3.31: Schichtdickenbestimmung und Oberfächencharakterisierung von Polystyrolfilmen

Maximilian Rudolf Lubba
Matrikel-Nr.: [redacted]
[redacted]

Benjamin Wolfgang Kosmala
Matrikel-Nr.: [redacted]
[redacted]

Betreuer: M.Sc. Oliver Löhmann
Versuch durchgeführt am: 13. November 2017
Abgabedatum: 3. Dezember 2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Physikalisches Praktikum
für Fortgeschrittene

Abteilung B

Hiermit versichern wir, das vorliegende Protokoll für das Physikalische Praktikum für Fortgeschrittene ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 3. Dezember 2017,

Maximilian Rudolf Lubba

Benjamin Wolfgang Kosmala

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 2

2 Versuchsziel 2

3 Theoretische Grundlagen 2
- 3.1 Polymerbeschichtung . . . 2
- 3.2 Rotationsbeschichtung . . . 2
  - 3.2.1 Beschreibung des Verfahrens . . . 2
  - 3.2.2 Erwartete Zusammenhänge von Schichtdicke mit Rotationsgeschwindigkeit und Konzentration 3
  - 3.2.3 Andere Methoden . . . 3
- 3.3 Ellipsometrie . . . 3
  - 3.3.1 Polarisation . . . 3
  - 3.3.2 Jones-Beschreibung . . . 4
  - 3.3.3 Ellipsometrische Gleichung . . . 4
  - 3.3.4 Aufbau eines Ellipsometers . . . 5
  - 3.3.5 Nullellipsometrie . . . 5
- 3.4 Rasterkraftmikroskopie . . . 5
  - 3.4.1 Lennard-Jones-Potential . . . 5
  - 3.4.2 Kontaktmodus . . . 6
  - 3.4.3 Nicht-Kontaktmodus . . . 6
  - 3.4.4 Tapping-Mode . . . 6
  - 3.4.5 Praktische Umsetzung des Nicht-Kontaktmodus . . . 6
- 3.5 Gefahrenschutz . . . 7

4 Versuchsdurchführung 7
- 4.1 Probenpräparation . . . 7
- 4.2 Ellipsometrie . . . 8
  - 4.2.1 Rasterkraftmikroskopie (AFM) . . . 10

5 Auswertung 10
- 5.1 Auswertung zur Ellipsometrie . . . 11
- 5.2 Auswertung zum AFM . . . 14

6 Fazit 15

7 Quellenverzeichnis 15

8 Laborbuch 16

1 Einleitung

In technischen Anwendungen ist es öfters notwendig, Oberflächen mit passenden Materialien zu beschichten. Zum Beispiel bei der Herstellung von Fotowiderständen und Wafern (Substrate für elektronische Bauteile) oder Auftragen eines dünnen Schutzlacks auf Oberflächen. In diese können dann Schaltkreise o. Ä. eingearbeitet werden, wofür die darunterliegenden Substrate nicht geeignet sind.
Aber auch außerhalb von technischen Bereichen ist das Verfahren anzutreffen. Man kann durch Aufbringen einer solchen Beschichtung auch die optischen Eigenschaften einer Oberfläche ändern und so die Farbqualität und Langlebigkeit von Bildern verbessern.
In medizinischen oder landwirtschaftlichen Bereichen sind oft Feuchtigkeitsmessungen in kleinen Dimensionen durchzuführen. Aufgrund der hygroskopischen Eigenschaft vieler Polymere, Feuchtigkeit zu binden und dabei nicht zu zerfließen oder zu verklumpen, bieten diese sich sehr dafür an. Zudem liegt der Brechungsindex vieler Polymere in der Nähe von Wasser, weshalb sie bei Antireflektionsbeschichtungen anzutreffen sind.
Typische Schichtdicken liegen für dünne Schichten im Bereich von über 200 nm, für ultradünne Schichten im Bereich von weniger als 200 nm und weisen im Optimalfall eine homogene Oberfläche auf.

2 Versuchsziel

In diesem Versuch wird durch Rotationsbeschichtung ein Substrat mit Polystyrol-Lösung beschichtet und auf seine Eigenschaften untersucht. Dazu werden zunächst Lösungen hergestellt, in denen das Beschichtungsmaterial gelöst ist und Substrate angefertigt. Verschiedene Konzentrationen und Rotationsfrequenzen sollen dabei Rückschlüsse auf das Verhalten von Schichtdicke und Brechungsindex der Beschichtung zulassen. Nach Aufbringen der Beschichtung werden die Präparate in einem Ellipsometer auf Brechungsindex und Schichtdicke und in einem Rasterkraftmikroskop auf ihre Rauigkeit untersucht und die Qualität der Proben beurteilt.

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Polymerbeschichtung

Bei einem Polymer handelt es sich um einen Verbund aus Makromolekülen. Diese fügen sich entlang bestimmter Bindungspunkte aneinander an und bilden somit komplexe u.a. fadenartige Strukturen aus. Beispiele für Polymere sind Cellulose, Stärke, Dextrine, Pektine und Polypropylen. In diesem Versuch wird Polystyrol verwendet. Sonst eher als Kunststoff, der für Hüllen oder plastikartige Gebrauchsgegenstände verwendet wird und aufgeschäumt als Styropor bekannt ist, wird in diesem Versuch ein Siliziumplättchen damit beschichtet werden.

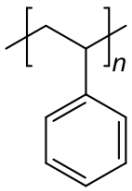


Abbildung 1: Struktur eines Polystyrol-Moleküls [1]

3.2 Rotationsbeschichtung

3.2.1 Beschreibung des Verfahrens

Das angewendete Verfahren in diesem Versuch ist die Rotationsbeschichtung. Der Aufbau ist in Abbildung 2 einzusehen:

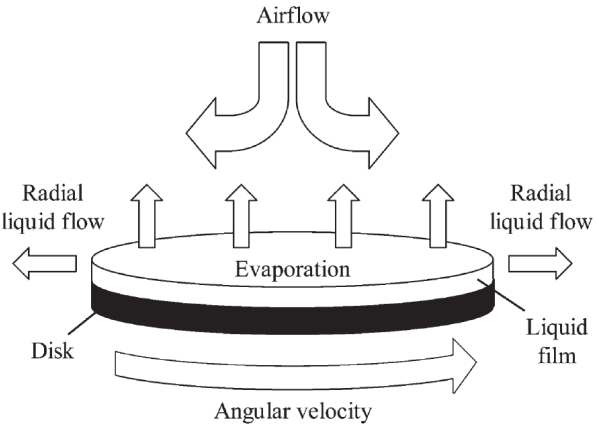


Abbildung 2: Aufbau und Funktionsweise eines Rotationsbeschichters [2]

Zuerst wird Polystyrol auf eine bestimmte Konzentration in einem bestimmten Lösungsmittel verdünnt. Nicht jedes ist hierbei geeignet. Beispielsweise würde Aceton Polystyrol stark lösen und vergleichsweise wenig verdunsten, sodass sich die Beschichtung per Rotation als eher ungeeignet erweisen würde. In diesem Versuch wird als Lösungsmittel Toluol genutzt.
Dann wird ein planares Substrat (wie bereits erwähnt ist das in diesem Versuch eine aus Silizium bestehende Platte von ca. $2 \times 2\ cm^2$) auf einem Drehteller platziert und durch Anlegen eines Vakuums befestigt. Die Polymer-Lösung wird darauf platziert und das Substrat rotiert. Um eine möglichst vollständige Beschichtung des Materials zu gewährleisten, wird dabei das gesamte Substrat mit Lösung versehen. Überschüssige Lösung wird beim Rotieren ohnehin durch die Zentrifugalkraft vom Wafer wegbefördert und zu wenig Lösung würde an den Rändern und auch womöglich in inneren Zonen für unregelmäßige Beschichtung sorgen.
Durch die bei der Rotation wirkende Zentrifugalkraft wird also die Lösungsflüssigkeit vom Wafer nach außen gedrängt. Die Polymere wechselwirken untereinander und mit der Substratoberfläche, werden also bei der Rotation nicht so leicht abgetragen wie die Lösung. Verstärkt wird dieser Effekt auch durch den fadenförmigen Aufbau der Polymere und die wirkenden Van-Der-Vaals-Kräfte. Beim Abtragen und auch Verdunsten des (flüchtigen) Lösemittels nimmt die Konzentration und damit die Viskosität der Lösung bei der Polymer-Umgebung-Grenze zu und verstärkt die Wechselwirkungen. Es bleibt im Idealfall ein homogener Film auf dem Substrat zurück.

