Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).



## D I P L O M A R B E I T

### Anwendung von Standard-Scannertechnologie zur spektroskopischen Charakterisierung von metallischen und dielektrischen dünnen Schichten

Ausgeführt am Institut für Festkörperphysik, E138 der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christoph Eisenmenger-Sittner

> durch Daniela Feiertag Prof. Kasererweg 340 3491 Straß im Staßertal

Wien, Oktober 2011

## Kurzfassung

In vielen technischen Prozessen spielen Schichten mit Dicken im Nanometer-Bereich (0,5-100 nm) auf granularen Materialien eine wichtige Rolle bei der Modifikation der physikalischen Eigenschaften der Materialien. Ziel dieser Arbeit bzw. dieses Projektes ist die optische Schichtdickenbestimmung transparenter Schichten auf transparentem Granulat.

Für die optische Schichtdickenbestimmung ist es notwendig, die optischen Konstanten (reeller Brechungsindex n, Extinktionskoeffizient  $\kappa$ ) des betreffenden Materials zu kennen. Aus diesem Grund wurde eine Methode zur Bestimmung dieser materialabhängigen Größen entwickelt, um diese auch für weniger bekannte Materialen schnell und einfach ermitteln zu können. Diese Methode beinhaltet die Herstellung dünner Schichten mit linearem Schichtdickengradienten auf Glassubstraten und die anschließende Messung der Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke.

Bei der Bestimmung der Schichtdicken von dünnen Schichten auf transparenten Granulaten (z.B. Diamant) wird versucht für eine statistisch signifikante Anzahl von Granulatteilchen die Transmission zu messen. Aus dem durch Bildbearbeitung und Mustererkennung erhaltenen Histogramm der Transmissionswerte wird versucht auf die mittlere Schichtdicke der Beschichtung auf den Diamanten zurückzuschließen.

### Abstract

In many technological processes thin films in the nanometer range (0,5-100 nm) on granular substrates are used to modify the physical properties of the materials. The aim of this work and this project is the development of a fast, cost effective method to determine the film thickness of thin transparent films on transparent granulates.

To determine the thickness of a transparent thin film by means of optical measurements, it is necessary to know the optical constants (real refraction index n, extinction coefficient  $\kappa$ ) of the material. For this reason a method for the determination of these constants, especially for less common materials, was developed. This method is based on the deposition of thin films with a linear gradient in their thickness and the following determination of the transmission as a function of the film thickness.

For the determination of the film thickness of thin films on transparent granulates (e.g. diamond), the transmission of a statistically significant ensemble of particles is measured. By means of the measured histogram of transmission the film thickness of the thin film on the granulate shall be determined.

## Danksagung

An erster Stelle möchte mich bei Herrn Prof. Dr. Christoph Eisenmenger-Sittner für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit bedanken. Abgesehen von guten Ratschlägen bezüglich dieser Arbeit und der stetigen Motivation, schafft er es immer eine angenehme Atmosphäre in seiner Arbeitsgruppe zu fördern. Für das familiäre Klima und die Unterstützung möchte ich mich generell bei der gesamten Arbeitsgruppe bedanken.

Ich danke dem "Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung", FWF, für die finanzielle Unterstützung meiner Diplomarbeit im Rahmen des Projektes "Optische Dickenbestimmung auf transparenten Granulaten" (TRP 6-N20).

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Eltern, die mir mein Studiums ermöglicht haben. Abgesehen von der finanziellen Unterstützung haben sie mir auch immer wieder Mut zugesprochen und mich dadurch aufs Neue motiviert.

Schlussendlich danke ich noch meinem Verlobten Gerhard Kitzler, der mir während meiner gesamten Studienzeit viel Kraft gegeben hat, und mich des Weiteren auch bei mathematischen Belangen immer wieder unterstützt hat.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung		
	1.1	Motivation	1
	1.2	Projektbeschreibung und Zielsetzung	2
<b>2</b>	The	eorie	4
	2.1	Herstellung dünner Schichten	4
	2.2	Bestimmung der Schichtdicke dünner Schichten	8
	2.3	Optische Eigenschaften dünner Schichten	10
3	Exp	perimenteller Aufbau	<b>21</b>
	3.1	Herstellung der Proben mit linearem Schichtdickengradienten	21
	3.2	Transmissionsmessungen bei Proben mit linearem Schichtdickengradi-	
		enten	22
	3.3	Herstellung der Diamantproben	25
	3.4	Transmissionsmessungen bei Diamantproben	27
	3.5	Bearbeitung der eingescannten Bilder der Diamantproben	29
4	Simulationen zur Intensitätsverteilung der Transmission bei granu-		
	larem Substrat		33
	4.1	Grundlegende Annahmen und Parameter der Simulation	34
	4.2	Simulation für Metalle	35
	4.3	Simulation für Dielektrika	37

#### INHALTSVERZEICHNIS

	4.4	Simulation für metall-dotierte Dielektrika	40
<b>5</b>	Mes	ssungen und Ergebnisse	43
	5.1	Messung des Spektrums der Lampe des Durchlichtscanners $\ . \ . \ .$ .	43
	5.2	Probenübersicht	44
	5.3	Transmissionsmessungen mittels Durchlichtscanner	45
	5.4	Transmissionsmessungen mittels Spektrometer	66
	5.5	Vergleich der Transmissionsmessungen mittels Scanner und Spektrometer	89
	5.6	Transmissionsmessungen bei Diamantgranulat	90
6	$\mathbf{Zus}$	ammenfassung, Diskussion und Ausblick 1	.07
	6.1	Diskussion der Transmissionsmessungen mittels Durchlichtscanner	107
	6.2	Diskussion der Transmissionsmessungen mittels Spektrometer	109
	6.3	Diskussion der Transmissionsmessungen bei Diamantproben	111
$\mathbf{Li}$	terat	cur 1	12
$\mathbf{A}$	nhan	g 1	115

## 1 Einleitung

### 1.1 Motivation

Bei vielen technologischen Prozessen sind dünne Schichten mit einer Schichtdicke im Nanometer-Bereich (0,5-100 nm) von großer Bedeutung. Neben Schichten auf ebenen oder nahezu ebenen Substraten gibt es auch immer mehr Problemstellungen, bei denen Schichten auf Granulaten (z.B. kleinen Diamanten oder Glaskugeln) oder komplexer geformten Körpern nötig sind, um die Oberflächeneigenschaften in der gewünschten Art und Weise zu modifizieren.

Abgesehen von dünnen Schichten auf Oberflächen kommen auch Zwischenschichten zwischen unterschiedlichen Bestandteilen von Werkstoffen zum Einsatz. Die Anwendungen reichen von Bereichen der Pulvermetallurgie und der Pulververarbeitung [1– 3], bis hin zu Modifikationen der thermischen und mechanischen Eigenschaften von Kompositwerkstoffen [4–6]. Von großem Interesse sind zum Beispiel Kupfer-Diamant-Komposite, welche sich aufgrund ihrer hohen thermischen Leitfähigkeit (600 W/mK oder höher) und ihrer geringen thermischen Ausdehnung gut zur Wärmeabfuhr eignen. Problematisch an den Kupfer-Diamant-Kompositen ist die Grenzfläche zwischen den einzelnen Komponenten, an der keinerlei Diffusion oder Reaktion stattfindet [7]. Dies führt zu einer schlechten mechanischen Verbindung und einem thermischen Kontaktwiderstand an der Grenzfläche. Eine Zwischenschicht kann die Wärmeleitung zwischen den beiden Bestandteilen des Kompositwerkstoffes wesentlich verbessern, falls diese eine passende Schichtdicke aufweist. Die Zwischenschicht muss dick genug sein, um die Oberflächeneigenschaften entsprechend zu verändern, aber dünn genug, um sich nicht als Verunreinigung im Komposit auszuwirken.

Die Schichtdicken der benötigten Zwischenschichten liegen im Nanometer-Bereich, wo auch metallische Schichten noch optisch transparent sind. Falls sich die Schichten auf transparenten Substraten befinden, lässt sich deren Dicke durch optische Methoden bestimmen.

### 1.2 Projektbeschreibung und Zielsetzung

In Zuge des FWF-Projektes "Optische Dickenbestimmung auf transparenten Granulaten" (TRP 6-N20) werden Proben untersucht, bei denen sowohl das Substrat (z.B. Diamanten) als auch die Beschichtung transparent im Bereich des sichtbaren Lichtes sind, sodass die transmittierte elektromagnetische Strahlung zur Schichtdickenbestimmung verwendet werden kann. Für metallische Schichten kann die Schichtdicke bei bekanntem Absorptionskoeffizienten aus der Absorption der elektromagnetischen Strahlung beim Durchgang durch die Schicht bestimmt werden.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer schnellen und kostengünstigen Methode zur Bestimmung der Schichtdicke von transparenten Schichten auf granularen Substraten mit einem Durchmesser von ungefähr 50-300  $\mu$ m. Mithilfe von Bildverarbeitung und Mustererkennung soll eine statistisch signifikante Anzahl an transparenten Bereichen der Granulatteilchen ermittelt werden und hinsichtlich ihrer Transmission vermessen werden.

Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, ob man mittels einfacher, kommerziell erhältlicher Scannertechnologie und Elektronik eine wissenschaftlich fundierte, wellenlängensensitive Schichtdickenanalyse durchführen kann.

Eine Aufgabe war es, eine Methode für die Herstellung von Proben zur Kalibrie-

rung zu entwickeln, um eine schnelle Abschätzung von Extinktionskoeffizienten zu ermöglichen. Bei diesen Proben handelt es sich um dünne, transparente Schichten mit wohldefinierten Schichtdickengradienten auf Glassubstraten. Zu Beginn sollen reine Metallschichten (Cu, Ag, Au, Mo, Al) hergestellt werden, um deren Extinktionskoeffizienten mit Literaturwerten zu vergleichen. Weiters sollen dielektrische Schichten und metall-dotierte dielektrische Schichten mit linear wachsender Schichtdicke erstellt werden, die zur Untersuchung der Abhängigkeit der Transmission von der Schichtdicke dienen sollen.

Die hergestellten Proben werden sowohl mithilfe eines Durchlichtscanners der Firma Nikon (Super Coolscan 9000 ED), als auch mithilfe eines UV/VIS/IR - Spektrometers von Ocean Optics (Spektrometer: HR4000, Lichtquelle: DT-MINI-2-GS) hinsichtlich ihrer Transmission vermessen. Dadurch soll die Genauigkeit der Messergebnisse des Durchlichtscanners mit jener des Spektrometers verglichen werden. Im Falle einer hinreichend hohen Genauigkeit des Durchlichtscanners kann die Verwendung dessen für das Messen der Transmission bei Granulaten gerechtfertigt werden.

In Laufe der Diplomarbeit sollen weiters auch erste Versuche zur Schichtdickenbestimmung mit granularem Substrat (Diamanten) durchgeführt werden.

## 2 Theorie

### 2.1 Herstellung dünner Schichten

Im Zuge dieser Arbeit wurden zwei verschiedene physikalische Verfahren zur Beschichtung von Glasplättchen bzw. von Diamantgranulat verwendet, die in den folgenden zwei Abschnitten kurz beschrieben werden. Auf der einen Seite wurden Schichten durch Bedampfen und auf der anderen Seite durch Kathodenzerstäubung hergestellt.

#### 2.1.1 Bedampfungsprozess

Beim Bedampfungsprozess wird das Verdampfungsgut im Vakuum in ein geeignetes hochschmelzendes Gefäß (z.B. Wolfram-Schiffchen) gelegt, das als Heizwiderstand dient. Durch Energiezufuhr wird das Aufdampfmaterial auf eine ausreichend hohe Temperatur gebracht, sodass die thermische Energie der Atome oder Moleküle ausreicht, um die Oberfläche zu verlassen. Die Atome oder Moleküle bewegen sich durch die Vakuumkammer von der Verdampfungsquelle zum gegenüberliegenden Substrat oder zu den Wänden der Vakuumkammer und kondensieren dort.



Abbildung 2.1: Schematische Darstellung einer Aufdampfanlage [8].

Der Verdampfungsprozess findet im Hochvakuum statt (üblicher Druck  $p < 10^{-5}$  mbar). Damit wird einerseits die geradlinige Ausbreitung der Beschichtungsteilchen und andererseits auch die Reinheit der Schicht gewährleistet.

Für das gleichzeitige Aufdampfen von unterschiedlichen Materialien zur Erzeugung von Schichten mit verschiedenen Komponenten, können mehrere Quellen in der Vakuumkammer verwendet werden ([9]).

#### 2.1.2 Kathodenzerstäubung (Sputtern)

Sputtern ist ein Hochvakuumprozess bei dem das Beschichtungsmaterial (Target) durch Impulsübertrag, welcher durch den Beschuss der Targetoberfläche mit energetischen Teilchen realisiert wird, aus dem Target gelöst wird.

Beim Sputtern befindet sich das Target, bestehend aus dem gewünschten Beschichtungsmaterial, und das Substrat in einer Hochvakuumkammer. Zusätzlich wird ein Arbeitsgas (z.B. Argon) bis zu einem bestimmten Druck eingelassen. Dieses wird durch eine anomale Glimmentladung zwischen Target (Kathode) und dem Substrat (Anode) ionisiert.



Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des Sputterprozesses [9].

Bei Magnetron-Sputtersystemen bewegen sich die freien Elektronen des Plasmas aufgrund eines Magnetsystems (z.B. planares Magnetron) hinter dem Target auf Spiralbahnen vor der Targetoberfläche. Der Weg der Elektronen verlängert sich und die Anzahl der Stöße erhöht sich. Die schwereren Ionen des Plasmas werden im Gegensatz zu den Elektronen vom Magnetfeld kaum beeinflusst und werden im elektrischen Feld zur Kathode (Target) hin beschleunigt. Treffen sie mit ausreichend Energie auf die Targetoberfläche, so kommt es unter anderem zur Emission von Atomen, Atomclustern oder Molekülen des Targetmaterials, welche sich am Substrat und an den Wänden der Vakuumkammer absetzen.

Ein Vorteil des Sputterprozesses im Vergleich zu anderen Beschichtungsverfahren ist seine vielfältige Anwendbarkeit. Da das Material nicht thermisch, sondern durch Impulsübertrag in die Gasphase übergeführt wird, gibt es kaum Einschränkungen bei der Wahl des Targetmaterials.

#### 2.1.3 Reaktives Sputtern

Beim reaktiven Sputtern wird zusätzlich zum herkömmlichen Arbeitsgas (z.B. Argon) noch ein reaktives Gas (z.B.  $O_2$ ,  $N_2$ ) in die Vakuumkammer eingelassen. Dadurch ist es möglich Verbindungen zwischen den gesputterten Atomen und den reaktiven Gasmolekülen zu erzeugen (z.B. Oxide, Nitride).

Im Gegensatz zum normalen Sputterprozess, der relativ einfach zu kontrollieren ist, ist das reaktive Sputtern weit komplizierter, da der aktuelle Zustand des Targets vom reaktiven Gas beeinflusst wird. Der Fluss des reaktiven Gases hat großen Einfluss auf den Sputterprozess, unter anderem auf die Sputterrate und die Zusammensetzung der Schicht. Abbildung 2.3 zeigt für den reaktiven Sputterprozess typische Zusammenhänge zwischen dem Gasfluss des reaktiven Gases, dem Druck in der Vakuumkammer und der Sputterrate. Die abgebildeten Kurven weisen Hysteresen auf, welche durch unterschiedliche Targetzustände begründet werden können.



Abbildung 2.3: Typische experimentelle Kurven eines reaktiven Sputterprozesses [10].

Als Beispiel wird das reaktive Sputtern von Aluminium unter Verwendung von  $O_2$  als reaktives Gas beschrieben. Beginnt man ohne reaktiven Gasfluss und erhöht diesen langsam, so ändert sich bis zum Punkt A (siehe Abb. 2.3) weder der Druck noch die Sputterrate wesentlich. Dieser Zustand wird "metallic mode" genannt. Der gesamte Sauerstoff wird von Aluminium gebunden, die Verbindungen am Target werden sofort vom Target entfernt und die Targetoberfläche bleibt metallisch.

Ab dem Punkt A ist der Sauerstofffluss zu hoch, sodass nicht mehr alle Sauerstoff-

atome von Aluminium gebunden werden und der Sauerstoff-Partialdruck steigt stark an. Es bildet sich Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sowohl an den Wänden der Vakuumkammer als auch auf der gesamten Targetoberfläche, weshalb die Sputterrate abnimmt. Dieser Zustand wird "poisoned mode" genannt.

Wird der Sauerstofffluss wieder reduziert, so bleibt das Target aufgrund der geringeren Sputterrate des Aluminiumoxides im Vergleich zum metallischen Aluminium länger im "poisoned mode" [10].

### 2.2 Bestimmung der Schichtdicke dünner Schichten

Da die Bestimmung von Schichtdicken in dieser Arbeit eine große Rolle spielt, werden die verwendeten Methoden zur Bestimmung von Schichtdicken dünner Schichten kurz erläutert.

### 2.2.1 Messung der Schichtdicke durch mechanisches Abtasten (Stylus-Methode)

Stylus-Instrumente werden oft zur Bestimmung der Schichtrauhigkeit verwendet. Deckt man allerdings während der Beschichtung einen Teil des Substrats ab, und erzeugt so eine Stufe zwischen Schicht und Substrat, wie in Abbildung 2.4 zu sehen, so kann man Stylus-Instrumente auch zur Messung der Schichtdicke verwenden [11].



Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Stylus-Methode zur Schichtdickenmessung. Während sich eine harte Spitze mit konstanter Geschwindigkeit zuerst über den beschichteten und danach über den unbeschichteten Teil der Probenoberfläche bewegt, werden die vertikalen Auslenkungen der Spitze mithilfe eines induktiven Wegaufnehmers in elektronische Signale umgewandelt und als Schichtdickenwerte ausgegeben. Nachteile dieser Methode im Vergleich zu berührungslosen Verfahren sind eventuelle Verformungen oder Beschädigungen der Probe, vor allem bei weicheren oder schlecht haftenden Materialen.

#### 2.2.2 Schwingquarz-Methode

Die Schwingquarz-Methode ist ein mechanisch zerstörungsfreies Verfahren. Bei diesem Messverfahren wird die Massenzunahme eines dem Dampf ausgesetzten Quarzplättchens gemessen und mithilfe der Dichte des Materials auf die tatsächliche Schichtdicke am Substrat kalibriert. Die Methode beruht auf der Verschiebung der Resonanzfrequenz eines Schwingquarzes, welche direkt proportional zu dessen Dicke und der Dichte des Materials ist. Während des Beschichtungsprozesses verändert sich die Resonanzfrequenz aufgrund der wachsenden Schichtdicke [9].

Ein Vorteil dieser Technik besteht darin, dass In-Situ-Messungen der Schichtdicke und der Beschichtungsrate während der Beschichtung möglich sind.

#### 2.2.3 Photometrische Schichtdickenbestimmung

Bei photometrischen Schichtdickenbestimmungen wird ein Lichtstrahl wohldefinierter Wellenlänge  $\lambda$  auf die zu vermessende Schicht gerichtet. Dabei wird die Intensität des an den Grenzflächen reflektierten Lichtes und/oder die Intensität des hindurchgehenden Lichtes in Bezug auf die einfallende Intensität gemessen. Daraus ergeben sich der Reflexionsgrad R (kurz: Reflexion) bzw. der Transmissionsgrad T (kurz: Transmission). Die Schichtdicke d lässt sich dann aus R bzw. T bei bekannten optischen Konstanten n und  $\kappa$  berechnen, wobei n der reelle Brechungsindex ist und  $\kappa$  den Extinktionskoeffizienten bezeichnet. Die Abhängigkeit der Reflexion bzw. der Transmission von der Schichtdicke wird von der Art des Materials beeinflusst. Metalle, Dielektrika und metall-dotierte Dielektrika zeigen sehr unterschiedliche Transmissionsverhalten, auf welche in Abschnitt 2.3.5 noch genauer eingegangen wird.

Neben den hier beschriebenen Methoden zur Schichtdickenbestimmung gibt es noch viele weitere Verfahren, wie unter anderem Wägungen, unterschiedliche Interferometer und Messungen mittels elektrischer oder magnetischer Größen (siehe [11]).

### 2.3 Optische Eigenschaften dünner Schichten

In diesem Abschnitt werden die optischen Eigenschaften dünner Schichten, die für diese Arbeit relevant sind, kurz zusammengefasst. Es werden einige Begriffe definiert und Ableitungen skizziert, die in [12] und [13] genauer nachzulesen sind.

Symbol	Physikalische Größe
E	Elektrische Feldstärke
D	Dielektrische Verschiebung
Н	Magnetische Feldstärke
В	Magnetische Induktion
ρ	Ladungsdichte
j	Stromdichte
$\epsilon$	Permittivität
μ	Magnetische Permeabilität
σ	Elektrische Leitfähigkeit
С	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
$\epsilon_0$	Permittivität des Vakuums
$\mu_o$	Magnetische Permeabilität des Vakuums

#### 2.3.1 Maxwellgleichungen

Die Maxwell-Gleichungen sind die Basis der theoretischen Grundlagen für die gesamte klassische Elektrodynamik, und somit auch für die klassische Optik. Im SI-System lauten die Maxwellgleichungen:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$
  

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$
  

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$
  

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$
  
(2.1)

In isotropen Medien gelten außerdem folgende Materialgleichungen:

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\epsilon} \cdot \mathbf{E}$$
$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{H}$$
$$\mathbf{j} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{E}$$
(2.2)

Für anisotrope Medien werden die Gleichungen komplizierter, da  $\epsilon$ ,  $\mu$  und  $\sigma$  keine Skalare mehr sind, sondern Tensoren.

#### 2.3.2 Brechungsindex

Für  $\rho = 0$  erhält man aus den Gleichungen (2.1) und (2.2) folgende Gleichung für **E**:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \epsilon \mu \, \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu \sigma \, \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \tag{2.3}$$

Die einfachsten Lösungen dieser Gleichung sind linear polarisierte, ebene, harmonische Wellen. Die komplexe Schreibweise einer Welle, die sich mit der Geschwindigkeit v in x-Richtung ausbreitet, lautet

$$\mathbf{E} = \boldsymbol{\epsilon} \exp[i\omega(t - x/v)] \tag{2.4}$$

wobei nur der Realteil dieses Ausdruckes physikalisch relevant für das elektrische Feld **E** ist.  $\boldsymbol{\epsilon}$  bezeichnet die Amplitude und  $\boldsymbol{\omega}$  die Kreisfrequenz der Welle. Damit (2.4) eine

Lösung von Gleichung (2.3) darstellt, muss

$$\frac{\omega^2}{v^2} = \omega^2 \epsilon \mu - i\omega\mu\sigma \tag{2.5}$$

erfüllt sein, was sich umformen lässt zu

$$\frac{c^2}{v^2} = \frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0} - i\frac{\mu\sigma}{\omega\epsilon_0\mu_0}.$$
(2.6)

Der dimensionslose Parameter c/v wird als komplexer Brechungsindex N bezeichnet.

$$N^{2} = \frac{\epsilon \mu}{\epsilon_{0} \mu_{0}} - i \frac{\mu \sigma}{\omega \epsilon_{0} \mu_{0}}$$

$$N = c/v = n - i\kappa$$
(2.7)

Für ein ideales Dielektrikum ist der Extinktionskoeffizient  $\kappa$  Null und der Brechungsindex N reell.

Mithilfe des Brechungsindex N und dem Zusammenhang  $\lambda = 2\pi c/\omega$  kann man die Gleichung (2.4) nun folgendermaßen umschreiben:

$$\mathbf{E} = \boldsymbol{\epsilon} \ exp[i(\omega t - (2\pi N/\lambda)x)] = \boldsymbol{\epsilon} \ exp[-(2\pi\kappa/\lambda)x] \ exp[i(\omega t - (2\pi n/\lambda)x)].$$
(2.8)

An dieser Gleichung ist erkennbar, dass  $\kappa$  ein Maß für die Absorption im Medium darstellt. Für dieselbe Welle, aber eine beliebige Ausbreitungsrichtung gilt

$$\mathbf{E} = \boldsymbol{\epsilon} \, \exp[i(\omega t - (2\pi N/\lambda)(ux + vy + wz))], \tag{2.9}$$

wobei  $\hat{\mathbf{s}} = u\hat{\mathbf{x}} + v\hat{\mathbf{y}} + w\hat{\mathbf{z}}$  der Einheitsvektor in Ausbreitungsrichtung der Welle ist.

