach einer neuen Anpassung der zusätzlichen Abschwächer verwendet. Der Transmissionsgrad des x-ten Abschwächers τ_x und dessen Fehler $\Delta\tau_x$ kann dann über die Beziehung Gl. 4.14 ermittelt werden:

$$T_x = \frac{P_{Ab,x}}{P_{Ref,x-1}} T_{x-1}, \quad \left| \frac{\Delta T_x}{T_x} \right| = \left| \frac{\Delta P_{Ab,x}}{P_{Ab,x}} \right| + \left| \frac{\Delta P_{Ref,x-1}}{P_{Ref,x-1}} \right| + \left| \frac{\Delta T_{x-1}}{T_{x-1}} \right|. \quad (4.14)$$

Der maximal auftretende Fehler des Transmissionsgrades des x-ten Abschwächers ΔT_x lässt sich unter Beachtung der linearen Fehlerfortpflanzung nach Gl. 4.15 bestimmen:

$$\left| \frac{\Delta T_x}{T_x} \right| = \sum_{n=1}^x \left| \frac{\Delta P_{Ab,n}}{P_{Ab,n}} \right| + \sum_{n=0}^{x-1} \left| \frac{\Delta P_{Ref,n}}{P_{Ref,n}} \right| + \sum_{n=1}^{x-1} \left| \frac{\Delta T_n}{T_n} \right|, \quad (x > 0, x \in \mathbb{N}). \quad (4.15)$$

Die für die Abschwächer bestimmten typischen Transmissionsgrade bei einigen häufig eingesetzten Messwellenlängen sowie deren Fehler wurden in Tab. 4.6 aufgelistet.

Wellenlänge λ	Abschwächer 1		Abschwächer 2		Abschwächer 3		Abschwächer 4	
	T_1	$ \Delta T_1 / T_1 $	T_2	$ \Delta T_2 / T_2 $	T_3	$ \Delta T_3 / T_3 $	T_4	$ \Delta T_4 / T_4 $
248 nm	7,48%	1,5%						
325 nm	9,31%	1,0%	0,955%	1,7%	$1,93 \cdot 10^{-4}$	2,2%	$2,09 \cdot 10^{-5}$	2,6%
514,5 nm	9,73%	0,4%	0,953%	0,7%	$4,39 \cdot 10^{-4}$	2,5%	$3,98 \cdot 10^{-5}$	3,5%
632,8 nm	9,51%	0,4%	0,807%	0,7%	$6,37 \cdot 10^{-4}$	2,5%	$5,60 \cdot 10^{-5}$	3,5%

Tab. 4.6: Transmissionsgrade T und deren relative Fehler $|\Delta T / T|$ für die vier im Abschwächerrad verwendeten Abschwächer bei häufig eingesetzten Messwellenlängen

Die Abschwächung T_R der für den MIR-Bereich verwendeten Reflexionsabschwächer lässt sich analog dem Vorgehen für die Transmissionsabschwächer durch einen Vergleich der Reflexion an der Quarzglasoberfläche mit der an der Al-Fläche bestimmen. Die verwendete Probe zur Erzeugung des Streusignals sollte ebenfalls homogen streuend sein. Aus der gemessenen relativen Streuleistung der Quarzglasoberfläche P_{Ab} und der Al-Fläche P_{Ref} des Reflexionsabschwächers lässt sich dann die Abschwächung T_R und deren Fehler ΔT_R bestimmen (Gl. 4.16):

$$T_{R,x} = \frac{P_{Ab,x}}{P_{Ref,x}}, \quad \left| \frac{\Delta T_{R,x}}{T_{R,x}} \right| = \left| \frac{\Delta P_{Ab,x}}{P_{Ab,x}} \right| + \left| \frac{\Delta P_{Ref,x}}{P_{Ref,x}} \right|, \quad (x = 1, 2). \quad (4.16)$$

Da die Bestimmung der Abschwächung des einen Abschwächers von der des anderen unabhängig ist, gibt es zwischen den Abschwächern keine Fehlerfortpflanzung. In Tab. 4.7 sind die Abschwächerwerte für beide Reflexionsabschwächer und deren Fehler aufgeführt.

Wellenlänge λ	Abschwächer 1		Abschwächer 2	
	$\tau_{R,1}$	$ \Delta\tau_{R,1} / \tau_{R,1} $	$\tau_{R,2}$	$ \Delta\tau_{R,2} / \tau_{R,2} $
10,6 μm	11,6%	1,2%	11,7%	1,4%

Tab. 4.7: Abschwächungen τ_R und deren relative Fehler $|\Delta\tau_R / \tau_R|$ für die beiden Reflexionsabschwächer bei ihrer Einsatzwellenlänge

4.9.2.4 Übertragungsfehler der Coblenzkugel

Eine weitere mögliche Fehlerquelle kann die unterschiedliche Übertragung der verschiedenen Streuwinkel durch die Coblenzkugel zum Empfänger sein. Die Fehlerursachen sind hierbei:

- Abweichungen der Coblenzkugel von der idealen Kugelgestalt,
- falsche Positionierung des Beleuchtungsflecks auf der Probe zur Coblenzkugel,
- falsche Positionierung des Empfängers zur Coblenzkugel und
- Dejustage des spekularen Strahlanteils zur Austrittsöffnung der Coblenzkugel.

Bei der Abweichung der Coblenzkugel von der idealen Kugelgestalt (z.B. eine Oberflächenwelligkeit) werden einzelne Streuwinkelbereiche durch den falschen Reflexionswinkel nicht mehr zur Ulbrichtkugleintrittsöffnung gelenkt. Dieser Fehler lässt sich durch eine sorgfältige Auswahl des Coblenzkugelgrundkörpers minimieren.

Eine falsche Positionierung des Beleuchtungsflecks auf der Probe zur Coblenzkugel bewirkt eine Fehllage und eine Vergrößerung des Fokusflecks. Dies bewirkt genauso wie die falsche Positionierung des Empfängers zur Coblenzkugel, dass gewisse Streuwinkelbereiche nicht vom Empfänger erfasst werden können. Aus diesem Grund wurde, ausgehend von den Berechnungen des Abbildungsverhaltens der Coblenzkugel und den sich daraus ergebenden Positionen für Beleuchtungsfleck und Empfänger (siehe Abschn. 4.4.5), eine Nachjustage der Empfängerposition durchgeführt. Hierbei wurde ein Streunormal an der Probenposition platziert und die Empfängerposition solange verschoben, bis das Detektorsignal sein Maximum erreicht hatte.

Den größten Einfluss auf die Übertragungsfunktion hat eine Dejustage des spekularen Strahlanteils (bei Rückwärtsstreuung der spekulare Reflex, bei Vorwärtsstreuung der spekulare transmittierte Strahl) zur Austrittsöffnung der Coblenzkugel. Entsprechend Gl. 3.2 bewirkt ein Strahlversatz von 1 mm in der Austrittsöffnung der Coblenzkugel (Durchmesser 350 mm) einen Versatz des minimal erfassten Winkelbereichs von $0,16^\circ$. Der minimal erfasste Winkelbereich würde dann nicht mehr azimutwinkelunabhängig bei 2° liegen, sondern in Abhängigkeit des Azimutwinkels in einem Bereich von $1,84^\circ$ bis $2,16^\circ$ schwanken. Um diesen Fehler zu minimieren, wurden verschiedene Justagemöglichkeiten an den Messanordnungen angebracht. Bei der Messung der Vorwärtsstreuung wird deshalb als erstes die Justage des Strahls auf die Austrittsöffnung durch Verkippung des letzten Umlenkspiegels visuell durchgeführt und danach mit Hilfe der Strahlrandbereiche des einfallenden Strahls fortgesetzt. Hierbei wird der Strahl so justiert, dass ein möglichst geringes Untergrundsignal vom Empfänger erfasst wird. Auch kleine Abweichungen von der Mittelposition des Strahls in der Austrittsöffnung können so erkannt

werden, da sonst die Strahlrandbereiche von der Coblenzkugel auf den Empfänger abgebildet und dort erfasst werden. Das prinzipiell gleiche Vorgehen wird bei der Justage der Messung der Rückwärtsstreuung angewendet. Hierbei kann die Probe mit in den Probenhalter integrierten Verstellmöglichkeiten so verkippt werden, dass der Strahl die Austrittsöffnung der Coblenzkugel ideal verlässt.

4.9.2.5 Streunormalfehler

Bei der Kalibrierung werden Streunormale verwendet, die zur homogenen Ausleuchtung des Integrationskörpers eine Lambertsche Streuverteilung (Cosinusstreuung) aufweisen.

Bei den Messungen wurden zwei verschiedene Streunormale verwendet:

- Streunormal für den UV-VIS-Wellenbereich aus Spectralon und
- Streunormal für den MIR-Bereich aus Infragold.

Beide Streunormale werden kommerziell von der Firma Labsphere mit Zertifizierung des Streuvermögens angeboten. Die Zertifizierung liegt bei Spectralon im Wellenlängenbereich von 250 nm bis 2,5 μm , bei Infragold von 700 nm bis 20 μm .

Für die Wellenlängen 193 nm und 248 nm wird kein Streunormal kommerziell angeboten. Aufgrund des geringen Wellenlängenunterschieds wird für die Wellenlänge 248 nm die Angabe für 250 nm verwendet. Bei der Bestimmung des Streuvermögens von Spectralon bei 193 nm konnte auf kein kommerzielles Gerät zurückgegriffen werden. Die totale Rückstreuung wurde in einem kleinen Versuchsaufbau unter Nutzung der Beleuchtungseinheit der TS-Messanordnung mit Deuteriumlampe und einer Ulbrichtkugel aus Spectralon ermittelt. Für ein neues Spectralon-Streunormal wurde so eine totale Rückstreuung von 88,5% bestimmt. Für das bei der Langzeituntersuchung bei 193 nm eingesetzte Spectralon-Streunormal lag der Wert der totalen Rückstreuung bei 80,4%. Als Streunormal wurde ein bisher wenig benutztes Spectralon-Streunormal verwendet, dessen Wert für die totale Rückstreuung mit 87% bei einem relativen Fehler von 15% angenommen wurde.

Bei den Messungen zur Bestimmung des Streuvermögens von Spectralon wurde eine Instabilität bei längerer Bestrahlung festgestellt (siehe Abschn. 4.9.2.1). Über einen Zeitraum von ca. 12 h verringerte sich das Streuvermögen um ca. 8%. Da für einen Kalibriervorgang das Streunormal ca. ½ Minute bestrahlt wird, verändert sich der Streuwert im Laufe von 180 Kalibrierungen um ca. 1%. Aufgrund dieser Eigenschaften ist der Einsatz von Spectralon bei der Kalibrierung der Wellenlänge 193 nm keine optimale Wahl, ist jedoch bis zur Auffindung eines besseren Streunormalmaterials vertretbar. An der Suche bzw. Entwicklung eines bei 157 nm und 193 nm einsetzbaren Materials für Streunormale beteiligt sich das Fraunhofer IOF Jena innerhalb des Projektes EUREKA-EUROLASER CHOCLAB II.

Die zertifizierten oder ermittelten Streuvermögen TS_{Normal} und relativen Fehler $|\Delta TS_{\text{Normal}} / TS_{\text{Normal}}|$ wurden in Tab. 4.8 für die einzelnen Wellenlängen aufgeführt.

Wellenlänge λ	Streunormal aus	zertifizierter Streuwert TS_{Normal}	angegebener relativer Fehler $ \Delta TS_{\text{Normal}} / TS_{\text{Normal}} $
193 nm	Spectralon	(87%)	(15%)
248 nm		(93,6%)	(2%)
325 nm		98,2%	0,8%
365 nm		98,8%	0,8%
488 nm		98,9%	0,8%
514,5 nm		98,9%	0,8%
632,8 nm		98,9%	0,8%
10,6 μm	Infragold	94,6%	0,8%

Tab. 4.8: Zertifizierung (bzw. angenommene Streuwerte) der verwendeten Streunormale bei ihren Einsatzwellenlängen

Neben dem Fehler des eigentlichen Streuwertes existiert mit der Ortsabhängigkeit auf dem Streunormal noch eine weitere Fehlerursache. In Abb. 4.51 wurde die Ortsabhängigkeit eines Spectralon-Streunormals bei der Wellenlänge 632,8 nm dargestellt.

Um diese Ortsabhängigkeit zu minimieren, wurde immer bei der Kalibrierung einer Messanordnung der Streuwert nicht nur an einer Stelle, sondern mittels eines Scans und Mittelung der Werte durchgeführt. Der Fehler durch die Mittelung liegt bei ca. 0,6%.

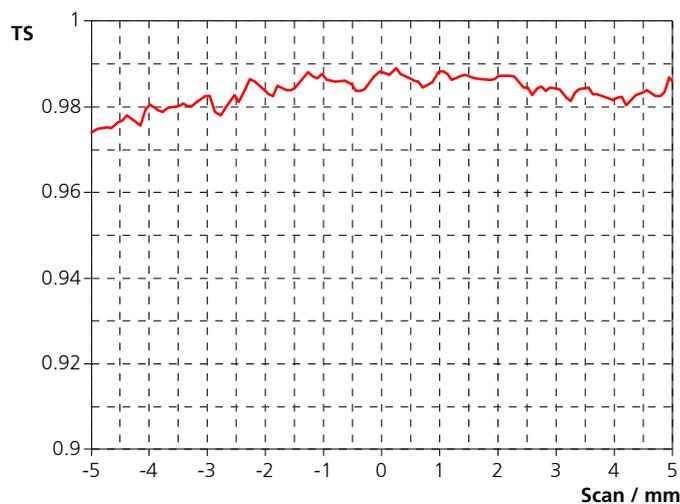


Abb. 4.51: Ortsabhängigkeit eines Spectralon-Streunormals bei der Wellenlänge 632,8 nm

4.9.2.6 Probenabhängigkeit des Untergrundsignals

Eine weitere Fehlerursache ist das Untergrundsignal einer TS-Messanordnung. Als Untergrundsignal wird hierbei der Messsignalteil bezeichnet, der nicht durch Streuung an der Probe entsteht, sondern Licht, das auf anderem Wege in das sammelnde Element und so auf den Detektor gelangt.

In Abb. 4.52 und Tab. 4.9 sind diese sechs Fälle des Eintritts des untergrundsignalbestimmenden Lichts in die Coblenzkugel sowie das Auftreten in Zusammenhang mit dem Vorhandensein einer Probe bzw. des Messstrahls grafisch sowie tabellarisch dargestellt.

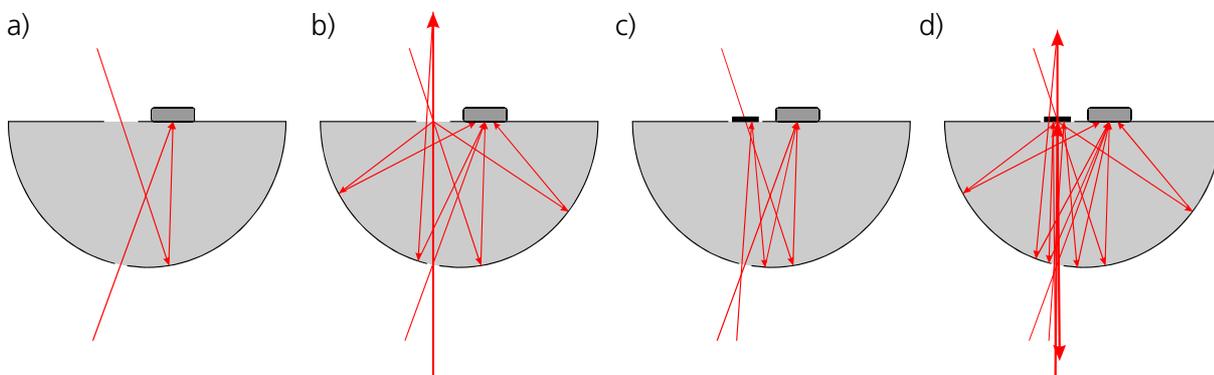


Abb. 4.52: Darstellung der Fälle des Eintritts des Untergrundsignal erzeugenden Lichtes in die Coblenzkugel mit und ohne Probe und mit und ohne Messstrahl: a) Fälle I und II, b) Fälle I, II, IV und VI, c) Fälle I bis III, d) Fälle I bis VI

Die Hauptursachen der einzelnen Untergrundsignalanteile sind:

- Raumlicht z.B. von LEDs³⁰ oder LCDs³¹ (Fälle I - III),
- am Chopperblatt reflektiertes Licht (Fälle I - III),
- Licht von der Strahlfalle in Transmissionsrichtung (Fall IV),
- Licht von der Strahlfalle in Reflexionsrichtung (Fall V) und
- Streuung an der Strahlformungsoptik, Beugung an den Blenden (Fall V).

Der Fall VI (Streuung des Messstrahls an der Luft) spielt in der Coblenzkugel nur eine untergeordnete Rolle, da aufgrund der abbildenden Eigenschaften dieses Licht nur aus einem sehr kleinen Messstrahlbereich zum Detektor gelangt. Bei der Vermessung von geringstreuenden Proben (z.B. superpolierten Si-Wafern) bestimmt das Streulicht an Luftmolekülen das Untergrundsignal von Ulbrichtkugeln. In [Kienzle, 1993] wurde das Untergrundsignal für eine Ulbrichtkugel mit 152 mm Durchmesser mit $1,02 \cdot 10^{-6}$ und in [Kadkhoda, 1995] mit 1 bis $1,4 \cdot 10^{-6}$ (\varnothing 250 mm) angegeben. In beiden Fällen musste zur Messung von niedrigstreuenden Proben die Messanordnung mit einem Gas gespült oder im Vakuum betrieben werden.

³⁰ Light Emitting Diode

³¹ Liquid Crystal Display

Fall des Lichteintritts in die Coblenzkugel		Eintritt des Untergrundsignals in die Coblenzkugel nach Abb. 4.52			
Fall	Weg	a) ohne Probe ohne Messstrahl	b) ohne Probe mit Messstrahl	c) mit Probe ohne Messstrahl	d) mit Probe mit Messstrahl
Licht, das vom Messstrahl unabhängig ist					
I	durch die Probenöffnung	X	X	X	X
II	direkt durch die Eintrittsöffnung	X	X	X	X
III	durch die Eintrittsöffnung mit Reflexion an der Probe			X	X
Licht, das vom Messstrahl abhängig ist					
IV	durch die Probenöffnung		X		X
V	durch die Eintrittsöffnung mit Reflexion an der Probe				X
VI	durch Luftstreuung des Messstrahls im sammelnden Element		(X)		(X)

Tab. 4.9: Gegenüberstellung der Fälle des Eintritts des untergrundsignalbestimmenden Lichts in die Coblenzkugel zu dessen Auftreten in Zusammenhang mit dem Vorhandensein einer Probe bzw. des Messstrahls : X - Fall tritt auf, (X) - Fall tritt auf, hat aber nur untergeordnete Bedeutung

Die Lichtanteile des Untergrundsignals können entweder entsprechend dem Referenzsignal moduliert (Fälle I - V) oder nichtmoduliert (Fälle I - III) auftreten. Die nichtmodulierten Strahlanteile werden durch die verwendete Lock-in-Technik bei der Messsignalauswertung unterdrückt, können aber durch Übersteuerung des Detektors zu einer Messsignalverfälschung beitragen (siehe Abschn. 4.9.2.7). Die modulierten Strahlanteile können gleichphasig oder gegenphasig moduliert sein. Dies führt entweder zu einer Erhöhung oder Verringerung des Messsignals.

Die Fälle I und III - V sind von den Probeneigenschaften bezüglich Transmission oder Reflexion abhängig.

Eine separate Bestimmung der Untergrundsignalanteile ist aufgrund ihrer Vielfalt nicht möglich. Eine Bestimmung der Untergrundsignale entsprechend der Darstellung Abb. 4.52 a) - c) ist möglich. Die Bestimmung des in Abb. 4.52 d) entstehenden Untergrundsignals ist nicht möglich. Diese, der Probenmessung entsprechende Situation, scheitert an dem Vorhandensein einer Probe mit Streuvermögen = 0% bei gleichzeitiger, definierter Reflexion \neq 0%. Dieser Fall lässt sich mit der in dieser Arbeit vorgestellten UV-/VIS-Messanordnung durch den Wechsel der Streulichtmessrichtung von Reflexionsrichtung in die Transmissionsrichtung unter Verwendung eines leeren Probenhalters gleichsetzen.

Da das tatsächlich wirkende Untergrundsignal bedingt durch die Abhängigkeit von Probenreflexion und Transmission nicht gemessen und somit korrigiert werden kann, muss es so weit wie möglich unterdrückt werden. Einige der prinzipiellen Möglichkeiten der Untergrundsignalverkleinerung seien hier exemplarisch aufgezählt:

- Abdeckung von Lichtquellen (z.B. LEDs, beleuchtete LCDs),
- Auslöschung des vom Chopperblatt reflektierten Lichts,
- Auslöschung des von der Probe reflektierten bzw. transmittierten Lichtes
- Einsatz von Strahlreinigungsaufbauten und
- Vergrößerung der Entfernung zwischen dem Integrationselement und den jeweils angrenzenden optischen Elementen (Umlenkspiegel, Strahlfallen).

Durch die Vergrößerung der Entfernung zwischen dem sammelnden Element und den jeweils angrenzenden optischen Elementen wird das Raumwinkelsegment ω zwischen diesen Elementen verkleinert. Somit wird auch der Winkelbereich des Lichts verkleinert, das an den optischen Elementen gestreut oder gebeugt wird und in das sammelnde Element gelangt. Das Raumwinkelsegment ω berechnet sich aus der Fläche der Eintrittsöffnung des sammelnden Elements A_{Ein} und dem Abstand zum betrachteten optischen Element L (Gl. 4.17):

$$\omega = \frac{A_{\text{Ein}}}{L^2} . \quad (4.17)$$

Durch eine Verzehnfachung des Abstandes L könnte somit das Raumwinkelsegment ω um den Faktor 100 verkleinert werden (siehe Abschn. 4.4.2). Um durch diesen Effekt eine Untergrundsignalverkleinerung zu erreichen, darf der Messstrahl nicht von der Eintrittsöffnung des sammelnden Elementes beschnitten oder an dessen Rand gebeugt werden.

4.9.2.7 Fehler durch Übersteuerung des Detektors

Eine Übersteuerung eines Detektors liegt dann vor, wenn dieser so viel Licht empfängt, dass er nicht mehr im linearen Bereich der Detektorkennlinie betrieben wird. Hierbei sind drei Fälle zu unterscheiden:

- die Übersteuerung führt zu keinerlei Veränderungen der Detektorkennlinie,
- die Übersteuerung führt zu kurzzeitigen Veränderungen der Detektorkennlinie und
- die Übersteuerung führt zu dauerhaften Veränderungen der Detektorkennlinie.

Bei einer Übersteuerung des Detektors, die zu einer dauerhaften Veränderung der Detektorkennlinie führt, wurde der Detektor irreparabel beschädigt und ist nicht mehr einsetzbar. Kurzzeitige Veränderungen der Detektorkennlinie infolge Detektorübersteuerung machen den Detektor für eine gewisse Ruhezeit unbrauchbar, in der die Folgen der Überlastung langsam abgebaut werden. Eine solche Situation ist z.B. nach einem "Verblitzen" eines PMT zu beobachten, bei der sich die Elektronenüberladung der Kathode erst nach etlichen Stunden abbaut ([Hamamatsu, 1999]). Diese beiden Übersteuerungsarten sind aufgrund ihrer Folgen (plötzliche, starke und zumindest zeitweise andauernde Änderung des Messsignals) relativ leicht zu

erkennen.

