

Aufbau eines Messplatzes für Dämpfungsmessungen an polymeren Schichtwellenleitern

Diplomarbeit

Eingereicht von

Frank Jodtka

Angefertigt am

Max-Planck-Institut für Polymerforschung Mainz

Fachhochschule Wiesbaden
Fachbereich Ingenieurwissenschaften - Studienbereich Physik

Referent: Prof. Dr. Hans-Dieter Bauer

Koreferent: Prof. Dr. Christoph Bubeck

Tag der Einreichung: 19. Juni 2007

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. C. Bubeck und Herr Prof. Dr. H.-D. Bauer für die Möglichkeit, diese Diplomarbeit am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz durchführen zu können und für die gute Betreuung.

Daneben möchte ich Frau Dipl.-Ing. G. Herrmann, Herrn Dipl.-Ing. H. Menges und Herrn Dipl.-Ing. W. Scholdei für ihren stets verfügbaren technischen Rat danken.

Inhalt

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung.....	3
3	Physikalische Grundlagen	4
3.1	Ausbreitung von Licht in Wellenleitern.....	4
3.2	Prismenkopplung.....	12
3.3	Wellenleiterverluste	17
4	Herstellung von Schichtwellenleitern	21
5	Methoden zur Dämpfungsmessung	24
5.1	Streulichtmethode.....	24
5.2	Sliding-Prism Methode.....	25
5.3	Auskopplung durch Eintauchen in eine hochbrechende Flüssigkeit	26
6	Aufbau eines Messplatzes für Dämpfungsmessungen	27
6.1	Anforderungen an den Dämpfungsmessplatz.....	27
6.2	Entwicklung	29
6.3	Aufbau des Messplatzes.....	36
6.4	Auswertungsmethoden	48
6.5	Fehlerbetrachtung	53
6.6	Mögliche Erweiterungen des Messplatzes.....	60
7	Messungen	61
7.1	Wellenleiter mit typischem Kurvenverlauf	61
7.2	Wellenleiter mit Störstelle	62
7.3	Wellenleiter mit geringer Dämpfung	63
8	Literaturverzeichnis.....	67
9	Anhang	68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Schichtwellenleiters.....	4
Abbildung 2: Strahlenverlauf Luftmoden	6
Abbildung 3: Strahlenverlauf für Substratmoden	7
Abbildung 4: Strahlenverlauf für Wellenleitermoden.....	7
Abbildung 5: Phasenbeziehung der Wellenleitermoden	9
Abbildung 6: Feldverteilungen der Moden	11
Abbildung 7: Anregung der Wellenleitermoden	12
Abbildung 8: Halfcut-Koppelprisma	13
Abbildung 9: Koppelprisma und Koppeldorn	15
Abbildung 10: Drehachsen des Koppelprismas.....	16
Abbildung 11: Schema der Streulichtmethode	24
Abbildung 12: Schema der Sliding-Prism Methode	25
Abbildung 13: Auskopplung durch Eintauchen in eine Flüssigkeit.....	26
Abbildung 14: Streulicht einer Wellenleitermode	29
Abbildung 15: Ein Aufbau zur Justage des Lasers	31
Abbildung 16: Schematische Darstellung des Gesamtaufbaus	36
Abbildung 17: Schematische Darstellung des optischen Aufbaus.....	37
Abbildung 18: Optischer Aufbau.....	37
Abbildung 19: Halterung der optischen Komponenten	38
Abbildung 20: Schema der Apparatur zur Dämpfungsmessung.....	40
Abbildung 21: Koppelvorrichtung und Küvettenhalterung.....	40
Abbildung 22: Verstelleinheit.....	42
Abbildung 23: Verwendetes Koppelprisma.....	42
Abbildung 24: Küvettenhalterung (mit Küvette)	44
Abbildung 25: Küvettenhalterung	44
Abbildung 26: Schema der Küvettenhalterung mit Linse und Diode.....	45
Abbildung 27: Messtechnik.....	46
Abbildung 28: Beispielhafter Datensatz.....	48
Abbildung 29: Beispielhafte Messkurve.....	49
Abbildung 30: Ergebnisse der linearen Regression.....	50
Abbildung 31: Transmissionsspektrum der Flüssigkeit.....	54
Abbildung 32: Vergleich Laserintensität und Messkurve	58
Abbildung 33: Dämpfungsmessung Wellenleiter (PMMA, $\alpha_{\text{gw}} = 0,78 \text{ dB/cm}$).....	61
Abbildung 34: Dämpfungsmessung Wellenleiter (PMMA) mit Störstelle	62
Abbildung 35: Dämpfungsmessung Wellenleiter mit geringer Dämpfung ($\alpha_{\text{gw}} = 0,08 \text{ dB/cm}$).....	63
Abbildung 36: Messsignal eines Wellenleiters mit kleiner Dämpfung und höherer Dämpfung, jeweils dargestellt als a) Einzelwerte und b) gleitender Durchschnitt	64