3.2.2 Erwartete Zusammenhänge von Schichtdicke mit Rotationsgeschwindigkeit und Konzentration

Die Schichtdicke wird beschrieben durch:

$$h = kc(\eta_0 \Delta_0)^{\beta} \omega^{\alpha} \tag{1}$$

Wobei hier h die Schichtdicke, k eine Proportionalitätskonstante, c die Konzentration der Lösung, η_0 die Viskosität der Lösung, Δ_0 die Diffusion der Lösung und ω die Rotationsfrequenz darstellt. Dabei werden folgende Zusammenhänge erwartet: $h \sim c$ und $h \sim \omega^{-0,5}$.

3.2.3 Andere Methoden

Neben der Rotationsbeschichtung gibt es noch eine Vielzahl weiterer Techniken, um dünne Schichten auf Oberflächen anzubringen.
Ein weiteres Beispiel ist das Dip-Coating. Hier wird ein Substrat komplett in eine Polymer-Lösung getaucht und die Qualität der Beschichtung durch Viskosität und Konzentration der Lösung und durch die Beschaffenheit des Substrats festgelegt.

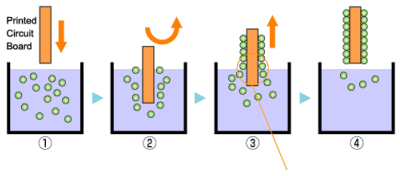


Abbildung 3: Vorgang beim Dip-Coating [3]

Ein weiteres oft genutztes Verfahren ist das Spray-Coating. Dabei wird eine Polymer-Lösung auf eine Oberfläche aufgesprüht und nur durch Verdunstungseffekte beschichtet. Die Qualität hängt hier von Konzentration, Tropfengröße und Beschaffenheit des Substrats ab.

3.3 Ellipsometrie

3.3.1 Polarisation

Licht ist eine elektromagnetische Welle, die sich entlang ihres Wellenvektors ausbreitet. Für die in diesem Versuch relevante Reflexion ist nur das elektrische Feld (i.F. E-Feld) von Bedeutung. Dieses lässt sich durch 2 linear unabhängige, orthogonale Vektoren beschreiben (x- und y-Richtung), die selber wiederum senkrecht auf dem Wellenvektor stehen (x-, y- und k-Vektor bilden also ein Dreibein aus). Dabei können die E-Feld-Komponenten verschiedene Amplituden und eine Phasendifferenz aufweisen. Man kann das E-Feld mathematisch durch

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \begin{pmatrix} |E_x| cos(2\pi \nu t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta_x) \\ |E_y| cos(2\pi \nu t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta_y) \end{pmatrix} \tag{2}$$

beschreiben, wobei $\vec{E}(\vec{r}, t)$ den E-Feld-Vektor, $|E_i|$ die Feldstärkeamplitude in x- bzw. y-Richtung, ν die Frequenz des E-Felds, t die Zeit, $\vec{k}$ den Wellenvektor, $\vec{r}$ den betrachteten Punkt im Raum und δ_i die Phasenverschiebung der x- und y-Komponente darstellt. Verschiedene Amplituden und Phasendifferenzen lassen sich nach bestimmten Regelmäßigkeiten einteilen, was man als Polarisation bezeichnet.

Man unterscheidet hierbei zwischen drei Arten:
Lineare Polarisation liegt vor, falls: $\delta_x - \delta_y = n\pi, n \in \mathbb{Z}$
Elliptische Polarisation liegt in allen anderen Fällen vor.
Zirkulare Polarisation ist ein Spezialfall der elliptischen und liegt vor bei : $\delta_x - \delta_y = n\pi + \frac{\pi}{2}, n \in \mathbb{Z}$ und $|E_x| = |E_y|$
Die Polarisationen sind in Abbildung 4 veranschaulicht.

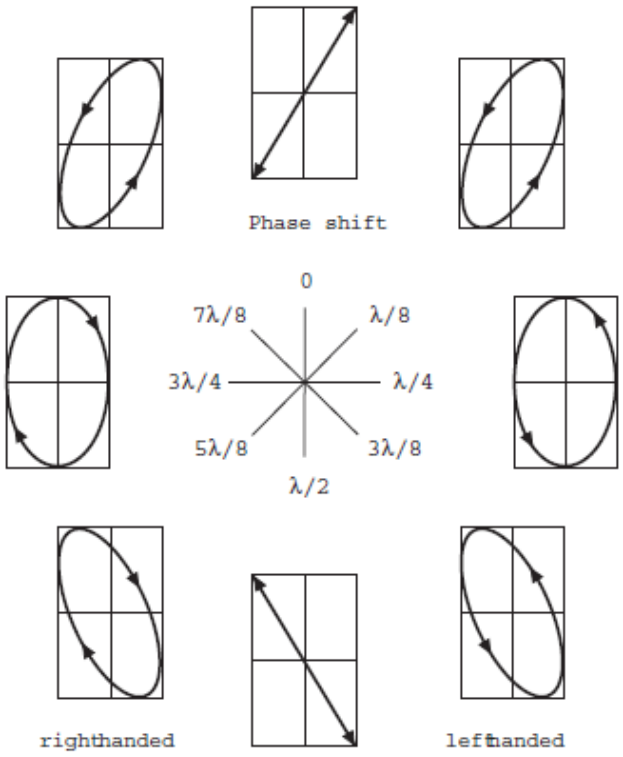


Abbildung 4: Verschiedene Arten der Polarisation [4]

3.3.2 Jones-Beschreibung

Die Polarisation lässt sich alleine durch die Amplituden und Phasendifferenzen beschreiben, weil sich die Polarisation ohne äußere Einwirkung mit der Zeit nicht ändert. An diesem Ansatz orientiert sich der sogenannte Jones Vektor.

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \begin{pmatrix} |E_x| e^{i\delta_x} \\ |E_y| e^{i\delta_y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \tag{3}$$

Dabei stellt dieser jede Art von Polarisation als Linearkombination der E-Felder dar.

3.3.3 Ellipsometrische Gleichung

Da bei Reflexion an Grenzflächen verschiedene Polarisationen unterschiedlich reflektiert werden und es zu Phasensprüngen kommen kann, ändern sich die Amplituden und Phasenbeziehungen des Lichtstrahls. Diese Änderungen werden durch die ellipsometrischen Winkel

$$\Delta = (\delta_x^r - \delta_y^r) - (\delta_x^i - \delta_y^i) \tag{4}$$

$$\tan(\Psi) = \frac{|E_x^r|/|E_x^i|}{|E_y^r|/|E_y^i|} \tag{5}$$

wobei Formelzeichen, die mit einem i versehen sind, vor der Reflektion und Formelzeichen, die mit einem r versehen sind, nach der Reflektion auftretende Größen kennzeichnen, charakterisiert, was auf die zentrale Gleichung der Ellipsometrie führt:

$$\tan(\Psi) \cdot e^{i\Delta} = \frac{r_x}{r_y} \tag{6}$$

Hierbei stehen r_i für die Reflektionskoeffizienten in x- und y-Richtung. Die ellipsometrischen Winkel stehen für keine direkt messbaren Winkel, hängen aber mit solchen zusammen.
Über Fresnel-Gleichungen lässt sich eine weitere Darstellung für $\frac{r_x}{r_y}$ gewinnen, die von Umgebungsbrechungsindex, Einfallswinkel des Lichtstrahls, Schichtdicke und Brechungsindex der Schicht abhängt und so Rückschlüsse auf die letzten zwei Größen liefert, die in diesem Versuch im Vordergrund stehen.

3.3.4 Aufbau eines Ellipsometers

Ein Ellipsometer ist im Allgemeinen folgendermaßen aufgebaut:

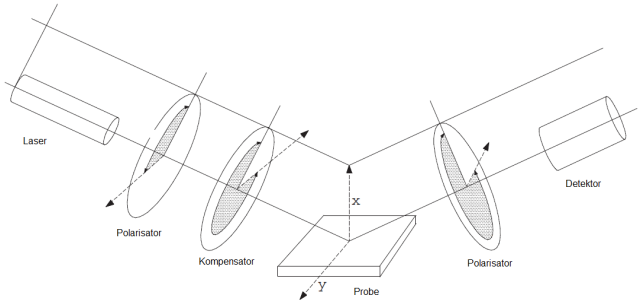


Abbildung 5: Aufbau eines Ellipsometers [4]

Ein Ellipsometer besteht aus einer Lichtquelle (hier vorzugsweise ein Laser, da dieser sehr intensives Licht auf kleiner Fläche erzeugt, wobei das Licht nur eine Wellenlänge enthalten sollte, damit es nicht zu Interferenzeffekten bei der wellenlängenabhängigen Brechung von Licht kommt, wobei es aber auch Ellipsometer gibt, die mit mehreren Wellenlängen arbeiten), einem Polarisator (er macht aus dem unpolarisiertem Licht linear polarisiertes), einem Kompensator (er erzeugt eine Phasenverschiebung der Komponenten des linear polarisierten Lichts), der Probe, an der reflektiert wird, einem weiteren Polarisator (er dient der Messung der Polarisation des von der Oberfläche reflektierten Lichts) und einem Detektor (er misst die Intensität des ankommenden Lichts).
Hierbei kann jedes Bauteil durch eine entsprechende Matrix beschrieben werden, sodass das gesamte System durch eine Hintereinanderausführung von Bauteil- und Trafomatrizen beschrieben werden kann (Vgl. Seite 9 in [4]). Aus dieser lassen sich dann Rückschlüsse auf die ellipsometrischen Winkel ziehen.