Wird bei einer Übersteuerung des Detektors die Kennlinie nicht geändert, so werden die Messergebnisse nur durch den nichtlinearen Charakter der Kennlinie verfälscht. Dieser Effekt ist nicht durch drastische Messsignaländerungen zu erkennen. Um eine Übersteuerung des Detektors zu vermeiden, muss deshalb das Messsignal permanent überwacht werden. Hierzu reicht eine Kontrolle des vom Lock-in-Verstärker ausgegebenen Spannungssignals U_{wechsel} nicht aus, da es nur eine Aussage über den Wechsellichtanteil, jedoch nicht über den Gleichlichtanteil gibt. Dieser wird mit Hilfe eines Gleichspannungsmessgerätes oder Oszilloskops überwacht und als Gleichspannungsanteil U_{gleich} gemessen. Ist der Spannungswert $U_{\text{lin,max}}$ des Detektors beim Erreichen des Endes des linearen Kennlinienbereiches bekannt, kann über das Einhalten der Ungleichung 4.18 das Arbeiten im linearen Kennlinienbereich überwacht werden:

$$U_{\text{lin,max}} \geq |U_{\text{gleich}}| + |U_{\text{wechsel}}|. \quad (4.18)$$

Durch das Einhalten der Ungleichung 4.18 wird gleichzeitig auch eine Übersteuerung des Detektors mit Veränderungen der Detektorkennlinie verhindert.

4.9.2.8 Elektronisches Rauschen

Das elektronische Rauschen, das zu einer Messsignalverfälschung führen kann, tritt in drei Komponenten auf:

- dem Detektor,
- den Analogelementen des Lock-in-Verstärkers und
- dem Verbindungskabel zwischen Detektor und Lock-in-Verstärker.

Durch die eingesetzte Lock-in-Technik wird der Einfluss des Rauschens auf die Anteile minimiert, die im Bereich der Toleranzen des Lock-in-Verstärkers die gleiche Frequenz und Phase wie das Referenzsignal aufweisen. Die so gleichgerichteten Rauschanteile erzeugen eine Offsetspannung U_{off} , die das eigentliche Messsignal verfälscht. Als Fehler dieser Offsetspannung ΔU_{off} wird die doppelte Standardabweichung (Vertrauenswert 95%) herangezogen. In Tab. 4.10 wurden die typischen Offsetspannungen U_{off} und ihre Fehler ΔU_{off} für die verwendeten Detektoren in Kombination mit dem Lock-in-Verstärker dargestellt.

Detektor	Wellenlängenbereich	U_{off}	ΔU_{off}
PMT	UVVIS	0,3 μV	0,2 μV
HgCdTe	MIR	7,6 μV	3,8 μV

Tab. 4.10: Typische Offsetspannungen U_{off} und ihre Fehler ΔU_{off} am Lock-in-Ausgang für die verwendeten Detektoren

Da die Offsetspannung ein systematischer Fehler ist, kann er durch eine Fehlerkorrektur aus dem

eigentlichen Messwert eliminiert werden (vgl. Gl. 4.5 und 4.6). Der Fehler der Offsetspannung lässt sich als zufälliger Fehler nicht aus den Messergebnissen korrigieren. Deshalb ist durch eine geeignete Wahl der verwendeten Abschwächer bei den Messungen darauf zu achten, dass der gemessene Spannungswert U_{Mess} immer wesentlich größer als der Fehler der Offsetspannung ΔU_{Off} ist. Üblicherweise ist die Messspannung U_{Mess} mindestens 100- bis 1000-mal größer als der Fehler der Offsetspannung ΔU_{Off} .

4.9.3 Gesamtfehler

Der Gesamtfehler einer TS-Messanordnung ergibt sich aus der Analyse der Berechnungsgrundlagen eines Streuwertes (Gl. 4.5 und 4.6) und den oben angeführten Fehlern und stellt eine Maximalfehlerbetrachtung dar. Der maximale Gesamtfehler $|\Delta TS / TS|$ eines ermittelten Messwertes setzt sich somit aus den Summen der relativen Fehler des eigentlich gemessenen Spannungswertes $|\Delta U_{\text{Mess}} / U_{\text{Mess}}|$, der verwendeten Abschwächer $|\Delta T_{\text{Abschw}} / T_{\text{Abschw}}|$, des Spannungswertes bei der Kalibrierung $|\Delta U_{\text{Mess,Normal}} / U_{\text{Mess,Normal}}|$, des zur Kalibrierung verwendeten Streunormales $|\Delta TS_{\text{Normal}} / TS_{\text{Normal}}|$ und der dort eingesetzten Abschwächer $|\Delta T_{\text{Abschw,Normal}} / T_{\text{Abschw,Normal}}|$ zusammen (Gl. 4.19):

$$\left| \frac{\Delta TS}{TS} \right| = \left| \frac{\Delta U_{\text{Mess}}}{U_{\text{Mess}}} \right| + \left| \frac{\Delta T_{\text{Abschw}}}{T_{\text{Abschw}}} \right| + \left| \frac{\Delta U_{\text{Mess,Normal}}}{U_{\text{Mess,Normal}}} \right| + \left| \frac{\Delta TS_{\text{Normal}}}{TS_{\text{Normal}}} \right| + \left| \frac{\Delta T_{\text{Abschw,Normal}}}{T_{\text{Abschw,Normal}}} \right|. \quad (4.19)$$

Die Fehler der Spannungswerte $|\Delta U_{\text{Mess}} / U_{\text{Mess}}|$ und $|\Delta U_{\text{Mess,Normal}} / U_{\text{Mess,Normal}}|$ werden dabei hauptsächlich von den Schwankungen der Lichtquellen verursacht. In Tab. 4.11 wurden maximale Gesamtfehler für die jeweiligen Messwellenlängen aufgeführt.

Messwellenlänge(n)	maximaler Gesamtfehler
193 nm	17%
248 nm, 365 nm	13%
325 nm, 488 nm, 514,5 nm, 632,8 nm	12%
10,6 μm	12%

Tab. 4.11: Maximaler Gesamtfehler bei verschiedenen Wellenlängen

Eine ausführliche Fehlerdiskussion von TS-Messanordnungen konnte in der Literatur nicht gefunden werden. In den einzelnen Veröffentlichungen wurden, wenn eine Fehlerdiskussion durchgeführt wurde, immer nur einzelne Fehlerursachen näher betrachtet. So wurde z.B. in [Kadkhoda, 1995] auf die zeitlichen Schwankungen der Lichtquelle und der Detektionseinheit, in [Kienzle, 1993] auf die statistischen Schwankungen der Messwerte und in [Bjuggren, 1996] auf das Abbildungsverhalten der Coblenzkugel auf eine eingeschränkte Detektorfläche eingegangen.

4.10 Erreichte Sensitivitäten

Die mittels den in den vorangegangenen Abschnitten erläuterten TS-Messanordnungen erreichten Sensitivitäten hinsichtlich elektronischem Rauschen und Untergrundsignal sind in Tab. 4.12 dargestellt.

Wellenlänge	elektronische Rauschgrenze	Untergrundsignal
193 nm	20 ppm	100 ppm
248 nm / 365 nm	3 ppm	4 ppm
325 nm	0,1 ppm	0,8 ppm
488 nm / 514,5 nm	< 0,01 ppm	0,07 ppm
632,8 nm	< 0,01 ppm	0,05 ppm
10,6 μm	0,8 ppm	4 ppm

Tab. 4.12: Sensitivitäten bei verschiedenen Wellenlängen

Beim Vergleich der erreichten Sensitivitäten mit den in der Literatur veröffentlichten Werten (siehe Tab. 3.7), ist zu erkennen, dass das in dieser Arbeit realisierte Messsystem nur bei der Wellenlänge 193 nm ein um den Faktor 3 höheres Untergrundsignal als die in [Kadkhoda, 2000 c] vorgestellte Messanordnung bei 193 nm aufweist. Bei den anderen Wellenlängen sind die Sensitivitäten mit den international veröffentlichten besten Sensitivitäten vergleichbar (632,8 nm) oder besser (325 nm, 488 nm, 514,5 nm, 10,6 μm).

4.11 VUV-TS-Messanordnung

Bedingt durch die jüngste Entwicklung in der Lithographie zum Einsatz der Wellenlänge 157 nm wurde das TS-Messsystem für diese Wellenlänge erweitert. Diese, im Rahmen des BMBF-Projektes EUREKA-EUROLASER CHOCLAB II geförderte Entwicklung, ist nicht mehr Gegenstand der vorliegenden Arbeit. An dieser Stelle sollen nur ein Ausblick auf die Anforderungen an diese TS-Messanordnung gegeben und die benötigte Vakuumanlage sowie ersten Messergebnisse unter Verwendung der Deuteriumlampe vorgestellt werden.

Die VUV-TS-Messanordnung sollte so ausgelegt werden, dass sie sowohl mit der Wellenlänge 157 nm als auch mit 193 nm betrieben werden kann. Als Lichtquellen sollten sowohl eine Deuteriumlampe als auch ein Excimerlaser verwendbar sein. Es sollte wieder möglich sein, die Streuung in Transmissions- und in Reflexionsrichtung detektieren zu können.

Bedingt durch die Absorption von Sauerstoff, Wasser und Kohlendioxid bei der Wellenlänge 157 nm ([Flemming, 2000], [Kadkhoda, 2000 c]) sollte die Messanordnung sowohl im Vakuum als auch unter Stickstoffatmosphäre betrieben werden können. Als kritischste Größe ist hierbei

die Sauerstoffkonzentration zu sehen, die, um einen verlustfreien Durchgang durch die Messanordnung mit einer Strahlweglänge von 3,3 m zu gewährleisten, einen Wert von höchstens 10^{-7} haben sollte [Flemming, 2000]. Dieser ist bei einem Luftrestdruck von ca. $5 \cdot 10^{-4}$ mbar erreicht.

Aus diesem Grund wurde die Messanordnung in einem speziell, in Zusammenarbeit mit der Firma Phönix Werkzeugbau GmbH, konstruierten und gefertigten Vakuumkammersystem aufgebaut. Der schematische Aufbau des Strahlenganges ist in Abb. 4.53 zu sehen.

Die Messanordnung wurde in zwei Kammern untergebracht. In der Strahlkammer wird die Strahlaufbereitung vorgenommen, in der Messkammer befindet sich die Detektionseinheit. Die Detektionseinheit wurde wieder so aufgebaut, dass die in Abschn. 4.4.2 vorgestellte Drehung der Coblenzkugel realisiert werden konnte. Als Beschichtung der Coblenzkugel mit Durchmesser von 350 mm wurde wieder Aluminium verwendet. Die Lichtquellen werden direkt an die Strahlkammer angeschlossen. Beide Kammern bestehen aus Edelstahl und wurden innenseitig sandgestrahlt und gebeizt. Die Strahlkammer hat eine Größe von $200 \cdot 200 \text{ mm}^2$ bei einer Länge von 1,4 m und die Messkammer eine Grundfläche $550 \cdot 550 \text{ mm}^2$ bei einer Höhe von 700 mm. Die Kammern sind in der Abb. 4.54 dargestellt.

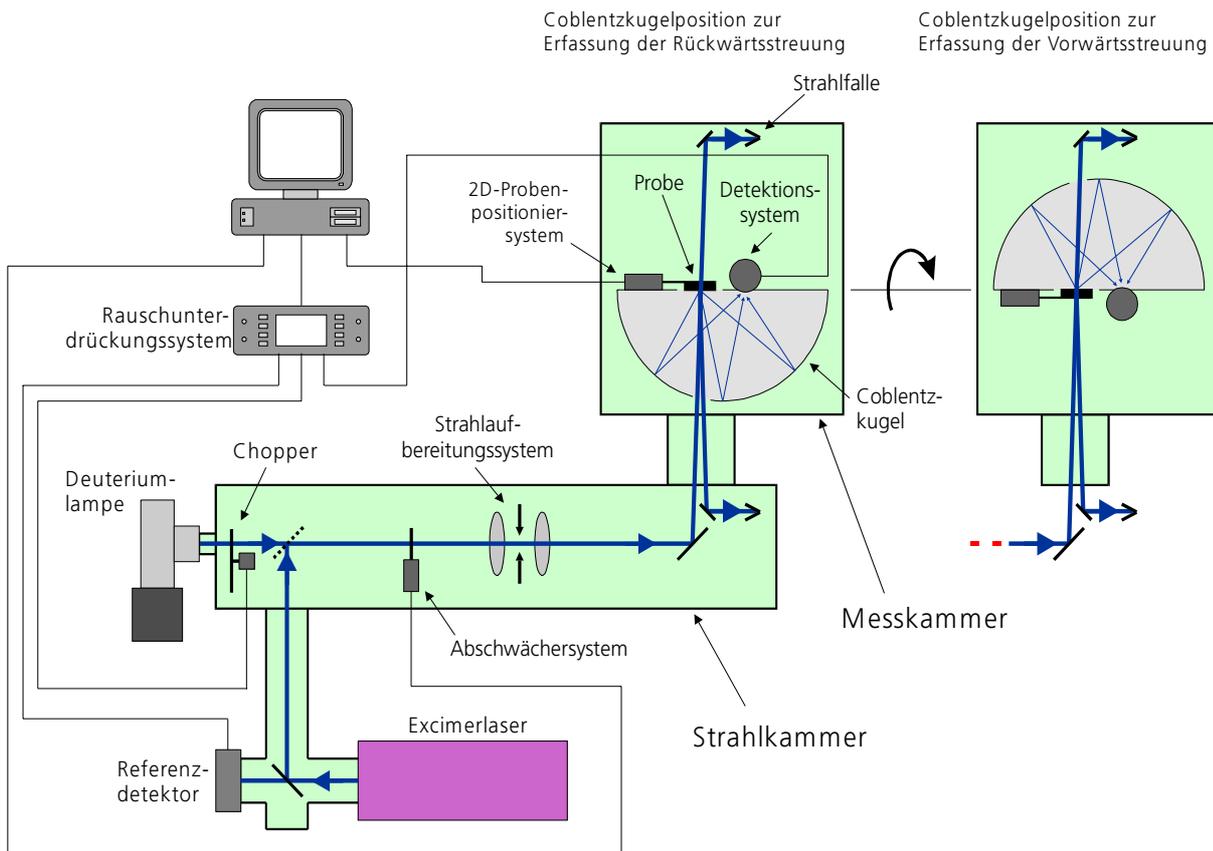


Abb. 4.53: Schematische Darstellung der TS-Messanordnung im VUV für den Betrieb der Wellenlängen 157 nm und 193 nm



Abb. 4.54: VUV-TS-Vakuumsystem bestehend aus Messkammer (oben) und Strahlkammer (unten)

Die Vakuumanlage wurde so konzipiert, dass Enddrücke kleiner $1 \cdot 10^{-5}$ mbar erreicht werden können. Als Pumpen werden eine Drehschieberpumpe ($65 \text{ m}^3/\text{h}$) mit Öladsorber und eine Turbomolekularpumpe (1100 l/s) eingesetzt. Die Ansteuerung erfolgt über insgesamt 5 elektropneumatisch betriebene Eckventile und zwei Schieberventile. Drei Eckventile dienen der Evakuierung der Vorpumpenleitung der Turbomolekularpumpe sowie der Mess- und der Strahlkammer und zwei weitere Eckventile dienen der Steuerung der alternativen Stickstoffspülung. Die Schieberventile werden für das vakuumtechnische Trennen der Turbomolekularpumpe und der Strahlkammer von der Messkammer benötigt. Es ist somit möglich, die Turbomolekularpumpe beim für den Probenwechsel notwendigen Belüften der Messkammer permanent weiterlaufen zu lassen. Des Weiteren muss die Strahlkammer nicht jedesmal mit der Messkammer belüftet und evakuiert werden, sondern kann beim Probenwechsel evakuiert bleiben. Neben der Vermeidung der Belegung der Kammeroberfläche mit Sauerstoff und Kohlenwasserstoffen bewirkt dies auch eine Einsparung der benötigten Belüftungs- und Evakuierungszeiten. Die zur Belüftung bzw. Evakuierung erforderliche Zeit liegt jeweils bei ca. 5 bis 6 min. Eine schematische Darstellung des Pumpsystems ist in Abb. 4.55 zu sehen.

Für die ersten Versuchsmessungen bei der Wellenlänge 157 nm wurde eine Deuteriumlampe (L7293, Hamamatsu) verwendet. Der Strahlengang entspricht dem beim Einsatz der Deuteriumlampe unter Luft bei 193 nm , jedoch wurde die Wellenlängenselektion über zwei schmalbandige 45° -Spiegel für 157 nm realisiert. Der Beleuchtungsfleckdurchmesser betrug 2 mm bis 3 mm , und es konnte ein Untergrundsignal von $1 \cdot 10^{-3}$ erreicht werden. Dieses Niveau des Untergrundsignals ist für die Messung von wenigstreuenden Proben wie z.B. superpolierte CaF_2 -Substrate und AR^{32} -Beschichtungen noch nicht ausreichend. Durch den Einsatz eines Excimerlasers als Strahlquelle ([Gliech, 2002]) konnte das Untergrundsignal auf ein Niveau von $1 \cdot 10^{-6}$ für 157 nm und 193 nm gesenkt werden, so dass auch Messungen an den zuvor genannten, extrem schwachstreuenden Proben möglich wurden.

³² anti-reflective

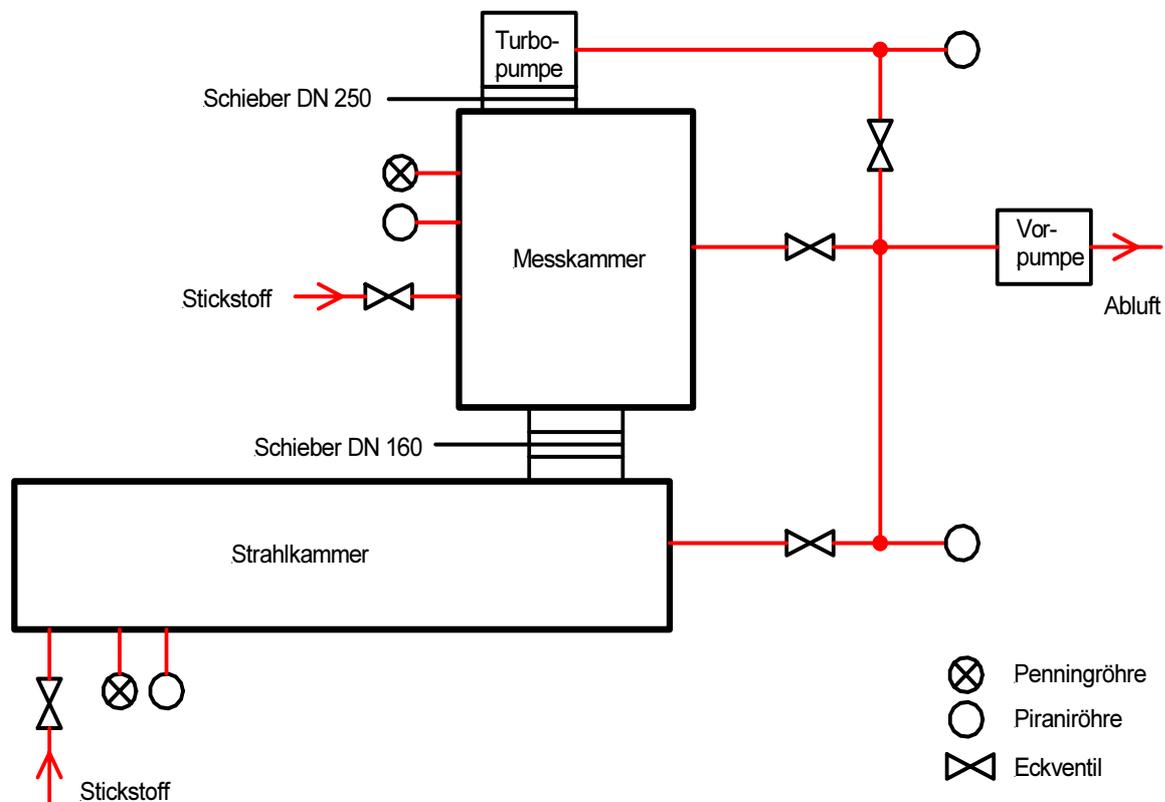


Abb. 4.55: Schematische Darstellung des Pumpsystems der VUV-TS-Messanordnung

Ein weiteres Problem stellt die Frage der Kalibrierung der TS-Messanordnung dar. Wie bei der Wellenlänge 193 nm existiert ebenfalls kein Streunormal für den Einsatz bei 157 nm. Für die ersten Testmessungen, die in Abschn. 6.6 vorgestellt werden, wurde deshalb die Coblenzkugel aus ihrer Lage für die Transmissionstremessung um ca. 15° verkippt, so dass das auf die Coblenzkugel einfallende Licht direkt auf das Detektionssystem gelenkt wurde. Das Detektionssystem bestand aus einer CaF_2 -Diffuserscheibe, um Akzeptanzwinkel und Ortsunabhängigkeit des Detektors zu erhöhen, und einem PMT R1220 (Hamamatsu) als Detektor.

Eine ausführliche Beschreibung dieser Messanordnung wurde in [Gliech, 2002] veröffentlicht.

5 Normen zur TS-/TIS-Messung

5.1 Einleitung

Innerhalb dieses Kapitels sollen die Normen zur Messung des totalen bzw. total integrierten Streulichts an Festkörperoberflächen beschrieben und auf den Einfluss des in dieser Arbeit beschriebenen Messsystems auf die Entwicklung der Normengestaltung eingegangen werden.

5.2 Norm ASTM F 1048-87

Bis zum Herbst 2002 existierte nur eine verabschiedete Norm, in der ein Verfahren zur Messung des totalen bzw. total integrierten Streulichts an Festkörperoberflächen beschrieben wird: die Norm ASTM F 1048-87 ([ASTM F 1048-87, 1987]) mit dem Titel "Standard test method for Measuring the effective surface roughness of optical components by total integrated scattering". Ziel dieses Standards ist dabei nicht die Normung der total integrierenden Streulichtmessung sondern die Normung eines Verfahrens zur Bestimmung der Oberflächenrauheit von opaken, ebenen (Krümmungsradius $> 10\text{ m}$) und reflektierenden Oberflächen mittels TIS-Messung. Die in der Norm beschriebene Messanordnung zur TIS-Bestimmung wurde u.a. mit folgenden Parametern festgelegt:

- *Lichtquelle*: HeNe-Laser mit Arbeitswellenlänge 632,8 nm, Strahlquerschnitt von $\leq 1\text{ mm}$, Strahldivergenz von $\leq 5\text{ mrad}$ und Ausgangsleistung von rund 2 mW,
- *Integrationelement*: Coblentzkugel mit einem Radius $\leq 20\text{ cm}$ und einem abzubildenden Streulichtwinkelbereich von $\leq 5^\circ$ bis $\geq 70^\circ$,
- *Detektor*: Si-Photodiode mit einem Dynamikbereich von 10^5 , einer sensitiven Fläche von $\geq 2\text{ mm}^2$, einem Gehäusedurchmesser $< 10\text{ mm}$ und mit einem Diffuserelement zur Minimierung des Einflusses von Beleuchtungsposition, -winkel und -polarisation auf die Si-Photodiode und
- *weitere Bestandteile u.a.*: Strahlabschwächer, optischer Chopper und Lock-In-Verstärker.

Bei der Ermittlung des TIS-Messwertes soll derselbe Detektor laut Messprozedur nicht nur zur Messung der eigentlichen Lichtstreuung eingesetzt, sondern auch zur Erfassung der Intensität des auf die Probenposition einfallenden und des von der Probe spekulär reflektierten Lichtes verwendet werden. Dazu muss der Detektor für die einzelnen Messschritte jeweils neu positioniert werden. Somit ist eine dreimalige Neupositionierung des Detektors bei der Erfassung des TIS-Wertes an einer Probenposition notwendig.

Aufgrund der auf die Bestimmung der Oberflächenrauheit mittels TIS-Messung festgelegten Zielsetzung sowie der exakten Festschreibung der Parameter der Messanordnung kann diese Norm nicht den Bereich der Bestimmung des totalen Streulichts als Verlustgröße sowie den Einsatz anderer Messwellenlängen abdecken.

5.3 ISO-Normungsprojekt EUREKA-EUROLASER CHOCLAB

5.3.1 Einführung

Aufgrund der zunehmenden Bedeutung und Anwendung der totalen Streulichtmessung bestand die Notwendigkeit, die Bestimmung der totalen Streulichtmessung zu standardisieren. Deshalb wurde innerhalb der ISO-Arbeitsgruppe TC 172/SC 9/WG 6 mit der Erarbeitung des Standards ISO 13696 „Optics and optical instruments: Test methods for radiation scattered by optical components“ begonnen. Innerhalb des Projektes EUREKA-EUROLASER CHOCLAB wurde die Erarbeitung des Standards neben der eigentlichen Mitarbeit bei der Dokumentenerstellung auch mit der Durchführung eines nationalen und eines internationalen Round-Robin-Experiments unterstützt. Die Round-Robin-Experimente wurden zur Überprüfung der Einsatzfähigkeit des ISO-Standards durchgeführt.