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

\mathbf{A}_x	X-Komponente des Vektors A
A_{Fl}	Flüssigkeitsoberfläche
\mathbf{B}_x	X-Komponente des Vektors B
c	Lichtgeschwindigkeit im Medium
d	Schichtdicke des Films
\mathbf{E}	Vektor der elektrischen Feldstärke
$\mathbf{E}_{x,y,z}$	Komponenten der elektrischen Feldstärke
\mathbf{H}	Vektor der magnetischen Feldstärke
$\mathbf{H}_{x,y,z}$	Komponenten der magnetischen Feldstärke
i	Variable $i = 1$ bis 4
$I(X)$	Intensität in Abhängigkeit vom Weg im Wellenleiter
I_0	Anfangsintensität
I_{Ray}	Intensitätsverluste durch Rayleigh-Streuung
I_{Mie}	Intensitätsverluste durch Mie-Streuung
\mathbf{k}	Wellenvektor
K	Proportionalitätsfaktor
l_p	Projektion der Länge der Prismenbasis
l	Weglänge des Strahls in der Flüssigkeit
m	Ordnung einer Wellenleitermoden oder allg. Variable, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$
M1, M2	Mittelpunkte der Drehachsen des Koppelprismas
n_1	Brechungsindex Luft ≈ 1
n_2	Brechungsindex Polymerfilm
n_3	Brechungsindex Substrat
$n_{eff,m}$	Effektiver Brechungsindex des Wellenleiters für die Mode m-ter Ordnung
n_p	Brechungsindex Prisma
r	Radius um die Drehachsen des Koppelprismas
t	Dicke des Koppelprismas
TE_m	Transversal elektrisch polarisierte Welle m-ter Ordnung
TM_m	Transversal magnetisch polarisierte Welle m-ter Ordnung
X,Y,Z	Kartesisches Koordinatensystem
ΔX	Weg
Δx	Systematischer Fehler durch Anstieg der Flüssigkeit

α	Einfallswinkel auf das Koppelprisma
α_{gw}	Dämpfungskoeffizient in dB/cm
α'	Winkel des Strahles in der Flüssigkeit
β_m	Ausbreitungskonstant der m-ten Mode Wellenleiter
β_p	Ausbreitungskonstant der Welle im Koppelprisma
γ	Größter Winkel des Koppelprismas
ε	Prismenwinkel
ε_g	Grenzwinkel der Totalreflexion
Θ	Winkel relativ zu den Grenzflächen
Θ_m	Ausbreitungswinkel der m-ten Mode
λ	Wellenlänge der elektromagnetischen Welle in nm
μ	Extinktionskoeffizient
ν	Frequenz der elektromagnetischen Welle in Hz
τ	Transmissionsgrad in %
ϕ	Phasenverschiebung zweier Wellen
χ	Einfallswinkel relativ zur Prismenbasis
ω	Kreisfrequenz, $\omega = 2\pi\nu$

Nicht aufgeführt sind Gerätebezeichnungen und mathematische Konstanten.

1 Zusammenfassung

Optische Schichtwellenleiter auf Polymerbasis besitzen vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in der Optoelektronik und in optischen Systemen. Verluste im Schichtwellenleiter führen zu einer Intensitätsabnahme des geführten Lichtes entlang des im Wellenleiter zurückgelegten Weges. Für technische Anwendungen sollen diese Verluste so gering wie möglich sein. Das Maß für diese Verluste ist der Dämpfungskoeffizient α_{gw} .