3.3.5 Nullellipsometrie

In diesem Versuch wird Nullellipsometrie genutzt, d. h. die Messung findet dadurch statt, dass kein Licht am Detektor ankommt. Stellt man den Kompensator so ein, dass seine schnelle Achse im ±45°-Winkel zur Einfallsebene des Lichtes steht steht, so erhält man Gleichungen, die Δ und Ψ mit den Winkeln der Polarisatoren (P_0 und A_0) identifizieren:

$$\tan(\Psi)\cdot e^{i\Delta} = \frac{r_x}{r_y} = \pm\tan(A_0)\exp\left[i\left(\pm 2P_0 + \frac{\pi}{2}\right)\right] \tag{7}$$

3.4 Rasterkraftmikroskopie

Für die Rasterkraftmikroskopie besteht das wesentliche Messprinzip darin, den Einfluss des auf atomarer Ebene wirkenden Potentials auf eine dünne Nadelspitze an einem Hebelarm zu messen. Die Vorrichtung aus Nadelspitze und Hebelarm nennt man auch Cantilever.

3.4.1 Lennard-Jones-Potential

Das Potential, mit dem der Cantilever in Wechselwirkung tritt, ist das sogenannte Lennard-Jones-Potential. Dieses setzt sich aus dem attraktiven Van-der-Vaals-Potential sowie dem repulsiven Potential, hervorgerufen durch die elektrostatische Abstoßung, zusammen.

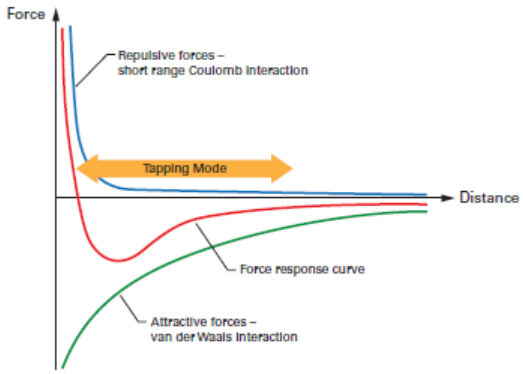


Abbildung 6: Lennard-Jones-Potential bestehend aus Van-der-Vaals-Potential und Coulomb-Potential [5]

Je nach Arbeitsbereich im Potential unterscheidet man zwischen drei Betriebsmodi.

3.4.2 Kontaktmodus

Die Kontaktmodi werden auch als statisch bezeichnet, da hier der Cantilever nicht in Schwingung versetzt wird. Bei solchen wird mit konstantem Abstand der Messkopf über die Probe gefahren, sodass die Auslenkung des Cantilevers gemessen wird.
Oder man stellt den Abstand kontinuierlich nach, um so die Auslenkung konstant zu halten.
Diese Modi sind schädlicher für Probe und Messkopf, da diese im direkten physischen Kontakt zueinander stehen.

3.4.3 Nicht-Kontaktmodus

Beim dynamischen Modus regt man den Cantilever bei oder in der Nähe seiner freien (d. h. ohne äußere Einwirkungen) Resonanzfrequenz an.
Bei diesem Modus fährt man in konstantem Abstand über die Probe, sodass sich aufgrund der wirkenden Kräfte die Eigenfrequenz des Cantilevers, wobei die relative Änderung dieser ein Maß für das Höhenprofil der Probe darstellt, verschiebt.

3.4.4 Tapping-Mode

Zuletzt gibt es noch den sogenannten Tapping-Mode. Bei diesem wird der Abstand so nachgeregelt, dass die Eigenfrequenzverschiebung konstant bleibt.
Beim Nichtkontaktmodus mit konstantem Abstand besteht zwar keine Gefahr für Probe und Messkopf, aber aufgrund der relativ schwachen attraktiven Kraft, in der dieser Modus operiert, gestaltet sich genaues Messen schwer. Beim Tapping-Mode geht man daher einen Kompromiss ein, welcher nur kurzzeitig Kontakt herstellt und trotzdem eine große Eigenfrequenzverschiebung zulässt, welche durch kontinuierliches Nachregeln der Höhe kompensiert wird.
Allgemein kann das Umgebungsmedium (wie z. B. Gase und Flüssigkeiten) dafür sorgen, dass zusätzliche Dämpfungseffekte auftreten.

3.4.5 Praktische Umsetzung des Nicht-Kontaktmodus

Dabei gibt es mehrere Möglichkeiten, die Nadel anzuregen. Zum Beispiel durch einen Piezoaktuator (d. h. durch Anlegen einer oszillierenden Spannung findet Verformung im Piezo-Kristall statt, die als mechanischer Ausschlag die Nadel bewegt. Dabei kann aber auch das umgebende Medium angeregt werden). Die gesamte Apparatur ist in Abbildung 7 einzusehen:

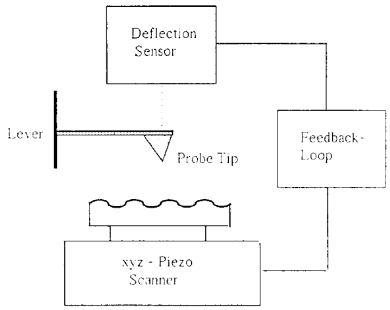


Abbildung 7: Aufbau eines Rasterkraftmikroskops [6]

Dabei misst der Sensor kontinuierlich den Ausschlag des Cantilevers und die Messapparatur(Feedbackloop) passt die Höhe durch den "xyz - Piezo Scanner"an. Dieser Scanner sorgt auch für die horizontale Bewegung der Probe.
Anstelle eines Piezo-Kristalls lässt sich zum Anregen des Cantilevers auch ein oszillierendes Magnetfeld bei magnetisierter Nadel anlegen.
Mathematisch kann dieses Problem also als eindimensionale, angetriebene und von Umgebungskräften beeinflusste Schwingung betrachtet werden. Die hierbei anliegenden Kräfte liegen im Bereich von $\approx 10^{-11}\ N$ bis $\approx 10^{-6}\ N$ und zerstören die Atomverbunde somit nicht (kovalente Bindungen $\approx 10^{-9}\ N$ [7]).
Zum Auslesen der Auslenkung und effektiv auch der Frequenz benutzt man entweder ein Tunnelmikroskop oder (wie bei diesem Versuch) einen Laser, der am Cantilever reflektiert wird.
Durch einen entsprechenden CMOS-Sensor kann die Auslenkung und Scherung des Cantilevers bestimmt werden.

3.5 Gefahrenschutz

Für die folgenden Chemikalien wurden folgende Hinweise aus den H- und P-Sätzen entnommen:
Silizium kann in Staubform i. A. zu Lungenkrankheiten führen, wenn man es einatmet und reizt/entzündet zudem Augen und Haut bei Kontakt.
Toluol führt beim Verschlucken und Einatmen zu Benommenheit, Organschädigung oder Tod. Bei Hautkontakt kann es zu Hautreizungen kommen. Weiterhin sind Dampf und Flüssigkeit leicht entzündlich. Toluol muss deshalb in einem gut verschlossenem Behälter an einen gut belüftetem Ort aufbewahrt werden.
Ethanol als Flüssigkeit und Gas ist leicht entzündlich und reizt die Augen bei Kontakt. Es muss daher in einem dicht verschlossenem Behälter und gut belüftetem Raum aufbewahrt werden.
Sollte es dennoch zum Hautkontakt, Verschlucken oder Einatmen kommen, so sind die betroffenen Stellen gründlich mit Wasser ab-/auszuspülen, mit Seife zu waschen und im Zweifelsfall ein Arzt zu konsultieren.
Laser der Klasse 1M sind für das Auge ungefährlich, können aber durch optische Instrumente zu Klassen 3R oder 3B verstärkt werden.
Laser der Klasse 3R sind an sich bereits gefährlich für das Auge, 3B zudem noch für die Haut.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Probenpräparation