Nur durch die intensive Mitarbeit der Arbeitsgruppe Oberflächencharakterisierung des Fraunhofer IOF in der ISO-Arbeitsgruppe TC 172/ SC 9/WG 6 und durch die Demonstration der Leistungsfähigkeit der im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen selbstentwickelten, auf einer Coblenzkugel basierenden TS-Messanordnung innerhalb der durchgeführten Round-Robin-Experimente (siehe Abschn. 5.3.3 und 5.3.4) konnte erreicht werden, dass die Coblenzkugel als alternatives Integrationselement mit in den Normentwurf aufgenommen wurde.

Innerhalb des Projektes EUREKA-EUROLASER CHOCLAB II wird derzeit eine an die Besonderheiten bei der TS-Messung im VUV-Wellenlängenbereich angepassten Norm erarbeitet. Um die Einsatzfähigkeit dieses Normenvorschlags zu untersuchen, sind wieder Round-Robin-Experimente geplant.

5.3.2 Überblick ISO 13696

Die Norm befand sich bis zum Herbst 2002 als ISO/FDIS 13696 in der Bewilligungsphase und liegt jetzt als veröffentlichter internationaler Standard vor. Da der veröffentlichte Standard erst unmittelbar vor Abschluss dieser Arbeit vorlag, konnten Änderungen zur Fassung als ISO/FDIS nicht mehr eingearbeitet werden.

Die Norm definiert das Verfahren zur Bestimmung der totalen Streuung in Vorwärts- und Rückwärtsstreuung von beschichteten und unbeschichteten optischen Oberflächen. Der Krümmungsradius der Oberflächen muss wie bei der Norm ASTM F 1048-87 ([ASTM F 1048-87, 1987]) mehr als 10 m betragen. Der Wellenlängenbereich umfasst den ultravioletten über den sichtbaren bis zum infraroten Spektralbereich.

Innerhalb dieser Norm wird u.a. neben der Begriffs- und Symboldefinition auch die Messanordnung, die Durchführung der Messung sowie die Auswertung der Messergebnisse festgelegt. Bei dem beschriebenen Aufbau der Messanordnung zur Bestimmung der totalen Streuung wurde ein möglichst breites Spektrum an verschiedenen Varianten der einzelnen Komponenten der Messanordnung zugelassen. Dies soll an einigen ausgewählten Parametern der Messanordnung verdeutlicht werden:

- *Lichtquelle:* Es wird ein Laser mit exzellenter Strahlqualität und hoher Beleuchtungsichte auf der Probenoberfläche empfohlen. Für spezielle Anwendungen können auch andere konventionelle Beleuchtungsquellen in Verwendung mit Raumfiltern oder Monochromatoren eingesetzt werden.
- *Strahlaufbereitungssystem:* Es soll aus einem Raumfilter und weiteren Blenden, die für eine Strahlbereinigung notwendig sind, bestehen. Beim Einsatz von konventionellen Beleuchtungsquellen sind weitere Elemente zur Strahlformung und -sammmlung notwendig. Der Strahl soll einen Durchmesser $> 0,4$ mm haben und in einem Gebiet außerhalb des 2,5-fachen des Strahldurchmessers keine Strahlungsleistung mehr besitzen. Bei der Verwendung von Lasern wird ein TEM_{00} -Mode mit einem beugungsbegrenzten Gauss-Profil empfohlen. Beim Einsatz von konventionellen Beleuchtungsquellen soll an der Probenposition ein rundes Strahlprofil, frei von Beugungsstrukturen und parasitären Spots, erzeugt werden.
- *Integrationselement:*
 - Variante mit Ulbrichtkugel: Die Ulbrichtkugel sollte im Inneren mit einem hoch diffusstreuenden Material mit Lambertscher Streucharakteristik (siehe Tab. 3.3) versehen sein. Die Durchmesser der Ports sollte wenigstens fünfmal größer als der Durchmesser des Messstrahls beim Durchtritt durch diese Ports sein. Zur Kompensation der lokalen Schwankungen der Detektorempfindlichkeit kann ein Diffuser vor dem Detektor eingesetzt werden. Der Integrationsbereich der Ulbrichtkugel muss mindestens einen Bereich von 2° bis 85° umfassen. Aus der Beziehung zwischen Strahldurchmesser zum Portdurchmesser sowie dem minimalen erfassten Streuwinkel lässt sich ermitteln, dass der Durchmesser der Ulbrichtkugel ungefähr 72 mal so groß sein muss wie der Strahldurchmesser am streulichtwinkelbegrenzenden Port. Beim Einsatz von anderen Strahlquellen als einem Laser oder unter besonderen Messbedingungen, bei denen es aufgrund des Strahldurchmessers zu einem unpraktikabel großen Ulbrichtkugeldurchmesser kommt, dürfen die Portdurchmesser verkleinert werden, wobei weder der einfallende, transmittierte oder reflektierte Strahl beschnitten werden dürfen. Es wird explizit auf die Probleme beim Einsatz von Wellenlängen kleiner 250 nm hingewiesen.
 - Variante mit Coblenzkugel: Die Größe der Coblenzkugel muss so angepasst sein, dass das gestreute Licht der Probe im Winkelbereich von 2° bis 85° vollständig auf die Detektionseinheit abgebildet wird. Der Probenhalter und die Detektionseinheit sollen sich in der Schnittfläche der Coblenzkugel in der Nähe des Kugelzentrums befinden. Die Eingangs-/Ausgangsöffnung der Coblenzkugel soll direkt gegenüber der Probenposition positioniert werden. Die Größe dieser Öffnung bestimmt die Nahwinkelbegrenzung des erfassten Streuwinkelbereichs. Die innere Oberfläche der Coblenzkugel sollte mit Aluminium beschichtet sein, was einen Einsatz in einem Wellenlängenbereich ≤ 200 nm bis $\geq 10,6$ μ m ermöglicht.
- *Detektionssystem:* Das Detektionssystem soll eine an die Strahlquelle angepasste Sensitivität mit einem Dynamikbereich $> 10^5$ und einer Linearitätsabweichung $< 2\%$ besitzen. Beim Einsatz einer Ulbrichtkugel soll die Größe der Detektionsfläche so gewählt werden, dass eine Beeinflussung des Integrationsprozesses in der Kugel (z.B. durch Specklebildung) ausgeschlossen ist. Ein zusätzliches Diffuserfenster vor dem Detektor soll die räumlichen Variationen der Detektorsensitivität ausgleichen. Bei Verwendung einer Coblenzkugel soll ein Diffuser (Empfehlung: kleine Ulbrichtkugel) die evtl. Positionsschwankungen der Streulichtabbildung ausgleichen.

Bei TS-Messungen mit Werten $< 10^{-4}$ werden für die Erhöhung der Sensitivität der Messanordnungen folgende Schritte erforderlich:

- Einsatz von Lasern mit stabilem TEM₀₀-Mode und
- großer Abstand zwischen letztem refraktiven optischen Element des Strahlaufbereitungssystems und dem Integrationselement.

Weiterhin wird empfohlen:

- Erhöhung des Dynamikbereichs des Detektionssystems auf das Doppelte des reziproken Werts des minimal zu detektierenden TS-Wertes (kein Einsatz von Abschwächern notwendig) und
- Spülung mit reinem Helium oder Evakuierung der Luft in der Messanordnung zur Vermeidung des Einflusses von Rayleigh-Streuung auf das Untergrundsignal.

Weitere Abschnitte der Norm beschäftigen sich u.a. mit der Probenpräparation, dem Messablauf und der Auswertung der Messergebnisse.

Somit umfasst die Norm ein breites Spektrum von möglichen Variationen von TS-Messanordnungen.

5.3.3 Nationales Round-Robin-Experiment

Bei der Durchführung des nationalen Round-Robin-Experimentes innerhalb des ISO-Normungsprojekts EUREKA-EUROLASER CHOCLAB beteiligten sich neben dem Fraunhofer IOF drei weitere Partner:

- die Spindler & Hoyer GmbH, Göttingen,
- das Laser Zentrum Hannover e. V., Hannover und
- die Laser- und Medizin-Technologie gGmbH Berlin, Berlin.

Die einzelnen TS-Messanordnungen wurden in Abschn. 3.3 beschrieben.

Es sollte die totale Rückwärtsstreuung bei der Wellenlänge 632,8 nm an folgenden 6 Probensätzen gemessen werden:

- polierte RG 1000-Substrate von Schott (Probensatz 1),
- TiO₂/SiO₂- $\lambda/4$ -Wechselschichtsysteme mit dem Design (HL)^NH mit N = 3, 7, 11 bzw. 17 (H = TiO₂, L = SiO₂) auf RG 1000-Substraten (Probensätze 2 bis 5) und
- superpolierte Si-Wafer (Probensatz 6).

Jeder der Probensätze bestand aus 3 gleichen Proben. Es wurde beschlossen, das Round-Robin-Experiment so durchzuführen, dass alle Partner an denselben Proben die Messungen durchführen. Als Kalibrierprobe wurde ein diffus reflektierender Standard mit einer totalen Rückstreuung von 20,8% bei allen Untersuchungen mit gemessen. Anhand der an diesem Standard gemessene TS-Werte erfolgte der Vergleich der anderen Proben.

Es wurde beschlossen, dass die Messergebnisse nur anonymisiert veröffentlicht werden ([Kadkhoda, 1997]), wobei dem Verfasser dieser Arbeit erlaubt wurde, die Anonymität der Messungen des Fraunhofer IOF aufzuheben ([CHOCLAB, 1997], [Ristau, 2002]). Zudem war das Fraunhofer

IOF der einzige Partner, der die TS-Messungen mit einer Coblenzkugelmessanordnung durchführte und somit ohnehin leicht zu identifizieren war. Die anderen Partner setzten Messanordnungen mit Ulbrichtkugeln ein. Um die Angaben zu den anderen Partnern voneinander unterscheiden zu können, werden diese ab jetzt mit Partner 1 bis 3 bezeichnet, wobei die Nummerierung keinen Bezug zu der Reihenfolge der oben angeführten Partner hat.

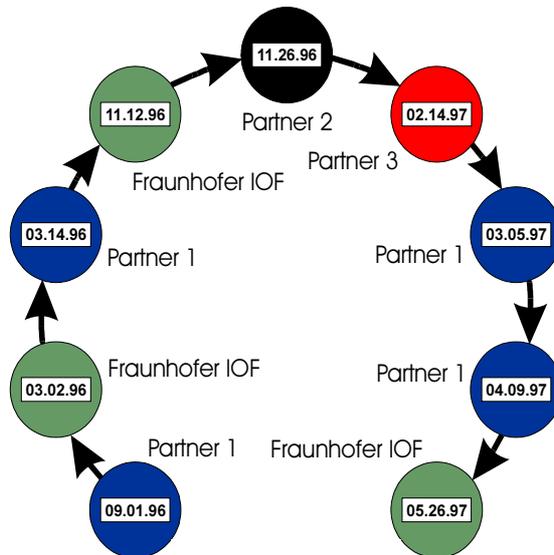


Abb. 5.1: Zeitlicher Ablauf der TS-Messungen beim nationalen Round-Robin-Experiment

Die Messungen wurden als erstes beim Partner 1 durchgeführt (Messung 1), wobei die Probenposition sich dabei in der Mitte der Ulbrichtkugel befand (siehe Abb. 3.3 e). Obwohl bei dieser Probenposition prinzipiell gleichzeitig die totale Rückwärts- und Vorwärtsstreuung erfasst wird (siehe Abschn. 3.1.3.1), ist der Anteil der Vorwärtsstreuung zu vernachlässigen, da alle Proben bei 632,8 nm stark absorbierend sind. Die nächsten TS-Untersuchungen wurden beim Fraunhofer IOF an dem in dieser Arbeit beschriebenen Messsystem durchgeführt (Messung 2). Danach wiederholte der Partner 1 die Messungen (Messung 3), wobei sich die Proben am hinteren Port befanden (siehe Abb. 3.3 c). Die nächsten Messungen wurden 8 Monate später wieder am Fraunhofer IOF durchgeführt (Messungen 4). Innerhalb dieses Zeitraumes kontaminierten die Oberflächen der Proben, so dass bei den Proben ein wesentlich höheres totales Streulicht gemessen wurde. Die nachfolgenden Messungen wurden bei den Partnern 2 und 3 und abschließend nochmals beim Partner 1 durchgeführt (Messungen 5 bis 7). Beim Partner 1 wurden die Proben dann einer manuellen Reinigung mittels Aceton unterzogen und nochmals vom Partner 1 vermessen (Messung 8). Da bei einigen Proben, insbesondere bei den Si-Wafern, keine Reinigung der Probenoberfläche festzustellen war, wurden die Proben am Fraunhofer IOF mittels Ultraschallwäsche gereinigt und abschließend vermessen (Messung 9). Die zeitliche Reihenfolge der Messungen wurde in Abb. 5.1 grafisch dargestellt.

Die Ergebnisse werden im Folgenden exemplarisch an den Probensätzen 1, 3 und 6 diskutiert (Abb. 5.2 bis 5.4). Angegeben wurden jeweils die TS-Werte, die sich durch die Mittelwertbildung aus den drei Proben pro Probensatz ergeben. Die dabei verwendeten TS-Werte pro Probe waren die arithmetischen Mittelwerte der in Abschn. 4.8 vorgestellten Datenreduktion. Die Anzahl der Messpunkte pro Probe variierte dabei je nach Partner von 51 bis zu 1001. Zusätzlich zu den TS-Werten wurden die mittleren Standardabweichungen der drei Proben pro Probensatz als Fehlerbalken dargestellt.

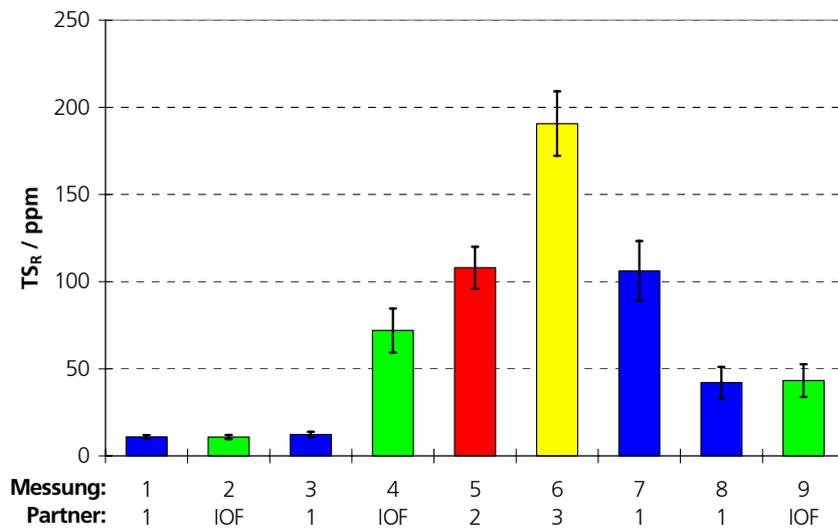


Abb. 5.2: Totale Rückstreuung, gemessen an dem Probensatz 1 (RG 1000-Substrate) des nationalen Round-Robin-Experimentes, 632,8 nm

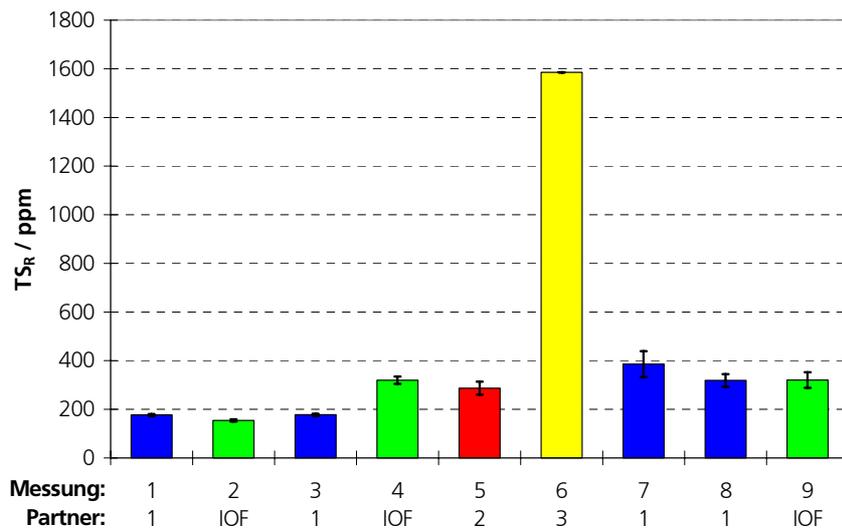


Abb. 5.3: Totale Rückstreuung, gemessen an dem Probensatz 3 (TiO₂/SiO₂-Wechselschichtsysteme mit 15 Einzelschichten auf RG 1000-Substraten) des nationalen Round-Robin-Experimentes, 632,8 nm

Bei den RG 1000-Substraten (Probensatz 1) und den TiO₂/SiO₂-Wechselschichtsystemen mit 15 Einzelschichten auf RG 1000-Substraten (Probensatz 3) ist zu erkennen (Abb. 5.2 und 5.3), dass die ersten drei Messungen (Partner 1, Fraunhofer IOF und Partner 1) sehr gut übereinstimmen. Eine Abhängigkeit der Probenpositionen in der Ulbrichtkugel auf das ermittelte totale Streulicht (beide Messungen des Partners 1) ist nicht zu erkennen. Ab der vierten Messung waren die Proben kontaminiert, was sich in einem Anstieg des Streulichtniveaus bemerkbar macht. Die nachfolgenden Messungen des Fraunhofer IOF, des Partners 2 und des Partners 1 liegen innerhalb bzw. knapp außerhalb der Standardabweichungen nach der Datenreduktion. Nur die Messungen des Partners 3 weisen ein deutlich höheres Streulichtniveau auf, das bedingt durch technische Probleme bei der Messanordnung auftrat. Die letzten beiden Messungen wurden beim Partner 1 und dem Fraunhofer IOF jeweils nach der Probenreinigung gemacht und zeigen eine sehr gute Übereinstimmung, was darauf hindeutet, dass beide Reinigungsverfahren die

gleichen Ergebnisse erzielen. Es konnten aber nicht die Streulichtniveaus, analog den Proben im unkontaminierten Zustand (Messungen 1 und 2) erreicht werden. Diese Abweichungen sind auf eine Degradation der Probenoberflächen zurückzuführen, die sich durch die Reinigungen nicht beseitigen ließen.

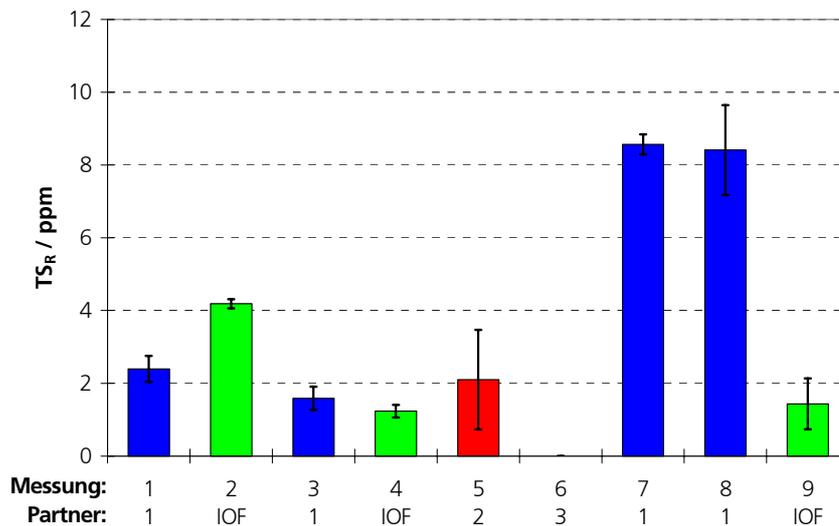


Abb. 5.4: Totale Rückstreuung, gemessen an dem Probenatz 6 (Si-Wafer) des nationalen Round-Robin-Experimentes, 632,8 nm

Die Untersuchungen an den superpolierten Si-Wafern (Probenatz 6, Abb. 5.4) zeigten ein anderes Verhalten. Nach den ersten Untersuchungen beim Fraunhofer IOF (Messung 2) wurde die Sensitivität der Messanordnung verbessert, so dass bei der Messung 4 ein deutlich geringeres Streulichtniveau ermittelt werden konnte. Die Degradation scheint nicht zwischen der dritten und vierten, sondern zwischen der fünften und siebenten Messung aufgetreten zu sein. Des Weiteren konnte durch die Reinigung zwischen der siebenten und achten Messung keine Verringerung des Streulichtniveaus festgestellt werden, sondern nur eine Erhöhung der Standardabweichung. Die Messung 9 am Fraunhofer IOF zeigte hingegen wieder die Streulichtniveaus der ersten Messungen. Dies deutet darauf hin, dass die vor der Messung 9 durchgeführte Reinigung geeigneter war, die Si-Wafer zu reinigen, als die vor der Messung 8. Beim Partner 3 konnten keine Messungen durchgeführt werden, da die Streulichtniveaus an den Si-Wafern unterhalb der Sensitivität der Messanordnung lagen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Messungen 1, 3 bis 5 und 9 gute bis sehr gute Übereinstimmungen bei den Streulichtniveaus der Si-Wafer gezeigt haben.

Anhand des nationalen Round-Robin-Tests konnte gezeigt werden, dass sich die Norm ISO 13696 (damals in der Fassung als ISO/CD³³ 13696) sehr gut zur Durchführung von vergleichbaren TS-Messungen eignet. Es konnte weiter gezeigt werden, dass sich keine prinzipbedingt unterschiedlichen Streulichtniveaus bei Verwendung einer Ulbricht- oder einer Coblenzkugel ergeben. Die Messergebnisse des in dieser Arbeit beschriebenen TS-Messsystems zeigten (mit Ausnahme von Partner 3) eine gute bis sehr gute Übereinstimmung mit den TS-Messungen der anderen Partner bei gleichem bzw. vergleichbarem Probenreinigungszustand.

5.3.4 Internationales Round-Robin-Experiment

Innerhalb des ISO-Normungsprojekts EUREKA-EUROLASER CHOCLAB wurde auch ein internationales Round-Robin-Experiment durchgeführt, an dem sich neben den Fraunhofer IOF folgende 8 Partner mit TS-Messungen beteiligten:

- Department of Material Science, Universität Uppsala, Uppsala, Schweden,
- Jenoptik L. O. S. GmbH, Jena, Deutschland,
- Laser- und Medizin-Technologie gGmbH Berlin, Deutschland,
- Laser Zentrum Hannover e. V., Hannover, Deutschland,
- Michelson Laboratory, Naval Air Warfare Center, China Lake, Kalifornien, USA,
- LINOS Photonics GmbH, Göttingen, Deutschland,
- Melles Griot Technical Optics, Ltd., Isle of Man, Großbritannien und
- Technische Universität Darmstadt, Institut für Angewandte Physik, Darmstadt, Deutschland.

Als Proben wurden ein Spiegel- (HR³⁴), ein Strahlteiler- (BS³⁵) und ein Antireflexsystem (AR) bestehend aus Ta₂O₅/SiO₂-Wechselschichtsystemen auf Quarzgläsern verwendet. Die TS-Messungen wurden in Rückwärtsrichtung bei der Wellenlänge 632,8 nm durchgeführt.

Die TS-Messungen in Rückwärtsrichtung wurden bei der Wellenlänge 632,8 nm durchgeführt. Nach der Erfahrung aus dem nationalen Round-Robin-Experiment wurden die Proben nicht nacheinander von den Partnern vermessen, sondern parallel bei allen Partner gleichzeitig. Dafür war es erforderlich, dass für alle Partner separate Probensätze hergestellt werden mussten.

Neben dem Fraunhofer IOF nahmen die Partner aus der Universität Uppsala und vom Naval Air Warfare Center ebenfalls mit je einer Messanordnung mit Coblentzkugel an dem Round-Robin-Experiment teil. Die anderen Partner verwendeten eine Ulbrichtkugel. Die Messergebnisse wurden wieder in anonymisierter Form veröffentlicht und in [Kadkhoda, 1999 b] und [Kadkhoda, 2000 a] ausführlich beschrieben.