Für die Entwicklung von Wellenleitern mit geringer Dämpfung ($< 0.5 \text{ dB/cm}$) ist ein im Vergleich zu bisher verwendeten Dämpfungs-Messmethoden genaueres Verfahren notwendig. Zur Dämpfungsmessung an Schichtwellenleitern existieren verschiedene Messmethoden. Bei einer neueren Methode wird ein, in einem Schichtwellenleiter geführter Laserstrahl, durch Eintauchen des Wellenleiters in eine höherbrechende Flüssigkeit ausgekoppelt und detektiert. Diese Methode ermöglicht auch bei Wellenleiterverlusten α_{gw} kleiner $0,1 \text{ dB/cm}$ eine hinreichend genaue Messung, besitzt aber praktische Nachteile.

Ziel dieser Arbeit war daher, aufbauend auf diesem Messprinzip, der Aufbau und die Erprobung eines neuartigen Messplatzes für Dämpfungsmessungen an polymeren Schichtwellenleitern. Die Nachteile der Methode sollten durch die Verwendung einer Koppelvorrichtung für Schichtwellenleiter des Max-Planck-Institutes für Polymerforschung Mainz (MPI-P) vermieden werden.

Zur Erprobung der Apparatur wurden mittels Spin-Coating Probefilme aus Polymethacrylat (PMMA) und Polystyrol (PS) mit Schichtdicken im Bereich $0,6 - 2,0 \mu\text{m}$ hergestellt.

Kern des Messaufbaus dieser Arbeit war die Einkopplung eines Laserstrahles in den Wellenleiter mittels eines Koppelprismas und die Auskopplung des Lichtes durch Eintauchen in eine hochbrechende Flüssigkeit. Der fertige Messplatz bestand aus drei Teilen: Einem optischen Aufbau, der eigentliche Apparatur zur Dämpfungsmessung und der Messtechnik. Die Apparatur zur Dämpfungsmessung bestand im Wesentlichen aus der am MPI-P vorhandenen Koppelvorrichtung, mit der das Licht in den Wellenleiter gekoppelt wurde und einer neu entwickelten höhenverstellbaren Küvettenhalterung mit abbildender Linse und Diode zur Detektion der Strahlintensität. Die rechnergestützte Messwerterfassung erfolgte synchronisiert zu einer schrittmotorgetriebenen Eintauchbewegung des Wellenleiters.

Die der Strahlintensität proportionale Diodenspannung wurde gegen den zurückgelegten Weg des Lichtes im Wellenleiter (Abstand des Auskoppelpunktes zum Koppelprisma) aufgetragen. Aus der Steigung einer Ausgleichsgeraden wurde der Dämpfungskoeffizient α_{gw} ermittelt. Bei der Auswertung der Daten erfolgten Korrekturen, um verschiedene systematische Fehler zu kompensieren.

Für die gemessenen Polymerfilme wurden Werte für α_{gw} von > 1 dB/cm bis 0,08 dB/cm ermittelt. Anhand beispielhafter Messungen wurden typische Kurvenverläufe gezeigt. Die Messkurven zeigen, dass mit dem aufgebauten Messplatz für Dämpfungsmessungen an polymeren Schichtwellenleitern auch sehr geringe Dämpfungen gemessen werden können.

2 Einleitung

Lichtwellenleiter auf Polymerbasis versprechen vielseitige Anwendungsmöglichkeiten in der Optoelektronik und in rein optischen Systemen. Für solche Schichtwellenleiter sollen Wellenleiterverluste, die zu einer Intensitätsabnahme des geführten Lichtes entlang des im Wellenleiter zurückgelegten Weges führen, so gering wie möglich sein. Das Maß für diese Intensitätsabnahme ist der Dämpfungskoeffizient α_{gw} . Die Wellenleiterverluste dünner Polymerfilme durch Streuung und Absorption sind durch die Wahl geeigneter Materialien und Herstellungsverfahren stark minimiert worden. Neue Schichtwellenleiter mit geringer Dämpfung erfordern Messverfahren mit verbesserter Genauigkeit.

Die Entwicklung von Wellenleitern mit geringer Dämpfung machte ein im Vergleich zu bisher verwendeten Messmethoden genaueres Verfahren erforderlich.

In der Literatur wurde eine Methode zur Dämpfungsmessung beschrieben, mit der Dämpfungskoeffizienten α_{gw} kleiner 0,1 dB/cm mit einer hinreichenden Genauigkeit gemessen werden konnten [2]. Diese Methode beinhaltet, dass ein in einen Schichtwellenleiter geführter Laserstrahl durch Eintauchen des Wellenleiters in eine hochbrechende Flüssigkeit ausgekoppelt und detektiert wird, besitzt aber praktische Nachteile.