#### 2.3.3 Poyntingvektor, Intensität und Absorptionskoeffizient

Der Poyntingvektor  $\mathbf{S}$  gibt die Energiestromdichte des elektrischen Feldes an. Die pro Zeit durch die Flächeneinheit senkrecht zur Ausbreitungsrichtung transportierte Energie wird auch als Intensität I bezeichnet [14]. Der Poynting-Vektor ist gegeben durch

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H},\tag{2.10}$$

wobei der zeitliche Mittelwert von Interesse ist. Der Ausdruck (2.10) gilt für die Realteile der oberen Ansätze (2.8) für die ebenen Wellen. Für Wellen mit harmonischer Zeitabhängigkeit kann man folgenden Ausdruck für die komplexen Ansätze der Wellen ableiten [12]:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*). \tag{2.11}$$

Re(x) bezeichnet dabei den Realteil von x und  $x^*$  die zu x komplex konjugierte Zahl. Mit den Gleichungen (2.1) und (2.2) erhält man für ebene Wellen der Form (2.9)

$$\mathbf{H} = \Upsilon \left( \hat{\boldsymbol{s}} \times \mathbf{E} \right) \tag{2.12}$$

wobei  $\Upsilon = N \cdot \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0}\right)^{1/2}$  als optische Admittanz des Mediums bezeichnet wird. In dem betrachteten Fall stehen das **E**-Feld, das **H**-Feld und die Ausbreitungsrichtung  $\hat{\mathbf{s}}$  der Welle normal aufeinander. Gemeinsam mit den Gleichungen (2.9) und (2.11) erhält man daraus für die Intensität

$$I = \frac{1}{2} n \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0}\right)^{1/2} exp[-(4\pi\kappa/\lambda)(ux + vy + wz)].$$
(2.13)

In einer Entfernung von  $\lambda/(4\pi\kappa)$  ist die Intensität auf den 1/e-fachen Wert der Ausgangsintensität gefallen. Der inverse Wert dieser Distanz wird als Absorptionskoeffizient  $\alpha$  bezeichnet.

$$\alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda} \tag{2.14}$$

#### 2.3.4 Reflexion und Transmission dünner Schichten

An der Grenzfläche zwischen zwei Medien wird die einfallende elektromagnetische Welle in zwei Teile aufgespalten, die reflektierte und die transmittierte Welle. Alle drei Strahlen befinden sich in einer Ebene, der Einfallsebene.



Abbildung 2.5: Aufspaltung der einfallenden Welle an der Grenzfläche zwischen zwei Medien.

Die Reflexion R wird definiert als das Verhältnis zwischen reflektierter Intensität  $I_r$ und einfallender Intensität  $I_e$ . Die Transmission T ist durch das Verhältnis aus transmittierter Intensität  $I_t$  und einfallender Intensität bestimmt [14].

$$R = \frac{I_r}{I_e} \qquad T = \frac{I_t \cdot \cos\vartheta_t}{I_e \cdot \cos\vartheta_e} \tag{2.15}$$

Der Grund für die Cosinus-Faktoren in der Definition von T ist die Berücksichtigung der unterschiedlichen Querschnittsflächen der Strahlen an der Grenzfläche aufgrund der unterschiedlichen Winkel  $\theta_e$  und  $\theta_t$  [14]. Diese Faktoren treten auch in der Definition von R auf, fallen allerdings aufgrund der Gleichheit von Einfallswinkel  $\theta_e$  und Reflexionswinkel  $\theta_r$  weg. Bei Vernachlässigung der Cosinus-Faktoren wäre die Energieerhaltung, also das Gesetz R + T = 1 verletzt [12].

Im Zuge dieser Arbeit wurden ausschließlich Messungen durchgeführt, bei denen der einfallende Strahl normal auf die Grenzfläche auftrifft. Aus diesem Grund werden die folgenden Zusammenhänge nur für normalen Einfallswinkel, das bedeutet  $\vartheta_e = 0$ , angegeben. Bei beliebigem Einfallswinkel werden die Zusammenhänge etwas komplizierter und man betrachtet s- und p-polarisierte Wellen (**E**-Feld normal zur Einfallsebene bzw. **E**-Feld in der Einfallsebene) separat.

Unter der Verwendung der Stetigkeit der zur Grenzfläche parallelen Komponenten des E-Feldes und des B-Feldes, erhält man unter der Voraussetzung, dass das Medium des einfallenden Strahls absorptionsfrei ist,

$$R = \left(\frac{\Upsilon_0 - \Upsilon_1}{\Upsilon_0 + \Upsilon_1}\right) \left(\frac{\Upsilon_0 - \Upsilon_1}{\Upsilon_0 + \Upsilon_1}\right)^*$$
(2.16)

$$T = \frac{4\Upsilon_0 \operatorname{Re}(\Upsilon_1)}{(\Upsilon_0 + \Upsilon_1)(\Upsilon_0 + \Upsilon_1)^*}$$
(2.17)

wobei  $\Upsilon_0$  und  $\Upsilon_1$  die optischen Admittanzen der beiden Medien sind [12].

Die Verallgemeinerung für eine Anordnung von q dünnen Schichten ergibt folgendes für die Reflexion und die Transmission.

$$R = \left(\frac{\Upsilon_0 B - C}{\Upsilon_0 B + C}\right) \left(\frac{\Upsilon_0 B - C}{\Upsilon_0 B + C}\right)^*$$
(2.18)

$$T = \frac{4\Upsilon_0 Re(\Upsilon_s)}{(\Upsilon_0 B + C)(\Upsilon_0 B + C)^*}$$
(2.19)

wobei  $\Upsilon_s$  die optische Admittanz des Substrates ist und sich die Koeffizienten *B* und *C* mit  $\delta_r = 2\pi N_r d_r / \lambda$  wie folgt berechnen [12]:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{r=1}^{q} \begin{bmatrix} \cos\delta_r & (i\sin\delta_r)/\Upsilon_r \\ i\Upsilon_r \sin\delta_r & \cos\delta_r \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \Upsilon_s \end{bmatrix}$$
(2.20)

#### 2.3.5 Berechnung der Transmission dünner Schichten

Mithilfe des in Abschnitt 2.3.4 beschriebenen Modells, speziell mithilfe von Gleichung (2.19), wurde die Transmission für die in Abbildung 2.6 dargestellte Anordnung berechnet.



Abbildung 2.6: Transmission und Reflexion an einer dünnen Schicht auf Glassubstrat.

Die einfallende elektromagnetische Welle trifft normal auf die erste Grenzschicht zwischen Luft und Probe. Das Ausgangsmedium Luft wird, wie es für die Ableitung der Gleichungen aus Abschnitt 2.3.4 gefordert wird, näherungsweise als absorptionsfrei angenommen (N=1). Ein Teil des Lichtes wird an dieser Grenzschicht reflektiert und ein Teil transmittiert. Im Fall einer absorbierenden dünnen Schicht wird ein Teil des transmittierten Lichtes absorbiert. An der zweiten Grenzfläche wird wiederum ein Teil des Lichtes reflektiert und ein Teil transmittiert. So kann es bei wenig oder nicht absorbierenden dünnen Schichten auch zu Mehrfachreflexionen innerhalb der Schicht kommen. Als Substrat wurde Glas verwendet, dessen Brechungsindex mit N=1,5 angenommen wurde.

Bei den folgenden Berechnungen wurde die in das Substrat transmittierte Intensität für verschiedene Materialien und jeweils unterschiedliche Wellenlängen in Abhängigkeit von der Schichtdicke berechnet.

#### Metalle

In Tabelle 2.1 sind die für die Berechnungen verwendeten optischen Konstanten für die Metalle Cu, Ag und Au zusammengefasst.

Material	Wellenlänge (nm)	n	$\kappa$
Cu	637	0,24	3,45
	521	1,11	2,60
	469	$1,\!15$	2,47
Ag	619	0,27	4,18
	551	$0,\!25$	3,50
	413	0,23	2,27
Au	637	0,12	3,32
	521	0,44	1,94
	469	$1,\!34$	1,60

Tabelle 2.1: Zusammenfassung der für die folgenden Transmissionsberechnungen verwendeten optischen Konstanten n und  $\kappa$  aus [15].

In Abbildung 2.7 sind die mithilfe von Gleichung (2.19) berechneten Transmissionen für verschiedene Metalle bei unterschiedlichen Schichtdicken dargestellt.



Abbildung 2.7: Berechnete Transmission in Abhängigkeit der Schichtdicke für (a) Cu,(b) Ag und (c) Au.

Bei allen drei Metallen ist eine exponentielle Abnahme der Transmission mit der Schichtdicke erkennbar. Der Unterschied der verschiedenen Materialien besteht darin, dass die einzelnen Wellenlängen abhängig vom Material unterschiedlich große Absorptionskoeffizienten haben. Für Silber zum Beispiel ist die Absorption für kurze Wellenlängen (blau) am geringsten. Bei Gold wird die Strahlung der Wellenlänge  $\lambda = 521$  nm im grünen Bereich am wenigsten absorbiert, aber auch blau wird deutlich schwächer absorbiert als rot. Für Kupfer ist die Transmission bei geringen Schichtdicken (bis 40 nm) für rot am stärksten, bei größere Schichtdicken für grün. Diese Unterschiede in den optischen Konstanten der verschiedenen Materialien sind in den eingescannten Bildern der hergestellten Proben erkennbar (Abbildungen 5.2, 5.5 und 5.8). Die Silberschicht sieht in Transmission bläulich aus, die Goldschicht wirkt grün-blau, und die Kupferschicht sieht rötlich aus.

#### Dielektrikum

Um für Dielektrika eine qualitative Aussage über die Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke zu erhalten, wurden beispielhaft Transmissionsberechnungen für Magnesiumfluorid durchgeführt. Die für die Berechnungen verwendeten optischen Konstanten sind in Tabelle 2.2 angegeben und die mithilfe von Gleichung (2.19) ermittelten Ergebnisse sind in Abbildung 2.8 dargestellt.

Material	Wellenlänge (nm)	n	$\kappa$
MgF <sub>2</sub>	637	1,38	0
	521	1,38	0
	469	1,38	0

Tabelle 2.2: Optische Konstanten n und  $\kappa$ , die für die Transmissionsberechnungen von MgF<sub>2</sub> verwendet wurden, aus [16].



Abbildung 2.8: Berechnete Transmission in Abhängigkeit der Schichtdicke für MgF<sub>2</sub>.

Magnesiumfluorid entspricht sehr gut einem idealen Dielektrikum ( $\kappa=0$ ). Für die un-

terschiedlichen Wellenlängen tritt keine kontinuierliche Abschwächung der Intensität auf, sondern ausschließlich Interferenzen. Der Abstand zwischen zwei Maxima der Transmission hängt vom Brechungsindex und von der Wellenlänge ab.

#### Metall-dotierte Dielektrika

Analog zu den Berechnungen für metallische und dielektrische Schichten, wurde mithilfe von Gleichung (2.19) die Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke für metall-dotierte dielektrische Schichten (MgF<sub>2</sub> und Cu, TiOx und Ti) berechnet. Die optischen Konstanten für Mischung 1 ergeben sich aus einer Kombination der optischen Konstanten von MgF<sub>2</sub> (99%) und Cu (1%). Anschließend wurden die optischen Konstanten der Mischung variiert und deren Einfluss auf die Transmission beobachtet. Ein Beispiel für ein sehr unterschiedliches Ergebnis im Vergleich zu Mischung 1 wird durch Mischung 2 dargestellt, bei der ein höherer Brechungsindex n zu stärkeren Oszillationen der Transmission führt. Bei Mischung 2 handelt es sich um eine Mischung aus einem Titanoxid (n = 2,55) und Titan.

Material	Wellenlänge (nm)	n	$\kappa$
Mischung 1	637	1,37	0,03
(99% MgF <sub>2</sub> , 1% Cu)	521	1,38	0,03
	469	1,38	0,02
Mischung 2	637	2,55	0,03
(99% TiO <sub>2</sub> , 1% Ti)	521	2,54	0,02
	469	2,54	0,02

Tabelle 2.3: Zusammenfassung der für die folgenden Transmissionsberechnungen verwendeten optischen Konstanten n und  $\kappa$ .



Abbildung 2.9: Berechnete Transmission in Abhängigkeit der Schichtdicke für (a) Mischung 1 und (b) Mischung 2.

Für metall-dotierte Dielektrika tritt eine für Metalle typische exponentielle Abnahme der Transmission mit der Schichtdicke auf. Diese ist allerdings mit Interferenzen überlagert. Je kleiner der reelle Brechungsindex n ist und je größer der Extinktionskoeffizient  $\kappa$  ist, und damit auch die Absorption des Mediums, umso schwächer ausgeprägt sind die Interferenzen. Die schwächeren Interferenzen aufgrund der höheren Absorption lassen sich folgendermaßen erklären: Die Interferenzen entstehen durch eine Überlagerung der direkt transmittierten Welle mit jenen Wellen, die innerhalb der dünnen Schicht mehrfach reflektiert werden. Je größer die Absorption in der dünnen Schicht ist, umso schwächer ist auch die Intensität der mehrfach reflektierten Welle, die für die Interferenzen verantwortlich ist. Aus demselben Grund nimmt auch die Höhe der Interferenzen mit steigender Schichtdicke ab.

## 3 Experimenteller Aufbau

## 3.1 Herstellung der Proben mit linearem Schichtdickengradienten

Zur Herstellung der Schichten mit linearem Gradienten der Schichtdicke wurde ein spezieller Substrathalter konstruiert (Abb. 3.1), auf welchem sich ein vakuumtauglicher Schrittmotor befindet. In der Aufdampfanlage wurde ein Schrittmotor der Firma *Haydon Kerk* (35000 Series, 35H4R-05-925, Datenblatt siehe Anhang) verwendet. In der Sputteranlage kam ein kleinerer Schrittmotor der gleichen Firma (21000 Series, 21H4AE-2.5-912, Datenblatt siehe Anhang) zum Einsatz. Der Schrittmotor wird über Kabeldurchführungen von außerhalb der Vakuumkammer mit Strom versorgt und über einen PC gesteuert. Zur Steuerung des Schrittmotors wird eine Schrittmotor torsteuerung von *LAM Technologies* (DS3041, Datenblatt siehe Anhang) verwendet, welche durch ein USB-Schnittstellen-Modul (UDP30 von Lam Technologies) mit dem Computer verbunden wird. Mithilfe der dazugehörigen Software (UDP Commander) ist es möglich, die Position bzw. die Geschwindigkeit des Schrittmotors zu kontrollieren oder auch komplexere Abläufe zu programmieren.

Die Verwendung des Schrittmotors ermöglicht es, eine Blende mit einer vorgegebenen, konstanten Geschwindigkeit vor dem Substrat weg zu ziehen. Bei einer konstanten Beschichtungsrate, das heißt einem konstanten Teilchenfluss von der Quelle zum Substrat, entsteht dadurch genau das gewünschte, lineare Schichtdickenprofil.



Abbildung 3.1: Schematische Skizze des Schrittmotors auf dem Substrathalter.

Eine schematische Skizze des Querschnittes einer Schicht mit linearem Schichtdickengradienten ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Theoretisch wäre es auch möglich, andere Schichtdickenprofile mithilfe des beschriebenen Substrathalters herzustellen.



Abbildung 3.2: Skizze des Querschnittes der hergestellten Schichten.

## 3.2 Transmissionsmessungen bei Proben mit linearem Schichtdickengradienten

Um die transmittierte Intensität des Lichtes I(d) in Abhängigkeit von der Schichtdicke d ermitteln zu können, ist die Steigung s der Schicht zu bestimmen. Das bedeutet, es ist notwendig die Länge L und die maximale Dicke  $d_{max}$  der aufgebrachten Schicht zu messen. Die Länge der Schicht wurde anhand der eingescannten Bilder gemessen und die maximale Schichtdicke wurde mithilfe der Stylus-Methode bestimmt. Aus diesen beiden Größen lässt sich die Steigung der Schicht wie folgt berechnen:

$$s = \frac{d_{max}}{L}.\tag{3.1}$$

Mithilfe dieser Steigung ist es möglich, die Dicke der Schicht für eine bestimmte Position x zu berechnen.

$$d(x) = s \cdot x \tag{3.2}$$

Die gemessene Transmission an einer bestimmten Position x entspricht dann der Transmission für die entsprechende Schichtdicke d(x).

$$I(d) = I(s \cdot x) \qquad \text{bzw.} \qquad T(d) = T(s \cdot x) \tag{3.3}$$

Für die Transmissionsmessungen wurden die hergestellten Proben mithilfe eines Durchlichtscanners der Firma *Nikon* (Super Coolscan 9000 ED) eingescannt. Die Bilder können anschließend in die einzelnen Farbkanäle (rot, grün, blau) aufgespalten werden, und die Helligkeitswerte (Werte zwischen 0 und 255) für die entsprechenden Farben bzw. die dazugehörigen Wellenlängen ermittelt werden. Der Wert 0 wird im Bild durch schwarz dargestellt und entspricht einer Transmission von 0%, der Wert 255 wird durch weiß dargestellt und entspricht einer Transmission von 100%. Das Verhältnis zwischen den Helligkeitswerten der Probe und jenen des unbeschichteten Glassubstrates entspricht der transmittierten Intensität. Zur Messung der Abhängigkeit der Transmission von der Schichtdicke wurden Messpunkte entlang einer Linie parallel zum Schichtdickengradienten gewählt (siehe Abb. 3.3). Die helleren Bereiche im linken Teil der Abbildung entsprechen geringen Schichtdicken, und die dunkleren Bereiche weiter rechts entstehen durch größere Schichtdicken.



Abbildung 3.3: Eingescannte Cu-Probe. Die Messpunkte für die Transmissionsmessungen liegen auf der gelben Linie.

Genauere Messungen der Transmission sind mithilfe eines UV/VIS/IR - Spektrometers von Ocean Optics (Spektrometer: HR4000, Lichtquelle: DT-MINI-2-GS) möglich. Auf der einen Seite kann man Messungen für jede beliebige Wellenlänge im Bereich von 300 nm bis 1000 nm durchführen. Und auf der anderen Seite sind die Messwerte für eine bestimmte Wellenlänge genauer, da die Anzahl der detektierten Intensitäten beim Spektrometer viel höher ist, als die 256 möglichen Helligkeitsabstufungen beim Scanner.

In Abbildung 3.4 ist der experimentelle Aufbau für die Transmissionsmessungen mittels Spektrometer dargestellt. Das Licht der Lichtquelle wird mithilfe von Lichtleitern zu zwei Stativen geleitet. Zwischen den beiden Stativen kann eine Probe in den Lichtstrahl gebracht werden. Danach wird das Licht weiter zum Spektrometer geleitet, welches das Spektrum des transmittierten Lichtes bestimmt und an den Computer (Software: Spektra Suite) weiterleitet.



Abbildung 3.4: Experimenteller Aufbau der Transmissionsmessungen mittels Spektrometer.

Analog zu den Messungen mit dem Durchlichtscanner wurden auch mit dem Spektrometer die transmittierten Intensitäten entlang einer Linie parallel zum Schichtdickengradienten der Probe entsprechend der Abbildung 3.3 gemessen. Um beim Vermessen der hergestellten Proben die Position x des Messpunktes mit hinreichender Genauigkeit einstellen zu können, wurde für die Spektrometermessungen ebenfalls ein Schrittmotor der Firma *Haydon Kerk* (35000 Series, 35H4R-05-925) verwendet (siehe Abb. 3.4). Durch Positionierung der Probe mithilfe des Schrittmotors konnte sichergestellt werden, dass man die Entfernung zwischen verschiedenen Messpunkten exakt einstellen kann und somit auch die Differenz der Schichtdicke zwischen den unterschiedlichen Messpunkten genau kennt. In einem Abstand von je einem halben oder einem viertel Millimeter wurden die transmittierten Intensitäten über den gesamten verfügbaren Wellenlängenbereich gemessen.

Um Transmissionsmessungen bei dünnen Schichten mit dem Spektrometer durchführen zu können, sind Messungen von zwei Referenzspektren notwendig. Auf der einen Seite wird ein Dunkelspektrum aufgenommen, das bei anschließenden Messungen abgezogen wird. Und auf der anderen Seite wird ein Transmissionsspektrum des Substrates (Glas) aufgenommen, das für darauffolgende Messungen als Ausgangsintensität angenommen wird.

### 3.3 Herstellung der Diamantproben

Die Beschichtungen auf den Diamanten wurden mithilfe einer in [17] beschriebenen Vorrichtung, die in Abbildung 3.5 zu sehen ist, hergestellt. Die Schale, in der die Diamanten beschichtet werden, befindet sich in einer Sputteranlage direkt unter dem Target. Sie rotiert während der Beschichtung, um die Diamanten ständig zu durchmischen. Neben der Rotation existieren noch einige weitere Mechanismen, die das Durchmischen der Diamanten fördern und das Festkleben der Diamanten an der Schale verhindern sollen.



Abbildung 3.5: Schale, in der die Diamanten beschichtet wurden.

Es wurden zwei unterschiedliche Größen von Diamanten zur Beschichtung verwendet. Die Bezeichnung *Mesh4050* bedeutet eine Größe von ungefähr 0,3 - 0,4 mm und die Bezeichnung *Mesh7080* steht für eine Größe von 0,18 - 0,21 mm. Die Form und Qualität der zur Beschichtung verwendeten Diamanten ist in Abbildung 3.6 zu sehen.



Abbildung 3.6: (a) Unbeschichtetes Diamantgranulat (Mesh7080). (b) Vergrößerte Ansicht der Diamanten.

### 3.4 Transmissionsmessungen bei Diamantproben

Zur Bestimmung der Schichtdicke der dünnen Schichten auf den Diamanten wird die Transmission des Lichtes durch die Diamanten ermittelt. Dafür werden die Diamanten auf einen Klebestreifen aufgestreut und eingescannt (siehe Abb. 3.6 (a)). In der vergrößerten Ansicht der Diamanten ist zu erkennen, dass sich nicht der gesamte Bereich der Diamanten zur Transmissionsmessung eignet. Zur Messung der Transmission sollten weder Diamanten schlechter Qualität noch Diamanten, die schräg am Klebestreifen liegen, herangezogen werden. Ausschließlich Diamanten hoher Qualität und in der entsprechenden Lage eignen sich zur Messung der Transmission, da diese hinreichend große Bereiche von Facetten normal zum einfallenden Licht aufweisen (siehe Abb. 3.7).



Abbildung 3.7: Schematische Darstellung eines Diamanten mit Grenzflächen, die parallel zum Klebestreifen und normal zum einfallenden Licht liegen.

Die in Abbildung 3.7 dargestellte Form der Diamantteilchen stellt einen großen Vorteil im Vergleich zu anderen granularen Substraten dar. Die zum Klebestreifen parallelen Grenzflächen der Diamanten ermöglichen einen normalen Lichteinfall auf die Grenzflächen und reduzieren so das Problem eines eventuell schrägen Lichteinfalls auf die Grenzfläche bzw. eines schrägen Durchganges des Lichtes durch die Beschichtung und das Granulat. Das Prinzip der Transmissionsmessung an einem einzelnen Granulatteilchen ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Bei der Messung trifft das verwendete Licht auf das beschichtete Teilchen und hat nacheinander folgende Medien zu durchqueren: die Beschichtung, das Granulat, die Beschichtung auf der Rückseite und den Klebestreifen, auf den das beschichtete Granulat zur Messung aufgebracht wurde. Die Transmission einer Anordnung von mehreren Schichten ist allerdings unabhängig von der Richtung, in der diese Anordnung vom einfallenden Licht durchlaufen wird (Beweis siehe [12]). Aus diesem Grund würden sich für eine Anordnung entsprechend Abbildung 3.8 dieselben transmittierten Intensitäten für von oben und von unten einfallendes Licht ergeben.



Abbildung 3.8: Veranschaulichung der Transmissionsmessung bei granularem Materialien.