Zunächst müssen die Wafer vorbereitet werden, auf die die Lösung später aufgebracht wird. Um die Wafer anzufertigen, wird aus einer großen Siliziumscheibe ein passendes Stück mit einem Glasschneider abgetrennt und dieses zu 7 $2 \times 2\ \mathrm{cm}^2$-Päparaten verarbeitet. Nach Eintauchen in Ethanol und Platzieren für 5 Minuten in einem Ultraschall-Bad werden die Substrate mit Druckluft gereinigt.
Die Stammlösung an in Toluol gelöstem Polystyrol (100 g/L) wird mithilfe einer manuellen Mikro-Kolben-Hub-Pipette in 10 ml Maßkolben abgefüllt. Um die dabei gewünschten Konzentrationen zu erhalten, werden bestimmte Mengen an Stammlösung in die Maßkolben gegeben und bis zur 10 ml Marke mit Toluol weiter verdünnt. Dabei wird darauf geachtet, dass trotz Kapillareffekt möglichst genau 10 ml Lösung in jedem Maßkolben sind. Auch wird für jede neue Konzentration eine neue Pipette zum Auffüllen mit Toluol verwendet, um Fehler zu vermeiden.
Die benötigten Mengen an Stammlösung berechnen sich folgendermaßen:

Die Stammlösung hat eine konstante Konzentration von 100 g/L. Diese wird nun auf andere Volumina so verteilt, dass sich niedrigere Konzentrationen ergeben:

$$c_S = \frac{m}{V_S} \tag{8}$$

$$c_i = \frac{m}{V_i} \tag{9}$$

Hierbei bezeichnet c_S die Konzentration der Stammlösung, c_i die gewünschte Konzentration, m die Masse des gelösten Stoffes, V_S das benötigte Volumen an Stammlösung und V_i das Volumen der neuen Konzentration. Einsetzen der Masse der Stammlösungskonzentration in die Masse einer niedrigeren Konzentration liefert nach Umformen einen Ausdruck für das Volumen einer niedriger konzentrierten Lösung, die aber 10 ml betragen soll:

$$V_i = \frac{c_S \cdot V_S}{c_i} = 10\ ml \tag{10}$$

Umgestellt nach V_S erhält man einen Ausdruck für die Menge an Stammlösung, die mit Lösungsmittel auf 10 ml aufgefüllt wird und dann die gewünschte Konzentration liefert:

$$V_S = 10\ ml \cdot \frac{c_i}{c_S} \tag{11}$$

Die benötigten Volumina sind in folgender Tabelle aufgetragen:

Konzentration in $[\frac{g}{L}]$	5	10	15	20	25
Benötigte Stammlösung in [ml]	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5

Tabelle 1: Konzentration und benötigte Menge an Stammlösung

Anschließend werden die Wafer auf das Ansaugloch im Rotationsbeschichter platziert und mit Unterdruck an diesem fixiert. Die Kammer wird geschlossen und die Rotationsdauer und -geschwindigkeit eingestellt.
Die Rotationsdauer beträgt hierbei 30 Sekunden. Alle Konzentrationen werden bei der Umlauffrequenz 2000 rpm und zusätzlich die 15 g/L Konzentration bei 1000 rpm und 3000 rpm rotiert. Durch ein oberes Zugangsloch können mit immer wechselnden Pipetten die einzelnen Lösungen auf die Wafer getropft werden. Dabei wird auf eine möglichst vollständige Bedeckung des Wafers geachtet. Anschließend wird die Rotation in Gang gesetzt und nach Abschluss dieser die Ansaugpumpe abgestellt. Daraufhin werden die nun beschichteten Wafer mit einer Pinzette in kleinen Petrischalen verwahrt.

4.2 Ellipsometrie

Es wird die 5 g/L Probe auf den Probentisch des Ellipsometer platziert. Damit der Laserstrahl möglichst mittig auf den Sensor auftrifft, wurde mittels eines Rohrs mit optischem Abschwächer der Probentisch so ausgerichtet, dass der Laserstrahl auf ein am Rohrende aufgebrachtes Fadenkreuz mittig auftrifft. Das Rohr wird dann entfernt und der Sensor wieder eingebracht, die Feinausrichtung erfolgt durch die Computersoftware, welcher der Auftreffpunkt des Lasers auf dem CMOS-Sensor zu entnehmen ist.
Nun werden die Proben so verschoben, dass an 3 bzw. 5 Stellen eine Messung mit anschließendem Fit durch die Software, die ellipsometrischen Konstanten (mit Ungenauigkeiten), Brechzahlen und Schichtdicken bestimmt werden können. Das verwendete Fitmodell wird hier beschrieben:

Schicht	Brechungsindex	Absorptionskoeffizient	Schichtdicke in [nm]
Luft	1,00027	0	Kontinuum
Polystyrol	-Zu bestimmen-	0	-Zu bestimmen-
Siliziumoxid	1,45708	0	1,5
Silizium	3,885	-0,018	Kontinuum

Tabelle 2: Modellparameter des Fits

Gemessen bei:
Wellenlänge des Lasers $\lambda = 632,8\ nm$, Umgebungstemperatur $\approx 23\ ^\circ C$, Luftfeuchte $\approx 30\%$ und Einfallswinkel $= 70\ ^\circ$. Die Messergebnisse der einzelnen Proben sind nachfolgend dargestellt:

Δ	121,861	121,221	122,45	122,964	122,246
Ψ	15,109	15,181	14,995	15,108	15,043
n	1,49741	1,5145	1,49891	1,49021	1,49536
h in [nm]	22,8	22,8	22,4	22,9	22,6
$\Delta - \Delta^\circ$	0	0	0	0	0,003
$\Psi - \Psi^\circ$	-0,001	0	0	0,001	-0,001

Tabelle 3: Ermittelte Werte der Lösung 5 g/L bei 2000 rpm

Δ	95,077	94,908	95,322
Ψ	22,096	22,144	22
n	1,55081	1,55232	1,5512
h in [nm]	43,4	43,5	43,1
$\Delta - \Delta^\circ$	0,001	0	0,001
$\Psi - \Psi^\circ$	0,003	0,003	-0,002

Tabelle 4: Ermittelte Werte der Lösung 10 g/L bei 2000 rpm

Δ	74,499	73,995	73,902	74,238	74,126
Ψ	34,577	34,649	34,704	34,681	34,752
n	1,56903	1,5775	1,5784	1,57247	1,57346
h in [nm]	77	76,8	76,9	77,1	77,2
$\Delta - \Delta^\circ$	0,001	0	0,004	0	0,007
$\Psi - \Psi^\circ$	-0,001	0	-0,001	0	0

Tabelle 5: Ermittelte Werte der Lösung 15 g/L bei 2000 rpm

Δ	57,692	57	57,667
Ψ	61,774	61,315	61,426
n	1,59398	1,59941	1,59575
h in [nm]	108,3	107,6	108
$\Delta - \Delta^\circ$	0	0,001	0
$\Psi - \Psi^\circ$	0	-0,004	-0,002

Tabelle 6: Ermittelte Werte der Lösung 20 g/L bei 2000 rpm

Δ	292,018	291,421	291,798	291,902	292,018
Ψ	47,796	45,934	47,708	47,754	47,503
n	1,57876	1,57891	1,57693	1,57783	1,57968
h in [nm]	148,7	150,8	149,1	148,9	148,9
$\Delta - \Delta^\circ$	0	-0,003	-0,005	0,003	-0,002
$\Psi - \Psi^\circ$	0,001	0,001	0,002	0,001	-0,002

Tabelle 7: Ermittelte Werte der Lösung 25 g/L bei 2000 rpm

Δ	64,790	64,717	65,04
Ψ	54,461	54,755	54,576
n	1,58394	1,58342	1,58181
h in [nm]	103,4	103,7	103,7
$\Delta - \Delta^\circ$	0	0	0
$\Psi - \Psi^\circ$	-0,002	0	-0,002

Tabelle 8: Ermittelte Werte der Lösung 15 g/L bei 1000 rpm

Δ	79,366	79,423	79,538
Ψ	29,791	29,776	29,789
n	1,56964	1,56906	1,5657
h in [nm]	65,2	65,1	65,3
$\Delta - \Delta°$	0,005	0,003	0,003
$\Psi - \Psi°$	0,002	-0,006	0,001