Da keine Ausnahmegenehmigung für die Offenlegung der mit den in dieser Arbeit beschriebenen TS-Messanordnung erzielten Messergebnisse vorliegt, kann anhand dieses Round-Robin-Experiments kein Messwertvergleich mit anderen TS-Messanordnungen durchgeführt werden. Es konnten jedoch ähnlich gute Übereinstimmungen beim Vergleich der TS-Messwerte der einzelnen Messanordnungen erzielt werden wie bei dem nationalen Round-Robin-Experiment.

Zusammenfassend lässt sich aussagen, dass die ISO-Norm schon zu der Zeit des internationalen Round-Robin-Experimentes (Fassung als ISO/DIS³⁶ 13696) erfolgreich als Prozedur zur Messung und Auswertung der totalen Streuung eingesetzt werden konnte.

³⁴ highly reflective

³⁵ Beam Splitter

³⁶ Draft International Standard

6 Anwendungsbeispiele

6.1 Einleitung

In diesem Kapitel soll die Leistungsfähigkeit und Einsatzbreite des TS-Messsystems anhand einer Reihe von Messungen an verschiedenen Oberflächenarten demonstriert werden. Einige dieser Messbeispiele werden darüber hinaus mit Messergebnissen von ARS-, AFM und Talysurf-Messungen verglichen. Der Vergleich mit anderen TS-Messanordnungen wurde in den Abschn. 5.3.3 und 5.3.4 bereits durchgeführt.

Die aus TS-Messungen angegebenen Streuwerte sind, wenn nicht anders angegeben, die arithmetischen Mittelwerte der Streulichtwerte nach der in Abschn. 4.8 vorgestellten Datenreduktion. Im Abschn. 6.2 wurden zusätzlich die zur Erfassung der TS-Messwerte benötigten Zeiten beispielhaft mit angegeben.

Bei denen zu Vergleichen herangezogenen AFM-Messungen wurden immer 512 Messpunkte pro Linienscan aufgenommen. Somit beträgt der erfasste Ortsfrequenzbereich laut Gl. 3.5 bei einem $10 \cdot 10 \mu\text{m}^2$ -Scan $0,1 - 25,6 \mu\text{m}^{-1}$ und bei einem $1 \cdot 1 \mu\text{m}^2$ -Scan $1 - 256 \mu\text{m}^{-1}$.

6.2 Untersuchungen an superpolierten Si-Wafern

Um die Leistungsfähigkeit bei extrem schwachstreuenden Proben zu demonstrieren, wurden Messbeispiele an superpolierten Si-Wafern gewählt, deren RMS-Rauheiten kleiner $0,1 \text{ nm}$ betragen.

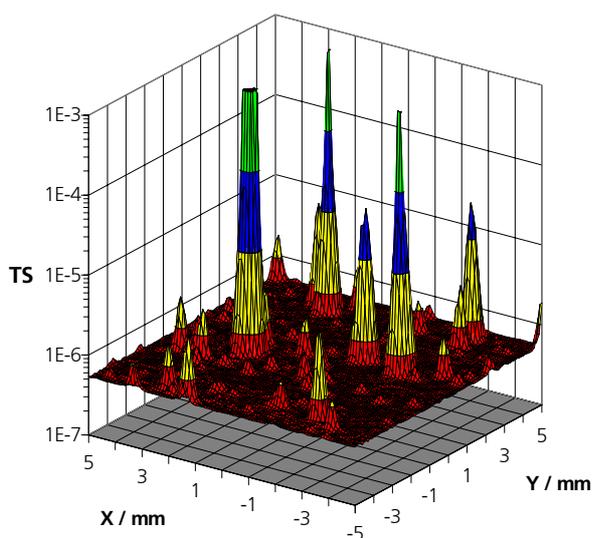


Abb. 6.1: Totale Rückwärtsstreuung an einem superpolierten Si-Wafer bei $632,8 \text{ nm}$

In Abb. 6.1 ist die TS-Messung an einem superpolierten Si-Wafer bei einer Wellenlänge von $632,8 \text{ nm}$ zu sehen. Die Streulichtspitzen des Mappings wurden durch Oberflächenkontaminati-

on hervorgerufen. Der mittlere Streuwert beträgt $5,3 \cdot 10^{-7}$. Die RMS-Rauheit der Si-Waferoberfläche lässt sich unter Verwendung der Gl. 2.16 ($R = 34,8\%$, [Palik, 1985]) mit $\sigma \approx 0,062$ nm berechnen. Der erfasste Ortsfrequenzbereich der TS-Messung liegt, bedingt durch die Messwellenlänge 632,8 nm und den erfassten Winkelbereich 2° bis 85° , laut Gl. 2.12 bei $0,055 - 1,5 \mu\text{m}^{-1}$. Für die Durchführung der in Abb. 6.1 dargestellten Messung mit 10201 Einzelpunkten wurde eine Messzeit von 17 min (ohne Probenvorbereitung und -handling) benötigt.

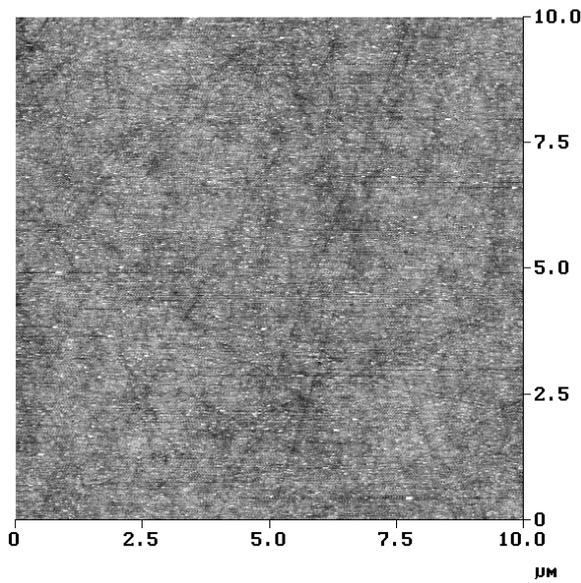


Abb. 6.2: AFM-Messung an einem superpolierten Si-Wafer (Höhenskala: 0 - 2 nm)

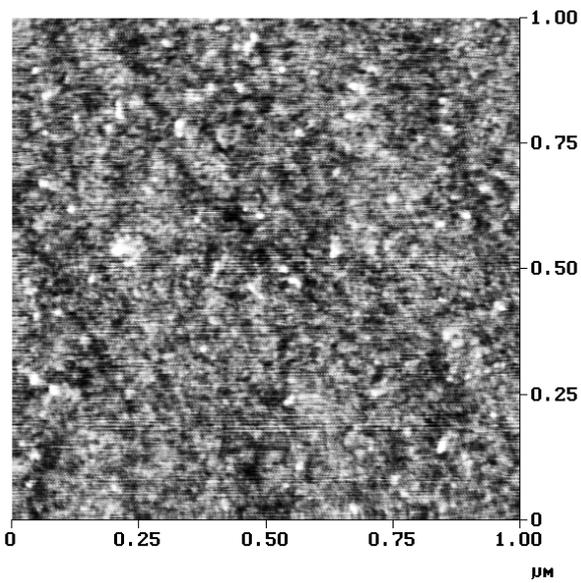


Abb. 6.3: AFM-Messung an einem superpolierten Si-Wafer (Höhenskala: 0 - 1 nm)

Die an einem Si-Wafer aus der gleichen Politurcharge mittels AFM (Abb. 6.2) gemessene RMS-Rauheit betrug $\approx 0,09$ nm bei einem $10 \cdot 10 \mu\text{m}^2$ -Scan (Ortsfrequenzbereich $0,1 - 25,6 \mu\text{m}^{-1}$). Die mittels AFM-Messung bestimmte RMS-Rauheit weist aufgrund der Eigenschwingungen des AFM bei der Messung von großen Scangebietes an superpolierten Oberflächen überhöhte Werte auf ([Gliech, 1999]). Bei der AFM-Messung innerhalb eines Scangebietes von $1 \cdot 1 \mu\text{m}^2$ konnte an diesem Wafer eine RMS-Rauheit von 0,07 nm bestimmt werden (Abb. 6.3). Da sich der mittels dieser Messung erfasste Ortsfrequenzbereich von $1 - 256 \mu\text{m}^{-1}$ nur noch geringfügig mit dem aus der TS-Messung überdeckt (siehe Abschn 3.4), kann die RMS-Rauheit aus diesem Scangebiet nur zur Orientierung und nicht zum direkten Wertevergleich dienen.

An einem weiteren superpolierten Si-Wafer wurden neben der TS-Messungen in Rückwärtsrichtung (Abb. 6.4) auch eine BRDF-Messung (Abb. 6.5) bei einer Wellenlänge von 632,8 nm durchgeführt. Die Erfassung der 101 TS-Messwerte konnte in 10 s durchgeführt werden. Der aus der TS-Messung ermittelte Streuwert beträgt $1,0 \cdot 10^{-6}$. Die RMS-Rauheit der Si-Waferoberfläche lässt sich mit $\sigma \approx 0,088$ nm ermitteln. Die ARS-Messung konnte nur in einem Winkelbereich von $\pm 70^\circ$ erfolgen, da außerhalb dieses Bereiches das Streusignal vom Rauschsignal überlagert wurde. Durch die Integration der ARS-Messung in diesem Winkelbereich nach Gl. 2.5 erhält man den totalen Streuwert $TS = 1,1 \cdot 10^{-6}$, der sehr gut mit dem durch die TS-Messung ermittelten Streuwert übereinstimmt. Der Fehler, der bei der Integration durch den kleineren Winkelbereich der ARS-Messung gemacht wird, ist aufgrund des geringen Streulichtbeitrages im Fernwinkelbereich vernachlässigbar (ca. 2 - 3%).

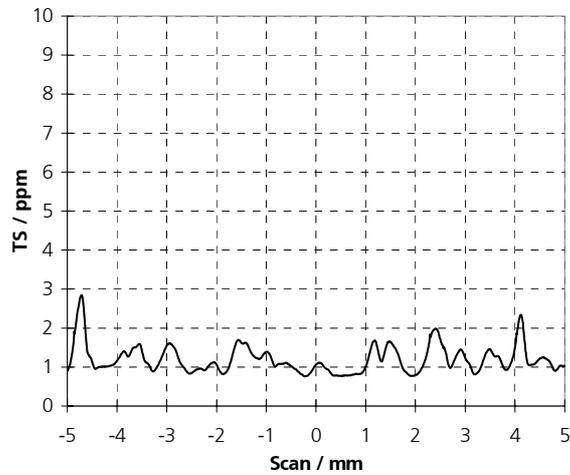


Abb. 6.4: Totale Rückwärtsstreuung an einem superpolierten Si-Wafer ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$)

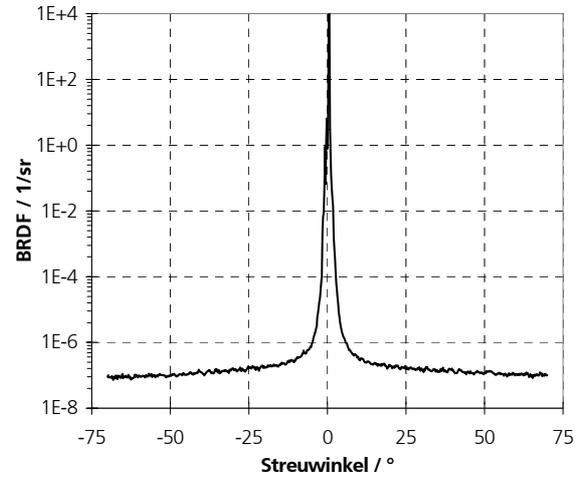


Abb. 6.5: BRDF-Messung an einem superpolierten Si-Wafer ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$)

6.3 Bewertung optischer Oberflächen

Für die Bewertung optischer Oberflächen sind neben der RMS-Rauheit auch die Oberflächenhomogenität und evtl. vorhandene Kontaminationen entscheidend.

Das Ergebnis der Messung der totalen Rückwärtsstreuung bei $632,8 \text{ nm}$ an einem konventionell polierten Quarzglas ist in Abb. 6.6 zu sehen. Anhand des Mappings lassen sich lokale Defekte bzw. Kontaminationen gut erkennen. Um die auf der Probenoberfläche vorhandenen Kratzer deutlicher sichtbar zu machen, wurde zudem in Abb. 6.7 dieselbe Messung als Draufsicht dargestellt.

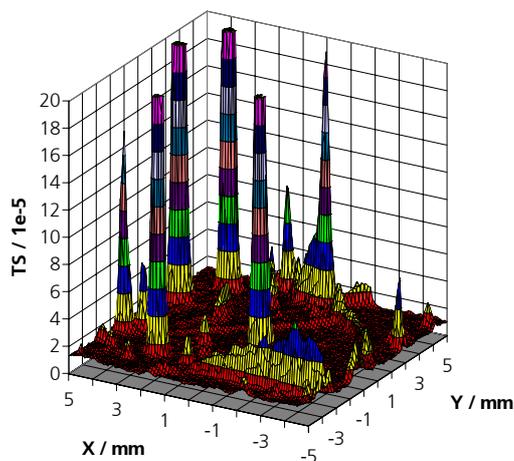


Abb. 6.6: Totale Rückstreuung bei $632,8 \text{ nm}$ an einem konventiell poliertem Quarzglas (dreidimensionale Ansicht)

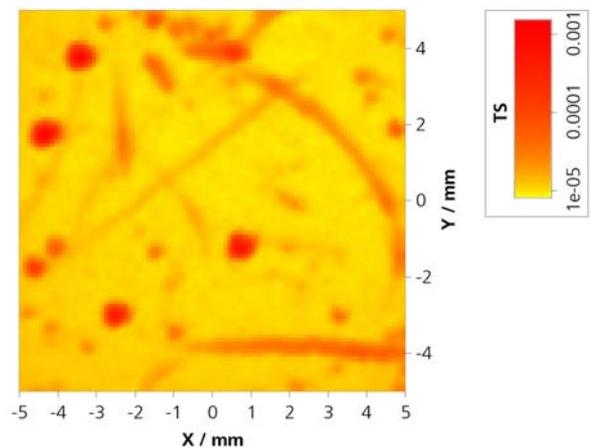


Abb. 6.7: Dieselbe Messung wie in Abb. 6.6 in Draufsicht

Der datenreduzierte TS-Mittelwert liegt bei $1,1 \cdot 10^{-5}$. Unter der Annahme, dass Vorder- und Rückseite die gleiche Oberflächenrauheit aufweisen, lässt sich mittels der Gl. 2.24 ([Kienzle, 1993]) der Einfluss der Vorder- und Rückseitenstreuung trennen. Die Rückwärtsstreuung der Vorderseite beträgt somit $3,6 \cdot 10^{-6}$ ($n = 1,46$ nach [Palik, 1985], $R = 3,5\%$) und die daraus berechnete RMS-Rauheit $0,51$ nm (Ortsfrequenzbereich $0,055 - 1,5 \mu\text{m}^{-1}$)

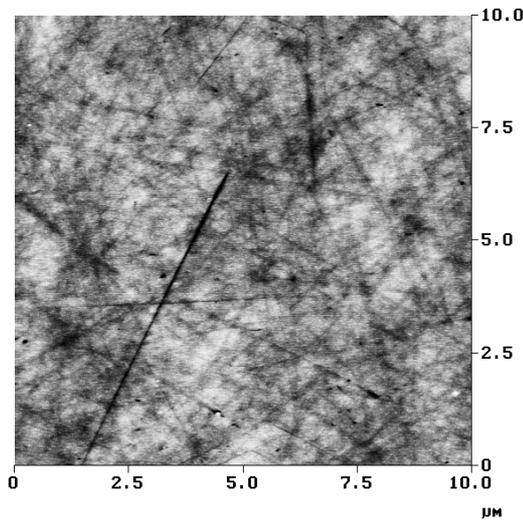


Abb. 6.8: AFM-Bild der Quarzglasoberfläche, Höhen-skala: 0 bis 10 nm, RMS-Rauheit: $0,49$ nm

Mittels der AFM-Messung (Abb. 6.8) konnte an diesem Quarzglas in einem Scangebiet von $10 \cdot 10 \mu\text{m}^2$ (Ortsfrequenzbereich $0,1 - 25,6 \mu\text{m}^{-1}$) eine RMS-Rauheit von $0,49$ nm bestimmt werden. Die mittels TS- und AFM-Messung ermittelten RMS-Rauheiten stimmen somit unter Beachtung des sich stark überlappenden Ortsfrequenzbereiche gut überein.

Sollen Oberflächenqualitäten von Proben mit stark unterschiedlichen Oberflächengüten ermittelt werden, kann mittels der in [Kienzle, 1993] vorgestellten Gleichungen der Einfluss der beiden Oberflächen nicht voneinander getrennt werden. Das hohe Niveau des Streulichts der Oberflächen mit der schlechteren Oberflächenqualität würde das mit der besseren Oberflächenqualität vollständig überdecken, so dass auch lokale Schwankungen nicht mehr detektiert werden könnten. Ein anderer Weg, den Streulichteinfluss der Rückseite bei einer totalen Rückstreuung zu unterdrücken, besteht darin, eine Wellenlänge zu verwenden, bei der die Probe stark absorbiert. Dieses Vorgehen wird im folgenden Beispiel demonstriert.

Bei einem 1 mm dicken SiC-Substrat, dessen eine Seite poliert und die andere geschnitten war, sollte mittels totaler Streulichtmessung die Oberflächenpolitur hinsichtlich Homogenität überprüft werden. Wie in Abb. 6.9 zu sehen ist, konnten anhand der totalen Rückstreuungsmessungen bei $632,8$ nm aufgrund der Transparenz des SiC-Substrates ($n \approx 2,6$, $k \approx 1 \cdot 10^{-4}$, [Palik, 1985]) und des dadurch vorhandenen Einflusses der geschnittenen Seite keine Aussagen zur Homogenität getroffen werden. Es konnte erst beim Einsatz der Messwellenlänge 325 nm (SiC: $n \approx 2,9$, $k \approx 6 \cdot 10^{-3}$, [Palik, 1985]) gezeigt werden, dass die polierte Seite starke lokale Inhomogenitäten aufwies.

Da zunehmend Optiken für den UV-Bereich eingesetzt werden (z.B. in der Lithographie) und in diesem Spektralbereich erhöhte Oberflächenrauheiten einen stärkeren Einfluss auf die Erhöhung der Streulichtverluste (Gl. 2.15) als im VIS-/IR-Wellenlängenbereich haben, ist eine Optimierung des Polierprozesses der im UV-Bereich eingesetzten Substrate (wie z.B. CaF_2) notwendig.

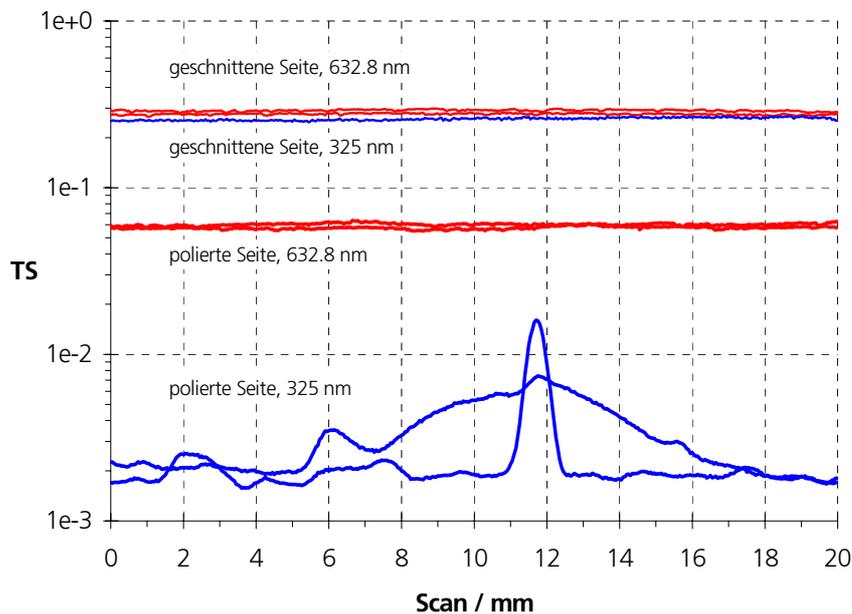


Abb. 6.9: Totale Rückstreuung an einem SiC-Substrat bei 325 nm und 632,8 nm; je zwei, auf der Probenoberfläche senkrecht zueinander orientierte Linienscans; Beleuchtungsfleck einmal auf der geschnittenen und einmal auf der polierten Seite

In Abb. 6.10 wurden Messungen der totalen Rückwärtsstreuung bei der Wellenlänge 248 nm an CaF_2 -Substraten mit verschiedenen Politurgütern dargestellt.

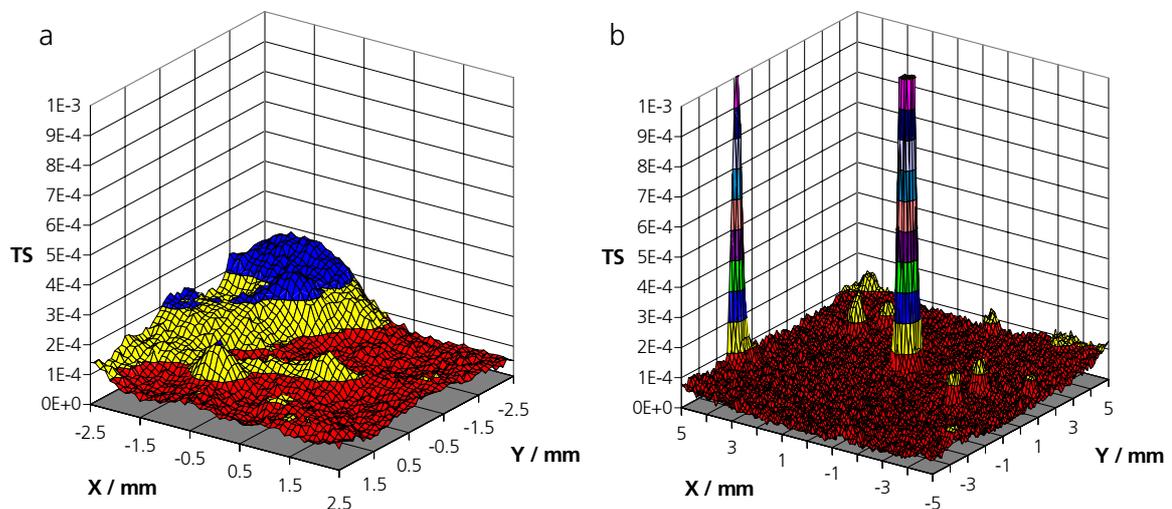


Abb. 6.10: Totale Rückstreuung (248 nm) an einem normalpolierten (a) und einem spezialpolierten (b) CaF_2 -Substrat

Das normalpolierte CaF_2 -Substrat besitzt große, noch nicht vollständig auspolierte Gebiete, die eine Erhöhung des Streulichtniveaus (Abb. 6.10, a) erzeugen. Das Streulichtniveau der auspolierten Oberflächenbereiche liegt bei $TS \approx 5,0 \cdot 10^{-5}$, das der nicht vollständig auspolierten bei Werten bis $TS \approx 2,7 \cdot 10^{-4}$.

Wie durch TS-Untersuchungen an einem spezialpolierten CaF_2 -Substrat (Abb. 6.10, b) gezeigt werden konnte, erzeugt dieses Politurverfahren eine homogenere Substratoberfläche, die neben den zwei kontaminationsbedingten Streulichterhöhungen nur geringe Inhomogenitäten

aufzuweisen hat. Das Streulichtniveau konnte im Gegensatz zu den auspolierten Bereichen der Normalpolitur auf $TS = 3,8 \cdot 10^{-5}$ gesenkt werden.

Ausgehend davon, dass die Oberflächenrauheit auf der Vorder- und Rückseite der CaF_2 -Substrate gleich ist, wurde der Einfluss der Vorder- und Rückseitenstreuung getrennt (Gl. 2.24, [Kienzle, 1993]) und die RMS-Rauheiten mit 0,98 nm bzw. 0,37 nm für das normal- bzw. das spezialpolierte CaF_2 -Substrat bestimmt.