Symbol	Beschreibung
I <sub>0</sub>	einfallende Intensität
$I_K$	Intensität nach Durchgang durch den Klebestreifen
$I_{DK}$	Intensität nach Durchgang durch Diamant und Klebestreifen
I <sub>SDK</sub>	Intensität nach Durchgang durch Schicht, Diamant und Klebestreifen
$T_K$	Transmission des Klebestreifens
$T_D$	Transmission des Diamanten
$T_S$	Transmission der Schicht

Mit den eben eingeführten Bezeichnungen lassen sich folgende Zusammenhänge für die unterschiedlichen Intensitäten angeben:

$$I_{K} = T_{K} \cdot I_{0}$$

$$I_{DK} = T_{D} \cdot T_{K} \cdot I_{0} = T_{D} \cdot I_{K}$$

$$I_{SDK} = \underbrace{T_{S}^{2} \cdot T_{D} \cdot T_{K}}_{T_{SDK}} \cdot I_{0} = T_{S}^{2} \cdot I_{DK}$$
(3.4)

Um über die Änderung der Transmission aufgrund der aufgebrachten Schicht auf den Diamanten eine Aussage treffen zu können, ist es notwendig, zuerst die Transmission des Klebestreifens und des unbeschichteten Granulates zu bestimmen. Sind diese Transmissionen und sowohl die einfallende Intensität als auch die auslaufende Intensität bekannt, so lässt sich die Transmission der Beschichtung  $T_S$  berechnen. Kennt man auch die vom Material abhängigen optischen Konstanten n und  $\kappa$ , so kann man auf die Dicke der Beschichtung schließen.

## 3.5 Bearbeitung der eingescannten Bilder der Diamantproben

Wie schon bei den Glassubstraten werden die Bilder der eingescannten Diamantproben in die drei Farbkanäle aufgespalten, um Informationen über die Transmission der entsprechenden Wellenlängen der Scannerlampe (siehe Abschnitt 5.1) zu erhalten. Zur Bestimmung der Transmission möchte man nun nicht die Helligkeitswerte des gesamten eingescannten Bildes berücksichtigen. Den Bereich zwischen den Diamanten, wo sich nur Klebestreifen befindet, bzw. den Rand der Diamanten möchte man vor der Messung eliminieren. Zur Ermittlung des gewünschten Messbereiches der Diamanten wurde ein in Entwicklung stehendes Programm (*DiamondView*) von Harald Mahr verwendet. Die Funktionsweise des Programms soll nun kurz beschrieben werden.

In den Bildern der eingescannten Diamanten (Abb. 3.9 (a)) werden im ersten Bearbeitungsschritt mithilfe von Differentiation die Kanten zwischen Diamanten und
Klebestreifen detektiert. Dabei werden alle Helligkeitswerte unterhalb einer bestimmten Grenze vorrübergehend auf 0 gesetzt, sodass die Diamanten als zusammengehörige Bereiche erkannt werden (Abb. 3.9 (b)). Danach werden unbrauchbare Kanten (z.B. nicht geschlossene Kanten am Rand oder Schmutz) durch Angabe eines Referenzdiamanten eliminiert (Abb. 3.9 (c), (d)). Anschließend werden alle Helligkeitswerte außerhalb der geschlossenen Kurven, die die Ränder der Diamanten darstellen, auf den Maximalwert gesetzt (Abb. 3.9 (e)). Als nächstes möchte man noch den schwarzen Rand der Diamanten eliminieren. Hierfür wurden zwei verschiedene Varianten zur Ermittlung der mittleren transparenten Bereiche der Diamanten angewendet. Auf der einen Seite kann man durch eine weitere Differentiation versuchen, die Kanten zwischen den zu messenden mittleren Bereichen der Diamanten und dem dunkleren Rand zu detektieren (Abb. 3.9 (f)), und anschließend den Randbereich wieder auf den maximalen Helligkeitswert setzen. Auf der anderen Seite kann man die ermittelten Bereiche der Diamanten sukzessive verkleinern, bis nur noch die mittleren Bereiche übrig bleiben. Bei der Verkleinerung des Messbereiches werden jeweils die Randpunkte des Messbereiches entfernt (Abb. 3.10).

Berücksichtigt man bei der abschließenden Messung der Helligkeitswerte des gesamten Bildes den Maximalwert nicht, so tragen nur noch die ausgewählten Bereiche (mittleren transparenten Bereiche der Diamanten) zum Ergebnis der Transmissionsmessung bei. Das Ergebnis der Transmissionsmessungen an jedem einzelnen Bildpunkt ist ein Helligkeitshistogramm bzw. ein Histogramm der transmittierten Intensitäten.



Abbildung 3.9: (a) Unverändertes Bild. (b) Alle Helligkeitswerte unterhalb Grenzwert auf einen Wert gesetzt. (c) Kantendetektion durch Differentiation. (d) Entfernung unbrauchbarer Kanten durch Angabe eines Referenzdiamanten. (e) Bereich außerhalb der geschlossenen Kanten auf Maximalwert gesetzt. (f) Detektion der inneren Kanten durch nochmaliges Differenzieren.



Abbildung 3.10: Sukzessive Verkleinerung des Messbereiches durch Entfernung der Randpunkte. x ist die Anzahl der Bildpunkte, die am Rand der Diamantbereiche entfernt wurden.

# 4 Simulationen zur Intensitätsverteilung der Transmission bei granularem Substrat

Mithilfe der beschriebenen Bildbearbeitung der eingescannten Bilder des beschichteten Diamantgranulates (siehe Abschnitt 3.5), lässt sich leicht ein Intensitätshistogramm generieren. Analog zu diesen Messergebnissen werden in diesem Abschnitt Transmissionsmessungen für eine große Anzahl an Granulatteilchen simuliert und Histogramme der transmittierten Intensitäten erstellt.

Ziel der Simulationen ist es herauszufinden, wie die Verteilung der transmittierten Intensitäten der Granulatteilchen für verschiedene Materialien (Metall, Dielektrikum, metall-dotiertes Dielektrikum) aussieht bzw. ob man charakteristische Merkmale für die unterschiedlichen Materialien feststellen kann. Falls charakteristische Unterschiede zu erkennen sind, könnte man aus den gemessen Verteilungen der Intensitäten auf das Material und eventuell auch auf die Schichtdicke des aufgebrachten Materials zurückschließen.

# 4.1 Grundlegende Annahmen und Parameter der Simulation

Bei der Messung der Transmission von granularen Materialien soll eine großen Anzahl an Teilchen berücksichtigt werden. Analog wurde bei den durchgeführten Monte-Carlo-Simulationen die Messung der transmittierten Intensität für eine große Anzahl an Granulatteilchen simuliert.

Die wichtigsten Parameter der Simulation sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Symbol	Beschreibung
m	Anzahl der generierten Zufallszahlen (Anzahl der Messpunkte)
$\mu = d_0$	Mittelwert der Normalverteilung (mittlere Schichtdicke auf Granulatteilchen)
σ	Standardabweichung der Normalverteilung der Schichtdicken
d	normalverteilte Zufallszahl für die Schichtdicke
I(d)	Abhängigkeit der transmittierten Intensität von der Schichtdick e $d$

Für alle durchgeführten Simulationen ist die Anzahl der generierten Zufallszahlen  $m = 10^6$ . Es wurde angenommen, dass die Schichtdicken auf den einzelnen Teilchen des Granulats um eine bestimmte mittlere Schichtdicke  $d_0$  normalverteilt sind. Die Auswahl einer bestimmten Anzahl an Granulatteilchen zur Transmissionsmessung entspricht in der Simulation der Erzeugung von normalverteilten Zufallszahlen. Für die generierten Zufallszahlen, die den Schichtdicken entsprechen, werden die entsprechenden Transmissionen berechnet. Diese berechneten Intensitäten werden einerseits von der Verteilung der Schichtdicken (den Parametern der Normalverteilung), und andererseits von den optischen Konstanten (materialabhängig) beeinflusst. Die Abhängigkeit der transmittierten Intensität I(d) von der Schichtdicke ist in Form einer Reihe von berechneten Werten für unterschiedliche Schichtdicken d gegeben (siehe Abschnitt 2.3.5). Für eine generierte Zufallszahl wird I(d) durch lineare Interpolation zwischen den angrenzenden Transmissionswerten ermittelt.

Weiters wird für die Simulation angenommen, dass die Transmission des Klebestreifens konstant ist. Die Granulatteilchen sind allerdings nicht alle gleich groß, und so auch deren Transmission nicht. Bei allen Simulationen wurde für die Transmission  $T_K \cdot T_D$  von Klebestreifen und Diamant eine Normalverteilung mit dem Mittelwert 0,6 und der Standardabweichung 0,05 angenommen. Die Transmission des gesamten simulierten Systems (siehe Abb. 3.8) ergibt sich dann aus dem Produkt der Transmission des Klebestreifen und des Diamanten und zwei Mal der Transmission der Beschichtung.

Für alle durchgeführten Simulationen wurden die Wellenlängen des Lichtes passend zu den Maxima des Spektrums der Scannerlampe gewählt. Diese liegen bei 469 nm, 521 nm und 637 nm (siehe Abschnitt 5.1).

### 4.2 Simulation für Metalle

Für Metalle wurden beispielhaft Simulationen für Kupfer bei der Wellenlänge von  $\lambda = 521$  nm durchgeführt. Dabei wurde einerseits die mittlere Schichtdicke  $\mu$  und andererseits die Schichtdickenschwankung  $\sigma$  variiert, wobei alle anderen Parameter jeweils konstant gehalten wurden.

In der ersten Reihe von Simulationen wurde  $\mu$  variiert und  $\frac{\sigma}{\mu} = 0, 1$  konstant gehalten. Bei der zweiten Reihe von Simulationen wurde umgekehrt  $\mu$  konstant gehalten und  $\sigma$  variiert. Für I(d) wurde auf die in der Theorie ermittelten transmittierten Intensitäten (Abb. 2.7) zurückgegriffen. Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abbildung 4.1 dargestellt.



Abbildung 4.1: Ergebnisse der Simulationen für unterschiedliche mittlere Schichtdicken  $\mu$  und verschiedene Schichtdickenschwankungen  $\sigma$ . Auf der x-Achse ist jeweils die Transmission  $T_{SDK}$  (siehe Gleichung (3.4)) aufgetragen, und auf der y-Achse jeweils die Anzahl der Messpunkte mit entsprechender Transmission.

Bei den oberen drei Histogrammen, bei denen die mittlere Schichtdicke variiert wird und die Standardabweichung konstant bleibt, verschiebt sich das Maximum des Histogramms für größere Schichtdicken nach links zu niedrigeren transmittierten Intensitäten. Bei den unteren drei Histogrammen ist die Schichtdicke konstant und die Standardabweichung wird variiert, was zu einer konstanten Lage des Maximums und einer Verbreiterung des Histogramms für größere Schichtdickenschwankungen führt.

Angenommen die Ergebnisse einer Transmissionsmessung bei einem Granulat würden den oberen Histogrammen entsprechen, so stellt sich die Frage, wie man aus dem gemessenen Histogramm auf die Schichtdicke schließen könnte. Der naheliegendste Versuch wäre, aus dem Maximum des Histogramms direkt auf die mittlere Schichtdicke zurückzurechnen. Da die transmittierte Intensität I(d) in Abhängigkeit von der Schichtdicke für Metalle durch eine abnehmende Exponentialfunktion und somit durch einen bijektiven Zusammenhang gegeben ist, kann die Schichtdicke direkt aus der Transmission ermittelt werden. Angenommen das Maximum im Histogramm entspricht der Transmission bei der mittleren Schichtdicke, so erhält man folgende Ergebnisse für die Schichtdicken.

$\mu$ (nm)	$\sigma$ (nm)	Max. im Histogramm	$T_S$	d (nm)
5	$0,\!5$	0,309	0,718	$^{5,1}$
10	1	$0,\!173$	0,536	10,1
20	2	0,052	0,294	20,5
10	0,5	0,175	0,539	10,0
10	1	0,173	0,536	10,1
10	2	0,165	0,525	10,5

Tabelle 4.1:  $T_S$  ist die Transmission der am Granulat aufgebrachten Schicht (siehe Gleichung (3.4)). d bezeichnet die mittlere Schichtdicke dieser Schicht, welche aus dem Maximum des Histogramms bestimmt wurde.

Zur Kontrolle oder für eine höhere Genauigkeit der Ergebnisse könnte man mehrere Messungen bei unterschiedlichen Wellenlängen durchführen.

### 4.3 Simulation für Dielektrika

Als Beispiel für ein Dielektrikum wurden Simulationen für Magnesiumfluorid, für unterschiedliche mittlere Schichtdicken bzw. Schichtdickenschwankungen und verschiedene Wellenlängen durchgeführt. Zuerst wurde die mittlere Schichtdicke variiert und die Standardabweichung der Schichtdicke konstant mit 5% der mittleren Schichtdicke angenommen (siehe Abb. 4.2). Danach wurden die Schichtdickenschwankungen bei



konstanter mittleren Schichtdicke variiert (siehe Abb. 4.3).

Abbildung 4.2: Ergebnisse der Simulationen für unterschiedliche mittlere Schichtdicken  $\mu$  und verschiedene Wellenlängen  $\lambda$ . Auf der x-Achse ist jeweils die Transmission  $T_{SDK}$  (siehe Gleichung (3.4)) aufgetragen, und auf der y-Achse jeweils die Anzahl der Messpunkte mit entsprechender Transmission.



Abbildung 4.3: Ergebnisse der Simulationen für verschiedene Schichtdickenschwankungen  $\sigma$  bei  $\mu = 150$  nm und  $\lambda = 521$  nm. Auf der x-Achse ist jeweils die Transmission  $T_{SDK}$  (siehe Gleichung (3.4)) aufgetragen, und auf der y-Achse jeweils die Anzahl der Messpunkte mit entsprechender Transmission.

Zwischen den einzelnen Histogrammen in Abbildung 4.2 ist kaum ein Unterschied zu erkennen. Die Verschiebung des Maximums von 0,6 für unbeschichtete Diamanten auf 0,56 - 0,58 (siehe Tabelle 4.2) für die beschichteten Diamanten ist sehr gering. Das liegt daran, dass die Transmission beim Durchgang durch ein Dielektrikum auf der einen Seite kaum abnimmt und sich auf der anderen Seite für verschiedene Wellenlänge kaum unterscheidet (siehe Abb. 2.8). Durch kleine Messfehler in der Transmission können sich so große Fehler in der Schichtdicke ergeben. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass die sehr geringe Abschwächung der transmittierten Intensität mithilfe der verwendeten Messmethoden nicht gemessen werden kann.

Ein weiteres Problem, das sich im Gegensatz zu Metallen bei der Berechnung der Schichtdicke aus der Transmission ergibt, ist die fehlende Bijektivität im Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen. Kennt man die transmittierte Intensität für ein ideales Dielektrikum, so gibt es theoretisch unendlich viele Schichtdicken, die zu dieser Intensität führen würden. Um die Schichtdicke bestimmen zu können, ist es also notwendig den Bereich, in dem diese liegt, ungefähr zu kennen (z.B. durch Beschichtungsrate und Beschichtungszeit). Eine Alternative dazu wäre der Vergleich aller zur gemessenen Transmission passenden Schichtdicken für verschiedene Wellenlängen (siehe Tabelle 4.2).

$\mu$ (nm)	$\sigma$ (nm)	$\lambda$ (nm)	max	$T_S$	mögliche $d$ (nm)
150	7,5	469	0,558	0,9646	24 - <b>146</b> - 193 - 315 - 363 - 485
150	7,5	521	0,566	0,9709	42 - <b>146</b> - 231 - 335 - 420
150	7,5	637	0,576	0,9800	79 - <b>153</b> - 310 - 384
280	14	469	0,572	0,9762	50 - 120 - 219 - <b>289</b> - 389 - 459
280	14	521	0,581	0,9839	77 - 112 - <b>266</b> - <b>301</b> - 455 - 490
280	14	637	0,562	0,9676	42 - 189 - <b>274</b> - 420

Tabelle 4.2: d ist die mittlere Schichtdicke der am Granulat aufgebrachten Schicht, welche aus dem Maximum des Histogramms (max) bestimmt wurde.

Die Abweichungen der berechneten Schichtdicken aus dem Maximum des Histogramms in der fünften Zeile der Tabelle 4.2 weist auf ein weiteres Problem hin. Besitzt die Transmission für die mittlere Schichtdicke genau ein Maximum (analog für ein Minimum), so verschiebt sich das Maximum des Histogramms etwas zu niedrigeren Intensitäten. Das liegt daran, dass die Granulatteilchen mit einer etwas größeren bzw. etwas kleineren Schichtdicke als der mittleren Schichtdicke, dieselbe Transmission aufweisen. Dadurch unterscheiden sie sich im Histogramm nicht und deren Anzahlen addieren sich. Aus diesem Grund erhält man für eine etwas geringere Intensität eine höhere Anzahl an Messpunkten. Das Maximum im Histogramm bei einer etwas geringeren Intensität führt beim Zurückrechnen auf die Schichtdicke zu zwei Werten, die symmetrisch um die eigentliche Schichtdicke liegen. Je größer die Standardabweichung der Schichtdicke ist, desto wahrscheinlicher tritt diese Problem auf.

Die Histogramme für unterschiedliche Schichtdickenschwankungen (siehe Abb. 4.3) unterscheiden sich kaum. Für höhere Schichtdickenschwankungen wird die Verteilung der transmittierten Intensitäten nicht merkbar breiter.

### 4.4 Simulation für metall-dotierte Dielektrika

Die Ergebnisse der Simulationen für Transmissionsmessungen bei Granulaten, die mit metall-dotierten Dielektrika beschichtet wurden, sind durch die Histogramme in Abbildung 4.4 dargestellt. Als Grundlage für diese Simulationen diente die in Abschnitt 2.3.5 für Mischung 2 berechnete transmittierte Intensität I(d) in Abhängigkeit von der Schichtdicke d.



Abbildung 4.4: Ergebnisse der Simulationen für unterschiedliche mittlere Schichtdicken  $\mu$  und verschiedene Wellenlängen  $\lambda$ . Auf der x-Achse ist jeweils die Transmission  $T_{SDK}$  (siehe Gleichung (3.4)) aufgetragen, und auf der y-Achse jeweils die Anzahl der Messpunkte mit entsprechender Transmission.

$\mu$ (nm)	$\sigma$ (nm)	$\lambda$ (nm)	max	$T_S$	mögliche $d$ (nm)
380	9,5	469	0,311	0,720	114 - 165 - 202 - 261 - 291 - 359 - <b>378</b> - 461
380	9,5	521	0,196	0,572	154 - 246 - 267 - 343 - <b>376</b> - 441 - 483 - 539
380	9,5	637	0,306	0,714	33 - 94 - 151 - 227 - 269 - 363 - <b>382</b>
540	13,5	469	0,249	0,647	253 - 299 - 349 - 388 - 446 - 475 - <b>544</b> - 562
540	13,5	521	0,158	0,514	457 - 467 - <b>550</b> - 579 - 648
540	13,5	637	0,139	0,482	<b>547</b> - 579 - 662 - 715

Tabelle 4.3: d ist die mittlere Schichtdicke der am Granulat aufgebrachten Schicht, welche aus dem Maximum des Histogramms (max) bestimmt wurde.

Ähnliche Probleme wie bei Dielektrika ergeben sich auch bei metall-dotierten Dielektrika. Auf der einen Seite besteht kein bijektiver Zusammenhang zwischen Schichtdicke und Transmission. Dadurch ergeben sich mehrere mögliche Schichtdicken bei bekannter Transmission. Zur Schichtdickenbestimmung muss man aus diesem Grund entweder den Bereich der Schichtdicke kennen oder Messungen für verschiedene Wellenlängen vergleichen. Auf der anderen Seite hat man wieder ein Problem, falls die Transmission bei der zu messenden Schichtdicke gerade ein Extremum aufweist (siehe Abschnitt 4.3).

# 5 Messungen und Ergebnisse

# 5.1 Messung des Spektrums der Lampe des Durchlichtscanners

Um die Messergebnisse des Durchlichtscanners besser einordnen und interpretieren zu können, wurde das Spektrum der Lampe des Durchlichtscanners gemessen. Bei dem Sensor des Scanners handelt es sich um einen CCD-Sensor, dessen spektrale Empfindlichkeit im sichtbaren Wellenlängenbereich annähernd konstant ist. Das gemessene Spektrum der Lampe ist in der Abbildung 5.1 dargestellt.



Abbildung 5.1: Spektrale Intensitätsverteilung der Lampe im Durchlichtscanner.

Das Spektrum der Lampe weist Maxima bei 469,3 nm im blauen, bei 520,8 nm im grünen und bei 636,5 nm im roten Bereich auf. Die eingescannten und in Farbkanäle aufgespaltenen Bilder der Proben liefern somit Informationen über die Transmission für genau diese drei Wellenlängen, wo die Scannerlampe im dazugehörigen Farbbereich das Maximum besitzt. Das bedeutet, mithilfe des blauen Farbkanals des eingescannten Bildes lässt sich die Transmission des Lichtes mit der Wellenlänge  $\lambda = 469$  nm bestimmen.

## 5.2 Probenübersicht

In Tabelle 5.1 ist eine Zusammenfassung der wichtigsten Beschichtungsparameter und Daten der untersuchten Proben zu finden. Weitere Beschichtungsparameter sind im Anhang nachzulesen.

Probenname	Verfahren	$p_V(10^{-6} \text{ mbar})$	$R \; ({ m nm/s})$	$d_{max}$ (nm)	L (m)
Cu-02	А	1,8	1,3	72,0	0,0271
Ag-02	А	6,5	1,1	69,7	0,0260
Au-03	А	1,8	3,0	169	0,0273
MgF <sub>2</sub> -04	А	1,5	5,0	828	0,0276
MgF <sub>2</sub> -Cu-03	A2	0,7	14,5	1020	0,0266
MgF <sub>2</sub> -Cu-05	A2	0,8	13,5	930	0,0266
MgF <sub>2</sub> -Cu-06	A2	1,9	12,0	714	0,0270
Al-02	S	2,0	0,9	128	0,0226
Mo-03	S	1,7	0,9	168	0,0230
AlOx-02	RS	5,0	1,25	580	0,0215

Tabelle 5.1:  $p_V$  bezeichnet den Druck in der Vakuumkammer vor Beginn des Beschichtungsprozesses und R die Beschichtungsrate. L ist die Länge und  $d_{max}$  die maximale Dicke der Probe. Außerdem ist noch das Verfahren zur Herstellung der Schicht angegeben (A=Aufdampfen, A2=Gleichzeitiges Aufdampfen mehrerer Komponenten, S=Sputtern, RS=Reaktives Sputtern).

# 5.3 Transmissionsmessungen mittels Durchlichtscanner

Als Ausgangsintensität  $I_O$  wird bei den Messungen die transmittierte Intensität durch das unbeschichtete Glassubstrat angesehen. Misst man nun die Transmission des Lichtes einer bestimmten Wellenlänge entlang einer Geraden parallel zum Schichtdickengradienten (gelbe Linie in Abb. 3.3), d. h. normal auf Geraden konstanter Schichtdicke, so kann man die Abhängigkeit der Transmission von der Schichtdicke bestimmen.

#### 5.3.1 Metallschichten

#### Kupfer

Abbildung 5.2 zeigt eine in der Aufdampfanlage hergestellte Kupferschicht (Cu-02), deren Schichtdicke von links nach rechts konstant wächst. Die Länge der abgebildeten Kupferschicht beträgt 27,1 mm und die maximale Dicke beträgt 72,0  $\pm$  5,4 nm.



Abbildung 5.2: Eingescannte Cu-Probe (Cu-02).

Bei einer Messung entlang einer entsprechend der Abbildung 3.3 eingezeichneten Linie ergeben sich folgende transmittierten Intensitäten:



Abbildung 5.3: Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke für Cu. (a) Lineare,(b) logarithmische Darstellung.

In Abbildung 5.3 kann der für Metalle typische exponentielle Abfall der Transmission mit der Schichtdicke erkannt werden, welcher sich im logarithmischen Plot durch eine fallende Gerade ausdrückt. Diese Messungen stimmen mit den theoretischen Berechnungen aus Abschnitt 2.3.5 überein.

Die Steigungen der Fitgeraden in der logarithmischen Darstellung entsprechen den negativen Absorptionskoeffizienten  $\alpha$ . Aus den Absorptionskoeffizienten lassen sich mithilfe von Gleichung (2.14) die Extinktionskoeffizienten berechnen. Ein Vergleich der aus den Fitgeraden ermittelten Extinktionskoeffizienten  $\kappa_M$  mit jenen aus der Literatur  $\kappa_L$  [15] bzw. ein Vergleich der entsprechenden Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  ist in Tabelle 5.2 dargestellt, wobei *e* den relativen Fehler des gemessenen Absorptionskoeffizienten im Vergleich zum Literaturwert angibt.

$$e = \frac{|\alpha_M - \alpha_L|}{\alpha_L} \tag{5.1}$$

$\lambda$ (nm)	$\kappa_L$	$\kappa_M$	$\alpha_L \ (\mathrm{m}^{-1})$	$\alpha_M \ (\mathrm{m}^{-1})$	e
637	3,47	3,67	$6,85 \cdot 10^{7}$	$7,24\cdot 10^7$	0,057
521	2,60	2,56	$6,27 \cdot 10^{7}$	$6,18\cdot 10^7$	0,015
469	2,47	2,64	$6, 61 \cdot 10^{7}$	$7,06\cdot 10^7$	0,067

Tabelle 5.2: Vergleich der gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [15] für Cu. e ist der relative Fehler der gemessenen Absorptionskoeffizienten in Bezug auf die Literaturwerte.