Tabelle 9: Ermittelte Werte der Lösung 15 g/L bei 3000 rpm

4.2.1 Rasterkraftmikroskopie (AFM)

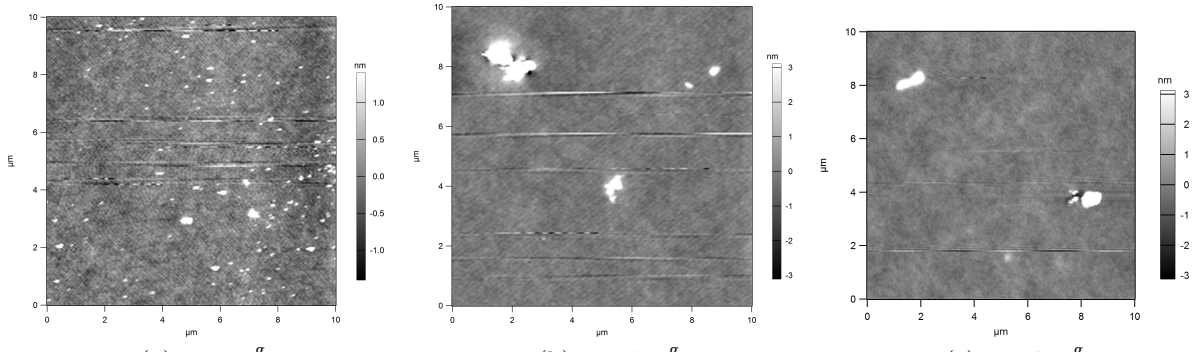
Unter einem AFM werden nun die Proben untersucht, die bei der Ellipsometrie an fünf Stellen vermessen wurden. Dazu werden die verschiedenen Proben unter dem dafür vorgesehenen Messkopf fixiert und dieser auf maximale Höhe ausgefahren, um eine möglichst flexible Einstellung zu gewährleisten. Mittels der Mikroskopsoftware kann auf eine Kamera zugegriffen werden, mithilfe derer der Laser mittig auf den vorderen Teil des Cantilevers eingestellt werden kann. Nach einer Kalibrierung können Federkonstante, Eigenfrequenz und Auslenkung des Cantilevers bestimmt werden:

Eigenfrequenz: 255,629 kHz
Federkonstante: 21,10 $\frac{N}{m}$
Auslenkung (in Abhängigkeit von der Piezospannung): 102,41 $\frac{nm}{V}$

Der maximal nach unten ausgelenkte Piezokristall wird passend an die Probe herangefahren und es werden Bereiche der Größe $10 \times 10\ \mu m^2$ abgerastert. Nach anschließender Bildbearbeitung, bei der Bildartefakte und Verkippung (Cantilever und Probe sind i. A. nicht orthogonal zueinander) ausgeglichen werden, können die Topologien der Proben erstellt werden. Diese und die von der Software bestimmten Rauigkeiten sind nachfolgend einzusehen. Es werden bei auch nach der Bearbeitung nicht ganz homogenen Flächen auch die Rauigkeiten homogener Abschnitte der Größe $2 \times 2\ \mu m^2$ bestimmt:

c in $[\frac{g}{L}]$	R_{gesamt} in [nm]	R_{lokal} in [pm]
5	0,699	212,73
15	1,319	242,215
25	1,962	269,281

Tabelle 10: Tabelle der topologischen Profile und bestimmten lokalen und gesamten Rauigkeiten



(a) $c = 5\ \frac{g}{L}$ (b) $c = 15\ \frac{g}{L}$ (c) $c = 25\ \frac{g}{L}$

Abbildung 8: Mit dem AFM vermesse Proben und vor Ort entstandene Bilder

5 Auswertung

5.1 Auswertung zur Ellipsometrie

Es werden die Brechungsindizes und Schichtdicken der einzelnen Proben gemittelt und die Ungenauigkeiten mittels Standardabweichung bestimmt. Diese sind im Folgenden einzusehen:

Konzentration in $[\frac{g}{L}]$	5	10	15	15	15	20	25
RPM in $[\frac{1}{min}]$	2000	2000	1000	2000	3000	2000	2000
Gemittelter Brechungsindex $\bar{n}$	1,499	1,5514	1,583	1,574	1,568	1,596	1,578
Ungenauigkeit $\Delta\bar{n}$	0,009	0,0008	0,001	0,004	0,002	0,003	0,001
Gemittelte Schichtdicke $\bar{h}$ in $[nm]$	22,7	43,3	103,6	77,0	65,2	108,0	149,3
Ungenauigkeit $\Delta\bar{h}$ in $[nm]$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,4	0,9

Tabelle 11: Gemittelte Brechungsindizes und Schichtdicken mit dazugehörigen Standardabweichungen der einzelnen Proben

Nachfolgend wird die Schichtdicke über die Konzentration und die Rotationsfrequenz aufgetragen. Dabei werden mittels Gnuplot die Exponenten α und β der Zusammenhänge

$$h \sim c^{\alpha} \sim \omega^{\beta}$$

bestimmt.

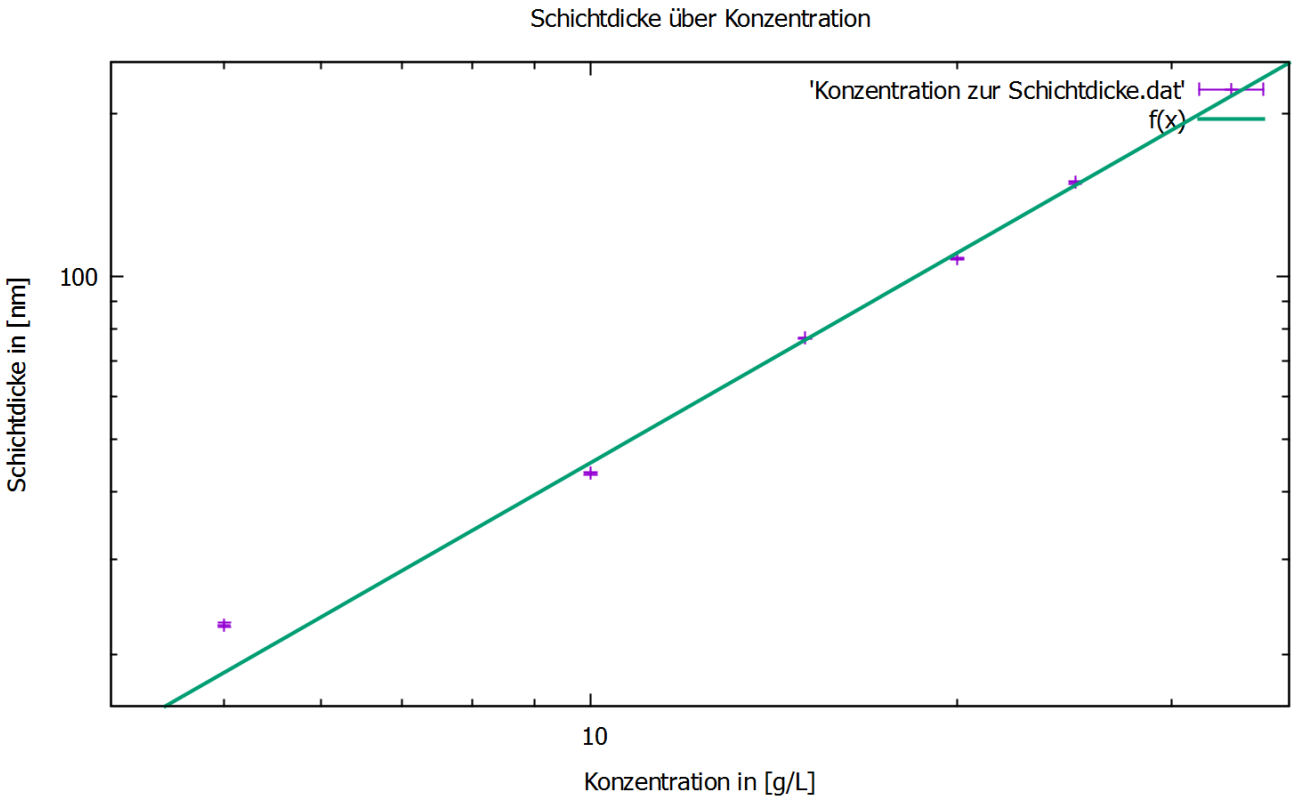


Abbildung 9: Schichtdicke über Konzentration

Mit der Fitfunktion:

$$h(c) = (2,33 \pm 0,41)\ \frac{nm}{\frac{g}{L}} \cdot c^{(1,29 \pm 0,06)} \tag{12}$$

Hierbei wird $\alpha \approx 1,3$ bestimmt. Dies liegt in der Nähe des erwarteten Wertes von $\alpha_{theoretisch} = 1$. Die relative Abweichung beträgt hier $\approx 30\%$. Das Bestimmtheitsmaß für diesen Fit liegt bei $R^2 \approx 0,9918$.