Die ebenfalls an Substraten durchgeführten AFM-Untersuchungen (Abb. 6.11) erwecken dagegen den Eindruck, beide Oberflächen wären homogen und würden mit 0,13 nm und 0,12 nm die nahezu gleiche RMS-Rauheit aufweisen. Dieses Beispiel zeigt, dass lokale Oberflächenuntersuchungsmethoden (wie z.B. durch AFM-Messung) nicht ausreichend für eine umfassende Oberflächenbewertung sind.

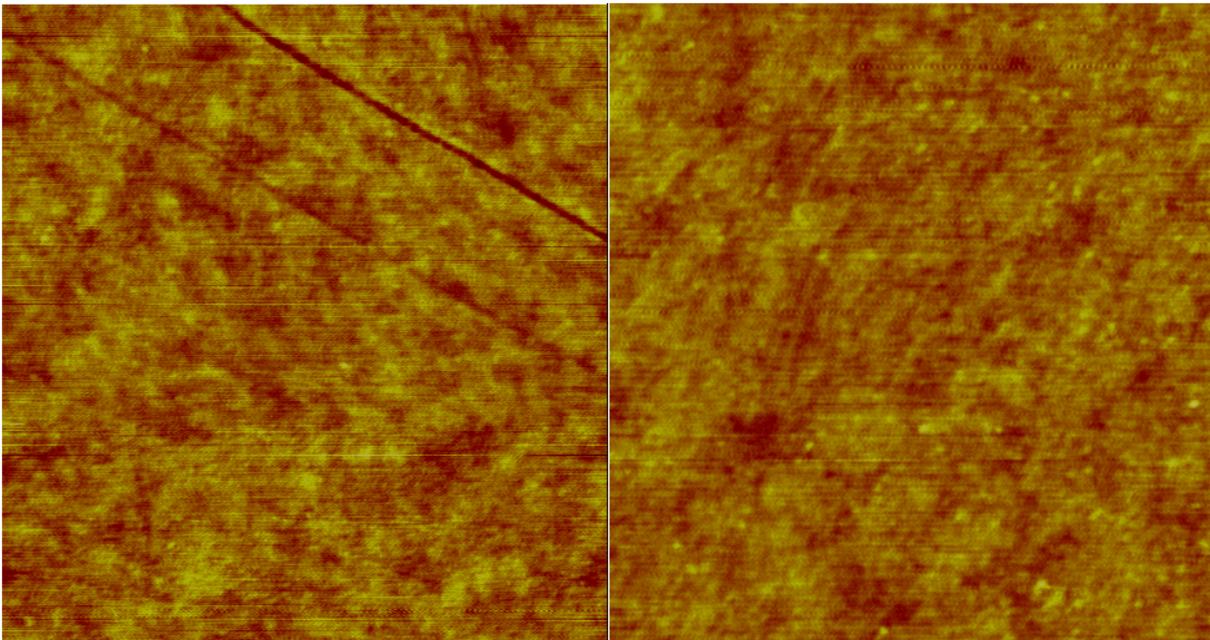


Abb. 6.11: AFM-Bilder des normalpolierten (links) und des spezialpolierten (rechts) CaF_2 -Substrates (Höhenskala: 2 nm, Scan-Gebiet: $1 \times 1 \mu\text{m}^2$, RMS-Rauheit: 0.13 nm bei Normalpolitur bzw. 0.12 nm bei Spezialpolitur)

Die TS-Messung bei 193 nm eignet sich auch zum Vergleich von Oberflächenpolituren verschiedener Hersteller. In Abb. 6.12 ist die totale Rückstreuung von fünf verschiedenen polierten CaF_2 -Substraten dargestellt. Der Bereich der ermittelten TS-Werte reicht von $1,4 \cdot 10^{-4}$ bis $1,3 \cdot 10^{-2}$ und zeigt die Notwendigkeit der Prüfung der Oberflächenqualität.

Da die Vorwärtsstreuung der eingesetzten Optiken insbesondere in der Lithographie eine entscheidende Rolle spielt, ist für das CaF_2 -Substrat mit der geringsten Rückwärtsstreuung auch die Vorwärtsstreuung als Mapping bei 193 nm in Abb. 6.13 dargestellt. Neben den probenhalterbedingten Streulichtabsenkungen in den Ecken des Mappings ist zu erkennen, dass die totale Vorwärtsstreuung Schwankungen aufweist, was auf lokale Inhomogenitäten der Oberflächenpolitur hindeutet.

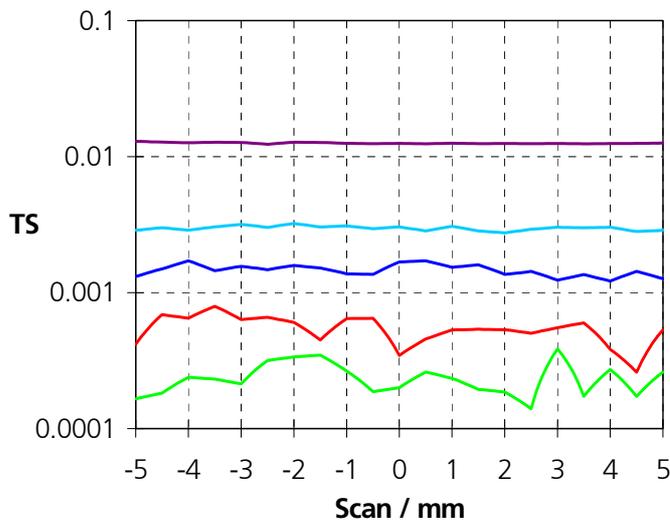


Abb. 6.12: Totale Rückstreuung bei 193 nm an von verschiedenen Herstellern polierten CaF_2 -Substraten

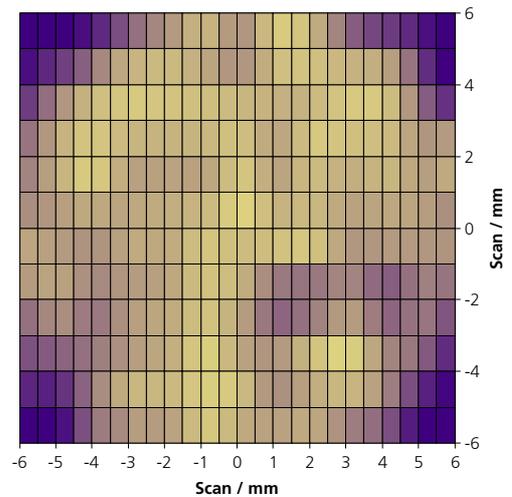


Abb. 6.13: Totale Vorwärtsstreuung bei 193 nm eines speziell-polierten CaF_2 -Substrats (Abb. 6.12, untere Kurve), Höhengskala: 0 bis 0,002

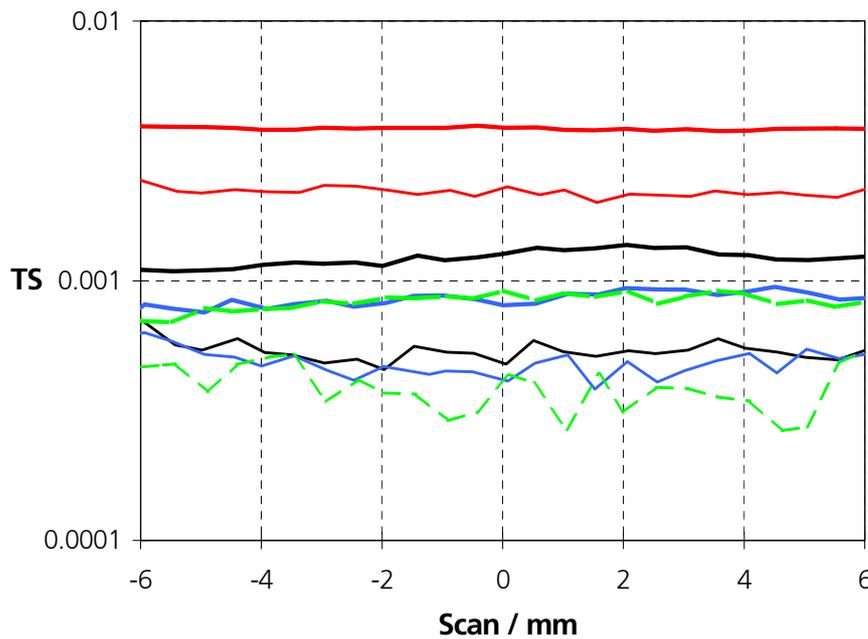


Abb. 6.14: Totale Vorwärts- (dicke Linien) und Rückstreuung (dünne Linien) bei 193 nm an drei CaF_2 -Substraten (aus Abb. 6.12) und einem Quarzglas (gestrichelte Linie); gleiche Linienfarbe bedeutet gleiche Probe

In Abb. 6.14 ist die totale Vorwärts- und Rückstreuung bei 193 nm von drei der in Abb. 6.12 gezeigten CaF_2 -Substrat mit einem Quarzglas zum Vergleich dargestellt. Bei allen Proben war die totale Vorwärtsstreuung größer als die Rückwärtsstreuung. Das Streulichtniveau der besten CaF_2 -Politur lag bei dem des Quarzglases.

Die totale Vorwärts- und Rückstreuung bei 193 nm eines CaF_2 -Substrates mit radial unterschiedlicher Polierqualität ist in Abb. 6.15 dargestellt. Anhand des erhöhten Streulichtniveaus ist zu sehen, dass der Mittelbereich des Substrates nicht so gut poliert wurde, wie der ringförmige

Bereich mit einem Durchmesser von ca. 15 mm. Die Streulichterhöhungen in den Randbereichen bei der Rückstreurichtung sind auf den Einfluss des Probenhalters bei der Streulichtmessung zurückzuführen.

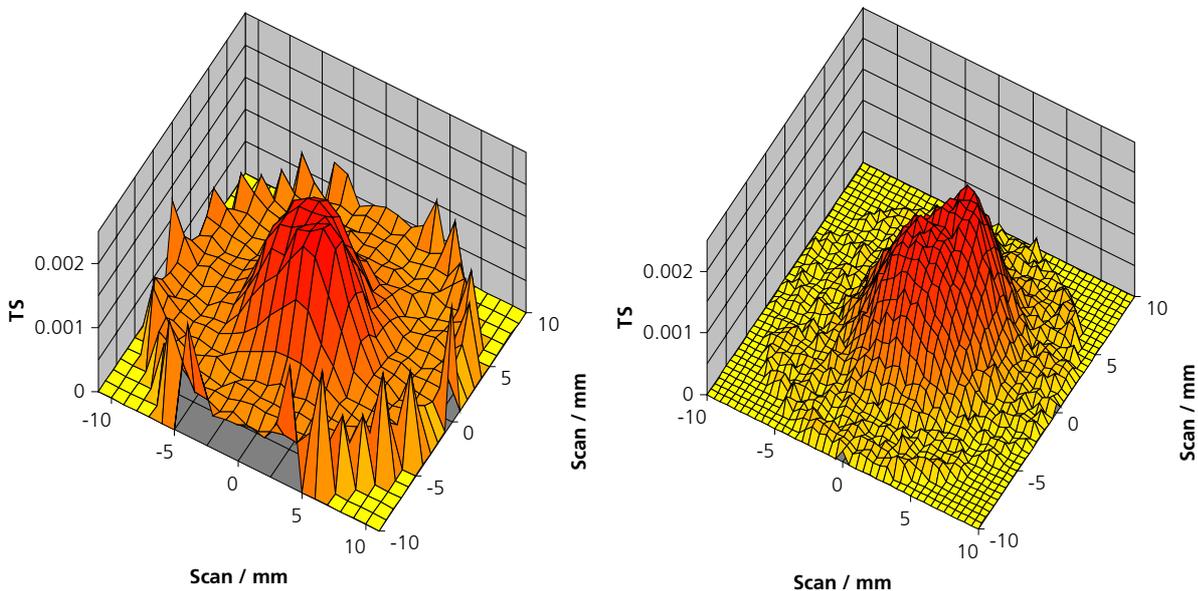


Abb. 6.15: totale Rückwärts- (links) und Vorwärtsstreuung (rechts) bei 193 nm eines radial unterschiedlich polierten CaF_2 -Substrates

6.4 Untersuchungen an optischen Schichtsystemen

Für die Bewertung optischer Schichtsysteme ist neben der Veränderung des Streulichtniveaus durch die Schichten wie bei den Oberflächen auch die Oberflächenhomogenität und das evtl. Vorhandensein von Kontaminationen entscheidend.

Ein Beispiel für eine Kontaminationskontrolle mittels TS-Messung ist in Abb. 6.16 zu sehen. Hierbei wurde ein AR-beschichtetes Glas vor und nach der Reinigung bei der Wellenlänge 632,8 nm vermessen.

Die Messung vor der Reinigung weist eine Vielzahl von starken lokalen Streulichterhöhungen (bis $\text{TS} = 3,4 \cdot 10^{-2}$) auf, die durch die Kontamination hervorgerufen wurden. Die Messung nach der Reinigung zeigt, dass die Anzahl und Größe (Maximum bei $\text{TS} = 8,6 \cdot 10^{-3}$) der Kontaminationen erheblich gesenkt werden konnte. Auch die Grundwerte (ungereinigt: $\text{TS} = 2,4 \cdot 10^{-3}$, gereinigt: $\text{TS} = 1,5 \cdot 10^{-3}$) belegen durch deren Senkung den Reinigungseffekt. Dass es auch schon auf der ungereinigten Probe unkontaminierte Stellen gab, kann durch die sich nur unbedeutend unterscheidenden Minima der TS-Werte (ungereinigt: $\text{TS} = 9,3 \cdot 10^{-4}$, gereinigt: $\text{TS} = 9,2 \cdot 10^{-4}$) gezeigt werden.

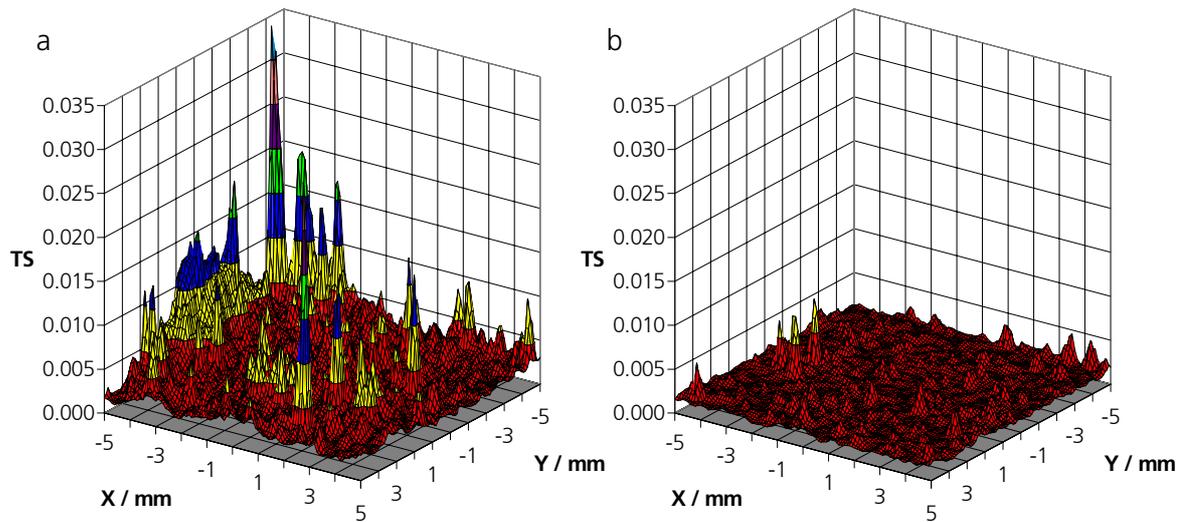


Abb. 6.16: 2D-TS-Mapping (Rückstreuung) bei einer Wellenlänge von 632,8 nm eines AR-beschichteten Glases vor (a) und nach (b) der Reinigung

Ein Beispiel für die Wellenlängenabhängigkeit des Streulichts von Schichtsystemen bei verschiedenen Wellenlängen ist in Abb. 6.17 zu sehen.

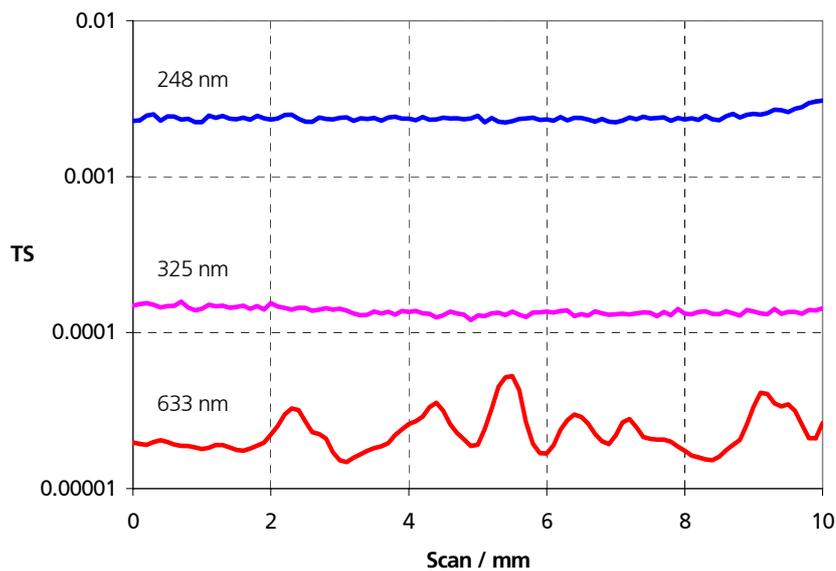


Abb. 6.17: Totale Rückstreuung bei 248 nm, 325 nm und 632,8 nm an einem HR-Mehrschichtsystem für 248 nm

Hier wurde an einem für 248 nm designten HR-Mehrschichtsystem die totale Rückstreuung für 248 nm, 325 nm und 632,8 nm gemessen. Die Rückstreuung bei 325 nm und 632,8 nm ist im Vergleich zu dem bei der Designwellenlänge vergleichsweise gering, da das Schichtsystem bei diesen Wellenlängen ein Transmissionsband aufwies. Anhand dieser Ergebnisse lässt sich feststellen, dass die Streulichtwirkung der Oberflächenrauheiten des Schichtsystems die des Substrates bei der Designwellenlänge weit übersteigt.

Ein anderes Beispiel für die Streulichtuntersuchung von Mehrschichtsystemen ist in Abb.

6.18 zu sehen.

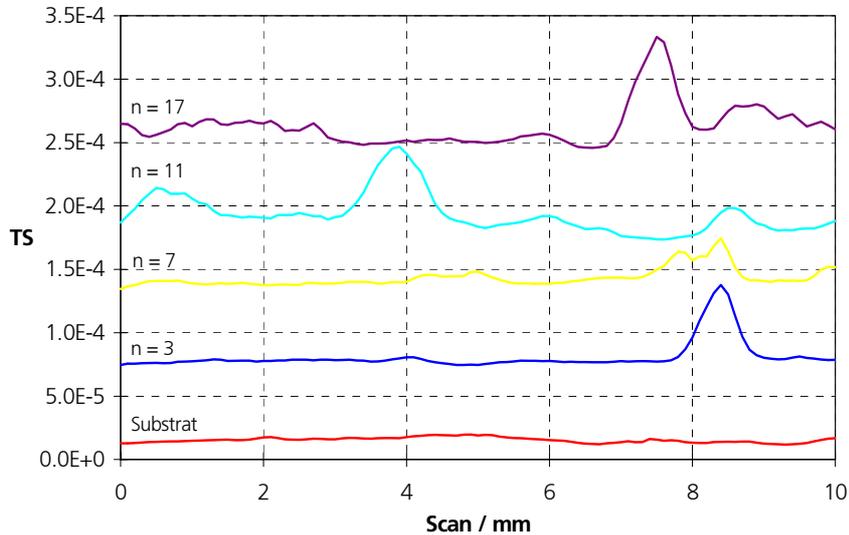


Abb. 6.18: Totale Rückstreuung bei 632,8 nm an $\lambda/4$ -Mehrfachschichtsystemen (für 632,8 nm) mit unterschiedlichen Schichtenanzahlen und an dem Beschichtungssubstrat

Ein $\lambda/4$ -Mehrfachschichtsystem mit einer unterschiedlichen Anzahl von $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -Schichten ($n = 3, 7, 11$ und 17) wurde für 632,8 nm hergestellt und die totale Rückstreuung bei 632,8 nm zusammen mit einem Substrat (RG1000 von Schott) gemessen. Die Erhöhung des Streulichtes lässt sich in erster Linie auf die Erhöhung des Reflexionsvermögens durch das Schichtsystem zurückführen. Die lokalen Inhomogenitäten des Streulichts wurden hingegen durch das Schichtsystem verursacht.

Der Streuverlust von hochreflektierenden Mehrfachschichtsystemen hängt signifikant von der Qualität der verwendeten Substrate ab.

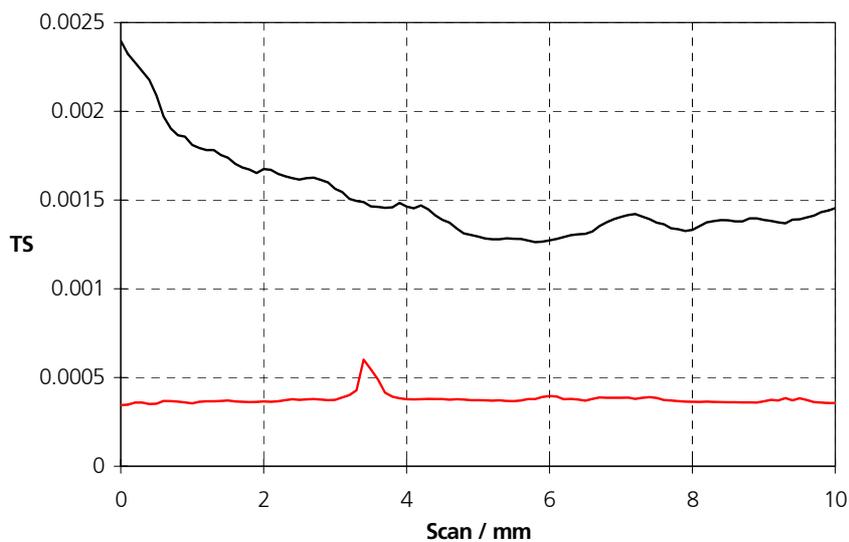


Abb. 6.19: Totale Rückstreuung (325 nm) eines HR-Mehrfachschichtsystems für 325 nm auf konventionell poliertem Glas (obere Linie) und auf superpoliertem Quarzglas aufgetragen (untere Linie)

Ein HR-Mehrfachschichtsysteme für 325 nm bestehend aus 49 $\lambda/4$ -Einzelschichten ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) wurde mittels konventioneller E-Beam-Verdampfung auf ein konventionell poliertes Glas und auf

superpoliertes Quarzglas aufgetragen. Wie in Abb. 6.19 dargestellt ist, weist das HR-System auf dem Glas ein wesentlich höheres Streulichtniveau und wesentlich höhere laterale Inhomogenitäten auf.

Der Einfluss einer fluoridischen HR-Beschichtung auf die Rückstreuung eines normalpolierten CaF_2 -Substrates bei 248 nm ist in Abb. 6.20 zu sehen.