Abbildung 5.4: Vergleich der gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [15] für Cu.

Die Fehlerbalken  $\Delta \alpha$  bzw.  $\Delta \kappa$  wurden mithilfe des Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetzes

$$\Delta f(x, y, \dots) = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \cdot \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \cdot \Delta y + \dots$$
(5.2)

ermittelt und berücksichtigen die Messfehler  $\Delta d_{max}$  der maximalen Schichtdicken  $d_{max}$ . Für die gemessene transmittierte Intensität I(d) gilt:

$$I(d) \propto exp(-\alpha \cdot d) = exp(-\alpha \cdot s \cdot x) = exp(-\alpha \cdot \frac{d_{max}}{L} \cdot x).$$
(5.3)

Mithilfe von Fitgeraden wurden die negativen Steigungen  $\tilde{\alpha}$  in der logarithmischen Darstellung der transmittierten Intensität in Abhängigkeit von der Position x des Messpunktes auf der Probe bestimmt.

$$\tilde{\alpha} = \alpha \cdot \frac{d_{max}}{L} \tag{5.4}$$

Für den Fehler  $\Delta \alpha$  des Absorptionskoeffizienten  $\alpha = \tilde{\alpha} \cdot \frac{L}{d_{max}}$  gilt dann laut Gleichung (5.2)

$$\Delta \alpha = \left| \frac{\partial \alpha}{\partial d_{max}} \right| \cdot \Delta d_{max} = \frac{\alpha}{d_{max}} \cdot \Delta d_{max}.$$
(5.5)

Eventuelle Fehler bei der Messung der Länge L der Probe bzw. bei der Bestimmung der negativen Steigung  $\tilde{\alpha}$  der Fitgeraden wurden nicht berücksichtigt. Aus dem Fehler  $\Delta \alpha$  und mithilfe der Gleichungen (2.14) und (5.2) lässt sich der Fehler  $\Delta \kappa$  des Extinktionskoeffizienten  $\kappa$  berechnen:

$$\Delta \kappa = \left| \frac{\partial \kappa}{\partial \alpha} \right| \cdot \Delta \alpha = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta \alpha.$$
(5.6)

Die gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten für Kupfer stimmen sehr gut mit den Literaturwerten überein. Die relativen Fehler der gemessenen Absorptionskoeffizienten in Bezug auf die Literaturwerte liegen zwischen 1,5% und 6,7%.

#### Silber

Die Silberschichten wurden ebenfalls durch Aufdampfen hergestellt. Die in Abbildung 5.5 dargestellte Silberschicht (Ag-02) hat eine Länge von 26 mm und an der dicksten Stelle eine Schichtdicke von  $69.7 \pm 4.6$  nm.



Abbildung 5.5: Eingescannte Ag-Probe (Ag-02).

Im Bereich sehr geringer Schichtdicken treten bei Silber ungewöhnliche Interferenzen auf. Diese sind nicht nur in Abbildung 5.5 zu erkennen, sondern treten auch bei den Transmissionsmessungen mittels Spektrometer auf. Das Auftreten dieser Interferenzen geht aus den theoretischen Berechnungen in Abschnitt 2.3.5 nicht hervor. Gründe für die Entstehung dieser Interferenzen könnten eine das Glassubstrat nicht vollständig benetzende Silberschicht oder die hohe Reflexivität der Ag-Grenzflächen sein.

Mithilfe der Steigungen der Fitgeraden in der logarithmischen Darstellung der Transmission über der Schichtdicke wurden wiederum die Absorptionskoeffizienten von Silber für die unterschiedlichen Wellenlängen bestimmt und anschließend mit Literaturwerten verglichen.



Abbildung 5.6: Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke für Ag. (a) Lineare,(b) logarithmische Darstellung.

$\lambda$ (nm)	$\kappa_L$	$\kappa_M$	$\alpha_L \ (\mathrm{m}^{-1})$	$\alpha_M \ (\mathrm{m}^{-1})$	e
637	4,35	4,46	$8,59 \cdot 10^{7}$	$8,80 \cdot 10^{7}$	0,025
521	3,35	3,39	$8,08 \cdot 10^{7}$	$8,18\cdot 10^7$	0,012
469	2,81	2,85	$7,52 \cdot 10^{7}$	$7,63\cdot 10^7$	0,014

Tabelle 5.3: Vergleich der gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [15] für Ag. e ist der relative Fehler der gemessenen Absorptionskoeffizienten in Bezug auf die Literaturwerte.



Abbildung 5.7: Vergleich der gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [15] für Ag.

Die Abweichungen der gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten von den Literaturwerten sind bei Silber sehr gering. In Übereinstimmung mit den theoretischen Berechnungen aus Abschnitt 2.3.5 hat Silber im blauen Bereich die geringste Absorption. Diese Tatsache ist nicht nur an den Messwerten, sondern auch an der blauen Farbe der Probe zu erkennen.

#### Gold

Abbildung 5.8 zeigt eine durch Aufdampfen erzeugte Goldschicht (Au-03). Die Länge dieser Probe beträgt 27,3 mm und ihre maximale Schichtdicke 169,0  $\pm$  11,2 nm.



Abbildung 5.8: Eingescannte Au-Probe (Au-03).



Abbildung 5.9: Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke für Au. (a) Lineare,(b) logarithmische Darstellung.

$\lambda$ (nm)	$\kappa_L$	$\kappa_M$	$\alpha_L \ (\mathrm{m}^{-1})$	$\alpha_M \ (\mathrm{m}^{-1})$	e
637	3,32	3,04	$6,55 \cdot 10^{7}$	$6,01 \cdot 10^{7}$	0,083
521	1,97	2,09	$4,68 \cdot 10^{7}$	$5,03\cdot 10^7$	0,075
469	1,63	1,92	$4, 36 \cdot 10^{7}$	$5,15\cdot 10^7$	0,180

Tabelle 5.4: Vergleich der gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [15] für Au. e ist der relative Fehler der gemessenen Absorptionskoeffizienten in Bezug auf die Literaturwerte.



Abbildung 5.10: Vergleich der gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [15] für Au.

Die gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten stimmen für Gold im Vergleich zu den bisherigen Materialien (Cu, Ag) nur relativ ungenau mit den Literaturwerten überein. Vor allem für  $\lambda = 469$  nm ist der Fehler (18%) sehr hoch. Diese starken Abweichungen sind eventuell auf das Wachstum der Goldschicht zurückzuführen (z.B. Inselbildung). Qualitativ zeigt das Messergebnis den korrekten Trend, dass die Absorptionskoeffizienten für grün und blau deutlich geringer sind als für rot, in Analogie zu den theoretischen Berechnungen aus Abschnitt 2.3.5. Im Vergleich zu allen anderen Metallen, die im Laufe der Diplomarbeit untersucht wurden, hat Gold die kleinsten Absorptionskoeffizienten und ist somit für gleiche Schichtdicken transparenter als andere Metalle.

#### Aluminium

Die Aluminiumschichten wurden in der Sputteranlage hergestellt. Die in der folgenden Abbildung dargestellte Aluminiumschicht (Al-02) ist 22,6 mm lang und maximal  $128 \pm 10$  nm dick.



Abbildung 5.11: Eingescannte Al-Probe (Al-02).



Abbildung 5.12: Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke bei der Probe Al-02. (a) Lineare, (b) logarithmische Darstellung.

$\lambda(\text{nm})$	$\kappa_L$	$\kappa_M$	$\alpha_L \ (\mathrm{m}^{-1})$	$\alpha_M (\mathrm{m}^{-1})$	e
637	7,67	7,96	$1,51 \cdot 10^{8}$	$1,57\cdot 10^8$	0,038
521	6,32	6,74	$1,53 \cdot 10^{8}$	$1,63\cdot 10^8$	0,067
469	5,70	6,28	$1,53 \cdot 10^{8}$	$1,68\cdot 10^8$	0,102

Tabelle 5.5: Vergleich der gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [15] für Al. e ist der relative Fehler der gemessenen Absorptionskoeffizienten in Bezug auf die Literaturwerte.



Abbildung 5.13: Vergleich der gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [15] für Al.

Die gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten stimmen gut mit den Literaturwerten überein. Sie haben für die unterschiedlichen Wellenlängen in etwa dieselbe Größe, was sich in der relativ farblosen Erscheinung der Probe in Abbildung 5.13 widerspiegelt. Im Vergleich zu allen anderen Metallen, die im Laufe der Diplomarbeit untersucht wurden, hat Aluminium die größten Absorptionskoeffizienten. Aus diesem Grund wird Aluminium bei vergleichsweise geringen Schichtdicken schon undurchsichtig.

In Abbildung 5.13 ist zu sehen, dass die Messwerte für Aluminium generell über den Literaturwerten liegen. Das könnte daher kommen, dass die mithilfe des Profilometers bestimmte maximale Schichtdicke zu gering ist. Da die Messung des Absorptionskoeffizienten sehr stark von der maximalen Schichtdicke abhängt, und diese für Aluminium eher schwierig zu bestimmen war, ist diese Vermutung der Fehlerquelle naheliegend. Die schwierige Bestimmung der maximalen Schichtdicke spiegelt sich in den relativ großen Fehlerbalken wider, wobei die Literaturwerte noch knapp innerhalb der berechneten Fehlerbalken liegen.

#### Molybdän

In Abbildung 5.14 ist eine durch Sputtern hergestellt Molybdänschicht (Mo-03) dargestellt. Sie hat eine Länge von 23 mm und eine maximale Schichtdicke von  $168 \pm 8$  nm.



Abbildung 5.14: Eingescannte Mo-Probe (Mo-03).



Abbildung 5.15: Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke für Mo. (a) Lineare, (b) logarithmische Darstellung.

$\lambda$ (nm)	$\kappa_L$	$\kappa_M$	$\alpha_L \ (\mathrm{m}^{-1})$	$\alpha_M \ (\mathrm{m}^{-1})$	e
637	3,55	3,80	$7,01 \cdot 10^{7}$	$7,50\cdot 10^7$	0,070
521	3,75	3,73	$9,05 \cdot 10^{7}$	$9,02\cdot 10^7$	0,004
469	3,56	4,08	$9,53\cdot 10^7$	$1,09\cdot 10^8$	0,147

Tabelle 5.6: Vergleich der gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [18] für Mo. *e* ist der relative Fehler der gemessenen Absorptionskoeffizienten in Bezug auf die Literaturwerte.



Abbildung 5.16: Vergleich der gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [18] für Mo.

Wie auch für einige andere Metalle (Au, Al) tritt der größte Fehler der gemessenen Absorptionskoeffizienten im blauen Bereich bei der Wellenlänge von  $\lambda = 469$  nm auf. Die Messwerte für die anderen beiden Wellenlängen weichen deutlich weniger von den Literaturwerten ab.

### 5.3.2 Dielektrische Schichten

#### Magnesiumfluorid

Abbildung 5.17 zeigt eine in der Aufdampfanlage hergestellte Magnesiumfluorid-Schicht (MgF<sub>2</sub>-04), deren Schichtdicke von links nach rechts konstant wächst. Die Länge der

abgebildeten Schicht beträgt 27,6 mm und die maximale Dicke beträgt 828  $\pm$  14 nm.



Abbildung 5.17: Eingescannte  $MgF_2$ -Probe ( $MgF_2$ -04). Die Schichtdicke nimmt von rechts nach links konstant zu.

Misst man nun analog zu den Metallschichten die transmittierte Intensität für unterschiedliche Schichtdicken, so erhält man folgendes Ergebnis:



Abbildung 5.18: Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke für MgF<sub>2</sub>. Die Kurven in den Farben blau, grün und rot stellen Messwerte dar, die schwarze Kurve wurde mithilfe der Gleichung (2.19) und durch fitten der Parameter n und  $\kappa$  ermittelt.

In Tabelle 5.7 sind die mithilfe von Gleichung (2.19) und durch fitten der Parameter n und  $\kappa$  ermittelten optischen Konstanten von MgF<sub>2</sub> angegeben. Exemplarisch wurde die für  $\lambda = 521$  nm berechnete Kurve in Abbildung 5.18 eingezeichnet.

$\lambda$ (nm)	n	$\kappa$
469	1,38	0
521	1,38	0
637	1,38	0

Tabelle 5.7: Optische Konstanten von  $MgF_2$ , die durch fitten der gemessenen Transmissionswerte ermittelt wurden.

Die Messergebnisse stimmen mit den Literaturwerten  $(n = 1, 38 \text{ und } \kappa = 0 \text{ [16]})$ überein. Da Magnesiumfluorid annähernd ein ideales Dielektrikum darstellt, gibt es keine kontinuierliche Abnahme der Transmission. Es kommt ausschließlich zu wellenlängenabhängigen Interferenzen, die aufgrund von Mehrfachreflexionen innerhalb der Schicht entstehen. Bei Magnesiumfluorid ist der reelle Brechungsindex n im sichtbaren Bereich annähernd konstant, und deshalb nehmen die Abstände zwischen den Maxima der Transmission mit steigender Wellenlänge zu.

Eine Schichtdickenbestimmung durch Transmissionsmessungen bei ausschließlich drei Wellenlängen ist eher schwierig bzw. nicht möglich. Im Gegensatz zu metallischen Schichten liegt bei dielektrischen Schichten kein bijektiver Zusammenhang zwischen Schichtdicke und Transmission vor, und deshalb kann die Schichtdicke nicht direkt aus der Transmission berechnet werden. Besser geeignet für die Schichtdickenbestimmung bei dielektrischen Schichten sind die Transmissionsmessungen mittels Spektrometer, bei denen das gesamte Transmissionsspektrum aufgenommen wird (Abschnitt 5.4.2).

#### Aluminiumoxid

Die Aluminium oxid-Schichten wurden durch reaktives Sputtern hergestellt. Die in der folgenden Abbildung dargestellte Aluminium oxid-Schicht (AlOx-02) ist 21,5 mm lang und maximal 580  $\pm$  22 nm dick.



Abbildung 5.19: Eingescannte Aluminiumoxid-Probe (AlOx-02). Die Schichtdicke nimmt von links nach rechts konstant zu.



Abbildung 5.20: Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke für AlOx. Die Kurven in den Farben blau, grün und rot stellen Messwerte dar, die schwarze Kurve wurde mithilfe der Gleichung (2.19) und durch fitten der Parameter n und  $\kappa$  ermittelt.

Mithilfe von Gleichung (2.19) und durch fitten der gemessen Transmissionswerte erhält man die optischen Konstanten n und  $\kappa$ , welche in Tabelle 5.8 mit den entsprechenden Literaturwerten für Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> verglichen werden.

5.3	Transmissionsmessungen	mittels	${\it Durchlichtscanner}$

$\lambda$ (nm)	$n_M$	$\kappa_M$	$n_L$	$\kappa_L$
469	1,63	0,001	1,777	0
521	1,62	0,001	1,773	0
637	1,62	0,001	1,765	0

Tabelle 5.8: Vergleich der optische Konstanten von  $Al_2O_3$ , die durch fitten der gemessenen Transmissionswerte ermittelt wurden (Index M), mit den entsprechenden Literaturwerten (Index L) aus [16].

Die Abweichungen der gemessenen reellen Brechungsindizes n von den Literaturwerten könnten durch Poren in der Schicht entstehen, welche n reduzieren. Da die Transmissionsmessungen mittels Spektrometer allerdings wesentlich geringere Abweichungen zur Literatur ergeben (siehe Abschnitt 5.4.2), handelt es sich vielleicht um Messungenauigkeiten.

Die Aluminiumoxid-Schicht zeigt die für Dielektrika typischen Interferenzen der Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke. Im Gegensatz zu Magnesiumfluorid ist allerdings zusätzlich zu den Interferenzen eine leichte Abnahme der transmittierten Intensität erkennbar. Das deutet darauf hin, dass die untersuchte Schicht nicht aus reinem Aluminiumoxid besteht, sondern wahrscheinlich auch eine sehr geringe Konzentration von metallischem Aluminium aufweist. Auch könnten die oben erwähnten Poren Streuzentren darstellen, welche ebenfalls die Transmission reduzieren.

#### 5.3.3 Metalldotierte-dielektrische Schichten

Bei der Herstellung der metall-dotierten dielektrischen Schichten wurde die Konzentration des Kupfers in der Magnesiumfluorid-Schicht variiert. Die genauen Konzentrationen von Kupfer in den Schichten wurden nicht exakt bestimmt. Während des Aufdampfens der Schichten ist es allerdings möglich, die aktuelle Beschichtungsrate mithilfe eines Schwingquarzes zu messen. Beim gleichzeitigen Beschichten mit mehreren Materialien ist das Bestimmen der einzelnen Raten aber problematisch, da es für diese Messung nötig ist, den Schwingquarz auf die Dichte des Verdampfungsgutes einzustellen. Da die Schicht zum Großteil aus MgF<sub>2</sub> besteht, wurde dessen Dichte zur Messung der Beschichtungsrate verwendet, wodurch aber die gemessene Rate für Kupfer stark verfälscht wird. Da die Änderung der Resonanzfrequenz des Schwingquarzes proportional dem Produkt der Dichte  $\rho$  des Aufdampfmaterials und der aufgedampften Schichtdicke *d* ist [8], kann man aus dem Verhältnis der Dichten von Cu ( $\rho = 8,93$  g/cm<sup>3</sup>) und MgF<sub>2</sub> ( $\rho = 3,18$  g/cm<sup>3</sup>) näherungsweise die Dicke der Kupferschicht, und daraus die Rate bzw. auch die Konzentration von Kupfer in der Schicht berechnen.

In Abbildung 5.21 sind drei mit Kupfer dotierte Magnesiumfluorid-Schichten zu sehen. Diese wurden durch gleichzeitiges Aufdampfen von MgF<sub>2</sub> und Cu hergestellt. Die Probe MgF<sub>2</sub>-Cu-03 ist 26,6 mm lang und hat eine maximale Schichtdicke von  $1020 \pm 24$  nm. Bei der Probe MgF<sub>2</sub>-Cu-05 wurde eine Länge von 26,6 mm und eine maximale Dicke von  $930 \pm 29$  nm gemessen. Die Probe MgF<sub>2</sub>-Cu-06 ist 27 mm lang und hat eine maximale Schichtdicke von  $714 \pm 27$  nm.



Abbildung 5.21: Eingescannte Cu-dotierte  $MgF_2$ -Schichten ((a)  $MgF_2$ -Cu-03, (b)  $MgF_2$ -Cu-05, (c)  $MgF_2$ -Cu-06).

An den eingescannten Proben ist erkennbar, dass die Cu-Konzentration bei der Probe  $MgF_2$ -Cu-03 am geringsten und bei der Probe  $MgF_2$ -Cu-06 am höchsten ist. Die Konzentration der Probe  $MgF_2$ -Cu-05 liegt dazwischen. Mit den oberen Überlegungen ergeben sich die folgenden grobe Abschätzungen für Konzentrationen von Cu in den dotierten  $MgF_2$ -Schichten.

Probe	$R_{MgF_2}~({ m nm/s})$	$R_{Cu}~({ m nm/s})$	$c_{Cu} (\mathrm{wt} \%)$
MgF <sub>2</sub> -Cu-03	14,5	0,57	4
MgF <sub>2</sub> -Cu-05	13,5	1,14	8
MgF <sub>2</sub> -Cu-06	12,0	1,78	13

Tabelle 5.9: Grobe Abschätzung der Beschichtungsraten R und der Cu-Konzentration  $c_{Cu}$ .

Auffallend in der optischen Erscheinung der mit Cu dotierten MgF<sub>2</sub>-Schichten ist, dass sie bei geringen Cu-Konzentrationen die typisch rötliche Färbung für Kupfer haben, bei höheren Cu-Konzentrationen aber eher schwarz aussehen. Die farbliche Veränderung der Schicht könnte daher kommen, dass die Schicht ab einer gewissen Cu-Konzentration nicht mehr aus Cu und MgF<sub>2</sub> besteht, sondern zum Teil aus anderen Verbindungen. Die exakte Zusammensetzung der Schicht wurde allerdings nicht genauer untersucht.

Analog zu den Metallschichten und den dielektrischen Schichten wurde für die mit Cu dotierten MgF<sub>2</sub>-Schichten die Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke für verschiedene Wellenlängen bestimmt.



Abbildung 5.22: Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke für die mit Cu dotierte MgF<sub>2</sub>-Schichten ((a) MgF<sub>2</sub>-Cu-03, (b) MgF<sub>2</sub>-Cu-05, (c) MgF<sub>2</sub>-Cu-06).

Wie zu erwarten war, sinkt die Transmission mit der Schichtdicke umso schneller, je höher die Cu-Konzentration ist. Bei geringen Cu-Konzentrationen verhält sich die Abhängigkeit der Transmission von der Schichtdicke ähnlich wie bei einem Dielektrikum. Es kommt innerhalb der Schicht zu Mehrfachreflexionen, was zu Interferenzen führt. Zusätzlich zu diesen Interferenzen kommt es zu einer kontinuierlichen Abschwächung der Transmission mit zunehmender Schichtdicke. Qualitativ stimmen diese Messungen gut mit den in Abschnitt 2.3.5 durchgeführten theoretischen Berechnungen überein. Für etwas höhere Cu-Konzentrationen in der MgF<sub>2</sub>-Schicht erhält man eine Abhängigkeit der Transmission von der Schichtdicke, die der von Metallen ähnlich sieht. Nur bei sehr geringen Schichtdicken sind leichte Interferenzen zu erkennen.

Die Bestimmung der Schichtdicke bei bekannter Transmission ist für geringe Cu-Konzentrationen, ähnlich wie bei reinen Dielektrika, schwierig, da es sich bei der Abhängigkeit der Transmission von der Schichtdicke um keine bijektive Funktion handelt. Je höher die Konzentration des Metalls ist, umso schwächer werden die Interferenzen, da das Licht bei den Mehrfachreflexionen stärker abgeschwächt wird. Ab einer gewissen Metallkonzentration sind die Interferenzen kaum noch zu erkennen. Die Transmission in Abhängigkeit der Schichtdicke ist dann, wie für Metalle, ein streng monoton fallender Zusammenhang. Dadurch kann man leicht aus der Transmission auf die Schichtdicke zurückrechnen.

In den Abbildungen 5.23 bis 5.25 wurden mithilfe von Gleichung (2.19) und durch fitten der Messergebnisse die optischen Konstanten der hergestellten Proben ermittelt, welche in Tabelle 5.10 zusammengefasst sind. Für die Probe MgF<sub>2</sub>-Cu-06 war es nicht möglich die optischen Konstanten allgemein zu bestimmen. Der Grund dafür könnte darin liegen, dass die Beschichtungsraten der einzelnen Komponenten nicht konstant waren, oder dass sich die optischen Konstanten für kleine Schichtdicken ändern. Ab ungefähr 200 nm nimmt die Transmission dann exponentiell ab, wobei die entsprechenden Extinktionskoeffizienten  $\kappa$  in Tabelle 5.10 abgegeben sind.



Abbildung 5.23: Durch fitten der gemessenen Transmissionswerte wurden die optischen Konstanten für  $MgF_2$ -Cu-03 ermittelt.



Abbildung 5.24: Durch fitten der gemessenen Transmissionswerte wurden die optischen Konstanten für  $MgF_2$ -Cu-05 ermittelt.



Abbildung 5.25: Durch fitten der gemessenen Transmissionswerte wurden die Extinktionskoeffizienten für  $MgF_2$ -Cu-06 ermittelt.
Probenname	Wellenlänge (nm)	n	$\kappa$
MgF <sub>2</sub> -Cu-03	469	1,60	0,0037
MgF <sub>2</sub> -Cu-03	521	1,57	0,0028
MgF <sub>2</sub> -Cu-03	637	1,60	0,0020
MgF <sub>2</sub> -Cu-05	469	1,61	0,013
MgF <sub>2</sub> -Cu-05	521	1,63	0,010
MgF <sub>2</sub> -Cu-05	637	1,65	0,009
MgF <sub>2</sub> -Cu-06	469	-	0,35
MgF <sub>2</sub> -Cu-06	521	-	0,33
MgF <sub>2</sub> -Cu-06	637	-	0,35

5.4 Transmissionsmessungen mittels Spektrometer

Tabelle 5.10: Zusammenfassung der durch fitten der gemessenen Transmissionswerte ermittelten optischen Konstanten n und  $\kappa$  für metall-dotierte dielektrische Schichten.