Nun folgt der Plot über die Rotationsfrequenz:

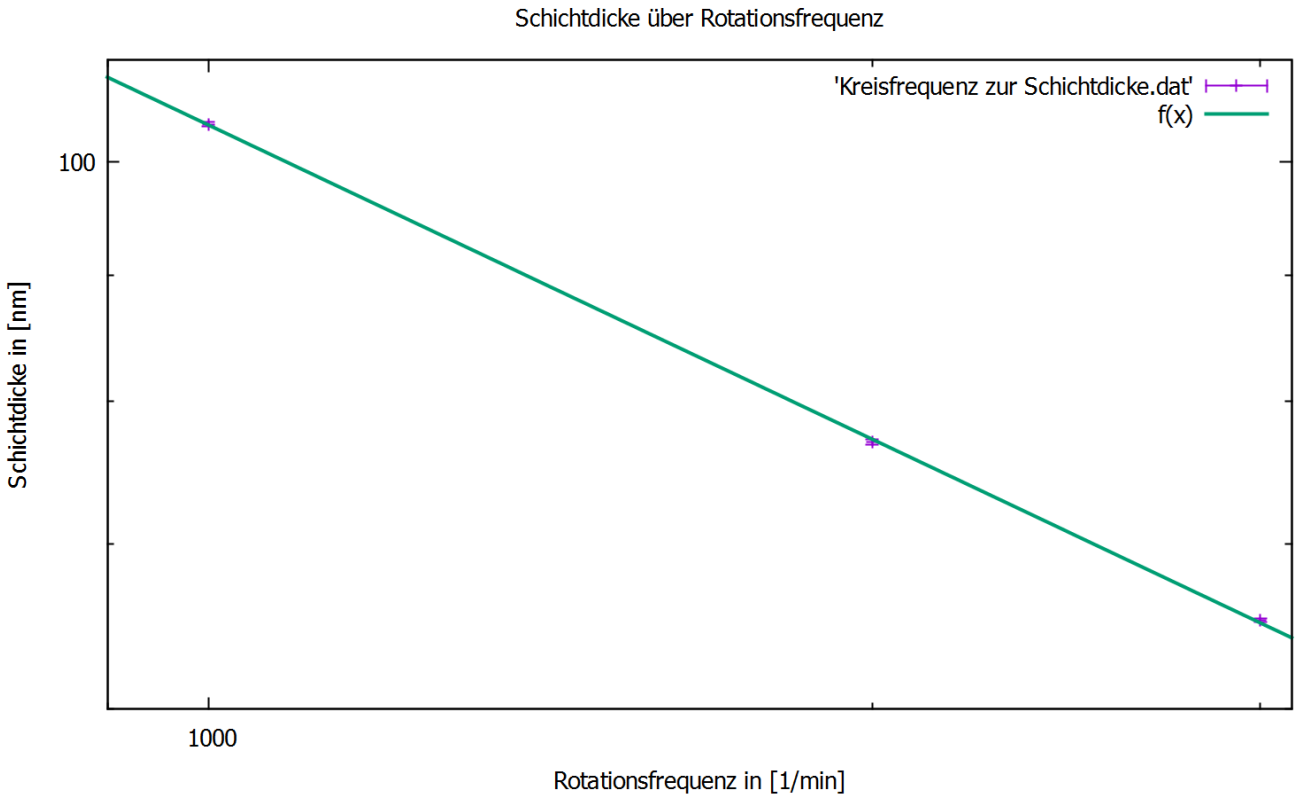


Abbildung 10: Schichtdicke über Rotationsfrequenz

Mit der Fitfunktion:

$$h(\omega) = (1926 \pm 60)\ \frac{nm}{\frac{1}{min}} \cdot \omega^{(-0{,}423 \pm 0{,}004)} \tag{13}$$

Hierbei wird $\beta \approx -0,42$ bestimmt und liegt um den erwarteten Wert von $\beta_{theoretisch} = -0,5$. Die relative Abweichung beträgt hier $\approx 16\%$. Das Bestimmtheitsmaß für diesen Fit liegt bei $R^2 \approx 0,9998$.

Die relativen Abweichungen liegen hier sehr hoch und sind nicht mit den durch den Plot verursachten Ungenauigkeiten in Verbindung zu bringen. Hierfür könnten andere Ursachen verantwortlich sein:
Das Fitmodell berücksichtigt zwar bereits, dass der Laserstrahl mehrere Schichten durchdringen muss (Luft, Polymerschicht, Siliziumoxid, Silizium), es ist aber nicht nachzuvollziehen, ob nicht noch mehr Parameter ins Fitmodell eingehen müssten. Etwa, dass sich mehrere Polymerschichten ausbilden können, da beim Beschichten die Polymerkonzentration zum Substrat hin sprunghaft anwächst. In der Lösungsschicht liegt nämlich ein Konzentrationsgradient vor, weil sich die Polymere eher in der Nähe des Substrates befinden. Die Viskosität ist in Bereichen von hoher und niedriger Konzentration proportional zu selbiger, die Gerade ist in Bereichen hoher Konzentrationen aber steiler. Im Bereich außerhalb dieser Konzentrationen (man spricht hier auch von der Überlappkonzentration wenn c größer ist als ein gewisses c_{min}) verläuft sie linear, dies ist sehr von Polymer- und Lösungsmitteleigenschaften abhängig und beeinflusst die Schichtdicke entsprechend. Zudem liegt in diesem Bereich eine Abhängigkeit von der Rotationsgeschwindigkeit vor. Wobei für c größer c_{max} die Viskosität bereits zu beginn der Rotation durch eine Überlappung der Polymere sehr stark ansteigt.
Am wahrscheinlichsten ist aber eine ungenaue Anfertigung der Proben: Nach Erstellen der Lösungen wurden die Konzentrationen nicht verfiziert, es könnte also Abweichungen geben. Beim Erstellen der Siliziumsubstrate könnten Kratzer auf den Oberflächen entstanden sein, die nicht erfasst wurden. Zudem könnte trotz Reinigung mit einer Stickstoffpistole und Transport in Petrischalen Staub o. Ä. auf die Substrate gelangt sein und die Messung beeinflussen. Letzteres wird vom Aussehen der Proben nach der Rotation bekräftigt, da einige Proben trotz vollständiger Bedeckung mit Lösung vor der Rotation nicht vollständig beschichtet wurden.
Bei der Auftragung der Schichtdicke auf die Rotationsfrequenz kommt noch hinzu, dass sehr wenige Werte aufgenommen wurden und die eben genannten Ursachen hier umso mehr wirken könnten.

Ebenso lässt sich der Zusammenhang von Brechungsindex zu Konzentration und Rotationsfrequenz betrachten. Hier sollte sich im Wesentlichen keine große Änderung bemerkbar machen, weil der Brechungsindex mit der (optischen) Dichte zusammenhängt, was eine stoffspezifische Eigenschaft ist. Die Menge an Stoff oder die Art und Weise der Auftragung sollten hierbei keine Rolle spielen. Demzufolge sollten Konzentration und Rotationsfrequenz keinen Einfluss haben.
Trägt man den Brechungsindex auf Konzentration und Rotationsfrequenz auf, so ergeben sich:

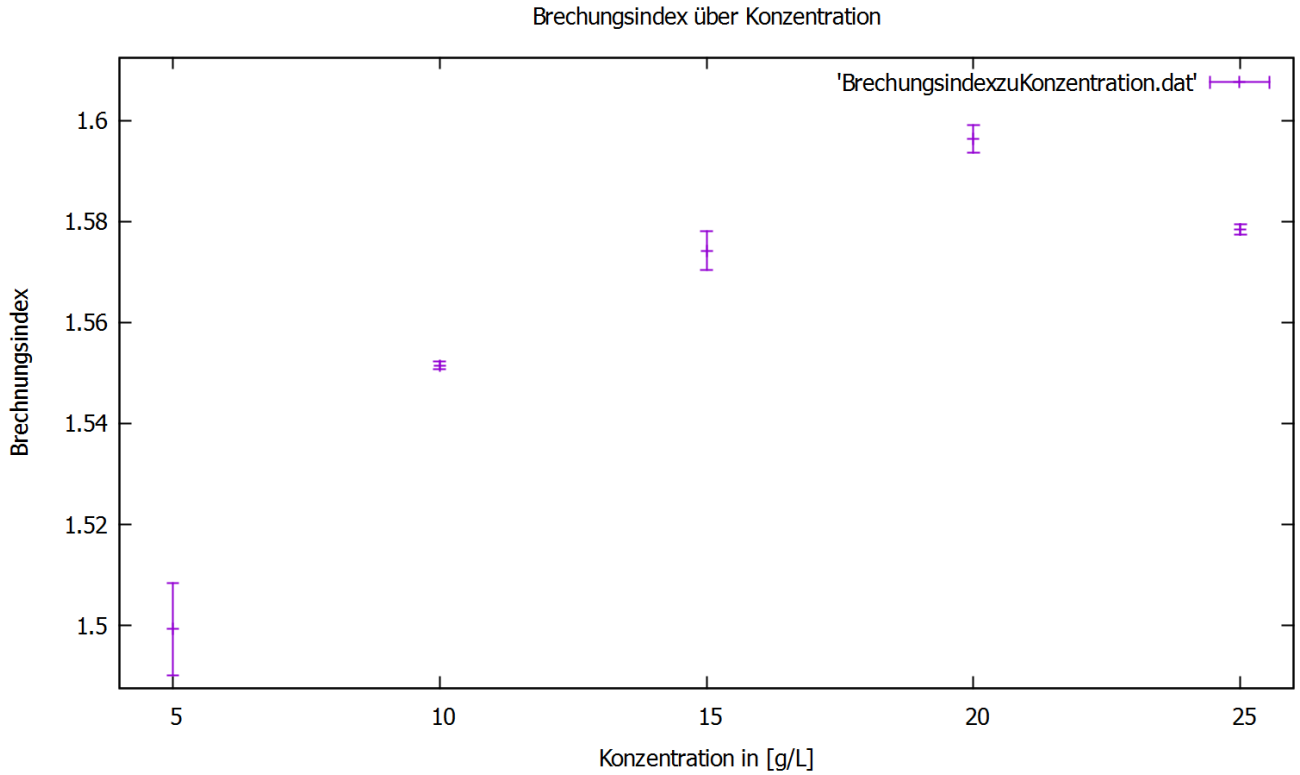


Abbildung 11: Brechungsindex über Konzentration

Dass beim Brechungsindex der Wert bei 5 g/L verhältnismäßig weit unten zu finden ist, könnte damit zu erklären sein, dass bei einer so niedrigen Konzentration die Polymere noch nicht nahe genug beieinander liegen, um sie als eine Schicht mit einheitlichem Brechungsindex aufzufassen, weil sich noch zu viele Hohlräume dazwischen befinden, die den Brechungsindex durchschnittlich absenken.
Die restlichen vier Werte sind in einem verhältnismäßig kleinen Bereich von 0,04 Einheiten anzufinden und aufgrund ihres Verlaufs nur schwer einer Systematik zuzuordnen. Zudem können die Schwankungen des Konzentrationsgradienten einen Einfluss haben.

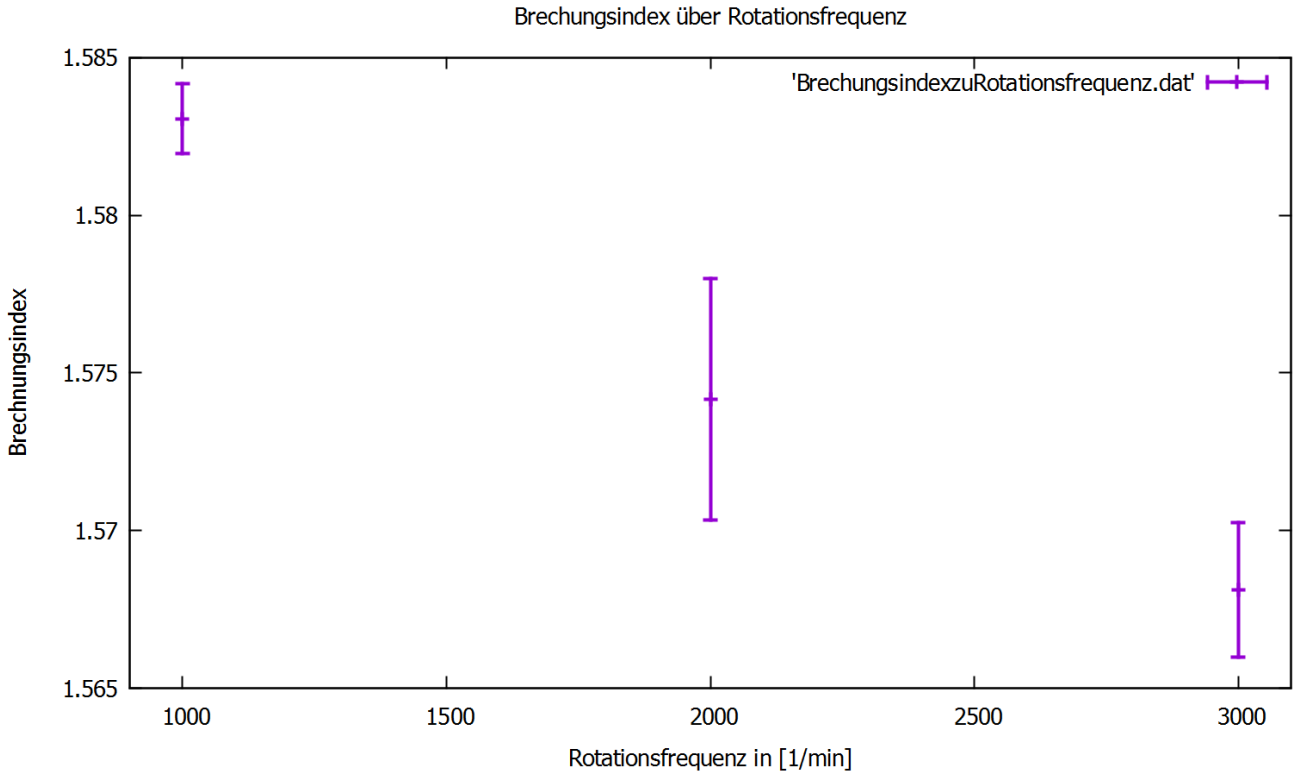


Abbildung 12: Brechungsindex über Rotationsfrequenz

Genauso bei der Auftragung des Brechungsindexes auf die Rotationsfrequenz: Hier lässt sich schon eher ein Verlauf erkennen, der damit erklärt werden kann, dass bei hohen Rotationsfrequenzen das Material ausgedehnt wird und sich Hohlräume ausbilden, sich also ähnlich zur vorherigen Auftragung eine Inhomogenität der Beschichtung mit ansteigender Rotationsfrequenz einstellt. Auch hier ist das Intervall, in dem sich die Brechungsindizes befinden, mit 0,02 sehr klein. Allerdings könnte hier auch die Überlappkonzentration Auswirkungen gehabt haben.
Für beide Betrachtungen könnte noch die Rauigkeit der Schicht eine Rolle spielen, da schon die Oberfläche ohne Berücksichtigung der Hohlräume nicht komplett planar ist und der Laserstrahl nicht optimal reflektiert wird.
Es könnte sich aber auch um statistische Einflüsse handeln, die insbesondere bei Auftragungen auf der Rotationsfrequenz zum Tragen kommen könnten, weil hier nur wenige Werte aufgenommen wurden. Mehr Werte aufzunehmen könnte die Schwankungen also reduzieren.

5.2 Auswertung zum AFM

Zuletzt wird die Messung im Ellipsometer mit der des Rasterkraftmikroskops verglichen. Dazu werden die gemessen Rauigkeiten der Proben gegenübergestellt.
Im Rasterkraftmikroskop sind die Rauigkeiten durch ein Programm (bzw. im Nachhinein durch andere Software) ermittelt worden, während sie aus dem Ellipsometer über die Standardabweichungen der Schichtdicken gegeben ist. Eine Gegenüberstellung ist in folgender Tabelle zu finden:

c in $[\frac{g}{L}]$	R_{lokal} in [pm]	Δh in [pm]
5	212,73	200
15	242,215	200
25	269,281	900

Tabelle 12: Rauigkeiten der verschiedenen Messungen

Die Werte befinden sich in der gleichen Größenordnung, was auf die prinzipielle Möglichkeit der beiden Messaparaturen, für Rauigkeitsbestimmung genutzt zu werden, und eine Plausibilität der Messwerte hinweist. Die Streuung der Werte ist beim Ellipsometer zwar größer, bei Betrachtung der Werte für die Schichtdicken der 25 g/L-Probe fällt aber auf, dass nur der zweite Wert für die große Streuung verantwortlich ist und sich die restlichen in einem

ähnlich kleinen Bereich wie 200 pm befinden. Bekräftigt wird dieser Gedanke durch die anderen sehr niedrigen Ungenauigkeiten der anderen Schichtdicken.
Dennoch ist das AFM als genauere Messapparatur anzusehen, da die Präzision (also die Streuung der Werte) gering(-er als beim Ellipsometer) ausfällt und im Vergleich zum Laser Inhomogenitäten der Oberfläche gezielt aus weiteren Messungen herausgenommen werden können, was beim Ellipsometer nicht möglich ist. Zudem können Kratzer in der Substratoberfläche zu starken Abweichungen bei der Lasermessung führen (weshalb auch einige Messreihen (wie im Laborbuch zu sehen ist) herausgenommen werden mussten, weil sie sich als Kratzer herausgestellt haben), was nicht unbedingt ersichtlich ist, beim AFM aber sofort auffallen würde, weil die grafische Darstellung einen direkten Eindruck von der Oberflächenbeschaffenheit vermitteln kann.