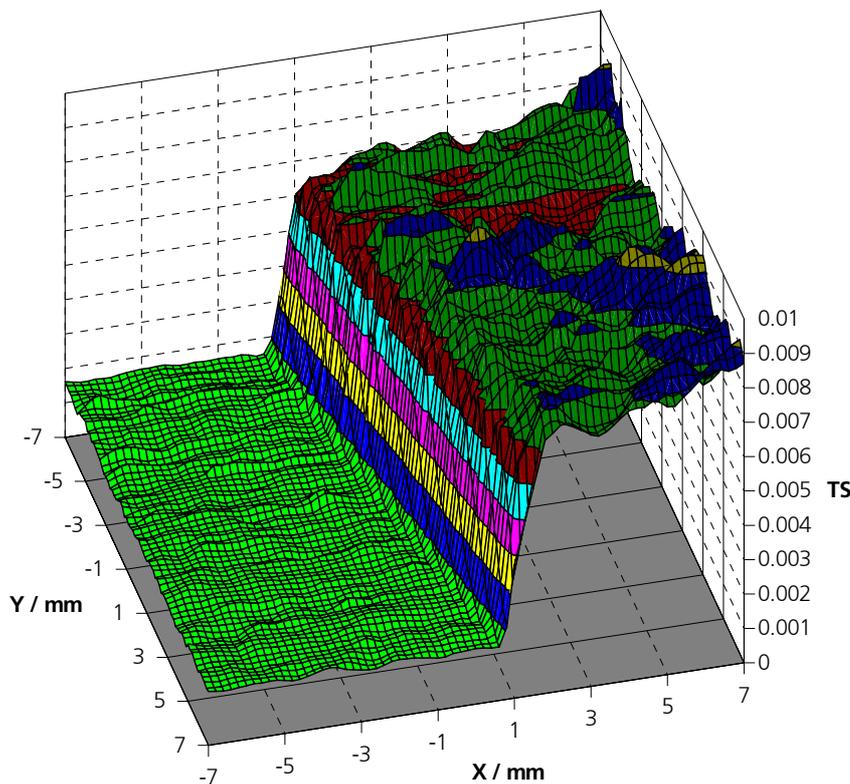


Abb. 6.20: Totale Rückstreuung (248 nm) an einem halbseitig mit einer fluoridischen HR-Beschichtung versehenen normalpolierten CaF_2 -Substrats

Das Substrat ist nur halbseitig beschichtet, so dass bei einer TS-Messung sowohl das Streulichtniveau des Substrates als auch das des Schichtsystems auf dem Substrat detektiert werden kann. Die Erhöhung des Streulichtes ist sowohl durch die Reflexionserhöhung als auch durch die Eigenstruktur der Schichten bedingt.

Wie auch schon bei der Bewertung von Substraten kann die TS-Messung auch zur Bewertung der Homogenität von Schichten herangezogen werden.

In Abb. 6.21 ist ein Mapping der totalen Rückstreuung bei 193 nm eines für 193 nm AR-beschichteten CaF_2 -Substrates dargestellt. Die Streulichterhöhung in den Bildecken ist auf den Einfluss des Probenhalters zurückzuführen. Innerhalb des vom Probenhalter ungestörten Gebietes sind deutlich unterschiedliche TS-Werte zu unterscheiden, was auf Inhomogenitäten im Substrat oder Schichtsystem hindeutete.

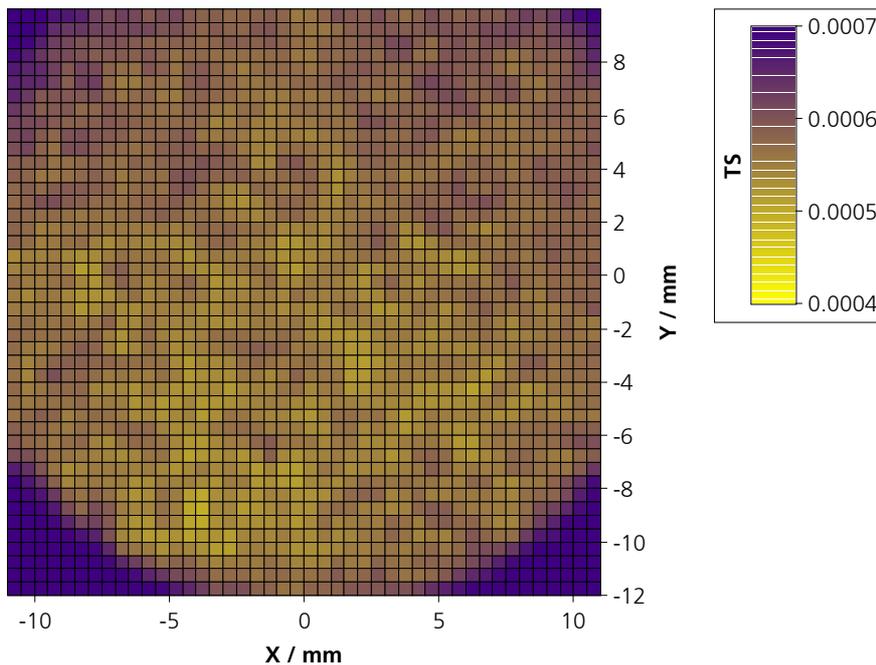


Abb. 6.21: Totale Rückstreuung bei 193 nm an einem AR-beschichteten CaF_2 -Substrat

6.5 Untersuchungen an technisch rauhen Oberflächen

Bei Oberflächen mit großen Rauheiten, wie z.B. bei maschinell bearbeiteten Metalloberflächen, Keramiken oder Halbzeugen der optischen Glasindustrie, liefert die totale Streulichtmessung im sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich nur quantitative Aussagen über die Qualität der Oberflächenbearbeitung und kann nicht als Basis für die Rauheitsberechnung nach der in der Abschn. 2.3 vorgestellten Beziehung zwischen totalem Streulicht und Oberflächenrauheit verwendet werden. Danach ist es erforderlich, dass die RMS-Rauheit σ der Oberfläche vielfach kleiner als die Messwellenlänge λ ist. Bei Verwendung der Messwellenlänge $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ ist diese Bedingung bis zu RMS-Rauheiten von ca. $1 \mu\text{m}$ erfüllt.

Eine andere Variante wäre die Verwendung von speziell an die Aufgabenstellungen angepassten rigorosen Streutheorien ([Baumgart, 1998], [Lewis, 1998]), auf die an dieser Stelle aber nicht eingegangen werden soll.

In Abb. 6.22 ist die totale Streulichtmessung in Rückwärtsrichtung an einer gedrehten und an einer polierten Aluminiumoberfläche dargestellt. Um auf Basis von TS-Messungen die RMS-Rauheit σ berechnen zu können, wurden die Messungen bei der Messwellenlänge $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ durchgeführt.

Der Mittelwert des gemessenen totalen Streulichts der gedrehten Oberfläche betrug $\text{TS} = 9,7\%$, der der polierten Oberfläche $\text{TS} = 2,0\%$. Die anhand dieser TS-Werte ermittelten RMS-Rauheiten liegen bei 264 nm bzw. 120 nm ($R = 98,9\%$, [Palik, 1985]).

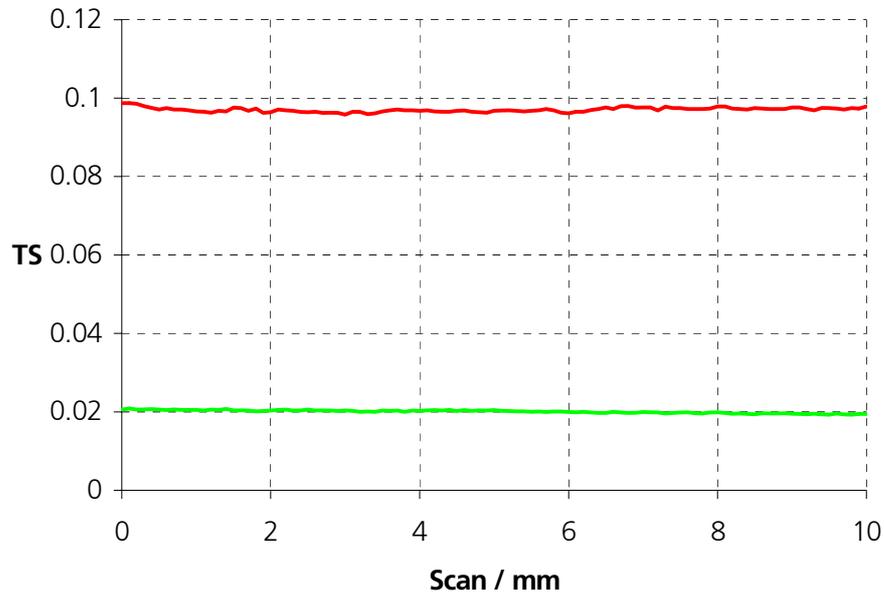


Abb. 6.22: Totale Rückwärtsstreuung bei $10,6 \mu\text{m}$ an einer gedrehten (obere Kurve) und an einer polierten (untere Kurve) Aluminiumoberfläche

Zum Vergleich der Messwerte wurden die Proben ebenfalls mittels mechanischer Profilometrie untersucht. In Abb. 6.23 und 6.24 sind die durch Messungen mit dem Form Talysurf 120L (von Taylor-Hobson) bestimmten Oberflächenprofile dargestellt.

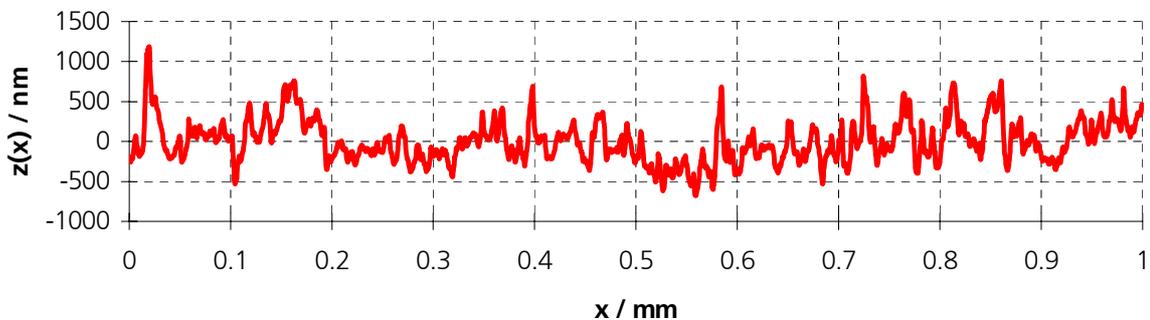


Abb. 6.23: Höhenprofil $z(x)$ der Talysurf-Messung an der gedrehten Aluminiumoberfläche

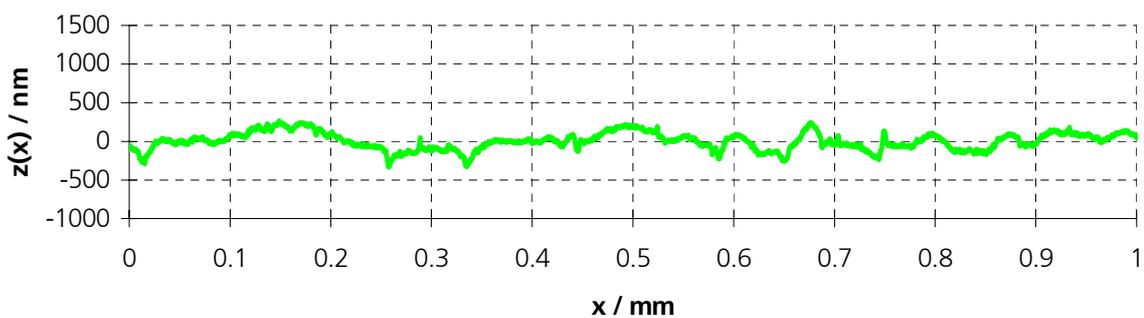


Abb. 6.24: Höhenprofil $z(x)$ der Talysurf-Messung an der polierten Aluminiumoberfläche

Die sich aus den Talysurf-Messungen ergebenden RMS-Rauheiten betragen 278 nm für die gedrehte und 105 nm für die polierte Al-Oberfläche. Die durch die Talysurf-Messungen erfassten Ortsfrequenzen liegen nach Gl. 3.5 in einem Bereich von $0,001 \mu\text{m}^{-1}$ bis $2 \mu\text{m}^{-1}$ (bei 4000 Messpunkten bei einer Scanlänge von 1 mm). Bedingt durch den Spitzenradius der Talysurf-Spitze von $2 \mu\text{m}$ und einer angenommenen Profilamplitude von 200 nm verringert sich die obere Grenzfrequenz nach Gl. 3.6 auf einen Wert von $0,25 \mu\text{m}^{-1}$. Unter Beachtung des erfassten Ortsfrequenzbandes der totalen Streulichtmessung von $0,0041 \mu\text{m}^{-1}$ bis $0,094 \mu\text{m}^{-1}$ weisen die RMS-Rauheiten mit 278 nm und 264 nm (gedrehte Aluminiumoberfläche) bzw. 105 nm und 120 nm (polierte Aluminiumoberfläche) eine gute Übereinstimmung auf.

Die gleiche Vorgehensweise wurde bei der Streulichtuntersuchung einer gesägten und danach feingefrästen Oberfläche eines synthetischen Quarzglas und einer polierten Messingoberfläche angewandt. Die Ergebnisse der totalen Streulichtmessung in Rückwärtsrichtung an den Proben wurden in Abb. 6.25 dargestellt.

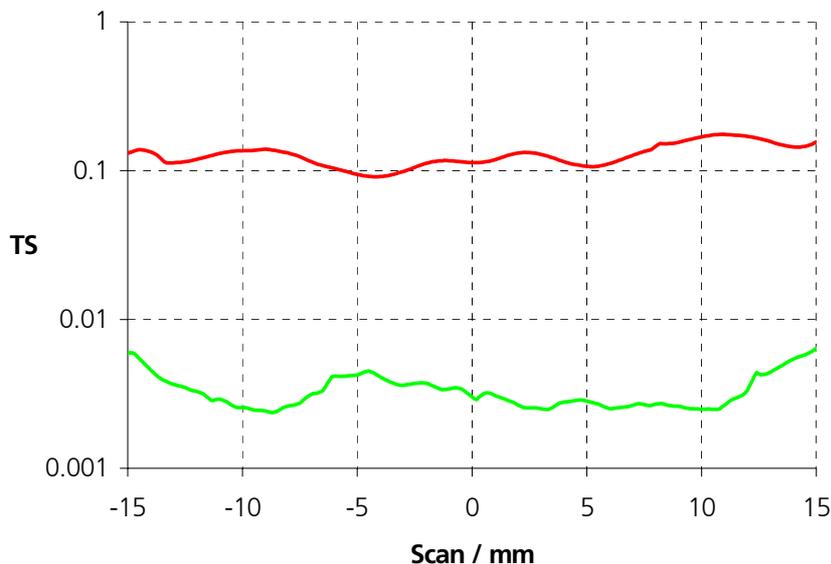


Abb. 6.25: Totale Rückwärtsstreuung bei $10,6 \mu\text{m}$ an einer gesägten und danach feingefrästen synthetischen Quarzglasoberfläche (obere Kurve) und an einer polierten Messingoberfläche (untere Kurve); beide Oberflächen mit einer Al-Schicht besputtert

Aus den Streulichtmessungen wurden die RMS-Rauheiten mit 40 nm für die Messingoberfläche und mit 280 nm für die Quarzglasoberfläche bestimmt.

Bei AFM-Messungen an der Messingprobe wurden folgende RMS-Rauheiten bestimmt: 12 nm, 6 nm und 3 nm für die Scangebiete $100 \times 100 \mu\text{m}^2$, $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ und $1 \times 1 \mu\text{m}^2$. Für die Quarzprobe wurde in einem Messfeld von $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ eine RMS-Rauheit von 221 nm ermittelt.

Die Differenzen zwischen den durch Streulichtmessung und den durch AFM-Messung bestimmten Rauheiten sind durch die nicht oder nur wenig überlappenden Ortsfrequenzbereiche (siehe Tab. 6.1) der Messverfahren bei diesen Messwellenlängen bzw. Messfeldern bedingt. Bei der Streulichtmessung an der Messingprobe fällt die inhomogene Oberflächenqualität aufgrund des Beleuchtungsfleckdurchmessers von 2 mm stärker ins Gewicht als bei der AFM-Messung.

Zum Vergleich der ermittelten Rauheit wurde die polierte Messingoberfläche ebenfalls mittels mechanischer Profilometrie untersucht. Das durch die Talysurf-Messung bestimmte Oberflächen-

profil ist in Abb. 6.26 dargestellt.

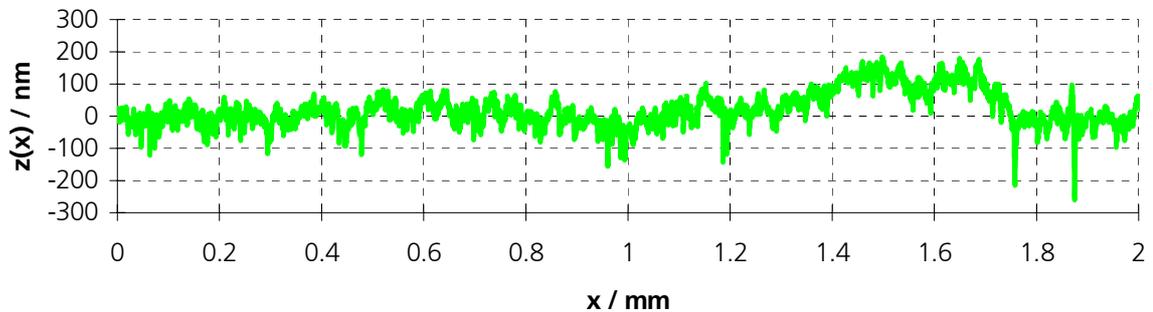


Abb. 6.26: Höhenprofil $z(x)$ der Talysurf-Messung an der polierten und mit Aluminium besputterten Messingoberfläche

Die aus dem Höhenprofil ermittelte RMS-Rauheit liegt bei 32 nm und weist unter Beachtung der erfassten Ortsfrequenzbereiche sowie der lokalen Inhomogenitäten der Probenoberfläche (siehe TS-Messung Abb. 6.25) sowie des Oberflächenabriebs der Talysurf-Spitze an der Al-Schicht eine gute Übereinstimmung zu der aus der totalen Streulichtmessung bestimmten RMS-Rauheit von 40 nm auf.

Messverfahren	RMS-Rauheit der		Ortsfrequenzbereich
	Messingprobe	Quarzglasprobe	
TS	40 nm	280 nm	$0,0041 - 0,094 \mu\text{m}^{-1}$
AFM:	$1 \times 1 \mu\text{m}^2$	3 nm	$1 - 260 \mu\text{m}^{-1}$
	$5 \times 5 \mu\text{m}^2$	6 nm	$0,2 - 51 \mu\text{m}^{-1}$
	$30 \times 30 \mu\text{m}^2$	221 nm	$0,033 - 8,5 \mu\text{m}^{-1}$
	$100 \times 100 \mu\text{m}^2$	12 nm	$0,01 - 2,6 \mu\text{m}^{-1}$
Talysurf	32 nm		$0,0005 - 0,56 \mu\text{m}^{-1}$

Tab. 6.1: Übersicht über die an der Messing- und Quarzglasprobe durchgeführten Messungen mit Darstellung Ortsfrequenzbereiche nach Gl. 2.12, 3.5 und 3.6 (Talysurf-Werte: Spitzenradius: $2 \mu\text{m}$, Messpunkte: 8000, angenommene Profilamplitude: 40 nm)

Wie oben bereits erwähnt, sind beim Einsatz von Messwellenlängen λ , die nicht vielfach größer als die RMS-Rauheiten σ der Oberfläche sind, qualitative Aussagen über die Oberflächenrauheit durch die verwendete Streulichttheorie (vgl. Abschn. 2.3) nicht möglich. Es besteht aber die Möglichkeit, quantitative Aussagen über die Qualität der Oberflächenbearbeitung zu ermitteln. In Abb. 6.27 sind die totalen Streulichtmessungen bei den Wellenlängen $10,6 \mu\text{m}$, $632,8 \text{ nm}$ und 248 nm an der zuvor schon diskutierten polierten Messingoberfläche mit Al-Schicht dargestellt.

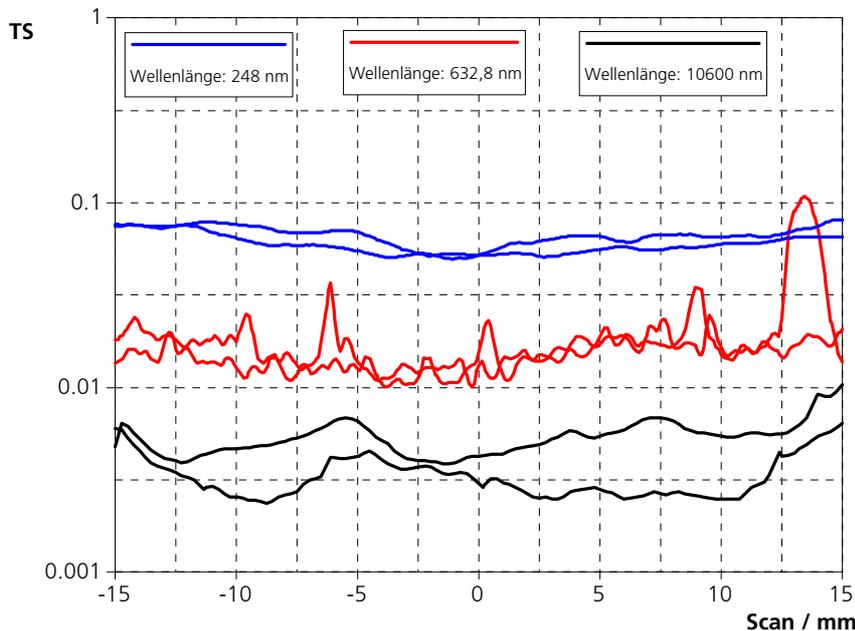


Abb. 6.27: Totale Rückwärtsstreuung bei 248 nm (obere Kurven), 632,8 nm (mittlere Kurven) und 10,6 μm (untere Kurven) an einer polierten Messingoberfläche mit Al-Schicht besputtert, je zwei Linienscans pro Messwellenlänge

Bei allen drei Messwellenlängen lassen sich aufgrund der TS-Scans lokale Inhomogenitäten nachweisen, wobei die Messung bei 632,8 nm aufgrund des kleinsten Beleuchtungsfleckdurchmessers (< 1 mm) die höchste Ortsauflösung hat. Die Beleuchtungsfleckdurchmesser bei 248 nm und 10,6 μm betragen bei diesen Messungen jeweils 2 mm.

6.6 Erste Messungen bei 157 nm

Die ersten Messungen im VUV mittels der in Abschn. 4.11 vorgestellten Messanordnung wurden unter Verwendung einer Deuteriumlampe als Beleuchtungsquelle bei der Wellenlänge 157 nm durchgeführt.

Wie in Abschn. 4.11 beschrieben, ist die Frage der Kalibrierung einer TS-Messanordnung im VUV-Wellenlängenbereich noch nicht ausreichend geklärt. Bei den hier vorgestellten Messergebnissen wurde die Kugel aus ihrer Lage in Transmissionsrichtung um 15° verkippt und somit der einfallende Strahl direkt über die Coblenzkugel auf das Detektionssystem gelenkt. Um die Lichtabsorption im Strahlengang zu minimieren, wurde die Sauerstoffkonzentration auf einen Wert kleiner 10^{-6} (siehe [Flemming, 2000]) durch Abpumpen bis 10^{-3} mbar und anschließende Stickstoffflutung bis Normaldruck gesenkt.

In Abb. 6.28 werden TS-Messungen bei 157 nm in Rückwärtsstreurichtung an fluoridischen HR-Mehrfachsichtsystemen auf CaF_2 -Substraten dargestellt. Bei dem einen Spiegel wurde aufgrund von durch Alterungserscheinungen (ca. 8 Jahre) hervorgerufenen Degradationen ein mit über 10% sehr hoher Streuwert ermittelt. Die zweite Messung wurde an einem vergleichsweise neuem Spiegel (6 Monate) durchgeführt. Der Streulichtwert liegt bei ca. 0,1% und ist somit im Bereich des Untergrundsignals der bei dieser TS-Messanordnung als Beleuchtungsquelle verwendeten Deuteriumlampe.