Die gemessenen reellen Brechungsindizes liegen im Bereich von 1,6 und sind somit größer als für reines MgF<sub>2</sub> (n = 1,38). Die gemessenen Extinktionskoeffizienten der Probe MgF<sub>2</sub>-Cu-06 sind mit 0,33-0,35 fast eine Größenordnung kleiner als für reines Kupfer (2,47-3,47), was auch mit der abgeschätzten Konzentration von Kupfer (12,92 wt%) in der Probe übereinstimmt.

## 5.4 Transmissionsmessungen mittels Spektrometer

Analog zu den Messungen mit dem Durchlichtscanner, wurden auch mit dem Spektrometer die transmittierten Intensitäten entlang einer Linie entsprechend der Abbildung 3.3 gemessen.

## 5.4.1 Metallschichten

#### Kupfer

In Abbildung 5.26 sind die gemessenen Transmissionsspektren von Kupfer (Cu-02) für unterschiedliche Schichtdicken zu sehen.



Abbildung 5.26: Transmissionsspektren von Kupfer (Cu-02) bei verschiedenen Schichtdicken d.

Durch Auswahl einer bestimmten Wellenlänge und Darstellung der Transmission über der Schichtdicke erhält man wieder die bekannte exponentielle Abnahme der Transmission mit der Schichtdicke, welche in Abbildung 5.27 graphisch veranschaulicht ist.



Abbildung 5.27: Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke bei der Probe Cu-02. (a) Lineare, (b) logarithmische Darstellung.

Analog zu den Messungen mit dem Durchlichtscanner werden zur Bestimmung der Absorptionskoeffizienten Fitgeraden in der logarithmischen Darstellung der transmittierten Intensität über der Schichtdicke verwendet. Vergleiche der aus den Fitgeraden ermittelten Extinktionskoeffizienten  $\kappa_M$  mit jenen aus der Literatur  $\kappa_L$  [15] bzw. Vergleiche der entsprechenden Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  sind in der folgenden Tabelle und den anschließenden Abbildungen zu sehen.

Wellenlänge (nm)	Energie (eV)	$\kappa_L$	$\kappa_M$	$\alpha_L \ (\mathrm{m}^{-1})$	$\alpha_M \ (\mathrm{m}^{-1})$	e
300	4,13	1,67	1,71	$6,99 \cdot 10^{7}$	$7,15\cdot 10^7$	0,021
350	3,54	1,89	1,96	$6,76 \cdot 10^{7}$	$7,03\cdot 10^7$	0,039
400	3,10	2,14	2,25	$6,72 \cdot 10^{7}$	$7,08\cdot 10^7$	0,053
450	2,76	2,40	2,57	$6,70 \cdot 10^{7}$	$7, 16 \cdot 10^{7}$	0,069
500	2,48	2,54	2,47	$6,38 \cdot 10^{7}$	$6,21\cdot 10^7$	0,026
550	2,25	2,60	2,41	$5,93\cdot 10^7$	$5,50\cdot 10^7$	0,072
600	2,07	3,07	3,03	$6,42 \cdot 10^{7}$	$6,34\cdot 10^7$	0,012
650	1,91	3,63	3,79	$7,02 \cdot 10^{7}$	$7,33\cdot 10^7$	0,044
700	1,77	4,15	4,28	$7,45 \cdot 10^{7}$	$7,67\cdot 10^7$	0,031
750	1,65	4,64	4,66	$7,77 \cdot 10^{7}$	$7,81 \cdot 10^{7}$	0,005
800	1,55	5,00	5,06	$7,85 \cdot 10^{7}$	$7,95\cdot 10^7$	0,013

Tabelle 5.11: Vergleich der gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [15] für Cu. *e* ist der relative Fehler der gemessenen Absorptionskoeffizienten in Bezug auf die Literaturwerte.



Abbildung 5.28: Vergleich der gemessenen Extinktionskoeffizienten bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [15] für Cu.

Die Fehlerbalken  $\Delta \kappa$  bzw.  $\Delta \alpha$  wurden analog zu den Messungen mittels Durchlicht-

scanner berechnet (siehe Gleichungen (5.2) bis (5.6)).

Da man mithilfe des Spektrometers Transmissionsspektren über einen breiten Wellenlängenbereich und für unterschiedliche Sichtdicken aufnehmen kann, ist es möglich die Abhängigkeit des Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten von der Wellenlänge über einen weiten Bereich zu charakterisieren. Beim Durchlichtscanner hingegen ist man auf die drei vorgegebenen Wellenlängen eingeschränkt.

Wie schon bei den Messungen mithilfe des Durchlichtscanners erhält man für Kupfer ein Minimum der Absorption im grünen Wellenlängenbereich. Ein Vergleich der relativen Fehler e der gemessenen Absorptionskoeffizienten der Spektrometermessung und der Messung mit dem Durchlichtscanner in Bezug auf die Literaturwerte ergibt, dass diese für Kupfer in etwa dieselbe Größe haben.

#### Silber

Die Transmissionsspektren von Silber (Ag-02) weisen ein ausgeprägtes Maximum im UV-Bereich auf, welches bis in den blauen sichtbaren Bereich des Lichtes reicht. Dieses Ergebnis deckt sich sowohl mit den theoretischen Berechnungen aus Abschnitt 2.3.5, als auch mit dem bläulichen Erscheinungsbild der Probe und dem Minimum des Absorptionskoeffizienten im kurzwelligen Bereich (siehe Abb. 5.31).



Abbildung 5.29: Transmissionsspektren von Silber (Ag-02) bei verschiedenen Schichtdicken d.



Abbildung 5.30: Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke für die Probe Ag-02. (a) Lineare, (b) logarithmische Darstellung.

Im Gegensatz zu den anderen untersuchten Metallen treten für Silber bei der Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke in einem Bereich von 0 bis 15 nm auffällig starke Interferenzen auf. Bei ungefähr 2 nm tritt ein Maximum der Transmission für Wellenlängen im roten Bereich auf und bei ungefähr 11 nm befindet sich ein Maximum für Wellenlängen im blauen Bereich. Diese Maxima der Transmission für eine bestimmte Wellenlänge sind auch mit freiem Auge beim Ansehen der Probe erkennbar (siehe Abb. 5.5). In diesem Bereich der Interferenzen könnte es schwierig werden, aus der gemessenen Transmission auf die Schichtdicke zurückzuschließen. Zur Bestimmung der Absorptionskoeffizienten wurden Fitgeraden in einem Schichtdickenbereich von 20 - 60 nm verwendet, in dem keine Interferenzen mehr auftreten.

Wellenlänge (nm)	Energie (eV)	$\kappa_L$	$\kappa_M$	$\alpha_L \ (\mathrm{m}^{-1})$	$\alpha_M \ (\mathrm{m}^{-1})$	e
300	4,13	0,91	0,86	$3,82 \cdot 10^{7}$	$3,61\cdot 10^7$	0,056
381	3,25	1,86	1,55	$6, 13 \cdot 10^{7}$	$5,11\cdot 10^7$	0,167
413	3,00	2,27	2,01	$6,90 \cdot 10^{7}$	$6,11\cdot 10^7$	0,114
450	2,76	2,68	2,46	$7,48 \cdot 10^{7}$	$6,88\cdot 10^7$	0,081
495	2,50	3,09	2,93	$7,83 \cdot 10^{7}$	$7,42\cdot 10^7$	0,053
550	2,25	3,62	3,51	$8,28 \cdot 10^{7}$	$8,02\cdot 10^7$	0,031
600	2,07	4,04	3,90	$8,46 \cdot 10^{7}$	$8,18\cdot 10^7$	0,034
650	1,91	4,50	4,35	$8,70 \cdot 10^{7}$	$8,40 \cdot 10^{7}$	0,034
700	1,77	4,92	4,77	$8,83 \cdot 10^{7}$	$8,56\cdot 10^7$	0,031
750	1,65	5,30	5,12	$8,87 \cdot 10^{7}$	$8,58 \cdot 10^{7}$	0,033
800	1,55	5,63	5,54	$8,84 \cdot 10^{7}$	$8,70 \cdot 10^{7}$	0,016

Tabelle 5.12: Vergleich der gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [15] für Ag. *e* ist der relative Fehler der gemessenen Absorptionskoeffizienten in Bezug auf die Literaturwerte.



Abbildung 5.31: Vergleich der gemessenen Extinktionskoeffizienten bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [15] für Ag.

Die gemessenen Absorptions- bzw. Extinktionskoeffizienten stimmen großteils gut mit den Literaturwerten überein. Im sichtbaren und im IR-Bereich sind die Fehler sehr klein, ausschließlich im UV-Bereich sind die Abweichungen etwas größer. Die relativen Fehler der gemessenen Absorptionskoeffizienten für die Messung mit dem Durchlichtscanner sind von ähnlicher Größe wie jene bei der Spektrometermessung.

#### Gold

In Abbildung 5.32 sind die gemessenen Transmissionsspektren von Gold (Au-03) für unterschiedliche Schichtdicken zu sehen.



Abbildung 5.32: Transmissionsspektren von Gold (Au-03) bei verschiedenen Schichtdicken d.

Aus diesen Transmissionsspektren ergeben sich die in Abbildung 5.33 dargestellten Abhängigkeiten der Transmission von der Schichtdicke für verschiedene Wellenlängen und die in Tabelle 5.13 angegebenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten.



Abbildung 5.33: Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke für die Probe Au-03. (a) Lineare, (b) logarithmische Darstellung.

Wellenlänge (nm)	Energie (eV)	$\kappa_L$	$\kappa_M$	$\alpha_L \ (\mathrm{m}^{-1})$	$\alpha_M \ (\mathrm{m}^{-1})$	e
300	4,13	1,78	1,98	$7,46 \cdot 10^{7}$	$8, 31 \cdot 10^{7}$	0,114
350	3,54	1,73	1,87	$6,21 \cdot 10^{7}$	$6,71 \cdot 10^{7}$	0,081
400	3,10	1,81	1,95	$5,68 \cdot 10^{7}$	$6, 11 \cdot 10^{7}$	0,075
450	2,76	1,76	1,87	$4,91 \cdot 10^{7}$	$5,22\cdot 10^7$	0,061
500	2,48	1,64	1,77	$4, 12 \cdot 10^{7}$	$4,45\cdot 10^7$	0,081
550	$2,\!25$	2,38	2,49	$5,44\cdot 10^7$	$5,68\cdot 10^7$	0,044
600	$2,\!07$	3,00	3,18	$6,28 \cdot 10^{7}$	$6,67\cdot 10^7$	0,061
650	1,91	3,48	3,78	$6,73 \cdot 10^{7}$	$7,30\cdot 10^7$	0,085
700	1,77	3,95	4,32	$7,09 \cdot 10^{7}$	$7,76\cdot 10^7$	0,094
750	1,65	4,37	4,83	$7,32 \cdot 10^{7}$	$8,09 \cdot 10^{7}$	0,105
800	1,55	4,80	5,20	$7,54 \cdot 10^{7}$	$8, 16 \cdot 10^{7}$	0,083

Tabelle 5.13: Vergleich der gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [15] für Au. *e* ist der relative Fehler der gemessenen Absorptionskoeffizienten in Bezug auf die Literaturwerte.



Abbildung 5.34: Vergleich der gemessenen Extinktionskoeffizienten bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [15] für Au.

Die gemessene Abhängigkeit des Absorptionskoeffizienten von der Wellenlänge hat

qualitativ dieselbe Form wie in der Literatur. Man erhält für Gold ein Minimum der Absorption bei ungefähr 500 nm (grün-blau), was sich qualitativ auch mit den Ergebnissen des Durchlichtscanners deckt. Zahlenmäßig sind die relativen Fehler der Absorptionskoeffizienten in Bezug auf die Literaturwerte etwas größer als bei Kupfer und Silber. Ein Vergleich der relativen Fehler der gemessenen Absorptionskoeffizienten von Spektrometermessung und der Messung mit dem Durchlichtscanner ergibt, dass die Spektrometermessung etwas exaktere Ergebnisse liefert.

#### Aluminium

In Abbildung 5.35 sind die gemessenen Transmissionsspektren von Aluminium (Al-02) für unterschiedliche Schichtdicken zu sehen. Daraus lässt sich wiederum die Abhängigkeit der Transmission von der Schichtdicke und der Absorptionskoeffizient für verschiedene Wellenlängen ermitteln.



Abbildung 5.35: Transmissionsspektren von Aluminium (Al-02) bei verschiedenen Schichtdicken d.



Abbildung 5.36: Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke für die Probe Al-02. (a) Lineare, (b) logarithmische Darstellung.

Wellenlänge (nm)	Energie (eV)	$\kappa_L$	$\kappa_M$	$\alpha_L \ (\mathrm{m}^{-1})$	$\alpha_M \ (\mathrm{m}^{-1})$	e
300	4,13	3,62	3,45	$1,52 \cdot 10^{8}$	$1,45\cdot 10^8$	0,046
350	3,54	4,25	4,21	$1,52 \cdot 10^{8}$	$1,51\cdot 10^8$	0,009
400	3,10	4,86	4,95	$1,53 \cdot 10^{8}$	$1,55\cdot 10^8$	0,019
450	2,76	5,48	5,95	$1,53 \cdot 10^{8}$	$1,66\cdot 10^8$	0,087
516	2,40	6,28	6,64	$1,53 \cdot 10^{8}$	$1,61\cdot 10^8$	0,056
550	2,25	6,70	7,28	$1,53 \cdot 10^{8}$	$1,66\cdot 10^8$	0,087
600	2,07	7,31	7,80	$1,53 \cdot 10^{8}$	$1,63\cdot 10^8$	0,067
650	1,91	7,82	8,32	$1,51 \cdot 10^{8}$	$1,61\cdot 10^8$	0,064
700	1,77	8,29	8,64	$1,49 \cdot 10^{8}$	$1,55\cdot 10^8$	0,042
750	1,65	8,62	8,77	$1,44 \cdot 10^{8}$	$1,47\cdot 10^8$	0,017
800	1,55	8,45	8,86	$1,33\cdot 10^8$	$1,39\cdot 10^8$	0,048

Tabelle 5.14: Vergleich der gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [15] für Al. *e* ist der relative Fehler der gemessenen Absorptionskoeffizienten in Bezug auf die Literaturwerte.



Abbildung 5.37: Vergleich der gemessenen Extinktionskoeffizienten bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [15] für Al.

Aluminium zeigt über den gesamten gemessenen Wellenlängenbereich eine relativ hohe, konstante Absorption. Die mittels Spektrometer ermittelten Absorptionskoeffizienten stimmen im gesamten betrachteten Wellenlängenbereich (300 - 800 nm) relativ gut mit den dazugehörigen Literaturwerten überein. Die relativen Fehler der mit dem Spektrometer gemessenen Absorptionskoeffizienten sind etwas kleiner als jene des Durchlichtscanners.

#### Molybdän

In Abbildung 5.38 sind die gemessenen Transmissionsspektren von Molybdän (Mo-03) für unterschiedliche Schichtdicken dargestellt.



Abbildung 5.38: Transmissionsspektren von Molybdän (Mo-03) bei verschiedenen Schichtdicken d.



Abbildung 5.39: Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke für die Probe Mo-03. (a) Lineare, (b) logarithmische Darstellung.

Wellenlänge (nm)	Energie (eV)	$\kappa_L$	$\kappa_M$	$\alpha_L \ (\mathrm{m}^{-1})$	$\alpha_M \ (\mathrm{m}^{-1})$	e
300	4,13	3,70	4,22	$1,55 \cdot 10^{8}$	$1,77 \cdot 10^{8}$	0,139
350	3,54	3,22	3,52	$1, 16 \cdot 10^{8}$	$1,26\cdot 10^8$	0,092
400	3,10	3,21	3,50	$1,01 \cdot 10^{8}$	$1, 10 \cdot 10^{8}$	0,091
450	2,76	3,47	3,67	$9,69\cdot 10^7$	$1,03\cdot 10^8$	0,059
500	2,48	3,75	3,85	$9,42 \cdot 10^{7}$	$9,69\cdot 10^7$	0,028
550	2,25	3,51	3,72	$8,02 \cdot 10^{7}$	$8,49\cdot 10^7$	0,059
600	2,07	3,49	3,67	$7,31 \cdot 10^{7}$	$7,68\cdot 10^7$	0,050
650	1,91	3,58	3,77	$6,92\cdot 10^7$	$7,28\cdot 10^7$	0,053
700	1,77	3,56	3,78	$6,39\cdot10^7$	$6,78\cdot 10^7$	0,062
750	1,65	3,46	3,84	$5,80 \cdot 10^{7}$	$6,43\cdot 10^7$	0,110
800	1,55	3,35	3,82	$5,26\cdot 10^7$	$5,99\cdot 10^7$	0,139

Tabelle 5.15: Vergleich der gemessenen Extinktions- bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [18] für Mo. *e* ist der relative Fehler der gemessenen Absorptionskoeffizienten in Bezug auf die Literaturwerte.



Abbildung 5.40: Vergleich der gemessenen Extinktionskoeffizienten bzw. Absorptionskoeffizienten (Index M) mit Literaturwerten (Index L) aus [18] für Mo.

Ähnlich wie Aluminium zeigt auch Molybdän über den gesamten gemessenen Wel-

lenlängenbereich eine relativ konstante Absorption. Die mithilfe des Spektrometers gemessenen Absorptionskoeffizienten liegen im gesamten betrachteten Wellenlängenbereich (300 - 800 nm) nahe den Literaturwerten. Die relativen Fehler der mit dem Spektrometer gemessenen Absorptionskoeffizienten sind etwas geringer als jene mit dem Durchlichtscanner ermittelten.

### 5.4.2 Dielektrische Schichten

#### Magnesiumfluorid

Mithilfe des Spektrometers wurde an drei unterschiedlichen Positionen einer MgF<sub>2</sub>-Probe (MgF<sub>2</sub>-04), das bedeutet bei drei verschiedenen Schichtdicken, ein Transmissionsspektrum aufgenommen. Die Distanz zwischen den Messpunkten beträgt jeweils 5 mm. Mithilfe des in Abschnitt 2.3.5 beschriebenen Modells ist es möglich, die Transmission eines Dielektrikums in Abhängigkeit von zwei Parametern, der Schichtdicke dund dem Brechungsindex n, anzugeben. Durch Fitten dieser beiden Parameter kann die Schichtdicke und der Brechungsindex bestimmt werden. In Abbildung 5.41 sind die aufgenommen Spektren, gemeinsam mit den gefitteten Kurven, dargestellt. In der darauffolgenden Tabelle 5.16 sind die daraus ermittelten Fitparameter zusammengefasst.



Abbildung 5.41: Transmissionsspektren von  $MgF_2$  auf Glassubstrat ( $MgF_2$ -04) für unterschiedliche Schichtdicken d.

Messpunkt	d (nm)	n
1	477	1,38
2	617	1,38
3	752	1,38

Tabelle 5.16: Ermittelte Fitparameter für die Schichtdicke d und den reellen Brechungsindex n.

Die Form der gefitteten Kurven stimmt gut mit den gemessenen Spektren überein. Der durch die Fitparameter bestimmte reelle Brechungsindex von 1,38 entspricht genau dem in der Literatur gefundenen Wert [16]. Der Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten auf der Probe beträgt jeweils 5 mm. Da die Abstände gleich sind, müssen auch die Zunahmen der Schichtdicke zwischen den einzelnen Messpunkten konstant sein. Das ist annähernd erfüllt, da die Zunahme der Schichtdicke zwischen ersten und zweiten Messpunkt 140 nm und zwischen zweiten und dritten Messpunkt 135 nm beträgt. Mithilfe der aus  $d_{max}$  und L berechneten Steigung s der MgF<sub>2</sub>-Schicht erhält man für Messpunkte in einer Entfernung von 5 mm eine Schichtdickendifferenz von  $150 \pm 3$  nm.

#### Aluminiumoxid

Analog zu Magnesiumfluorid wurden für Aluminiumoxid auf Glassubstrat (AlOx-02) einige Transmissionsspektren bei unterschiedlichen Schichtdicken aufgenommen, und daraus durch fitten der Parameter d und n die Schichtdicke und der Brechungsindex ermittelt.



Abbildung 5.42: Transmissionsspektren von Aluminiumoxid auf Glassubstrat (AlOx-02) für unterschiedliche Schichtdicken *d*.

Messpunkt	d (nm)	n
1	390	1,74
2	445	1,74
3	500	1,74

Tabelle 5.17: Ermittelte Fitparameter für die Schichtdicke d und den reellen Brechungsindex n.

Die gefitteten Kurven stimmen gut mit den gemessenen Spektren überein. Mithilfe

der Fitparameter wurde ein Brechungsindex von 1,74 für Aluminiumoxid bestimmt. Dieser Wert liegt immer noch unterhalb des Literaturwertes  $(1,759 - 1,784 \ [16])$ , aber nicht so viel wie der mit dem Durchlichtscanner ermittelte Wert (siehe Abschnitt 5.3.2). Der Grund für den zu geringen Brechungsindex *n* könnten Poren in der Schicht sein. Die unterschiedlichen Messergebnisse für Scanner und Spektrometer liegen möglicherweise an der unterschiedlichen Beleuchtung der Probe. Die eher punktförmige Beleuchtung beim Spektrometer führt zu genaueren Messergebnissen als die ganzflächige Beleuchtung beim Scanner, welche eventuell zu Mehrfachstreuung aufgrund des teilweise schrägen Lichteinfalles führt.

Der Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten auf der Probe beträgt jeweils 2,5 mm. Aufgrund der äquidistanten Messpunkte auf der Probe, muss die Zunahme der Schichtdicke wiederum konstant sein. Diese Erwartung wird von den Messergebnissen erfüllt, da der Anstieg der Schichtdicke sowohl zwischen ersten und zweiten Messpunkt, als auch zwischen zweiten und dritten Messpunkt 55 nm beträgt. Mithilfe der aus  $d_{max}$  und L berechneten Steigung s der AlOx-Schicht erhält man für Messpunkte in einer Entfernung von 2,5 mm eine Schichtdickendifferenz von 67 ± 3 nm.

#### 5.4.3 Metall-dotierte dielektrische Schichten

Abbildung 5.43 zeigt Transmissionsspektren der aufgedampften mit Kupfer dotierten Magnesiumfluorid-Schichten ((a) MgF<sub>2</sub>-Cu-03, (b) MgF<sub>2</sub>-Cu-05, (c) MgF<sub>2</sub>-Cu-06) für unterschiedliche Schichtdicken.



Abbildung 5.43: Transmissionsspektren der Cu-dotierten MgF<sub>2</sub>-Schichten für unterschiedliche Schichtdicken d ((a) MgF<sub>2</sub>-Cu-03, (b) MgF<sub>2</sub>-Cu-05, (c) MgF<sub>2</sub>-Cu-06).

Bei einer Darstellung der Transmission in Abhängigkeit der Schichtdicke erhält man ähnliche Ergebnisse wie mit dem Durchlichtscanner, allerdings für beliebige Wellenlängen.



Abbildung 5.44: Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke für Cu-dotierte MgF<sub>2</sub>-Schichten ((a) MgF<sub>2</sub>-Cu-03, (b) MgF<sub>2</sub>-Cu-05, (c) MgF<sub>2</sub>-Cu-06). Die bunten Linien sind Messergebnisse, die schwarzen Linien sind gefittete Kurven.

Mithilfe von Gleichung (2.19) und durch fitten der gemessenen Transmissionen wurden die in Tabelle 5.18 angegebenen optischen Konstanten bestimmt. Exemplarisch wurden einige gefittete Kurven in Abbildung 5.44 eingezeichnet.