6 Fazit

In diesem Versuch wurden mittels Rotationsbeschichtung Siliziumsubstrate mit Polymeren beschichtet und die Zusammenhänge von Schichtdicke und Brechungsindex mit Polymerkonzentration und Rotationsfrequenz untersucht.
Bei der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Schichtdicke und Polymerkonzentration stellt sich ein Zusammenhang von $h \sim c^{1,3}$ heraus und weicht um 30% vom zu erwartenden Exponenten 1 ab. Bei Untersuchung der Schichtdicke und Rotationsfrequenz stellt sich ein Zusammenhang von $h \sim \omega^{-0,42}$ heraus. Die Abweichung des Exponenten vom theoretischen Wert von -0,5 beträgt hier 16%. Die großen Abweichungen konnten nicht mit Ungenauigkeiten des Plots vereinbart werden und müssen auf das Fitmodell bzw. vor allem auf Fehler bei der Durchführung zurückzuführen sein.
Zusammenhänge von Brechungsindex mit Konzentration und Rotationsfrequenz wurden auch untersucht und Abweichungen davon, dass eigentlich keine Zusammenhänge vorliegen sollten, mit Aspekten, die das Modell nicht erfasst und wenigen aufgenommenen Messwerten, geklärt.
Weiterhin erwiesen sich sowohl Ellipsometer als auch Rasterkraftmikroskop als brauchbare Instrumente zur Bestimmung von Rauigkeiten. Beide Instrumente liefern Rauigkeiten im Bereich von 200 nm bis 300 nm, wobei dem Rasterkraftmikroskop eine höhere Präzision zugeschrieben werden kann, da dessen Werte wesentlich weniger Abweichungen unterliegen und Inhomogenitäten beim AFM herausgearbeitet werden können, was beim Ellipsometer nicht möglich ist, da dieses über die Fläche des Laserstrahls mittelt.

7 Quellenverzeichnis

[1] https://de.wikipedia.org/wiki/Polystyrol#/media/File:Polystyrene_skeletal.svg, Stand: 3.12.2017.
[2] K. Norrman, A. Ghanbari-Siahkali, and N. B. Larsen. Studies of spin-coated polymer films. Annu. Rep. Prog. Chem., Sect. C: Phys. Chem., 101:174-201, 2005.
[3] http://www.sdicompany.com/en/device/images/img-device-13.gif, Stand: 3.12.2017.
[4] H. Motschmann and R. Teppner. Ellipsometry in interface science. Max-Planck-Institut für Grenzflächenforschung, Golm.
[5] Versuchsanleitung FP 3.31 September 2017, TU-Darmstadt, Stand: 3.12.2017.
[6] E. Meyer. Atomic force microscopy. Progress in Surface Science, 41(1):3-49, 1992.
[7] David B. Hall, Patrick Underhill, and John M. Torkelson. Spin coating of thin and ultrathin polymer films. Polymer Engineering & Science, 38(12):2039-2045, 1998.
[8] Tobias Holmgaard, Jesper Jung, Jakob Bork and Niels Anker Kortbek. Detection of nanostructures. Technical report, Aalborg University; Institute of Physics and Nanotechnology, 2004.
[9] Ricardo Garca and Rubn Prez. Dynamic atomic force microscopy methods. Surface Science Reports, 47(6):197-301, 2002.
[10] Anleitung Versuch F9 Ellipsometrie 2002, Uni Potsdam, Adresse: https://www.uni-potsdam.de/u/physik/fprakti/ANLEIF9.pdf, Stand: 3.12.2017.
[11] https://de.wikipedia.org/wiki/Silicium#Sicherheit, Stand: 3.12.2017.
[12] https://de.wikipedia.org/wiki/Toluol#Sicherheitshinweise, Stand: 3.12.2017.
[13] https://de.wikipedia.org/wiki/Ethanol#Toxikologie, Stand: 3.12.2017.
[14] http://www.doku.net/unterartik/definition.htm, Stand: 3.12.2017.
[15] https://www.youtube.com/watch?v=fivhcWYEtkQ, Stand: 3.12.2017.

3.31.

Bestimmen der Mengen der Stammlösung für angegebene Konzentrationen

$c_{Stamm} = \frac{m}{V}$ ⇒ $c_{Stamm} = \frac{m}{V'}$ → $V' = \frac{c_{St} \cdot V}{c_{Stamm}} = 10\,ml$

⇒ $V_{Stamm} = \frac{10\,ml}{c_{St.}} \cdot c_i$ entnehmen, auf 10 ml auffüllen

Konzentration	Menge aus der Stammlösung
5 g/L	0,5 mL
10 g/L	1 mL
15 g/L	1,5 mL
20 g/L	2 mL
25 g/L	2,5 mL

Ellipsometrie (i.F. bei 2000 rpm):

5 g/L:

Δ	121,861	121,221	122,45	121,364	122,246	±0,02
Ψ	15,109	15,181	14,955	15,108	15,043	±0,01
n	1,49536	1,49021	1,49891	1,51950		
d [nm]	22,6	22,3	22,4	22,8		
Δ-Δ°	0,003	0	0	0		
n-n°	-0,001	0,001	0	0		

n	1,49741	1,51145	1,49891	1,49021	1,49536
d [nm]	22,8	22,8	22,4	22,3	22,6
Δ-Δ°	0	0	0	0	0,003
n-n°	-0,001	0	0	0,001	-0,001

10 S/L					
Δ	95,077	94,908	95,332	±0,02	
μ	22,096	22,144	22	±0,01	
n	1,55081	1,55232	1,55512		
t[mm]	43,4	43,5	43,1		
$\Delta-\delta°$	0,001	0	0,001		
$\mu-\mu°$	0,003	0,003	-0,002		

15 S/L:							
Δ	74,493	X	73,995	73,902	74,238	74,126	± 0,02
μ	34,977	X	34,649	34,704	34,681	34,752	± 0,01
n	1,56303		1,5775	1,5784	1,57247	1,57346	
t[mm]	77		76,8	76,9	77,1	77,2	
$\Delta-\delta°$	0,001		0	0,004	0	0,007	
$\mu-\mu°$	-0,001		0	-0,001	0	0	

20 S/L:						
Δ	57,682	57,315	57		57,667	± 0,02
μ	61,774	62,982	61,315		61,426	± 0,01
n	1,53338	1,6	1,53541	X	1,53575	
t[mm]	108,3	110,6	107,6		108,001	
$\Delta-\delta°$	0	0,004	0,001		0	
$\mu-\mu°$	0	2,572	-0,004	↑	-0,002	

X ← hier wurde ein Kratzer getroffen

25 S/L:							
Δ	232,018	231,421	231,738	231,902	232,018	±0,02	
μ	47,796	45,934	47,708	47,754	47,503	±0,01	
n	1,57876	1,57831	1,57693	1,57783	1,57868		
t[mm]	148,7	150,8	149,1	148,9	148,9		
$\Delta-\delta°$	0	-0,003	-0,005	0,003	-0,002		
$\mu-\mu°$	0,001	0,001	0,002	0,001	-0,002		

15°/L bei 1000 rpm:	Δ	64,730	64,717	65,04
	4	54,461	54,755	54,376
	n	1,58334	1,58342	1,58181
	t[mm]	103,4	103,7	103,7
	Δ-Δ°	0	0	0
	4-4°	-0,002	0	-0,002

15°/L bei 3000 rpm:	Δ	79,366	79,423	79,538
	4	29,731	29,776	29,783
	n	1,56364	1,56306	1,5657
	t[mm]	65,2	65,1	65,3
	Δ-Δ°	0,005	0,008	0,003
	4-4°	0,002	-0,006	0,001

gemessen bei: $\lambda = 632,8$ nm Temperatur: ≈ 23°C Luftfeuchtigkeit: ≈ 30%

Einfallswinkel = 70°

Modell:	Schicht	Brechungsindex	Absorptionskoeff. ~~Schichtdicke~~	Schichtdicke [nm]
	Luft	1,00027	0	Kontinuum
	Polysterol	~~1,45708~~	0	
	Si-Oxid	1,45708	0	1,5
	Si	3,885	-0,018	Kontinuum

AFM:

Eigenfrequenz: 255,629 kHz

Federkonstante: 21,10 $\frac{nN}{nm}$

Amp InvOLS : 102,41 $\frac{nm}{V}$

Auswertung von OS:

5 g/L bei 2000 rpm : Rauigkeit$_{ges}$: 638,57 pm

15 g/L bei 2000 rpm: Rauigkeit (von Abschnitten ohne Streifen): ≈ 300 pm

Rauigkeit$_{ges}$: 1,319 nm

25 g/L bei 2000 rpm: Rauigkeit (-11-): ≈ 300 pm

Rauigkeit$_{ges}$: 1,362 nm