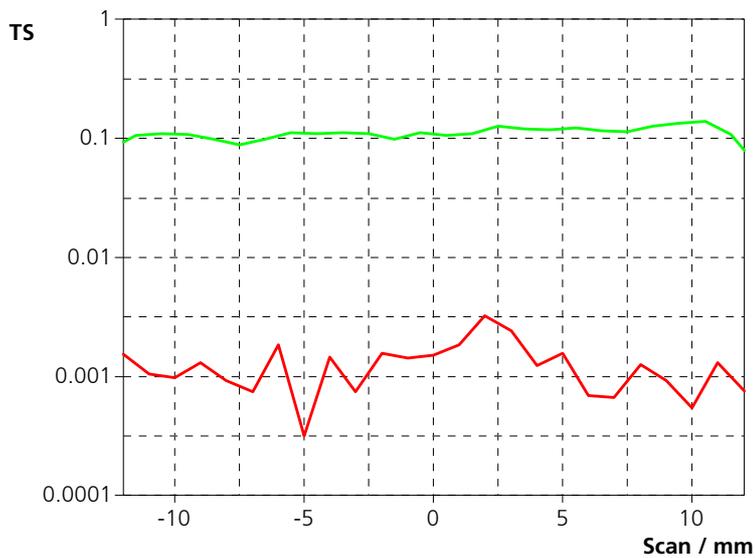


Abb. 6.28: Totale Rückwärtsstreuung bei 157 nm von fluoridischen HR-Mehrschichtsystemen auf CaF_2 -Substraten, obere Kurve: degradiertes Spiegel, untere Kurve: neuer Spiegel

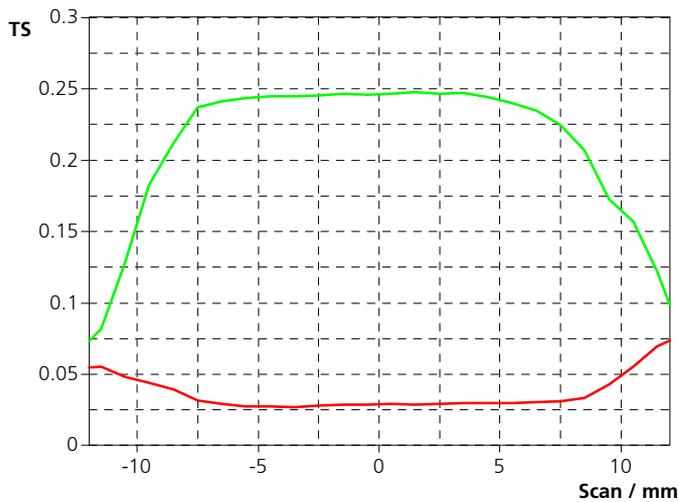


Abb. 6.29: Vorwärts- (obere Kurve) und Rückwärtsstreuung (untere Kurve) eines CaF_2 -Diffusors bei 157 nm

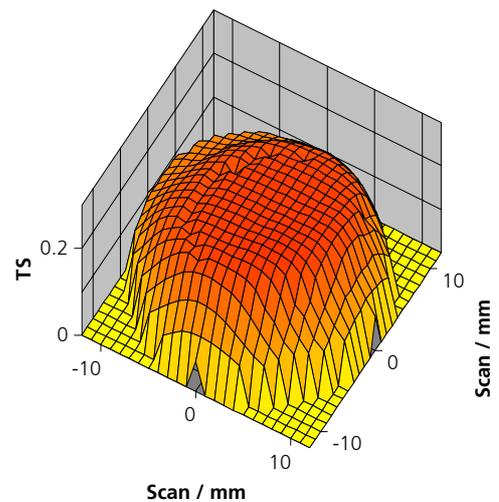


Abb. 6.30: 2D-Mapping der Vorwärtsstreuung des gleichen CaF_2 -Diffusors wie in Abb. 6.29 bei 157 nm

Abb. 6.29 zeigt die Vorwärts- und Rückwärtsstreuung an einem geschliffenen CaF_2 -Substrat, wie es auch als Diffusor im Detektionssystem unmittelbar vor dem Detektor zu dessen homogener Ausleuchtung eingesetzt wird. Das gemessene Streulicht wurde am Anfang und Ende des Linienscans durch die Streuung (in Rückwärtsrichtung) bzw. Abschattung (in Vorwärtsrichtung) des Probenhalters beeinflusst. Um Aussagen zur Homogenität der Vorwärtsstreuung an diesem CaF_2 -Diffusor zu gewinnen, wurde neben den oben gezeigten Linienscans auch ein 2D-

Mapping³⁷ der Vorwärtsstreuung (Abb. 6.30) durchgeführt. Anhand dieser Messung konnte gezeigt werden, dass das Streuverhalten des Diffusors bis auf einen kleinen Bereich (relative Schwankung ca. 15 %) außerhalb der Probenmitte in dem nicht durch den Probenhalter beeinflussten Bereich mit einer relativen Schwankung von ca. 5 % sehr homogen ist.

³⁷ Das Mapping wurde in einem Bereich von \varnothing 24 mm aufgenommen. Zur Darstellung wurden Werte außerhalb dieses Bereiches auf Null gesetzt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden die Konzeption, der Aufbau und die Anwendung eines selbstentwickelten Messsystems zur Erfassung der totalen Streuung in Rückwärts- und Vorwärtsrichtung von Festkörperoberflächen und Schichten dargestellt. Dieses nimmt u.a. durch die erreichten Sensitivitäten und das verfügbare Messwellenlängenspektrum eine international herausragende Stellung ein. So wird der internationale Stand der Technik bzgl. der Sensitivitäten durch das realisierte Messsystem bei der Messwellenlänge 632,8 nm mit- und bei 325 nm, 488 nm, 514,5 nm und 10,6 μm allein bestimmt. Durch das breite Wellenlängenspektrum von 157 nm bis 10,6 μm wird erstmalig ein extrem ausgedehnter Ortsfrequenzbereich von $4,1 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$ bis $6,3 \mu\text{m}^{-1}$ abgedeckt. Das Einsatzspektrum des Messsystems umfasst somit Substrate und Beschichtungen für Optiken im UV- bis IR-Wellenlängenbereich sowie technisch raue Oberflächen. Gleichzeitig ermöglichen das breite Wellenlängenspektrum und die Vielzahl der Einzelwellenlängen die Messung bei den jeweiligen Einsatzwellenlängen optischer Komponenten.

Die verschiedenen Messverfahren zur Erfassung von Streulicht wurden miteinander verglichen. Es zeigte sich, dass nur die Streulichterfassung mittels Coblenzkugel die Anforderungen an eine schnelle und robuste Messung bei gleichzeitig hoher Sensitivität und minimiertem technischen Aufwand (z.B. keine He-Spülung notwendig) erfüllt.

Das in dieser Arbeit realisierte Messsystem ermöglicht eine Drehung der Coblenzkugel um die Probenoberfläche und die Arretierung der Coblenzkugel in den jeweiligen Messpositionen zur Erfassung der Vorwärts- und der Rückwärtsstreuung [Gliech, 1999 b]. Hierdurch ist es erstmals möglich, die zuvor justierten Einstellungen beider Streulichtrichtungen präzise, schnell und unabhängig von Positionierfehlern des Drehsystems unter Beibehaltung der Einstrahlbedingungen an der Probenposition hinsichtlich Strahlleistung, -durchmesser und -divergenz wiederzufinden.

Es wurden in Abhängigkeit von der Wellenlänge sowie dem Einsatz von Lampen und Lasern verschiedene Beleuchtungskonzepte entwickelt. Beim Einsatz von Laserlichtquellen ist sowohl der Einsatz von Blenden als auch einer Raumfilteranordnung zum Erreichen eines niedrigen Untergrundsignals notwendig. Innerhalb der Fehlerdiskussion wurde demonstriert, dass die ermittelten Intensitätsschwankungen der eingesetzten Lichtquellen akzeptabel klein sind und nicht durch den Einsatz einer Referenzmessung korrigiert werden müssen. Der maximale Gesamtfehler des Messsystems liegt je nach Messwellenlänge im Bereich von 12% bis 17% relativ zum gemessenen Wert.

In der Diskussion des Abbildungsverhaltens der verwendeten Coblenzkugel wurden in Abhängigkeit vom Durchmesser des Beleuchtungsflecks auf der Probe optimale Positionen für Probe und Detektionssystem bestimmt.

Mit der Darstellung der bestehenden Möglichkeiten der Erfassung und Auswertung der Messsignale mittels der selbstentwickelten Ansteuer- und Auswertesoftware wurde gezeigt, dass sich Linien- bzw. Kreuzscans über die Probenoberfläche besser zum Vergleich verschiedener Proben eignen, mittels Flächenscans sich jedoch einzelne lokale Defekte besser erfassen und darstellen lassen.

Anhand von Beispielen wurde gezeigt, dass der datenreduzierte Mittelwert nach ISO 13696 [ISO/FDIS 13696, 1999] ein guter Ersatz für den visuell bestimmten Grundwert eines Linienscans

ist. Damit steht ein objektives Kriterium zur Beurteilung von Streulichtniveaus auch bei Linienscans mit lokalen Streulichterhöhungen zur Verfügung.

Durch Messbeispiele wurde verdeutlicht, dass die TS-Messungen zeitökonomisch durchführbar sind. Ohne eine speziell auf Messgeschwindigkeit optimierte Ansteuerung des Messsystems liegt die Zeit für die Messwertaufnahme für einen Linienscan mit 101 Messpunkten bei 10 s. Ein Mapping mit $101 \cdot 101$ (insgesamt 10201) Messpunkten (z.B. $10 \cdot 10 \text{ mm}^2$ -Mapping mit 0,1 mm Schrittweite) kann in 17 min durchgeführt werden.

Gute bis sehr gute Übereinstimmung der Messwerte mit denen anderer TS-Messanordnungen wurden innerhalb von Round-Robin-Experimenten, die im Rahmen der ISO-Arbeitsgruppe TC 172/ SC 9/WG 6 (ISO-Normenentwurf 13696) bei der Wellenlänge 632,8 nm durchgeführt wurden, erzielt.

Die Funktionstüchtigkeit, Leistungsfähigkeit und Einsatzbreite des TS-Messsystems wurden anhand einer Reihe von Messungen an verschiedenen Oberflächenarten demonstriert. Bei Vergleichen mit Messergebnissen der winkelaufgelösten Streulichtmesstechnik sowie profilgebender Messverfahren (AFM, Talysurf) wurden unter Berücksichtigung der jeweiligen Bandweitenbegrenzungen gute bis sehr gute Übereinstimmungen erreicht. Die Einsatzbreite wurde anhand von superpolierten Si-Wafern, optischen Oberflächen und Schichtsystemen sowie technisch rauhen Oberflächen bei jeweils nach Einsatzfall ausgewählten Wellenlängen im Bereich 193 nm bis $10,6 \mu\text{m}$ nachgewiesen.

Es wurden erste Ergebnisse zu einer bei 157 nm und 193 nm arbeitenden Messanordnung vorgestellt. Diese Messanordnung besteht aus zwei separaten Edelstahlkammern, die einerseits zur Strahlaufbereitung (Strahlkammer) und andererseits zur Messwernerfassung (Messkammer) dienen. Durch die vakuumtaugliche Auslegung der Arretierung [Gliech, 1999 b] der eingesetzten Coblenzkugel wird die Erfassung der totalen Streuung in Rückwärts- sowie Vorwärtsrichtung ermöglicht. Mit den erreichten, für diese Wellenlängen extrem niedrigen Untergrundsignalen von ca. $1 \cdot 10^{-6}$ wurde eine den internationalen Stand bestimmende Anordnung realisiert, die selbst den kritischen Anforderungen der Messbarkeit superpolierter CaF_2 -Substrate und AR-Beschichtungen gerecht wird. Eine ausführliche Beschreibung dieser Messanordnung wurde in [Gliech, 2002] veröffentlicht.

Weiterentwicklungen werden sich insbesondere auf die VUV-TS-Messanordnung konzentrieren. Eine wichtige Aufgabe besteht im Einsatz von Spiegeloptik zur Strahlereinigung, die den Justageaufwand beim Wechsel zwischen den Wellenlängen erheblich verringert und den Einsatz eines Pilotlichtstrahls im sichtbaren Wellenlängenspektrum ermöglicht. Von herausragender Bedeutung ist die Fragestellung der Kalibrierung der VUV-TS-Messanordnung, da derzeit kein Streunormal kommerziell verfügbar bzw. aus der Literatur bekannt ist. Aus diesem Grund werden z.Z. im Fraunhofer IOF im Rahmen von Forschungsarbeiten Materialien auf ihre Eignung als VUV-Streunormal untersucht. Ein wesentlicher Bestandteil ist dabei die Untersuchung der Streulichtwinkelverteilung der in Frage kommenden Materialien. Um diese Untersuchungen voranzutreiben, wurde in das Kammersystem der VUV-TS-Messanordnung eine winkelaufgelöste Streulichtmessanordnung für 157 nm und 193 nm integriert, die sich z.Z. in der Erprobungsphase befindet [Gliech, 2002].

8 Erklärung von häufig verwendeten Symbolen und Abkürzungen

a	- Amplitude eines sinusförmigen Profils	t_{Mod}	- Modulationszeit bei gehoperten Strahlen
B_{Chopp}	- Chopperblattöffnungsbreite	T	- Transmissionsvermögen
d_{Aus}	- Größe der Austrittsöffnung des sammelnden Elements	T_{Abschw}	- Transmissionsvermögen der verwendeten Abschwächer
d_{Pin}	- Pinholedurchmesser	TS	- totale Streuung
d_{Tail}	- Taillendurchmessers	TS_{Normal}	- Streuvermögen eines Streunormals
D	- Strahl- bzw. Beleuchtungsfleckdurchmesser	TS_{R}	- totale Rückwärtsstreuung
D_{Fokus}	- Fokusfleckdurchmesser	TS_{T}	- totale Vorwärtsstreuung
f	- Ortsfrequenz	TIS	- total integrierte Streuung
f_1, f_2	- Brennweiten	$U_{100\%}$	- Spannungswert eines 100%-streuenden Streunormals
f_o	- obere Ortsfrequenz	U_{gleich}	- Gleichspannungsanteil des Messsignals
f_u	- untere Ortsfrequenz	$U_{\text{lin,max}}$	- maximaler Spannungswert der linearen Kennlinie des Detektors
F_{Off}	- Verhältnis zwischen Chopperblattöffnungsbreite und Messstrahldurchmesser	U_{Mess}	- gemessene Signalspannung
h_{Halter}	- Höhe des Probenhalterrandes	U_{Off}	- Offsetspannung (Mittelwert aller Werte)
k	- Absorptionskonstante	$U_{\text{Rausch,eff}}$	- effektive Rauschspannung (Standardabweichung)
l_{Aus}	- Abstand zwischen Probe und Austrittsöffnung des sammelnden Elements	$U_{\text{Rausch,Spitze}}$	- maximale Rauschspannung (Abstand zwischen größtem und kleinstem Messwert)
l_{Halter}	- kleinste Entfernung zwischen Probenhalter und Beleuchtungsfleck	U_{wechsel}	- Wechselspannungsanteil des Messsignals
n	- Brechungsindex	x_d	- Mittenversatz an der Detektorposition
P_{Det}	- Lichtleistung am Detektor	x_s	- Mittenversatz der Probe zum Coblenzkugelmittelpunkt
P_i	- Einfallleistung	y_d	- Höhenversatz an der Detektorposition
P_r	- reflektierte Leistung	y_s	- Höhenversatz der Probe zum Coblenzkugelmittelpunkt
P_s	- gestreute Leistung		
PSD	- Rauheitsspektrum		
Q	- optischer Faktor		
r	- Radius der Coblenzkugel		
r_{Spitze}	- Messspitzenradius		
r_{Tail}	- Taillenradius		
R	- Reflexionsvermögen		
t_{Flank}	- Flankenanstiegszeit bei gehoperten Strahlen		

α	- Strahldivergenz (Vollwinkel)	λ	- Wellenlänge
$\alpha_{1/2}$	- Strahldivergenz (Halbwinkel)	λ_o	- obere Ortswellenlänge
β	- Einfallswinkel auf der Co- blentzkugeloberfläche	λ_u	- untere Ortswellenlänge
Θ_i	- Einfallswinkel auf der Probe	σ	- RMS-Rauheit
Θ_d	- Einfallswinkel an der Detektor- position	σ_s	- Standardabweichung
Θ_s	- Streuwinkel der Probe	τ	- Transmissionsgrad
$\Theta_{s,max}$	- minimal erfasster Streuwinkel	τ_c	- Korrelationslänge
$\Theta_{s,min}$	- minimal erfasster Streuwinkel	ϕ_s	- Azimutwinkel der Probe
		Ω	- Raumwinkelement
AFM	- Atomic Force Microscopy	FIR	- Far Infrared
AR	- anti-reflective	IR	- Infrarot
ARS	- Angle Resolved Scattering	ISO	- International Organization for Standardization
ASCII	- American Standard Code for Information Interchange	LED	- Light Emitting Diode
ASTM	- American Society for Testing and Materials	LCD	- Liquid Crystal Display
BMBF	- Bundesministerium für Bil- dung und Forschung	MIR	- Mittleres Infrarot
BRDF	- Bidirectional Reflectance Dis- tribution Function	NIR	- Nahes Infrarot
BS	- Beam Splitter	PMT	- Photomultiplier
BSDF	- Bidirectional Scatter Distributi- on Function	PSD	- Power Spectral Density
BTDF	- Bidirectional Transmission Dis- tribution Function	RMS	- Root Mean Square
CCD	- Charge Coupled Device	SEV	- Sekundärelektronenvervielfa- cher
CD	- Committee Draft	TEM	- transversal elektrisch und magnetisch
CW	- Continuous Wave	TIS	- Total Integrated Scattering
DIS	- Draft International Standard	TS	- Total Scattering
DUV	- Deep Ultraviolet	UV	- Ultraviolett
FDIS	- Final Draft International Stan- dard	VIS	- Visuell
		VUV	- Vakuum Ultraviolett
		WMF	- Windows Metafile Format

9 Literaturverzeichnis

[Amra, 1993 a]

C. Amra, D. Torricini, P. Roche, "Multiwavelength (0.45 - 10.6 μm) angle-resolved scatterometer or how to extend the optical window", Appl. Opt. 32, Nr. 28, 5462 - 5474, 1993

[Amra, 1993 b]

C. Amra, C. Grèzes-Besset, L. Bruel, „Comparison of surface and bulk scattering in optical multilayers“, Appl. Opt., Vol. 32, 5492 - 5502, 1993

[Amra, 1994]

C. Amra, C. Grèzes-Besset, S. Maure, D. Torricini, "Light scattering from localized and random interface or bulk irregularities in multilayer optics: the inverse problem", Proc. SPIE 2253, 1184 - 1200, 1994

[Angelsky, 1992]

O. V. Angelsky, P. P. Maksimyak, "Optical diagnostics of slightly rough surfaces", Appl. Opt. 31, Nr. 1, 140 - 143, 1992

[Apel, 2000 a]

Oliver Apel, "Untersuchungen der Verlustmechanismen an optischen Komponenten für Hochleistungs-DUV-Laser", Dissertation, Georg-August-Universität zu Göttingen, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, CUVILLIER VERLAG, Göttingen, 2000

[Apel, 2000 b]

Oliver Apel, Uwe Leinhos, Klaus Mann, „Absorption and scattering measurements on DUV optical components“, Proc. of 5th International Workshop on Laser Beam and Optics Characterization, 291-300, 2000

[Apel, 2001]

Oliver Apel, Christian Göring, Uwe Leinhos, Klaus Mann, Bernd Schäfer, „CHARISMA - A new way for angular-resolved scattering measurements“, Proc. SPIE 4347, 569 - 577, 2001

[ASTM F 1048-87, 1987]

American Society for Testing and Materials, "Standard test method for Measuring the effective surface roughness of optical components by total integrated scattering", 29. Mai 1987

[Baumgart, 1998]

Jörg W. Baumgart, Horst Truckenbrodt, „Scatterometry of honed surfaces“, Opt. Eng., Vol. 37, Nr. 5, 1435 - 1441, 1998

[Bawolek, 1993]

E. J. Bawolek, James B. Mohr, E. D. Hirlleman, A. Majumdar, "Light scatter from polysilicon and aluminum surface and comparison with surface-roughness statistics by atomic force microscopy", Appl. Opt. 32, Nr. 19, 3377 - 3400, 1993

[H. Bennett, 1978]

H. E. Bennett, "Scattering characteristics of optical materials", Opt. Eng. 17, Nr. 5, 480 - 488, 1978

[J. Bennett, 1985]

Jean M. Bennett, "Optical scattering and absorption losses at interfaces and in thin films", *Thin Solid Films* 123, 27 - 44, 1985

[J. Bennett, 1989]

Jean M. Bennett, Lars Mattsson, Michael P. Keane, Leif Karlsson, "Test of strip coating materials for protecting optics", *Appl. Opt.* 28, Nr. 5, 1018 - 1026, 1989

[J. Bennett, 1992]

Jean M. Bennett, "Precision metrology for studying thin films and surfaces", *Thin Solid Films* 220, 227 - 233, 1992

[J. Bennett, 1999]

Jean M. Bennett, Lars Mattsson, *Introduction to Surface Roughness and Scattering*, 2. Auflage, Optical Society of America, Washington, D.C., 1999

[Bjuggren, 1996]

Måns Bjuggren, "Measurement of Infrared Scattering and its Application to Surface Roughness Measurement", Diplomarbeit, Royal Institute of Technology, Department of Physics II, Stockholm, 1996

[Bjuggren, 1997]

Måns Bjuggren, Laurent Krummenacher, Lars Mattsson, "Infrared diffuser for application in transmission and reflection at 10.6 μm ", *Appl. Opt.*, Vol. 36, Nr. 4, 940 - 948, 1997

[Bronstein, 1989]

I. N. Bronstein, K. A. Semendjajew, *Taschenbuch der Mathematik*, 24. Auflage, BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1989

[Cao, 1991]

Lin-xiang Cao, Theodore V. Vorburger, A. George Lieberman, Thomas R. Lettieri, "Light-scattering measurement of the rms slopes of rough surfaces", *Appl. Opt.*, Vol. 30, Nr. 22, 3221 - 3227, 1991

[Carniglia, 1979]

C. K. Carniglia, "Scalar scattering theory for multilayer optical Coatings", *Opt. Eng.* 18, Nr. 2, 104 - 115, 1979

[Chao, 1990]

Shiuh Chao, Yun-Fa Lin, Jeng-Fung Lin, Cheng-Chung Lee, "Scattering loss of an optimum pair high reflectance dielectric mirror", *Appl. Opt.*, Vol. 29, Nr. 13, 1990

[CHOCLAB, 1997]

Protokoll des CHOCLAB-Arbeitstreffens „Optische Streuung von Laserkomponenten“, 23.04.1997, Göttingen

[Church, 1979]

E. L. Church, H. A. Jenkinson, J. M. Zavada, "Relationship between surface scattering and microtopographic features", *Opt. Eng.* 18, Nr. 2, 125 - 136, 1979

[Dai, 1991]

YuZhong Dai, F. P. Chiang, "Scattering from plastically roughened surfaces and its applications to strain assessment", *Opt. Eng.*, Vol. 30, Nr. 9, 1269 - 1276, 1991

[Delplancke, 1997]

F. Delplancke, "Automated high-speed Mueller matrix scatterometer", *Appl. Opt.*, Vol. 36, Nr. 22, 5388 - 5395, 1997

[Demuschewski, 1993]

H. Demuschewski, R. Huff, R. Rehländer, R. Schneider, D. Spriegel, "Maskenblank-Inspektion", *VDI Berichte*, Nr. 1102, 161 - 185, 1993

[Duparré, 1994 a]

Angela Duparré, Stefan Glied, Karl Hehl, Stephan Pichlmaier, "Interface and volume inhomogeneities in optical thin films investigated by light scattering methods", *Proc. SPIE* 2253, 1060 - 1067, 1994

[Duparré, 1994 b]

Angela Duparré, Axel Kiesel, Norbert Kaiser, Horst Truckenbrodt, Uwe Schuhmann, "Roughness and scattering measurements on thin films for UV/VIS applications", *Proc. SPIE* 2262, 67 - 78, 1994

[Duparré, 1995]

Angela Duparré, "Light scattering of thin dielectric films", in *Handbook of optical properties. Vol. 1: Thin films for optical coatings*, Ed. R. E. Hummel, K. H. Guenther, Boca Raton : CRC Press, 273 - 303, 1995

[Duparré, 1996 a]

Angela Duparré, Axel Kiesel, Stefan Glied, "Optical scattering and surface microstructure of thin films for laser application", *Laser Engineering* 24, Nr. 2, 220 - 228, 1996

[Duparré, 1996 b]

Angela Duparré, Stefan Jakobs, "Combination of surface characterization techniques for investigating optical thin-film components", *Appl. Opt.* 35, Nr. 25, 5052 - 5058, 1996

[Duparré, 1997 a]

Angela Duparré, Stefan Glied, "Quality assessment from supersmooth to rough surfaces by multiple-wavelength light scattering measurement", *Proc. SPIE*, Vol. 3141, 57 - 64, 1997

[Duparré, 1997 b]

Angela Duparré, Stefan Glied, "Non-contact testing of optical surfaces by multiple-wavelength light scattering measurement", *Proc. SPIE*, Vol. 3110, 566 - 573, 1997

[Duparré, 1997 c]

Angela Duparré, Stefan Jakobs, Norbert Kaiser, "Influence of substrate surface and film roughness on the quality of optical coatings for UV spectral region", *Proc. SPIE*, Vol. 3110, 509 - 516, 1997

[Duparré, 2000]

Angela Duparré, Stefan Glied, Jörg Steinert, "Light scattering of UV-optical components", 5.