Probenname	Wellenlänge (nm)	n	$\kappa$
MgF <sub>2</sub> -Cu-03	300	1,59	0,027
$MgF_2$ -Cu-03	400	$1,\!59$	0,014
$MgF_2$ -Cu-03	500	1,60	0,004
$MgF_2$ -Cu-03	600	1,60	0,002
$MgF_2$ -Cu-03	700	1,60	0,001
MgF <sub>2</sub> -Cu-05	300	1,66	0,054
$MgF_2$ -Cu-05	400	1,63	0,034
$MgF_2$ -Cu-05	500	1,65	0,025
$MgF_2$ -Cu-05	600	$1,\!65$	0,017

5.4 Transmissionsmessungen mittels Spektrometer

 $MgF_2$ -Cu-05

 $MgF_2$ -Cu-06 300 0,37- $MgF_2$ -Cu-06 400 0,35\_  $MgF_2$ -Cu-06 5000,30 \_  $MgF_2$ -Cu-06 600 0,33 \_ 700  $MgF_2$ -Cu-06 0,28\_

700

1,60

0,014

Tabelle 5.18: Zusammenfassung der durch Fitten der gemessenen Transmissionswerte ermittelten optischen Konstanten n und  $\kappa$  für metall-dotierte dielektrische Schichten.

Wie schon in Abschnitt 5.3.3 bei den Messungen mittels Durchlichtscanner beschrieben, ist es bei einer ausreichend hohen Cu-Konzentrationen möglich, aus der Transmission bei einer bestimmten Wellenlänge auf die Schichtdicke zurückzuschließen, da es sich bei der Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke um einen bijektiven Zusammenhang handelt.

Bei geringen Cu-Konzentrationen ist es nicht möglich die Schichtdicke durch Messung der Transmission bei einer bestimmten Wellenlänge zu bestimmen. Eine weitere Möglichkeit zur Schichtdickenbestimmung, die auch schon bei den dielektrischen Schichten verwendet wurde, wäre die theoretische Berechnung des gesamten Transmissionsspektrums mit anschließender Anpassung der Fitparameter. Diese Methode zur Schichtdickenbestimmung wäre allerdings im Fall dotierter Schichten um ein Vielfaches komplexer. Im Gegensatz zu den untersuchten dielektrischen Schichten, die absorptionsfrei waren und deren reelle Brechungsindizes n annähernd konstant für verschiedene Wellenlängen waren, liegen bei den dotierten Schichten auf der einen Seite keine absorptionsfreien Schichten vor, und auf der anderen Seite können die optischen Konstanten  $(n, \kappa)$  für verschiedene Wellenlängen unterschiedlich sein.

Für Cu-Konzentrationen, bei denen der Zusammenhang zwischen Transmission und Schichtdicke nicht eindeutig ist, besteht die Möglichkeit, die Schichtdicke zumindestens abzuschätzen. Je höher die Cu-Konzentration, umso exakter ist diese Abschätzung möglich. Bei den betrachteten Proben wäre es generell günstiger die Schichtdicke mithilfe der Transmission bei kurzwelligem Licht zu bestimmen, da die Abschwächung bei diesen Wellenlängen am stärksten ist.

# 5.5 Vergleich der Transmissionsmessungen mittels Scanner und Spektrometer

Die Transmissionsmessungen an den Schichten mit linearem Schichtdickengradienten haben sowohl mithilfe des Scanners als auch mithilfe des Spektrometers zu guten Ergebnissen geführt. Allerdings haben beide Messmethoden unterschiedliche Vor- und Nachteile.

Der Scanner hat im Vergleich zum Spektrometer einen deutlich niedrigeren Preis und der experimentelle Aufwand ist wesentlich geringer. Außerdem besitzt der Scanner eine hohe Ortauflösung. Ein Nachteil bei der Verwendung des Scanners ist die geringe Wellenlängensensitivität. Die Transmissionsmessungen mittels Scanner sind auf wenige vorgegebene Wellenlängen beschränkt. Ein weiterer Nachteil ist die notwendige Kalibrierung. Da der Scanner im Allgemeinen nicht als Messgerät verwendet wird, sind in dessen Beschreibung keine Details zum Sensor oder zur Spektralcharakteristik der Lampe enthalten.

Das Spektrometer hat im Vergleich zum Scanner sowohl eine hohe Wellenlängensensitivität und auch eine hohe Wellenlängenauflösung. Allerdings hat das Spektrometer einen wesentlich höheren Preis und der experimentelle Aufwand ist größer als bei den Messungen mittels Scanner. Weiters ist die Anwendbarkeit des Spektrometers zur Transmissionsmessung an Granulaten fraglich.

Unabhängig von der verwendeten Messmethode zur Bestimmung der Transmission ist die Herstellung der Schichten mit linearem Schichtdickengradienten vorteilhaft. Der Zeitaufwand zur optischen Charakterisierung eines Materials bzw. zur Bestimmung der optischen Konstanten ist relativ gering, da man mithilfe von einer Probe die Transmission bei vielen verschiedenen Schichtdicken ermitteln kann. Außerdem ist gewährleistet, dass die unterschiedlichen Schichtdicken bei denselben Bedingungen hergestellt wurden.

## 5.6 Transmissionsmessungen bei Diamantgranulat

Analog zu den in Abschnitt 4 durchgeführten Simulationen wurden Transmissionsmessungen bei Diamantgranulat, das mit unterschiedlichen Materialien beschichtet wurde, durchgeführt. Für metallische Beschichtungen haben die Simulationen gezeigt, dass sich das Maximum im Histogramm der Transmission für größere Schichtdicken zu geringeren Transmissionen verschiebt (siehe Abb. 4.1). Auch die maximale auftretende Transmission wird kleiner. Für dielektrische Schichten auf Diamantgranulat hat man kaum eine Verschiebung des Maximums im Histogramm der Transmission im Vergleich zu den unbeschichteten Diamanten erkennen können (siehe Abb. 4.2). Bei den Simulationen für metall-dotierte dielektrische Beschichtungen auf Diamanten hat sich das Maximum im Histogramm der Transmission, ähnlich zu den Metallen, für größere Schichtdicken zu geringeren Transmissionen verschoben (siehe Abb. 4.4). Allerdings war diese Verschiebung kleiner und die Berechnung der Schichtdicke aus den Histogrammen schwieriger.

Zum besseren Verständnis soll die Histogrammdarstellung dieses Abschnittes kurz erläutert werden. Die eingescannten Bilder der Diamanten wurden in die drei Farbkanäle aufgespalten. Dadurch erhält man für jeden Farbkanal ein Bild in Graustufen, wobei jedem Bildpunkt ein Helligkeitswert zwischen 0 und 255 zugeordnet wird. Der Helligkeitswert 0 wird durch Schwarz dargestellt und entspricht einer Transmission von 0% an diesem Punkt für den entsprechenden Farbkanal. Der Wert 255 wird durch Weiß dargestellt und entspricht einer Transmission von 100% an dem jeweiligen Bildpunkt.

## 5.6.1 Übersicht über Diamantproben

In Tabelle 5.19 ist eine Zusammenfassung der wichtigsten Beschichtungsparameter aller Diamantproben zu finden. Weitere Beschichtungsparameter sind im Anhang nachzulesen. Das Beschichtungsmaterial ist jeweils am Probenamen zu erkennen.

Probenname	Verfahren	Diamantgröße	$p_V(10^{-6} \text{ mbar})$	$t \pmod{t}$
S-7080-Ag-15min	S	Mesh 7080	2,0	15
S-7080-Ag-05min	S	Mesh 7080	6,0	5
S-7080-Ag-02min	S	Mesh 7080	0,6	2
S-4050-Ag-02min	S	Mesh 4050	6,0	2
S-4050-Ag-01min	S	Mesh~4050	$0,\!5$	1
S-4050-Ag-30sec	S	Mesh~4050	6,0	$0,\!5$
S-4050-Ag-15sec	S	Mesh 4050	1,0	0,25
S-4050-Ti-02min	S	Mesh 4050	1,0	2
S-4050-Ti-01min	S	Mesh~4050	0,5	1
S-4050-Ti-30sec	S	Mesh~4050	0,1	$0,\!5$
S-4050-AlOx-65min	RS	Mesh 4050	7,0	65
S-4050-AlOx-172min	RS	Mesh 4050	9,0	172
S-4050-AlOx-120min	RS	Mesh 4050	4,0	120

Tabelle 5.19:  $p_V$  bezeichnet den Druck in der Vakuumkammer vor Beginn des Beschichtungsprozesses und t die Beschichtungszeit. Außerdem ist noch das Verfahren zur Herstellung der Schicht angegeben (S=Sputtern, RS=Reaktives Sputtern).

## 5.6.2 Vergleich der unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung der mittleren transparenten Bereiche der Diamanten

In Abschnitt 3.5 wurden zwei unterschiedliche Methoden zur Ermittlung der mittleren transparenten Bereiche der Diamanten beschrieben. Anhand einer Transmissionsmessung bei Diamanten mit Silberbeschichtung (S-4050-Ag-01min) soll bestimmt werden, welche dieser beiden Methoden die besseren Ergebnisse liefert.

Abbildung 5.45 zeigt das durch zweifache Kantendetektion ermittelte Histogramm der

Helligkeitswerte. Die drei unterschiedlichen Kurven entstanden dadurch, dass man bei der Entfernung der unbrauchbaren Kanten, sowohl bei den äußeren Rändern als auch bei den inneren Kanten, einen einzelnen Diamanten als Referenz angibt (siehe Abb. 3.9 (c)). Je nachdem welchen Diamanten man für diesen Schritt auswählt, bleiben unterschiedliche Bereiche zur endgültigen Messung übrig.



Abbildung 5.45: Histogramm der Helligkeitswerte der Probe S-4050-Ag-01min für  $\lambda = 521$  nm. Messbereich wurde durch zweifache Kantendetektion ermittelt (siehe Abb.3.9 (e)).

In Abbildung 5.45 ist zu sehen, dass bei einer Helligkeit von 59 das Maximum der drei gemessenen Histogramme liegt. Bei dieser speziellen Probe hat die Methode der zweifachen Kantendetektion relativ gut funktioniert. Man kann allerdings erkennen, dass die erhaltenen Kurven stark verrauscht sind. Der Grund dafür ist die geringe Anzahl an Messpunkten, die bei dieser Methode für die tatsächliche Messung übrig bleiben, weil vor allem bei der Detektion und anschließenden Auswahl der inneren Kanten sehr viele Diamanten wegfallen, da die inneren transparenten Flächen sehr unterschiedliche Formen haben. Zum Vergleich der beiden Messmethoden: Bei der blauen Kurve in Abbildung 5.45 wurde an 8432 Punkten die Helligkeit gemessen, bei der orangen Kurve (x=16) in Abbildung 5.46 wurde mit 320316 Punkten ein deutlich größerer Bereich vermessen.

Das eben beschriebene Problem wird noch deutlicher, wenn die Beschichtungszeit und

somit auch die Schichtdicke der aufgebrachten Schicht größer werden, da dann der Unterschied der Helligkeitswerte zwischen der Mitte der Diamanten und dem Rand geringer wird.

Mithilfe der zweiten beschriebenen Messmethode, das bedeutet durch sukzessive Verkleinerung der Messbereiche (siehe Abb. 3.10), erhält man für dieselbe Probe die in Abbildung 5.46 dargestellten Histogramme.



Abbildung 5.46: Histogramm der Helligkeitswerte der Probe S-4050-Ag-01min für  $\lambda = 521$  nm. Messbereich wurde durch einfache Kantendetektion und sukzessive Verkleinerung der Bereiche ermittelt (siehe Abb.3.9 (f)). x ist die Anzahl der Bildpunkte, die am Rand der Diamant-Bereiche entfernt wurde.

Bei den ersten Histogrammen (x=0 bis x=8), bei denen erst ein kleiner Teil des Randes vom Messbereich entfernt wurde, kann man ein sehr deutliches Maximum bei einer Helligkeit von ungefähr 5 (fast schwarz) erkennen, aber kein weiteres bei größeren Helligkeiten. Dieser Peak stammt zu einem Teil von dem noch vorhandenen Rand (siehe Abb. 3.10). Zum anderen Teil stammt er von Diamanten schlechter Qualität, weshalb er auch bei den nachfolgenden Spektren nicht vollständig verschwindet.

Reduziert man den relevanten Messbereich weiter, indem man einen breiteren Rand entfernt (x=12 bis x=24), wird neben dem bereits bestehenden Maximum beim Wert 5 noch ein zweites Maximum bei einer Helligkeit von 58 sichtbar. Dieses stammt von den mittleren Bereichen der Diamanten und stimmt sehr gut mit dem Maximum der anderen Messmethode überein.

Durch das sukzessive Verkleinern der Bereiche nimmt die Anzahl der Messpunkte ab und die Schwankungen in den Messwerten steigen an, bis das schwach ausgeprägt Maximum nicht mehr zu erkennen ist (x=26). Das bedeutet beim ständigen Verkleinern der Messbereiche wird irgendwann ein Maximum erkennbar, das zuerst deutlicher wird, aber bei weiterer Verkleinerung im stark schwankenden Messergebnis verschwindet. Bei jenen Histogrammen, wo ein Maximum erkennbar ist, befindet es sich aber immer ungefähr an der gleichen Stelle. Für die weiteren Auswertungen wird ausschließlich diese Variante zur Ermittlung der Histogramme verwendet, da so deutlich mehr Punkte in die Messung einfließen.

#### 5.6.3 Transmission der unbeschichteten Diamanten

Um über die Änderung der Transmission aufgrund der aufgebrachten Schicht auf den Diamanten eine Aussage treffen zu können, ist es notwendig, zuerst die Transmission des Klebestreifens und der unbeschichteten Diamanten zu bestimmen.

Die einfallende Intensität entspricht im Falle der mit dem Durchlichtscanner aufgenommenen Bilder für jeden Farbkanal der maximalen Helligkeit von 255. Der Klebestreifen bewirkt einen Abfall der gemessenen Helligkeit vom Maximalwert 255 auf 239. Daraus ergibt sich mithilfe der Gleichung (3.4)

$$T_K = \frac{239}{255} = 0,937. \tag{5.7}$$

In der Abbildung 5.47 sind die Histogramme der transmittierten Intensitäten der unbeschichteten Diamanten für die Größen Mesh 4050 bzw. Mesh 7080 dargestellt.



Abbildung 5.47: Histogramm der transmittierten Intensitäten  $I_{DK}$  (siehe Abb. 3.8) der unbeschichteten Diamanten der Größe (a) Mesh 4050, (b) Mesh 7080 für  $\lambda = 521$  nm. x ist die Anzahl der Bildpunkte, die am Rand der Diamantbereiche entfernt wurden.

Die mittlere transmittierte Intensität der Diamanten der Größe Mesh 4050 beträgt 145, die mittlere transmittierte Intensität von Mesh 7080 ist 151. Im Histogramm der Diamanten der Größe Mesh 4050 treten im Bereich des Maximums ungewöhnliche Schwankungen auf. Aus diesem Grund wurde das Maximum durch Interpolation ermittelt.

Mithilfe der Gleichungen (3.4) und (5.7) lassen sich daraus die Transmissionen  $T_D$  für die unbeschichteten Diamanten verschiedener Größe bestimmen, welche in weiterer Folge zur Berechnung von  $T_S$  und folglich auch für die Bestimmung der Schichtdicke notwendig sind. Bezogen auf die Intensität, die nach dem Durchgang des Lichtes durch den Klebestreifen noch vorhanden ist, entsprechen die gemessenen Intensitäten einer Transmission von 60,7% für Mesh 4050 und einer Transmission von 63,2% für Mesh 7080.

Diamanten	Durchmesser (mm)	$I_{DK}$	$T_D$
Mesh 4050	0,35	145	0,607
Mesh 7080	0,20	151	0,632

### 5.6.4 Metallschichten auf Diamanten

Es wurden Messreihen mit verschiedenen Metallen (Ag, Ti) und unterschiedlichen Diamantgrößen durchgeführt (Beschichtungsparameter siehe Tabelle 5.19), wobei innerhalb einer Messreihe die Beschichtungszeit variiert wurde, um Metallschichten unterschiedlicher Schichtdicke auf den Diamanten zu erhalten. Bei der ersten Messreihe wurden Diamanten der Größe Mesh 7080 mit Silber beschichtet. Als Beschichtungszeiten wurden 15 Minuten, 5 Minuten und 2 Minuten gewählt. Bei einer Messung der Transmission der beschichteten Diamanten haben sich folgende Histogramme ergeben.



Abbildung 5.48: Histogramm der Helligkeitswerte von Ag-Schichten auf Diamanten (S-7080-Ag-05min, S-7080-Ag-02min) für  $\lambda = 521$  nm und unterschiedliche Beschichtungszeiten t.

Die einzelnen Histogramme in Abbildung 5.48 wurden mithilfe von Kantendetektion und Verkleinerung der ermittelten Bereiche der Diamanten gemessen. Für die unterschiedlichen Beschichtungszeiten wurde jeweils das optimale Histogramm ausgewählt, sodass das Maximum erkennbar ist und die Schwankungen der Messwerte noch nicht zu groß sind.

Für die Beschichtungszeit von 15 Minuten war abgesehen vom Maximum bei der Intensität 5 kein weiteres Maximum zu sehen. Das bedeutet, die Dicke der Schicht auf den Diamanten war bereits zu groß, um sie mithilfe der verwendeten optischen Messmethode zu bestimmen. Auch bei einer Beschichtungszeit von 5 Minuten ist das Maximum bei einer Intensität von 35 nur sehr schwer zu erkennen. Bei den Diamanten, die 2 Minuten lang beschichtet wurden, kann man ein deutliches Maximum bei einer Intensität von 58 sehen.

Weiters ist in Abbildung 5.48 erkennbar, dass das Maximum mit wachsender Beschichtungszeit nach links zu kleineren Helligkeiten wandert. Das ist klar, da die Transmission mit wachsender Beschichtungszeit und damit größerer Schichtdicke abnimmt. Aus demselben Grund verschiebt sich auch die maximale auftretende Helligkeit mit längeren Beschichtungszeiten zu geringeren Helligkeiten. Diese Ergebnisse haben auch die Simulationen ergeben.

Zum Vergleich der Messergebnisse wurden die Diamantproben zusätzlich noch händisch vermessen. Das bedeutet es wurden jeweils 20-40 Diamanten guter Qualität ausgewählt. Für jeden einzelnen Diamanten wurde die mittlere Transmissionen des inneren Bereiches ermittelt. Abschließend wurde noch der Mittelwert über alle ausgewählten Diamanten gebildet. Die händische Vermessung einzelner Diamanten wurde sowohl für unbeschichtete als auch für beschichtete Diamanten durchgeführt. Ein Vergleich der erzielten Ergebnisse von den Messungen mithilfe von DiamondView mit den Ergebnissen der händischen Messungen ist in Tabelle 5.21 zu sehen.

Diamanten	Durchmesser (mm)	$I_{DK}$ (DV)	$I_{DK}$ (H)
Mesh 4050	0,35	145	155
Mesh 7080	0,20	151	157

Für die unbeschichteten Diamanten wurden folgende Intensitäten gemessen:

Tabelle 5.20:  $I_{DK}$  ist die Intensität des Lichtes nach dem Durchgang durch den Diamanten und den Klebestreifen (siehe Abb. 3.8). DV bezeichnet die mithilfe von DiamondView und H die händisch ermittelten mittleren Intensitäten.

Probe	$I_{SDK}$ (DV)	$I_{SDK}$ (H)	$T_S$ (DV)	$T_S$ (H)
S-7080-Ag-05min	35	46	0,23	0,29
S-7080-Ag-02min	58	61	0,38	0,39

Für die beschichteten Diamanten erhält man daraus für die Transmission  $T_S$ :

Tabelle 5.21:  $I_{SDK}$  ist die Intensität des Lichtes nach dem Durchgang durch die Beschichtung, den Diamanten und den Klebestreifen (siehe Abb. 3.8). DV bezeichnet die mithilfe von DiamondView und H die händisch ermittelten mittleren Intensitäten bzw. Transmissionen.

Die gemessenen Intensitäten sind bei der händischen Vermessung der einzelnen Diamanten etwas höher als bei den Messungen mit DiamondView. Das gilt aber sowohl für die beschichteten, als auch für die unbeschichteten Diamanten. Die daraus berechneten Transmissionen stimmen allerdings relativ gut überein. Die Abweichung von 6% in der Transmission bei der Beschichtungszeit von 5 Minuten kann einerseits damit zusammenhängen, dass man die Lage des Maximums im Histogramm in Abbildung 5.48 nur schwer bestimmen kann. Auf der anderen Seite sind die 5 Minuten lang beschichtete Diamanten schon sehr dunkel, sodass man eventuell bei der händischen Vermessung die dunkelsten Diamanten nicht mehr berücksichtigt, da man sie nicht mehr von den Diamanten schlechter Qualität unterscheiden kann, und so zu einer im Durchschnitt höheren Intensität kommt.

Aus der Transmission  $T_S$  der Schicht kann auf die Schichtdicke zurück geschlossen werden. Mithilfe des in Abschnitt 2.3.4 beschriebene Modells wurde die Transmission von Silber für die Wellenlänge  $\lambda = 521$  nm ( $\kappa = 3,35$  und n = 0,25 [15]) in Abhängigkeit der Schichtdicke berechnet.



Abbildung 5.49: Berechnete Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke für Silber bei  $\lambda = 521$  nm (*n* und  $\kappa$  aus [15]).

Aus dieser Berechnung und den gemessenen Transmissionen  $T_S$  ergeben sich unter der Berücksichtigung, dass die aufgebrachte Schicht bei der Messung der Transmission an Diamanten zweimal vom Lichtstrahl durchlaufen wird, folgende Dicken für die Ag-Schichten.

Probe	$d_{DV}$ (nm)	$d_H (\mathrm{nm})$
S-7080-Ag-05min	10	8,75
S-7080-Ag-02min	7,25	7

Tabelle 5.22: *d* ist die gemessene Schichtdicke der Ag-Schichten. DV bezeichnet die mit DiamondView und H die händisch ermittelten mittleren Intensitäten.

Bei einer weiteren Messreihe wurden etwas größere Diamanten (Mesh 4050) ebenfalls mit Silber beschichtet. Da sich bei den ersten Versuchen gezeigt hat, dass bei den gewählten Beschichtungszeiten die Schichtdicke zu groß für die verwendete optische Methode zur Schichtdickenbestimmung ist, wurden kürzere Beschichtungszeiten festgelegt (2 Minuten, 1 Minute, 30 Sekunden, 15 Sekunden). Die gemessenen Histogramme für die transmittierten Intensitäten sind in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 5.50: Histogramm der transmittierten Intensitäten von Ag-Schichten auf Diamanten (S-4050-Ag-02min, S-4050-Ag-01min, S-4050-Ag-30sec, S-4050-Ag-15sec) für  $\lambda = 521$  nm und unterschiedliche Beschichtungszeiten t.

Die im Vergleich zur vorigen Messreihe etwas größeren Diamanten sind schon bei einer Beschichtungszeit von 2 Minuten sehr dunkel und es lässt sich nur schwer die Lage des relevanten Maximums im Histogramm bestimmen. Man könnte sowohl ein Maximum bei einer Helligkeit von 23 als auch ein Maximum bei einer Helligkeit von 46 vermuten. Da die Messergebnisse aber stark variieren, könnte es sich auch nur um Schwankungen handeln. Für die kürzeren Beschichtungszeiten lässt sich die Lage der Maxima besser bestimmen.

Die mit DiamondView ermittelten Transmissionen und Schichtdicken werden in der folgenden Tabelle wiederum den durch händisches Vermessen der Diamanten ermittelten Transmissionen gegenüber gestellt.
5.6 Transmissionsmessungen bei Diamantgranulat

Probe	$I_{SDK}$ (DV)	$I_{SDK}$ (H)	$T_S$ (DV)	$T_S$ (H)	$d_{DV}$ (nm)	$d_H$ (nm)
S-4050-Ag-02min	23 / 46	46	$0,16 \ / \ 0,31$	0,30	$12 \ / \ 8,5$	8,5
S-4050-Ag-01min	58	66	0,40	0,43	7	6,5
S-4050-Ag-30sec	65	68	0,45	0,44	6,25	6,5
S-4050-Ag-15sec	76	89	0,52	0,57	5,5	4,75

Tabelle 5.23:  $I_{SDK}$  ist die Intensität des Lichtes nach dem Durchgang durch die Beschichtung, den Diamanten und den Klebestreifen (siehe Abb. 3.8). *d* ist die gemessene Schichtdicke der Ag-Schichten. DV bezeichnet die mit DiamondView und H die händisch ermittelten mittleren Intensitäten.

Abgesehen von den 2 Minuten lang beschichteten Diamanten, die sehr dunkel waren, kann eine gute Übereinstimmung für die mithilfe von DiamondView ermittelten Transmissionen und den händisch gemessenen Transmissionen erzielt werden. Das gleiche gilt dann natürlich auch für die daraus berechneten Schichtdicken.

Ein weiteres Metall, das zum Beschichten der Diamanten verwendet wurde, ist Titan. In einer Messreihe wurden Diamanten der Größe Mesh 4050 für die verschiedenen Beschichtungszeiten von 2 Minuten, 1 Minute und 30 Sekunden beschichtet. Die mit DiamondView gemessenen Intensitäten bzw. Transmissionen werden in Abbildung 5.51 dargestellt und in Tabelle 5.24 mit händischen Messungen vergleichen.



Abbildung 5.51: Histogramm der transmittierten Intensitäten von Ti-Schichten auf Diamanten (S-4050-Ti-02min, S-4050-Ti-01min, S-4050-Ti-30sec) für  $\lambda = 521$  nm und unterschiedliche Beschichtungszeiten t.

Probe	$I_{SDK}$ (DV)	$I_{SDK}$ (H)	$T_S$ (DV)	$T_S$ (H)
S-4050-Ti-02min	115	127	0,79	0,82
S-4050-Ti-01min	132	143	0,91	0,92
S-4050-Ti-30sec	145	153	1,00	0,99

Tabelle 5.24:  $I_{SDK}$  ist die Intensität des Lichtes nach dem Durchgang durch die Beschichtung, den Diamanten und den Klebestreifen (siehe Abb. 3.8). DV bezeichnet die mit DiamondView und H die händisch ermittelten mittleren Intensitäten.

Wie auch bei den Silberschichten ergeben sich ähnliche Ergebnisse für die händisch gemessenen Transmissionen und die mit DiamondView ermittelten Transmissionen. Die Schichtdicken lassen sich daraus wiederum mithilfe einer theoretischen Berechnung für die Transmission von Titan in Abhängigkeit von der Schichtdicke ermitteln.



Abbildung 5.52: Berechnete Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke für Titan bei  $\lambda = 521$  nm (*n* und  $\kappa$  aus [15]).

Daraus ergeben sich folgende Schichtdicken für die Titanschichten auf den Diamanten.

Probe	$d_{DV}$ (nm)	$d_H (\mathrm{nm})$
S-4050-Ti-02min	1,1	1,0
S-4050-Ti-01min	0,4	0,4
S-4050-Ti-30sec	0,05	0,05

Tabelle 5.25: d ist die gemessene Schichtdicke der Ti-Schichten. DV bezeichnet die mit DiamondView und H die händisch ermittelten mittleren Intensitäten.

Da die berechneten Schichtdicken extrem gering sind, könnte es auch sein, dass es sich bei den aufgebrachten Schichten nicht um reines Titan, sondern um teilweise oxidiertes Titan handelt. Da Titanoxid transparent ist, würde sich dadurch die Transmission erhöhen. Die gemessenen Schichtdicken wären dann unter der Annahme von reinen Titanschichten zu gering.

#### 5.6.5 Dielektrische Schichten auf Diamanten

Die dielektrischen Schichten auf dem Diamantgranulat wurden durch reaktives Sputtern von Aluminiumoxid hergestellt. Nach einer Beschichtungszeit von 2 Stunden war nur ein leichter Unterschied zwischen den unbeschichteten und den beschichteten Diamanten zu erkennen. Beim genauen Hinsehen konnte man bunte, aber sehr schwache Reflexionen bei den beschichteten Diamanten erkennen.

Die Auswertung der Transmissionsmessung hat folgendes Histogramm ergeben:



Abbildung 5.53: Histogramm der transmittierten Intensitäten einer AlOx-Schicht auf Diamanten (S-4050-AlOx-120min) für  $\lambda = 521$  nm.

Die Abschwächung der Transmission durch die Aluminiumoxid-Beschichtung auf den Diamanten ist zu gering, um sie mit den verwendeten Messgeräten in einer sinnvollen Genauigkeit bestimmen zu können. Das Maximum des Histogramms verschiebt sich ungefähr vom Wert 145 für die unbeschichteten Diamanten auf den Wert 144 für die mit AlOx beschichteten Diamanten. Allerdings könnte man das Maximum des Histogramms der beschichteten Diamanten auch bei 143 oder 145 statt 144 sehen.

Auch der Versuch, die auf Klebestreifen aufgestreuten Diamanten mittels Spektrometer zu vermessen, führte zu keinem Erfolg. Eine Möglichkeit, die einem zur optischen Schichtdickenbestimmung noch bleibt, ist die Messung der Reflexion. In Abbildung 5.54 sind die mithilfe eines Lichtmikroskopes aufgenommenen Bilder der unbeschichteten bzw. der mit Aluminiumoxid beschichteten Diamanten zu sehen. Bei den mit AlOx beschichteten Diamanten kann man deutlich die Interferenzfarben der Aluminiumoxidschicht erkennen. Das Reflexionsverfahren wird in diesem Zusammenhang weiter verfolgt, allerdings nicht mehr in dieser Arbeit.



Abbildung 5.54: (a) Unbeschichtete und (b) mit AlOx beschichtete Diamanten (S-4050-AlOx-120min) unter dem Lichtmikroskop.

# 6 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wurden Schichten mit linearem Schichtdickengradienten aus unterschiedlichen Materialien (Metalle, Dielektrika, metall-dotierte Dielektrika) auf Glassubstraten deponiert. Mithilfe dieser Schichten wurden die Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke und im Weiteren die optischen Konstanten für das entsprechende Material ermittelt. Die Messung der Transmission erfolgte mittels Durchlichtscanner und mittels Spektrometer, wobei die Ergebnisse der beiden Messmethoden jeweils mit Literaturwerten und untereinander verglichen wurden.

Weiters wurden erste Versuch mit granularem Substrat durchgeführt. Metallische und dielektrische Schichten auf kleinen Diamanten wurden hergestellt. Aus der gemessenen Transmission einer großen Anzahl an beschichteten Diamantteilchen wurde versucht auf die mittlere Schichtdicke der aufgebrachten Schicht zurückzuschließen. Zu diesem Zweck wurden zu den Transmissionsmessungen analoge Simulationen durchgeführt und die zu erwartenden Histogramme der Transmission ermittelt.

## 6.1 Diskussion der Transmissionsmessungen mittels Durchlichtscanner

Die gemessenen Extinktions- und Absorptionskoeffizienten der Schichten mit linearem Schichtdickengradienten stimmen gut mit den Literaturwerten überein. Das gilt sowohl für die in der Aufdampfanlage, als auch für die in der Sputteranlage hergestellten Proben. Die häufigsten und stärksten Abweichungen der Messwerte von den Literaturwerten traten im blauen Bereich des Scanners bei der Wellenlänge von  $\lambda =$ 469 nm auf. Der Grund dafür ist vermutlich die geringere Intensität der Scannerlampe bei 469 nm im Vergleich zu 521 nm und 637 nm (siehe Abb. 5.1).

Einige Dinge, die zur erfolgreichen Herstellung der Schichten mit linearem Schichtdickengradienten notwendig sind, sollen an dieser Stelle kurz angesprochen werden. Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben wurde, muss zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten die Länge und die maximale Dicke der aufgebrachten Schicht gemessen werden. Die daraus berechneten Werte für die Absorptionskoeffizienten hängen stark von diesen beiden Größen ab. Vor allem die Bestimmung der maximalen Dicke ist im manchen Fällen etwas problematisch gewesen. Da die Schichten optisch vermessen werden sollen, und Metallschichten nur ungefähr bis zu einer Schichtdicke in der Größenordnung von 50 nm transparent sind, mussten auch die maximalen Schichtdicken in diesem Bereich liegen. Um die dünnere Hälfte der Probe noch optisch vermessen zu können, sollte die maximale Schichtdicke abhängig vom Material nicht dicker als 100-150 nm sein. Schichtdicken in dieser Größenordnung sind aber mithilfe des Profilometers, speziell in Fällen schlechter Haftung der Schicht auf dem Substrat, nur relativ ungenau zu bestimmen.

Eine weitere Schwierigkeit, die sich beim Aufdampfen der Schichten ergeben hat, war das Konstanthalten der Beschichtungsrate. Diese wird mit einem Schwingquarz während des Beschichtungsprozesses laufend gemessen und kann per Hand nachgeregelt werden. Eine schwankende Beschichtungsrate führt zu einer Schicht, deren Schichtdicke nicht konstant wächst. Misst man nun in äquidistanten Schritten die Transmission, unter der Annahme einer konstant anwachsenden Schichtdicke, so führt das ebenfalls zu stark abweichenden Ergebnissen des Extinktionskoeffizienten von den Literaturwerten.

Für dielektrische Schichten erhält man die laut theoretischen Berechnungen erwarte-

ten Interferenzen der Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke. Der Abstand der Maxima dieser Interferenzen hängt vom reellen Brechungsindex n des Materials und der Wellenlänge ab. Aufgrund des nicht-bijektiven Zusammenhanges zwischen Schichtdicke und Transmission ist eine einfache Berechnung der Schichtdicke bei bekannter Transmission für nur drei Wellenlängen leider nicht möglich.

Bei metall-dotierten dielektrischen Schichten hängt die qualitative Form der Transmission in Abhängigkeit von der Schichtdicke von der Konzentration des Metalls ab. Bei hinreichend geringen Metallkonzentrationen verhält sich die Schicht eher wie eine dielektrische Schicht, was die Schichtdickenbestimmung mithilfe des Scanners schwierig macht. Bei etwas höheren Metallkonzentration und einem eher metallischen Verhalten der Schicht, ist die Schichtdickenbestimmung bei bekannter Transmission möglich.

## 6.2 Diskussion der Transmissionsmessungen mittels Spektrometer

Für Metalle konnte, wie schon bei den Messungen mithilfe des Durchlichtscanners, auch mittels Spektrometer eine relativ gute Übereinstimmung der gemessenen Absorptionskoeffizienten mit den Literaturwerten erzielt werden. Abgesehen von gewöhnlichen Messungenauigkeiten, werden folgende zwei Gründe für teils auffallend große Abweichungen der Messwerte von den Literaturwerten angenommen. Auf der einen Seite kann es vor allem beim Aufdampfen, aber auch beim Sputtern zu einer nicht ganz konstanten Beschichtungsrate kommen, was sich im Schichtdickengradienten und somit auch bei den Transmissionsmessungen auswirkt. Andererseits sind auch die Literaturwerte nicht immer exakt. Für den Vergleich der Messwerte konnte nicht immer ein passender Literaturwert für genau die entsprechende Wellenlänge gefunden werden, und es musste zwischen den angegeben Werten aus der Umgebung interpoliert werden. Vor allem in Bereichen, wo sich der Absorptionskoeffizient stark ändert, kann das zu leicht verfälschten Literaturwerten führen. Allgemein lässt sich feststellen, dass die Genauigkeit des Durchlichtscanners nicht ganz mit der Genauigkeit des Spektrometers mithalten kann. Die erzielten Ergebnisse bei den Messungen der Absorptionskoeffizienten weichen allerdings nur wenig voneinander ab, sodass die Verwendung des Scanners als Messgerät durchaus gerechtfertigt werden kann. Ein deutlicher Vorteil des Spektrometers ist natürlich die Möglichkeit, die Transmission für jede beliebige Wellenlänge im sichtbaren Bereich messen zu können, wohingegen man beim Scanner an die vorgegebenen drei Wellenlängen gebunden ist. Das Spektrometer bietet somit zwei Vorteile. Man kann eher eine Aussage über die charakteristische Abhängigkeit der Absorption von der Wellenlänge treffen. Außerdem kann man zur Bestimmung der Schichtdicke aus der Transmission jede beliebige Wellenlänge wählen.

Sowohl beim Scanner ( $\lambda = 521$  nm) als auch beim Spektrometer wird im Bereich von 500-550 nm häufig die höchste oder zumindest eine relativ hohe Genauigkeit erzielt. Daraus lässt sich schließen, dass sich diese Wellenlängen gut zur optischen Bestimmung der Schichtdicke eignen.

Für dielektrische Schichten ist eine Schichtdickenbestimmung mittels theoretischer Berechnung des Transmissionsspektrums und Anpassung der Fitparameter möglich. Bei metall-dotierten dielektrischen Schichten hängt die Möglichkeit der Schichtdickenbestimmung von der Zusammensetzung der Schicht ab. Bei ausreichen hohen Metallkonzentrationen kann die Schichtdickenbestimmung ähnlich zu metallischen Schichten erfolgen. Für geringere Metallkonzentrationen, bei denen die Schicht sowohl Absorption als auch Interferenzen aufweist, wurde im Zuge dieser Arbeit keine Methode zur Schichtdickenbestimmung entwickelt.

## 6.3 Diskussion der Transmissionsmessungen bei Diamantproben

Die Transmissionsmessungen bei Diamanten, die mit metallischen Schichten beschichtet wurden, zeigten deutliche Unterschiede für verschiedene Schichtdicken. Für längere Beschichtungszeiten, das bedeutet für größeren Schichtdicken, verlagert sich das Maximum im Histogramm der Helligkeitswerte zu geringeren Helligkeiten, im Vergleich zu kürzeren Beschichtungszeiten. Diese Messergebnisse decken sich mit den Ergebnissen und Erwartungen aus den Simulationen. Für größere Schichtdicken wird die Transmission geringer und die Unterscheidung zwischen den mittleren transparenten Bereichen der Diamanten und den Rändern der Diamanten wird deutlich schwieriger bis unmöglich. Deshalb ist die Messung der Schichtdicke im Allgemeinen schwieriger, je größer die Schichtdicke ist. Ein Vergleich der Messungen mithilfe des Programms DiamondView mit händischen Messungen der Transmissionen lieferte eine gute Übereinstimmung.

Die Bestimmung der Schichtdicke von dielektrischen Schichten mithilfe von Transmissionsmessungen ist leider nicht gelungen. Eine Möglichkeit der optischen Schichtdickenbestimmung dielektrischer Schichten wäre die Messung der Reflexion, da auf den Bildern des Lichtmikroskopes im Gegensatz zu den eingescannten Bildern, deutliche Unterschiede zwischen den beschichteten und den unbeschichteten Diamanten zu erkennen waren.

## Literaturverzeichnis

- Kuan-Wen Wang, Shu-Ru Chung, Ling-Yun Jang, Jyh-Fu Lee, and Tsong-Pyng Perng. Variation of surface composition and sintering of binary Pd70Ag30 nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*, 415:62–65, 2006. 1.1
- [2] Chang-Hoon Kim, Kum-Jin Park, Yeo-Joo Yoon, Dong-Sook Sinn, Young-Tae Kim, and Kang-Heon Hur. Effects of milling condition on the formation of coreshell structure in BaTiO3 grains. *Journal of the European Ceramic Society*, 28:2589–2596, 2008.
- [3] Jae-Hoon Ahn, Jin-Kyu Lee, Dong-Woo Kim, Young-Soo Jung, Gil-Pyo Kim, and Sung-Hyeon Baeck. Electroless coating of tungsten oxide on the surface of copper powder. *Materials Research Bulletin*, 43:2266–2271, 2008. 1.1
- [4] T. Köck, A. Brendel, and H. Bolt. Interface reactions between silicon carbide and interlayers in silicon carbide-copper metal-matix composites. *Journal of Nuclear Materials*, 362:197–201, 2007. 1.1
- [5] S. Scholz and S. Kaskel. Surface functionalization of ZrO2 nanocrystallites for the integration into acrylate nanocomposite films. *Journal of Colloid and Interface Science*, 323:84–91, 2008.
- [6] Th. Schubert, B. Trindade, T. Weißgärber, and B. Kieback. Interfacial design of Cu-based composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications. *Materials Science and Engineering A*, 475:39–44, 2008. 1.1

- [7] T. B. Massalski, H. Okamoto, P. R. Subramanian, and L.Kacprzak. *Binary Alloy Phase Diagrams*, volume 1. ASM International, Ohio, 1999. 1.1
- [8] C. Eisenmenger-Sittner A. Bergauer. Physik und Technologie Dünner Schichten. Skriptum zur Lehrveranstaltung, Technische Universität Wien. 2.1, 5.3.3
- [9] R. F. Bunshah. Deposition Technologies for Films and Coatings, Developments and Applications. Noves Publications, New Jersey, 1982. 2.1.1, 2.2, 2.2.2
- [10] D. Depla and S. Mahieu. *Reactive Sputter Deposition*. Springer-Verlagl, Berlin Heidelberg, 2008. 2.3, 2.1.3
- [11] L. I. Maissel and R. Glang. Handbook of Thin Film Technology. McGraw-Hill Book Company, New York, 1970. 2.2.1, 2.2.3
- [12] H. A. Macleoud. *Thin-Film Optical Filters*. Institute of Physics Publishing, Bristol, 2001. 2.3, 2.3.3, 2.3.4, 2.3.4, 2.3.4, 3.4
- [13] J. D. Jackson. Dt.Übers. und Bearb. Kurt Müller. Klassische Elektrodynamik.Walter de Gruyter, Berlin, 1999. 2.3
- [14] W. Demtröder. Experimentalphysik 2. Springer, Berlin, 1995. 2.3.3, 2.3.4, 2.3.4
- [15] J. H. Weaver, C. Krafka, D. W. Lynch, and E. E. Koch. Physics Data, Optical Properties of Metals, Part 2: Noble Metals, Aluminium, Scandium, Yttrium, the Lanthanides, and the Actinides. Fachinformationszentrum, 7514 Eggenatein-Leopoldshafen 2, Karlsruhe, 1981. 2.1, 5.3.1, 5.2, 5.4, 5.3, 5.7, 5.4, 5.10, 5.5, 5.13, 5.4.1, 5.11, 5.28, 5.12, 5.31, 5.13, 5.34, 5.14, 5.37, 5.6.4, 5.49, 5.52
- [16] E. D. Palik. Handbook of optical constants of solids. Academic Press, Orlando, 1985. 2.2, 5.3.2, 5.8, 5.4.2, 5.4.2
- [17] Johannes Hell. Aufbau und Charakterisierung einer PVD-Beschichtungsanlage zur Beschichtung granularer Materialien. Diplomarbeit, TU Wien, 2009. 3.3

[18] J. H. Weaver, C. Krafka, D. W. Lynch, and E. E. Koch. *Physics Data, Optical Properties of Metals, Part 1: The Transition Metals.* Fachinformationszentrum, 7514 Eggenatein-Leopoldshafen 2, Karlsruhe, 1981. 5.6, 5.16, 5.15, 5.40

## Anhang

## Beschichtungsparameter

Alle Proben mit linearem Schichtdickengradienten wurden auf Glassubstrat hergestellt. Das Material der jeweiligen Probe ist am Probennamen zu erkennen.

Probenname	$p_V$ (mbar)	$R \; (\rm nm/s)$	<i>I</i> (A)	$p_N$ (mbar)	$v~({ m mm/s})$	$d_{max}$ (nm)	<i>L</i> (m)	s
Cu-02	$1,8.10^{-6}$	1,30	213	$3,0.10^{-5}$	0,655	72	0,0271	$2,6568 \cdot 10^{-6}$
Cu-04	$1,6.10^{-6}$	1,25	210	$6,0.10^{-5}$	0,286	163	0,0269	$6,0595 \cdot 10^{-6}$
Cu-05	$1,8.10^{-6}$	1,60	200	$9,0.10^{-5}$	0,286	205	0,0265	$7,7359 \cdot 10^{-6}$
Cu-07	$5,7.10^{-7}$	3,20	218	$6,0.10^{-5}$	0,818	134	0,0258	$5,1938 \cdot 10^{-6}$
Ag-01	$6,8.10^{-7}$	1,10	164	$2,0.10^{-5}$	0,450	83,5	0,0260	$3,2115 \cdot 10^{-6}$
Ag-02	$6,5 \cdot 10^{-6}$	1,05	160	$5,0.10^{-5}$	0,532	69,7	0,0260	$2,6808 \cdot 10^{-6}$
Ag-04	$1,6\cdot 10^{-6}$	1,00	160	$5,0.10^{-5}$	0,450	121	0,0270	$4,4815 \cdot 10^{-6}$
Au-01	$2,0.10^{-6}$	2,20	220	$4,5 \cdot 10^{-5}$	0,573	116	0,0273	$4,2491 \cdot 10^{-6}$
Au-02	$8,8.10^{-7}$	2,35	215	$5,4.10^{-5}$	0,409	196	0,0274	$7,1533 \cdot 10^{-6}$
Au-03	$1,8.10^{-6}$	3,00	220	$1,1.10^{-4}$	0,573	169	0,0273	$6,1813 \cdot 10^{-6}$
MgF2-03	$4,5\cdot 10^{-7}$	4,50	200	$1,0.10^{-5}$	0,205	1010	0,0270	$3,7407 \cdot 10^{-5}$
MgF2-04	$1,5.10^{-6}$	5,00	200	$7,0.10^{-6}$	0,286	828	0,0276	$3,0022 \cdot 10^{-5}$

#### Aufdampfen

Tabelle 6.1:  $p_V$  bzw.  $p_N$  bezeichnet den Druck vor bzw. nach dem Beschichtungsprozess. R ist die Beschichtungsrate und I der Strom. v gibt die Geschwindigkeit an, mit der die Blende vor dem Substrat weggezogen wurde.  $d_{max}$ , L und s bezeichnen die maximale Dicke, die Länge und die Steigung der Schicht.

Probenname	$p_V$ (mbar)	$R_{MgF_2}~({ m nm/s})$	$p_N$ (mbar)	$v \ (\rm mm/s)$	$d_{max}$ (nm)	L (m)	$s(10^{-5})$
MgF2-Cu-03	$7,0.10^{-7}$	14,5	$5,0.10^{-5}$	0,6138	1020	0,0266	3,8346
MgF2-Cu-05	$7,6.10^{-7}$	13,5	$9,0.10^{-6}$	0,7366	930	0,0266	3,4962
MgF2-Cu-06	$1,9.10^{-6}$	12,0	$2,5 \cdot 10^{-5}$	0,7366	714	0,0270	2,6444
MgF2-Cu-07	$7,6.10^{-6}$	4,0	$4,0.10^{-4}$	0,7366	480	0,0270	1,7778

#### Gleichzeitiges Aufdampfen von $MgF_2$ und Cu

Tabelle 6.2:  $p_V$  bzw.  $p_N$  bezeichnet den Druck vor bzw. nach dem Beschichtungsprozess.  $R_{MgF_2}$  ist die Beschichtungsrate von MgF<sub>2</sub>. v gibt die Geschwindigkeit an, mit der die Blende vor dem Substrat weggezogen wurde.  $d_{max}$ , L und s bezeichnen die maximale Dicke, die Länge und die Steigung der Schicht.

#### Sputtern

Probenname	$p_V(\text{mbar})$	$R(\mathrm{nm/s})$	P(W)	U(V)	$I(\mathbf{A})$	$p_W(\text{mbar})$	$p_N(\text{mbar})$	$v({ m mm/s})$	$d_{max}(nm)$	L(m)	$s(10^{-6})$
Al-02	$2,0.10^{-6}$	0,92	200	470	0,43	$4,00 \cdot 10^{-3}$	$1,70 \cdot 10^{-6}$	0,1637	128	0,0226	5,6637
Al-03	$2,0.10^{-6}$	0,60	200	480	0,43	$4,00 \cdot 10^{-3}$	$1,50 \cdot 10^{-6}$	0,1637	111	0,0229	4,8472
Mo-02	$2,2.10^{-6}$	0,64	200	390	0,52	$4,00 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^{-6}$	0,1637	118	0,0237	4,9789
Mo-03	$1,7.10^{-6}$	0,87	200	391	0,52	$4,00 \cdot 10^{-3}$	$1,50 \cdot 10^{-6}$	0,1228	168	0,0230	7,3044

Tabelle 6.3:  $p_V$  bzw.  $p_N$  bezeichnet den Druck vor bzw. nach dem Beschichtungsprozess. R ist die Beschichtungsrate und  $p_W$  ist der Druck des Arbeitsgases während des Beschichtungsprozesses. v gibt die Geschwindigkeit an, mit der die Blende vor dem Substrat weggezogen wurde. P ist die Leistung, U die Spannung und I der Strom.  $d_{max}$ , L und s bezeichnen die maximale Dicke, die Länge und die Steigung der Schicht.