International Workshop on Laser Beam and Optics Characterization 2000, Proceedings, Düsseldorf : VDI Technologiezentrum, 272 - 282, 2000

[Elson, 1983]

J. M. Elson, J. P. Rahn, J. M. Bennett, "Relationship of the total integrated scattering from multilayer-coated optics to angle of incidence, polarization, correlation length, and roughness cross-correlation properties", Appl. Opt. 22, Nr. 20, 3207 - 3219, 1983

[Elson, 1993]

J. Merle Elson, Jean M. Bennett, John C. Stover, "Wavelength and angular dependence of light scattering from beryllium: comparison of theory and experiment", Appl. Opt. 32, Nr. 19, 3362 - 3376, 1993

[Fed Std 209E, 1992]

Federal Standard 209E, „Airborne Particulate Cleanliness Classes in Cleanrooms and Clean Zones“, Institute of Environmental Sciences, 1992

[Flemming, 2000]

Marcel Flemming, „Experimentelle Untersuchungen zur Strahlformung und Signaldetektion im tiefen ultravioletten Spektralbereich“, Diplomarbeit, Westsächsische Hochschule Zwickau (FH), Fachbereich Physikalische Technik / Informatik, Fachgruppe Physikalische Technik, 2000

[Gliech, 1996]

Stefan Gliech, Angela Duparré, "Apparatus for measuring integrated light scattering of optical components over an extended range of wavelengths", Proc. SPIE 2775, 297 - 304, 1996

[Gliech, 1999 a]

Stefan Gliech, Angela Duparré, Rolf-Jürgen Recknagel, Gunther Notni, "Wide-scale surface characterization by combination of scanning force microscopy, white light interferometry and light scattering", Proc. SPIE, Vol. 3739, 355-362, 1999

[Gliech, 1999 b]

S. Gliech, A. Duparré, G. Notni, "Vorrichtung zur Bestimmung des an einer Probe gestreuten Lichtes", Gebrauchsmuster Nr. 299 04 098.4, 1999

[Gliech, 2002]

Stefan Gliech, Jörg Steinert, Angela Duparré, „Light scattering measurements on optical thin film components at 157 nm and 193 nm“, Appl. Opt., im Druck, 2002

[Görling, 2001]

Ch. Görling, U. Leinhos, K. Mann, „Verlustmechanismen von Excimerlaserstrahlung in Calciumfluorid bei 193 nm und 157 nm“, Beitrag beim CHOCLAB II-Treffen, 04.12.-05.12.2001, Jena, 2001

[Guenther, 1982]

K. H. Guenther, „Columnar and nodular growth of thin films“, Proc. SPIE 346, 9 - 18, 1982

[Haferkorn, 1981]

H. Haferkorn, *Optik, Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen*, Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1981

[Hamamatsu, 1999]

Hamamatsu Photonics K.K., *Photomultiplier Tubes - Basics and Applications*, Hamamatsu Photonics K.K., 1999

[Heber, 1996]

Jörg Heber, "Wellenlängenabhängigkeit des integrierten Streulichts an technisch rauhen und ultrapräzisionsbearbeiteten Oberflächen", Diplomarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Physikalisch-Astronomisch-Technikwissenschaftliche Fakultät, 1996

[Hecht, 1994]

Eugene Hecht, *Optik*, 3. korrigierter Nachdruck, Addison-Wesley, München, 1994

[Hielscher, 1997]

Andreas H. Hielscher, Judith R. Mourant, Irving J. Bigio, "Influence of particle size and concentration on the diffuse backscattering of polarized light from tissue phantoms and biological cell suspensions", *Appl. Opt.*, Vol. 36, Nr. 1, 125 - 135, 1997

[ISO/FDIS 13696, 1999]

ISO/FDIS 13696, "Optics and optical instruments: Test methods for radiation scattered by optical components", Final Draft International Standard, 1999

[Izawa, 1991]

T. Izawa, R. Uchimura, N. Yamamura, T. Yakuoh, Y. Owadano, Y. Matsumoto, M. Yano, "Light scattering of highest damage resistant", *Proc. SPIE*, Vol. 1624, 294 - 303, 1991

[Jakobs, 1998 a]

Stefan Jakobs, Angela Duparré, Horst Truckenbrodt, "Interfacial roughness and related scatter in UV-optical coatings: a systematic experimental approach", *Appl. Opt.*, Vol. 37, Nr. 7, 1180 - 1193, 1998

[Jakobs, 1998 b]

Stefan Jakobs, „Grenzflächenrauheiten und Lichtstreuung von Interferenzschichtsystemen für den ultravioletten Spektralbereich“, Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Physikalisch-Astronomische Fakultät, 1998

[Kadkhoda, 1995]

Mohammad Kadkhoda, "Optimierung eines Meßaufbaus zur Streumessung von leistungsfähigen HR-Spiegeln", Diplomarbeit, Universität Hannover, Institut für Atom- und Molekülphysik, 1995

[Kadkhoda, 1997]

M. Kadkhoda, P. Strink, D. Ristau, A. Duparré, S. Glied, N. Reng, M. Greif, R. Schuhmann, M. Goldner, "Concepts for standardisation of total scatter measurements at 633 nm", 4th Int. Workshop on Laser Beam and Optics Characterization, 16-18 June 1997, Munich, Germany, to be published in VDI-TZ Proceedings, Verl. Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 1997

[Kadkhoda, 1999 a]

P. Kadkhoda, D. Ristau, F. von Alvensleben, "Total scatter measurements in the DUV/VUV", *Proc. SPIE*, Vol. 3578, 544 - 554, 1999

[Kadkhoda, 1999 b]

P. Kadkhoda, C. Amra, J. M. Bennett, C. Deumie, A. Duparré, S. Gliech, C. Jolie, H. Kessler, H. Lauth, T. Lindstroem, A. Müller, N. Reng, C.-G. Ribbing, D. Ristau, R. Schuhmann, U. Schuhmann, M. Tilsch, "International round-robin experiment on optical total scattering at 633 nm according to ISO/DIS 13696", Proc. SPIE 3439, 548 - 556, 1999

[Kadkhoda, 2000 a]

Puja Kadkhoda, Arno Müller, Detlev Ristau, Angela Duparré, Stefan Gliech, Hans Lauth, Uwe Schuhmann, Norbert Reng, Markus Tilsch, Rainer Schuhmann, Claude Amra, Carole Deumie, Christophe Jolie, Helmut Kessler, Tomas Lindström, Carl-Gustaf Ribbing, Jean M. Bennett, "International round-robin experiment to test the International Organization for Standardization total-scattering draft standard", Appl. Opt., Vol. 39, Nr. 19, 3321-3332, 2000

[Kadkhoda, 2000 b]

P. Kadkhoda, H. Blaschke, J. Kohlhaas, D. Ristau, „Investigation of transmittance and reflectance in the DUV/VUV spectral range", Proc. SPIE 4099, 311-318, 2000

[Kadkhoda, 2000 c]

P. Kadkhoda, A. Müller, D. Ristau, „Total scatter losses of optical components in the DUV/VUV spectral range", Proc. SPIE 3902, 118-127, 2000

[Kienzle, 1993]

Oliver Kienzle, "Entwicklung eines Modells und Aufbau eines Meßgerätes zur Messung kleinster Lichtstreuung an unbeschichteten Quarzglassubstraten," Diplomarbeit, Technische Hochschule Darmstadt, Institut für angewandte Physik, Juni 1993

[Kienzle, 1994 a]

O. Kienzle, J. Staub, T. Tschudi, "Description of an integrated scatter instrument for measuring scatter losses of 'superpolished' optical surfaces", Meas. Sci. Technol. 5, 747 - 752, 1994

[Kienzle, 1994 b]

O. Kienzle, J. Staub, T. Tschudi, "Light scattering from transparent substrates: theory and experiment", Phys. Rev. B 50, Nr. 3, 1848 - 1860, 1994

[Kienzle, 1994 c]

Oliver Kienzle, Volker Scheuer, Josef Staub, Theo Tschudi, "Design of an integrated scatter instrument for measuring scatter losses of superpolished optical surfaces, application to surface characterization of transparent fused quartz substrates", Proc. SPIE 2253, 1131 - 1142, 1994

[L.O.T., 1995]

L.O.T. - Oriel GmbH & CO KG, „Lichtquellen, Ausgabe 1996/97", Produktkatalog, 1995

[L.O.T., 2000]

L.O.T. - Oriel GmbH & CO KG, „The Book of Photon Tools", Produktkatalog, 2000

[Labsphere, 1994]

Labsphere, Inc., *1994 - 1995 Catalog*, 1994

[Labsphere, 1996]

Labsphere, Inc., *Sphere Systems and Instrumentations, 1996 - 1997 Catalog II*, 1996

[Lewis, 1998]

Gareth D. Lewis, David L. Jordan, Eric Jakeman, „Backscatter linear and circular polarization analysis of roughened aluminum“, Appl. Opt, Vol. 37, Nr. 25, 5985 - 5992, 1998

[Lorincik, 1997 a]

Jan Lorincik, Joseph Fine, Greg Gillen, „The scanning scattering microscope for surface and buried interface roughness and defect imaging“, Proc. SPIE 3141, 302 - 315, 1997

[Lorincik, 1997 b]

J. Lorincik, J. Fine, „Focusing properties of hemispherical mirrors for total integrating scattering instruments“, Appl. Opt., Vol. 36, Nr. 31, 8270 - 8274, 1997

[Maffione, 1997]

Robert A. Maffione, David R. Dana, „Instruments and methods for measuring the backward-scattering coefficient of ocean waters“, Appl. Opt., Vol. 36, Nr. 24, 6057 - 6067, 1997

[Mann, 2000]

Klaus Mann, Oliver Apel, „Verfahren zur integralen Streulichtmessung“, Patent DE 199 50 272 A 1, 2000

[Matsumoto, 2001]

Akira Matsumoto, Kazuho Sone, Jun Saito, Tadahiko Saito, „A measurement apparatus of 157 nm optical scatter loss“, 6th Intern. Workshop on Laser Beam and Optics Characterization, 18-20 June 2001, München, 2001

[Mattsson, 1988]

Lars Mattsson, „Characterization of supersmooth surfaces by light scattering techniques“, Proc. SPIE 1009, 165 - 171, 1988

[Mattsson, 1994]

L. Mattsson, J. Ingers, J. M. Bennett, „Wavelength dependence of angle-resolved scattering in the extreme-ultraviolet-visible region“, Appl. Opt. 33, Nr. 16, 3523 - 3532, 1994

[McKnight, 2001]

Mary E. McKnight, Theodore V. Vorburger, Egon Marx, Maria E. Nadal, P. Yvonne Barnes, Michael A. Galler, „Measurements and predictions of light scattering by clear coatings“, Appl. Opt., Vol. 40, Nr. 13, 2159 - 2168, 2001

[Nefedov, 1997]

Anatoli P. Nefedov, Oleg F. Petrov, Olga S. Vaulina, „Analysis of particle sizes, concentration, and refractive index in measurement of light transmittance in the forward-scattering-angle range“, Appl. Opt., Vol. 36, Nr. 6, 1357 - 1366, 1997

[Neubert, 1994]

Jakob Neubert, Thomas Seifert, Norbert Czarnetzki, Thomas Weigel, „Fully automated angle resolved scatterometer“, Proc. SPIE 2210, 543 - 553, 1994

[Newell, 1997]

Michael P. Newell, Ritva A. M. Keski-Kuha, „Extreme ultraviolet scatterometer: design and capability“, Appl. Opt., Vol. 36, Nr. 13, 2897 - 2904, 1997

[Oertmann, 1983]

F.-W. Oertmann, "Zur Optimierung des Polierprozesses optischer Gläser", *Optica Acta*, Vol. 30, Nr. 2, 243 - 251, 1983

[Palik, 1985]

Edward D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press, Inc., Orlando, Florida, 1985

[PerkinElmer, 1993]

PerkinElmer Instruments GmbH, "Lambda 19DM - Gerätehandbuch", 1993

[Pichlmaier, 1997]

Stephan Pichlmaier, "Optimierung der Meßstrategie zur streulichtspektroskopischen Mikrostrukturanalyse von Schichten durch theoretische Modellierung", Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Physikalisch-Astronomisch-Technikwissenschaftliche Fakultät, 1997

[Reng, 1996]

Norbert Reng, persönliche Mitteilung, 1996

[Ristau, 2002]

Detlev Ristau, persönliche Mitteilung, 2002

[Rönnow, 1993]

Daniel Rönnow, "Sources of error in spectroscopic, low level integrated light scattering measurements", *Proc. SPIE* 1995, 143 - 151, 1993

[Rönnow, 1994]

Daniel Rönnow, Eugen Veszelei, "Design review of an instrument for spectroscopic total integrated light scattering measurements in the visible wavelength region", *Rev. Sci. Instrum.* 65, Nr. 2, 327 - 334, 1994

[Rönnow, 1995]

Daniel Rönnow, Arne Roos, "Correction factors for reflectance and transmittance measurements of scattering samples in focusing Coblentz spheres and integrating spheres", *Rev. Sci. Instrum.* 66, Nr. 3, 2411 - 2422, 1995

[Rönnow, 1996]

Daniel Rönnow, "Elastic Light Scattering by Thin Films - Spectroscopic Measurements and Analysis", Dissertation, Uppsala University, 1996

[Roos, 1988 a]

Arne Roos, Carl G. Ribbing, Mikael Bergkvist, "Anomalies in integrating sphere measurements on structured samples", *Appl. Opt.* 27, Nr. 18, 3828 - 3832, 1988

[Roos, 1988 b]

Arne Roos, Carl G. Ribbing, Mikael Bergkvist, "Interface scattering of light from oxidized copper surfaces", *Proc. SPIE* 1009, 182 - 188, 1988

[Roos, 1988 c]

A. Roos, M. Bergkvist, C.-G. Ribbing, J. M. Bennett, "Quantitative interface roughness studies of

copper oxide on copper", *Thin Solid Films* 164, 5 - 11, 1988

[Rothe, 1994]

Hendrik Rothe, Peter Riedel, „Defekt-Klassifizierungs-Gerät“, Patent DE 43 21 042 C 1, 1994

[Ruppe, 1994]

Carsten Ruppe, „Untersuchungen zur Mikrostruktur optischer Schichten mittels Rasterkraftmikroskopie“, Diplomarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Physikalisch-Astronomisch-Technikwissenschaftliche Fakultät, 1994

[Saito, 2001]

T. Saito, J. Saito, E. Nakamura, T. Kudo, M. Kagaya, T. Takahashi, "Measurement of Total Integrated Scatter of Optical Coatings for 157nm Lithography," *Proc. SPIE*, Vol. 4449, 22 - 29, 2001

[Saleh, 1991]

Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, *Fundamentals of photonics*, John Wiley & Sons, Inc., 1991

[Schiff, 1997]

T. F. Schiff, M. L. Bernt, "System for measuring the total integrated scatter of a surface", United States Patent US 5661556, 1997

[Schmitt, 1988 a]

Dirk-Roger Schmitt, "Characterization of mirror surfaces for laser-gyro applications", *Proc. SPIE*, Vol. 1009, 155 - 164, 1988

[Schmitt, 1988 b]

Dirk-Roger Schmitt, "Laser-gyro mirrors of differing layer structure", *Proc. SPIE*, Vol. 1019, 162 - 172, 1988

[Schmitt, 1989]

Dirk-Roger Schmitt, "High reflectance low scatter laser mirrors", *Proc. SPIE*, Vol. 1125, 94 - 106, 1989

[Schmitt, 1991]

Dirk-Roger Schmitt, "Characterization of high-quality surfaces by Nomarski microscopy and light scattering", *Prec. Eng.*, Vol. 31, Nr. 4, 263 - 269, 1991
Proc. SPIE, Vol. 1009, 155 - 164, 1988

[Schott, 1999]

Schott, "Optisches Glasfilter", Katalog, 1999

[Schott, 2000]

Schott, "Optisches Glas", Katalog, 2000

[R. Schuhmann, 1996]

R. Schuhmann, persönliche Mitteilung, 1996

[U. Schuhmann, 1997]

Uwe Schuhmann, persönliche Mitteilung, 1997

[U. Schuhmann, 2001]

Uwe Schuhmann, persönliche Mitteilung, 2001

[Siegel, 2000]

Die Deutsche Agenda Optische Technologien für das 21. Jahrhundert, A. Siegel und G. Litfin (Herausgeber), ISBN 3-00-006083-9, Düsseldorf, Mai 2000

[Spindler & Hoyer, 1990]

Spindler & Hoyer, *Precision Optics*, 1990

[Stover, 1995]

John C. Stover, *Optical scattering: measurement and analysis*, 2. edition, SPIE - The International Society for Optical Engineering, Bellingham, 1995

[Thurn, 1983]

G. Thurn, Th. Gast, "Optische Oberflächenprüfung mit Streulicht", *Feinwerktechnik & Messtechnik*, Vol. 91, Nr. 1, 15 - 18, 1983

[Truckenbrodt, 1992]

H. Truckenbrodt, A. Duparré, U. Schuhmann, "Roughness and defect characterization of optical surfaces by light scattering measurements", *Proc. SPIE 1781*, 139 - 151, 1992

[Truckenbrodt, 1997]

Horst Truckenbrodt, Thomas Schroeter, Thomas Weigel, „Lichtmeßanordnung zur Detektion von Oberflächendefekten, Patent DE 41 34 747 C 2, 1997

[Truckenbrodt, 1998]

H. Truckenbrodt, R. Jahn, „Oberflächenprüfung mit STRESO“, Datenblatt der Technische Universität Ilmenau, 1998

[Wang, 1994]

Haiming Wang, "Measurement of optical waveguide scattering loss: an improved method by the use of a Coblentz mirror", *Appl. Opt.*, Vol. 33, Nr. 9, 1707 - 1714, 1994

[Weigel, 1991]

Thomas Weigel, "Konzeption, Aufbau und Steuerung eines zweidimensionalen Scatterometers", Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Technikwissenschaftliche Fakultät, 1991

[Weigel, 1995]

Thomas Weigel, Jakob Neubert, Albrecht Hertzsch, Bernd Harnisch, Martin Weiß, Uwe Schulz, „Streulichtmeßanordnung zur Untersuchung der Oberflächenrauheit“, Patent DE 41 05 509 C 2, 1995

[Wuttig, 1999]

Andreas Wuttig, „Experimentelle Untersuchung von Subsurface-Damage-Effekten in Glassubstraten“, Diplomarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Physikalisch-Astronomisch-Technikwissenschaftliche Fakultät, 1999

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meiner Arbeitsgruppenleiterin Frau Dr. Duparré. Sie unterstützte mich kontinuierlich bei der Konzeption und Durchführung dieser Arbeit und stand mir jederzeit für viele hilfreiche Diskussionen und Anregungen zur Verfügung. Darüber hinaus möchte ich mich dafür bei ihr bedanken, dass meine Projektmitarbeit am Fraunhofer IOF immer nah am meinem Promotionsthema ausgerichtet war.

Meinem betreuenden Hochschullehrer, Herrn Prof. Truckenbrodt, möchte ich herzlich für die stete Begleitung meiner Arbeit danken. Er stand mir jederzeit für Diskussionen zur Verfügung und gab mir zahlreiche wertvolle Anregungen.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. Hehl für die vielen anregenden Diskussionen zur Auswertung und Interpretation von Streulichtmessungen bedanken.

Ich möchte mich herzlich bei den Mitarbeitern des Fraunhofer Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik unter Leitung von Herrn Prof. Karthe, insbesondere bei denen der Abteilung Optische Systeme unter Leitung von Herrn Dr. Notni, bedanken. Sie ermöglichten mir ein angenehmes Arbeitsumfeld und standen mir mit Rat und Tat zur Seite. Besonders hervorheben möchte ich hierbei Stefan Jakobs, Jörg Steinert und Marcel Flemming für die schnelle und zuverlässige Durchführung von AFM-Messungen und die anschließenden Diskussionen sowie den beiden letztgenannten für die Unterstützung bei der Weiterentwicklung der Streulichtmesstechnik und die Hilfe bei der Durchführung von Messungen. Hein Uhlig und Jörg Heber danke ich für die vielen Diskussion zum Thema Schichtherstellung und -charakterisierung. Bei Hanno Heiße möchte ich mich für die exzellente Reinigung von Substraten und Schichten bedanken.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung danke ich für die im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 196 "Physik und Chemie optischer Schichten" bzw. des Projektes EUREKA-EUROLASER CHOCLAB gewährte finanzielle Unterstützung.

Kathrin Mäusezahl und Nils Benkert danke ich für die gründliche Suche nach Schreibfehlern.

Ganz herzlich danke ich meiner Frau Susanne, meinen Eltern und Schwiegereltern für die wichtige familiäre Unterstützung, ihr Verständnis und ihre Geduld.

Thesen zur Dissertation

“Entwicklung und Anwendung einer Messanordnung zur Bestimmung des totalen Streulichts von optischen und technisch rauhen Oberflächen und Schichten“

vorgelegt von Stefan Glied

- (1) Das vorgestellte System zur Messung der totalen Lichtstreuung (TS) nimmt mit dem verfügbaren Wellenlängenspektrum von 157 nm bis 10,6 μm eine international herausragende Stellung ein.
- (2) Mit dem Messsystem lassen sich Substrate und Beschichtungen für Optiken im UV- bis IR-Wellenlängenbereich mit Oberflächenrauheiten bis in den Subnanometerbereich sowie technisch raue Oberflächen bis zu Rauheiten von 2 μm vermessen.
- (3) Die entwickelte Drehung und Arretierung der Coblenzkugel ermöglicht es erstmals, die zuvor justierten Einstellungen zur Messung der totalen Vorwärts- bzw. Rückwärtsstreuung präzise, schnell und unabhängig von Positionierfehlern des Drehsystems unter Beibehaltung der Einstrahlbedingungen an der Probenposition wiederzufinden.
- (4) Eindimensionale TS-Diagramme (Linienscans über die Probenfläche) eignen sich besser zum Vergleich von TS-Werten verschiedener Proben als zweidimensionale Diagramme (Flächenscans).
- (5) Die Durchführung eines Linienscans mit 101 Messpunkten kann in 10 s erfolgen.
- (6) Die Ergebnisse der TS-Messung sind gut mit denen anderer TS-Messanordnungen vergleichbar.
- (7) Die Messergebnisse lassen sich unter Berücksichtigung der jeweiligen Bandweitenbegrenzungen gut mit denen winkelaufgelöster Streulichtmessungen sowie profilgebender Messverfahren vergleichen.
- (8) Das bei der Messwellenlänge von 632,8 nm erreichte Untergrundsignal von $5 \cdot 10^{-8}$ ermöglicht die Erfassung der totalen Rückwärtsstreuung von superpolierten Si-Wafern mit RMS-Rauheiten $< 0,1 \text{ nm}$.
- (9) Mit orts aufgelösten Flächenscans lassen sich lokale Defekte bzw. Kontaminationen und Kratzer an konventionell polierten Glasoberflächen detektieren.
- (10) Die totale Streulichtmessung eignet sich zum Nachweis von Reinigungseffekten an beschichteten Oberflächen.
- (11) Das Messsystem erlaubt die Bewertung von Politurzuständen von CaF_2 -Oberflächen für die VUV-Lithografie hinsichtlich der erreichten Oberflächenhomogenitäten und -rauheiten.