#### **Reaktives Sputtern**

Probenname	$p_V(\text{mbar})$	$R(\mathrm{nm/s})$	P(W)	U(V)	I(A)	$f_{Ar}(\text{sccm})$	$f_{O_2}(\text{sccm})$
AlOx-02	$5 \cdot 10^{-6}$	1,25	261	385	0,68	16,78	3
	$p_{W,Ar}(\text{mbar})$	$p_{W,ges}(mbar)$	$p_N(\text{mbar})$	$v({ m mm/s})$	dmax(nm)	L(mm)	s
	3,93	4,2	$6 \cdot 10^{-6}$	0,0409	580	0,0215	$2,6977 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 6.4:  $p_V$  bzw.  $p_N$  bezeichnet den Druck vor bzw. nach dem Beschichtungsprozess. R ist die Beschichtungsrate und  $p_W$  ist der Druck des Arbeitsgases während des Beschichtungsprozesses. f bezeichnet den Gasfluss und v gibt die Geschwindigkeit an, mit der die Blende vor dem Substrat weggezogen wurde. P ist die Leistung, U die Spannung und I der Strom.  $d_{max}$ , L und s bezeichnen die maximale Dicke, die Länge und die Steigung der Schicht.

#### LITERATURVERZEICHNIS

Probe	Größe	$p_V(\text{mbar})$	$p_N(\text{mbar})$	$I(\mathbf{A})$	$U(\mathbf{V})$	P(W)	$f_{O_2}(\text{sccm}))$	$t(\min)$
S-7080-Ag-15min	Mesh7080	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	0,35	563	100	-	15
S-7080-Ag-05min	Mesh7080	$6 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	0,36	553	100	-	5
S-7080-Ag-02min	Mesh7080	$6 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	0,36	548	100	-	2
S-4050-Ag-02min	Mesh4050	$6 \cdot 10^{-6}$		0,36	543	100	-	2
S-4050-Ag-01min	Mesh4050	$5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	0,37	542	100	-	1
S-4050-Ag-30sec	Mesh4050	$6 \cdot 10^{-6}$	$1.10^{-5}$	0,36	541	100	-	0,5
S-4050-Ag-15sec	Mesh4050	$1.10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	0,36	546	100	-	0,25
S-4050-Ti-02min	Mesh4050	$1.10^{-6}$	$1.10^{-7}$	0,48	403	100	-	2
S-4050-Ti-01min	Mesh4050	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	0,47	406	100	-	1
S-4050-Ti-30sec	Mesh4050	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	0,47	406	100	-	0,5
S-4050-AlOx-65min	Mesh4050	$7 \cdot 10^{-6}$	$7.10^{-6}$	0,52	419	217	2,95	65
S-4050-AlOx-172min	Mesh4050	$9.10^{-6}$	$5.10^{-6}$	0,55	420	230	2,93	172
S-4050-AlOx-120min	Mesh4050	$4 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	0,57	385	220	3,00	120

### Diamantproben

Tabelle 6.5:  $p_V$  bzw.  $p_N$  bezeichnet den Druck vor bzw. nach dem Beschichtungsprozess. I ist der Strom, U die Spannung und P die Leistung. f bezeichnet den Gasfluss und t die Beschichtungszeit. Der Druck des Arbeitsgases (Ar) während des Beschichtungsprozesses war für jede Probe  $4 \cdot 10^{-3}$  mbar.

# Datenblätter der Schrittmotoren und der Schrittmo-

### torsteuerung

### **35000 Series: Size 14 Linear Actuator**

**Haydon** kerk

HaydonKerk Motion Solutions™ • www.HaydonKerk.com • Phone: 800.243.2715 • International: 203.756.7441

#### Haydon™ 35000 Series Size 14 hybrid linear actuators have been improved to provide higher force, longer life and improved performance.

The various patented designs deliver exceptional performance and new linear motion design opportunities. Three designs are available, captive, noncaptive and external linear versions. The 35000 Series is available in a wide variety of resolutions - from 0.00012-in (.003048 mm) per step to 0.00192-in (.048768 mm) per step. The motors can also be microstepped for even finer resolutions. The Size 14 actuator delivers thrust of up to 50 lbs. (222 N). Size 14

Size 14 External Linear



Size 14 Non-Captive Shaft

Size 14 Captive Shaft

#### **Salient Characteristics**

Size	e 14: 35 mm (1	.4-in) Hybric	l Linear A	ctuator (	1.8° Step A	ngle)		
	Captive	35	H4(X)-V	35H6(X)-V				
Part No.	Non-captive	35	F4(X)-V		35F6(X)-V			
	External Lin. E35H4(X)-V					6(X)-V		
Wiring		E	Bipolar		Unipo	olar**		
Winding voltage		2.33 VDC	5 VDC	12 VDC	5 VDC	12 VDC		
Curre	Current/phase		0.57 A	0.24 A	0.57 A	0.24 A		
Resist	ance/phase	1.86 Ω	8.8 Ω	50.5 Ω	8.8 Ω	50.5 Ω		
Inducta	ance/phase	2.8 mH	13 mH	60 mH	6.5 mH	30 mH		
Power of	consumption		5.7 W					
Rote	or inertia		27.0 gcm <sup>2</sup>					
Temperature rise		135°F Rise (75°C Rise)						
V	Veight	5.7 oz (162 g)						
Insulatio	on resistance			20 MΩ				

		Li	near T	ravel / Step	)	
	Scre	wØ	Order	Screw	Ø	Order
	.218" (5.	54 mm)	Code	.250" (6.35	5 mm)	
	Inches	mm	I.D.	Inches	mm	
	.00012	.0030*	N	.00015625	.0039*	Р
_	.00024	.0060*	K	.0003125	.0079*	Α
	.00048	.0121*	J	.000625	.0158*	В
	.00096	.0243*	Q	.00125	.0317*	С
	.00192	.0487*	R			

\*Values truncated

Standard motors are Class B rated for maximum temperature of 130°C.

Special drive considerations may be necessary when leaving shaft fully extended or fully retracted.

\*\* Unipolar drive gives approximately 30% less thrust than bipolar drive.



## **35000 Series: Size 14 Dimensional Drawings**

HaydonKerk Motion Solutions™ • www.HaydonKerk.com • Phone: 800.243.2715 • International: 203.756.7441



HYBRID LINEAR ACTUATOR STEPPER MOTORS

### **35000 Series: Size 14 Performance Curves**

**Werk** 

HaydonKerk Motion Solutions™ • www.HaydonKerk.com • Phone: 800.243.2715 • International: 203.756.7441

#### FORCE vs. PULSE RATE Bipolar • Chopper • 100% Duty Cycle

Ø .218 (5.54) Leadscrew



#### Ø .250 (6.35) Leadscrew





#### **35000 Series: Size 14 Performance Curves**

HaydonKerk Motion Solutions™ • www.HaydonKerk.com • Phone: 800.243.2715 • International: 203.756.7441

#### FORCE vs. LINEAR VELOCITY Bipolar • Chopper • 100% Duty Cycle

Ø .218 (5.54) Leadscrew



#### Ø .250 (6.35) Leadscrew



NOTE: All chopper drive curves were created with a 5 volt motor and a 40 volt power supply.

Ramping can increase the performance of a motor either by increasing the top speed or getting a heavier load accelerated up to speed faster. Also, deceleration can be used to stop the motor without overshoot.

With L/R drives peak force and speeds are reduced, using a unipolar drive will yield a further 30% force reduction.

**35000 Series:** Size 14 High Resolution Linear Actuator



HaydonKerk Motion Solutions™ • www.HaydonKerk.com • Phone: 800.243.2715 • International: 203.756.7441

### **Precision step movement** down to 1.5 micron with up to 50 lbs (222 N) force.

The Haydon<sup>™</sup> 35000 Series Size 14, 0.9° high resolution (standard resolution = 1.8°) motor has been engineered to precisely deliver reliable high speed, force, up to 50 lbs (222 N), as well as a full step movement as low as 1.5 microns. These compact units provide a cost effective solution for engineers requiring positional accuracy and high speed linear travel. Haydon can custom design this motor for virtually any customer specific application.



#### **Salient Characteristics**

	Size 14: 35 mm (1.4-in) Hybrid Linear Actuator (0.9° Step Angle)									
	Captive		35K4(X)-V		35K6(X)-V					
Part No.	Non-captive		35J4(X)-V	35J6	(X)-V					
	External Lin.	E	E35K4(X)-V	E35K	6(X)-V					
	Wiring		Bipolar		Unip	olar**				
Winding voltage		2.33 VDC	5 VDC	12 VDC	5 VDC	12 VDC				
С	urrent/phase	1.25 A	0.57 A	0.24 A	0.57 A	0.24 A				
Res	sistance/phase	1.86 Ω	8.8 Ω	50.5 Ω	8.8 Ω	50.5 Ω				
Ind	uctance/phase	2.8 mH	13 mH	60 mH	6.5 mH	30 mH				
Pow	er consumption			5.7 W	•					
I	Rotor inertia	27 gcm <sup>2</sup>								
Tei	mperature rise	135°F Rise (75°C Rise)								
	Weight		5.7 oz (162 g)							
Insu	lation resistance			20 MΩ						

	Linear Travel / Step								
Scre	w Ø	Order	Screw	Ø	Order				
.218" (5.	.54 mm)	Code	.250" (6.35	imm)	Code				
inches	mm	I.D.	inches	mm	I.D.				
.00006	.0015*	U	.000078*	.00198'	· V				
.00012	.0030*	Ν	.00015625	.0039*	Р				
.00024	.0060*	К	.0003125	.0079*	Α				
.00048	.0121*	J	.000625	.0158*	В				
.00096	.0243*	Q							

\*Values truncated

Special drive considerations may be necessary when leaving shaft fully extended or fully retracted.

\*\* Unipolar drive gives approximately 30% less thrust than bipolar drive.



### 35000 Series: Size 14 High Resolution Linear Actuator Performance Curves

HaydonKerk Motion Solutions™ • www.HaydonKerk.com • Phone: 800.243.2715 • International: 203.756.7441

#### FORCE vs. PULSE RATE Bipolar • Chopper • 100% Duty Cycle

Ø .218 (5.54) and Ø .250 (6.35) Leadscrews



FORCE vs. LINEAR VELOCITY Bipolar • Chopper • 100% Duty Cycle

Ø .218 (5.54) and Ø .250 (6.35) Leadscrews



NOTE: All chopper drive curves were created with a 5 volt motor and a 40 volt power supply.

Ramping can increase the performance of a motor either by increasing the top speed or getting a heavier load accelerated up to speed faster. Also, deceleration can be used to stop the motor without overshoot.

With L/R drives peak force and speeds are reduced, using a unipolar drive will yield a further 30% force reduction.



HaydonKerk Motion Solutions™ • www.HaydonKerk.com • Phone: 800.243.2715 • International: 203.756.7441



Haydon<sup>™</sup> 35000 Series Size 14 Double Stack hybrid linear actuators have improve force and performance.

**Haydon** [kerk]

The various patented designs deliver exceptional performance and new linear motion design opportunities.

Three designs are available, captive, non-captive and external linear versions. The 35000 Series is available in a wide variety of resolutions - from 0.000625-in (.0158 mm) per step to 0.005-in (.127 mm) per step. The motors can also be microstepped for even finer resolutions. The Size 14 actuator delivers thrust of up to 50 lbs. (222 N).

#### **Salient Characteristics**

Size 14: 3 mm (1.4-in) Double Stack Hybrid Linear Actuator (1.8° Step Angle)					
Captive		35M4(X)-V			
Part No.	Non-captive	35L4(X)-V		,	
	External Lin.	E35M4(X)-V			
Wiring		Bipolar			
Winding voltage		2.33 VDC	5 VDC	12 VDC	
Current/phase		2 A	910 mA	380 mA	
Resistance/phase		1.2 Ω	5.5 Ω	31.6 Ω	
Inductance/phase		1.95 mH	7.63 mH	65.1 mH	
Power consumption		9.1 W Total			
Temperature rise		135°F Rise (75°C Rise)			
Weight		8.5 oz (240 g)			
Insulation resistance		20 MΩ			
Max. Load Limit		50 lbs (222 N)			

Linear Tra Screw Ø.25 inches	Order Code I.D.	
.000625	.0158*	В
.00125	.0317*	С
.0025	.0635	Y
.00375	.0953	AG
.005	.127	Z

\*Values truncated

Standard motors are Class B rated for maximum temperature of 130°C.

Special drive considerations may be necessary when leaving shaft fully extended or fully retracted.

### Haydon kerk

#### 35000 Series: Size 14 Double Stack Dimensional Drawings

HaydonKerk Motion Solutions™ • www.HaydonKerk.com • Phone: 800.243.2715 • International: 203.756.7441

#### **Captive Leadscrew** DIMENSION "A" MAX Dimension "B" Max Fully Retracted (44.1 MAX) 1.736 MAX [2.00±.25] .08±.010 [16.50] .650 EXTERNAL STOP [6.73] .265 [35.2 MAX] 0 1 [26±.10] 1.024±.004 [9] Ø.354 [6.35] Ø 250 M4 X 0.7 THREAD TO WITHIN 0.76(.030) OF SHOULDER [15.88] Ø.625 STROKE DIM. "A" DIM. "B" SUFFIX # (304.8±12.7) 12"±1/2" 0.50 0.82 (20.8) 0.04 (1.0)- 905 (12.7)0.750 (19.05) 1.07 (27.2)0.29 (7.4)- 907 (13.7) #26 AWG LEAD WIRES -910 1.00 (25.4)1.32 (33.5)0.54 [12.70±3.18] 1/2"±1/8" 1.250 (31.8) 1.57 (39.9) 0.79 (20.1) -912 22 .00 1.500 (38.1) (26.4) - 915 4X M3 X 0.5 THREAD X 3¥ .118 (3.0) 1.82 (46.2)1.04 Ø.866<sup>+.000</sup> 2.00 (50.8)2.32 (58.9)1.54 (39.1) - 920 2.500 (63.5) - 925 (71.6) 2.04 (51.8) 2.82









**Haydon** (kerk)

HaydonKerk Motion Solutions \*\* • www.HaydonKerk.com • Phone: 800.243.2715 • International: 203.756.7441

#### FORCE vs. PULSE RATE Bipolar • Chopper • 100% Duty Cycle

Ø .250 (6.35) Leadscrew



FORCE vs. LINEAR VELOCITY Bipolar • Chopper • 100% Duty Cycle

Ø .250 (6.35) Leadscrew



NOTE: All chopper drive curves were created with a 5 volt motor and a 40 volt power supply.

Ramping can increase the performance of a motor either by increasing the top speed or getting a heavier load accelerated up to speed faster. Also, deceleration can be used to stop the motor without overshoot.

With L/R drives peak force and speeds are reduced, using a unipolar drive will yield a further 30% force reduction.

### **21000 Series: Size 8 Linear Actuator**

**Haydon** (kerk)

HaydonKerk Motion Solutions™ • www.HaydonKerk.com • Phone: 800.243.2715 • International: 203.756.7441

### One of the world's smallest linear actuators, the Size 8 precision motor is a recent addition to our extensive, award winning miniature stepper motor product line.

Equipment designers and engineers now have an even more compact option for their motion applications. The Haydon™ 21000 Series Size 8 linear actuator occupies a minimal 0.8" (21 mm) space and includes numerous patented innovations that provide customers high performance and endurance in a very small package.

Three designs are available, captive, non-captive and external linear versions. The 21000 Series is available in a wide variety of resolutions - from 0.00006" (.0015 mm) per step to 0.00157" (0.04 mm) per step. The Size 8 actuator delivers thrust of up to 10 lbs. (44 N).



#### **Salient Characteristics**

Size 8: 21 mm (0.8-in) Hybrid Linear Actuator (1.8° Step Angle)				Linear Travel / Step Screw Ø.138"(3.50 mm)		Order Code	
	Captive		21H4(X)-V			0015*	1.0.
Part No.	Non-captive		21F4(X)-V			.0025	
	External Lin.		E21H4(X)-V			.0030*	N
Wiring		Bipolar			.00019*	.005	AB
•	Viiiiig				.00024	.006*	К
Windi	ng voltage	2.5 VDC	5 VDC	7.5 VDC	.00039*	.01	AC
Curre	ent/phase	.49 A	.24 A	.16 A	.00048	.0121*	J
Resistance/phase		5.1 Ω	20.4 Ω	45.9 Ω	.00078*	.02	AD
		0			.00157*	.04	AE
Inductance/phase		1.5 mH	1.5 mH 5.0 mH 11.7 mH		Values truncated		
Power consumption		2.45 W Total					
Rotor inertia		1.4 gcm <sup>2</sup>			Standard motors are Class B		
Temperature rise     135°F Rise (75°C Rise)		of 130°C.					
v	Veight	1.5 oz (43 g)			Special drive considerations may		
Insulation resistance 20 MΩ			be necessary when leaving shall fully extended or fully retracted.				



### 21000 Series: Size 8 Dimensional Drawings

HaydonKerk Motion Solutions \*\* • www.HaydonKerk.com • Phone: 800.243.2715 • International: 203.756.7441

### **Captive Leadscrew**







### 21000 Series: Size 8 Performance Curves



HaydonKerk Motion Solutions™ • www.HaydonKerk.com • Phone: 800.243.2715 • International: 203.756.7441

#### FORCE vs. PULSE RATE Bipolar • Chopper • 100% Duty Cycle

Ø .138 (3.50) Leadscrew





#### 21000 Series: Size 8 Performance Curves

HaydonKerk Motion Solutions™ • www.HaydonKerk.com • Phone: 800.243.2715 • International: 203.756.7441

#### FORCE vs. LINEAR VELOCITY Bipolar • Chopper • 100% Duty Cycle

Ø .138 (3.50) Leadscrew



\*Care should be taken when utilizing these screw pitches to ensure that the physical load limits of the motor are not exceeded. Please consult the factory for advice in selecting the proper pitch for your application.

NOTE: All chopper drive curves were created with a 5 volt motor and a 40 volt power supply.

Ramping can increase the performance of a motor either by increasing the top speed or getting a heavier load accelerated up to speed faster. Also, deceleration can be used to stop the motor without overshoot.

With L/R drives peak force and speeds are reduced, using a unipolar drive will yield a further 30% force reduction.

## LAM Technologies electronic equipment



### Programmable Drives 18Vdc(16Vac)...240Vdc(120Vac) 0.3Arms...10Arms (14.1Apk)



The DS30 series drives have a built-in flexible motion controller able to perform accurate motor control in speed and position.

The programming is quick and simple through the development software tool. The program is built using functional blocks as variable assignment blocks, timing block, conditional jump blocks, etc. Particularly powerful is the mathematical block able to execute additions, subtractions, multiplications and divisions and which allows to realize even complex applications.

The connection with the external devices is through 4 inputs and 2 digital outputs each one optocoupled, independently PNP or NPN or line driver usable. Two +/-10V analog inputs and one 0-10Vdc analog output complete the available interface signals.

To assure the maximum flexibility, the I/O are not specialized and through the programming it is possible to use them as per application requirements. For example, it is possible to use the digital inputs to command the start and the stop of a cycle, the execution of the homing procedure, the selection of the target position, of the speed, etc. The digital outputs can be used to indicate the reaching of a position, the intervention of a protection, etc. The analog inputs, for example, can be used to change dynamically the speed, to execute a position adjustment, to change the timing, etc. The analog output can be used instead to command proportional actuators, to supply a speed reference to an inverter, to command an analog instrument, proportional valve, etc.

- ✓ <u>Up to 3000rpm at 1/128 step/rev</u>
- <u>Mathematical functions at <u>32bit</u>
  </u>
- Speed or position control
- Independent acceleration and deceleration ramps
- ✓ Absolute and relative positioning
- ✓ 4 digital and two <u>+/-10V analog inputs</u>
- 2 digital and one <u>0-10V analog ouputs</u>
- 100KHz high speed counter
- <u>AC power supply models available</u>
- Optocoupled and differential I/O, independently NPN or PNP usable
- Inputs from <u>3Vdc up to 28Vdc</u>
- Line driving supported
- 11 bit analog inputs resolution
- 32bit quote registers from -2,147,483,638 to +2,147,483,647
- Resonance damping
- ✓ Automatic current reduction
- ✓ High efficiency power mosfet stage
- Complete diagnostics with univocal indication for each anomaly
- ✓ Over/under voltage protection, short circuit protection (cross phase, ground and positive supply)
- Overheating protection
- Break motor phase diagnostics
- Compact size
- Easy DIN rail installation
- Removable terminal block connector
- ✓ IP20-compliant construction
- ✓ Cost-effective

The drive is designed to be quickly and easily installed on DIN rail. The connection to the motor, with the control signal and the power supply is through colored and removable terminal blocks.

The connection to the programming and diagnostic port of the drive is through the UDP30 interface (see below), which is connected to the PC by the USB port. The interface ensures also the electrical insulation between the PC and the drive.





## LAM Technologies electronic equipment



Symbol	ol Description			Value		Unit	
-		-		Min	Тур	Max	
Vp	Power supply voltage	(for DC models)		18		50	Vdc
Vac	Power supply voltage (for AC models)		DS3041(A)	16		36	Vac
lf	Motor phase current (	Motor phase current ( <b>rms</b> )		0.3		1.4	Arms
Vp	Power supply voltage	(for DC models)		20		50	Vdc
Vac	Power supply voltage	(for AC models)	DS3044(A)	18		36	Vac
lf	Motor phase current (	<u>rms</u> )		1		4	Arms
Vp	Power supply voltage	(for DC models)		20		50	Vdc
Vac	Power supply voltage	(for AC models)	DS3048(A)	18		36	Vac
lf	Motor phase current (	<u>rms</u> )		3		8	Arms
Vp	Power supply voltage	(for DC models)		24		90	Vdc
Vac	Power supply voltage	(for AC models)	DS3073(A)	20		65	Vac
lf	Motor phase current (	<u>rms</u> )		0.8		3	Arms
Vp	Power supply voltage	(for DC models)		24		90	Vdc
Vac	Power supply voltage	(for AC models)	DS3076(A)	20		65	Vac
lf	Motor phase current (	<u>rms</u> )		2		6	Arms
Vp	Power supply voltage	(for DC models)		24		90	Vdc
Vac	Power supply voltage	(for AC models)	DS3078(A)	20		65	Vac
lf	Motor phase current (	rms)		4		10	Arms
Vp	Power supply voltage	(for DC models)		45		160	Vdc
Vac	Power supply voltage	(for AC models)	DS3084(A)	35		115	Vac
lf	Motor phase current (	rms)		2		4	Arms
Vp	Power supply voltage	(for DC models)		45		160	Vdc
Vac	Power supply voltage	(for AC models)	DS3087(A)	35		115	Vac
lf	Motor phase current (	rms)		4		8.5	Arms
Vn	Power supply voltage	·······	DS3098	45		240	Vdc
lf	Motor phase current (	rms)		4		10	Arms
Vdi	Digital input voltage r			-		29	Vdc
Idi	Digital input voltage to	urrent		<u> </u>	6	20	mA
Vdo	Digital input supply cu	range		4	0	30	Vdc
Ido	Digital output voltage	range		1		50	mA
Vai	Analog input voltage r	ange		-10		10	Vdc
Rai	Analog input impedan			10	47	10	KO
Vao	Analog niput inipedance Analog output voltage range			0		10	Vdc
lao	Analog output current range				10	mA	
Prt	Protections / Diagnostics / alarms Over/Under voltage. Short circuit. Overheating. Brea			ak phase			
Mpr	Quote range (1/128 step)2 147 483 638 / +2 147 483 647			1/128s			
Psp	User program memory (functional blocks)			250			
Clp	Mathematical calculat	ion resolution			32		bit
Mechanical Specifications							
FDh	Height 100.4			mm			
FDI	Depth	119.0			mm		
FDw		DS3041(A), DS3044, DS3073 17.5 (22.7)					
	Width	DS3044A, DS3073A, DS3048(A), DS3076(A),			35	.0	mm
	DS3078(A), DS3084(A), DS3087(A), DS3098						
FDnw		DS3041(A), DS3044(A), DS3073(A) 185 (220)			220)	g	
	Weight	DS3048(A), DS3076(A), DS3078(A), DS3084(A), 295 (350)					
	DS3087(A), DS3098						

Note: The A suffix (ex. DS3076**A**) identifies the AC power supply versions

(	
(	)
	/
www.lamtechnologies.com	
info@lomtochnologica.com	
inio@iamecrinologies.com	



LAM Technologies

Viale Ludovico Ariosto, 492/D 50019 Sesto Fiorentino (FI) – ITALY Ph. +39 055 4207746 – Fax +39 055 4207651