Durch die Verwendung einer Koppelvorrichtung für Schichtwellenleiter des Max-Planck-Institutes für Polymerforschung Mainz (MPI-P) [3] sollte eine Vereinfachung eines solchen Aufbaues möglich sein.

Ziel dieser Diplomarbeit war deshalb der Aufbau und die Erprobung eines neuartigen Messplatzes für Dämpfungsmessungen an polymeren Schichtwellenleitern, basierend auf der in der Literatur beschriebenen Methode [2] und unter Verwendung der Koppelvorrichtung des MPI-P.

3 Physikalische Grundlagen

In diesem Kapitel wird die Ausbreitung von Licht im Wellenleiter beschrieben (3.1). Es wird gezeigt, dass nur bestimmte ausbreitungsfähige Wellen existieren, die im Folgenden als Moden bezeichnet werden. Aus den Bedingungen für Ausbreitung der Moden im Wellenleiter ergeben sich Anforderungen für die Einkopplung von Licht, die in den theoretischen Grundlagen der Prismenkopplung beschrieben werden (3.2). Die Grundlagen wurden der Literatur [1, 2, 3, 4, 5] entnommen.

3.1 Ausbreitung von Licht in Wellenleitern

Für diese Arbeit sind nur Schichtwellenleiter relevant, so dass nur diese Art Wellenleiter beschrieben wird. Der prinzipielle Aufbau von Schichtwellenleitern ist in Abbildung 1 gezeigt: Auf einem Substrat, mit einem Brechungsindex n_3 , befindet sich ein dünner Polymerfilm (im Folgenden als Film bezeichnet) mit einem Brechungsindex n_2 . Für technische Anwendungen ist der Film meist noch mit einer Deckschicht versehen, deren Brechungsindex mit n_1 bezeichnet wird. Um den Film als Wellenleiter nutzen zu können muss der Brechungsindex der Medien n_1 und n_3 kleiner als n_2 sein. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Wellenleiter wurden ohne Deckschicht hergestellt, so dass n_1 gleich $n_{Luft} \approx 1$ ist.

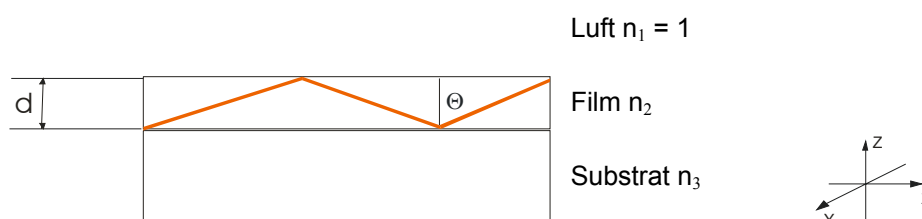


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Schichtwellenleiters

Für die Brechungsindizes gilt:

$$n_1 < n_2 \quad \text{und} \quad n_3 < n_2$$

Beschreibung der Wellenleitung:

Grundlage der Wellenleitung in der Polymerschicht ist nach dem Strahlenmodell, die Totalreflexion (**T I R** - **T**otal **I**nternal **R**eflexion) des geführten Lichtes an den Grenzflächen Polymer-Luft und Polymer-Substrat: Ein Lichtstrahl wird gemäß dem Brechungsgesetz beim Übergang von einem optisch dichten Medium (n_2) in ein Medium mit geringerem Brechungsindex n_1 bzw. n_3 vom Lot der Grenzfläche weggebrochen. Der Winkel des Strahles relativ zum Lot der Grenzfläche ist der Ausbreitungswinkel Θ (Abbildung 1). Ist der Ausbreitungswinkel des Strahles in der Polymerschicht größer als der Grenzwinkel der Totalreflexion ε_g , wird der Brechungswinkel größer 90° und der Strahl tritt nicht mehr in das optisch weniger dichte Medium über sondern wird an der Grenzfläche zu 100 % reflektiert.

$$\sin \varepsilon_g = \frac{n_3}{n_2} \quad (\text{Gleichung 1})$$

$$\varepsilon_g = \arcsin\left(\frac{n_3}{n_2}\right) \quad (\text{Gleichung 2})$$

Beschreibung der Lichtleitung mit Hilfe des Strahlenmodells:

Die Strahlen breiten sich geradlinig in der gleichen Richtung wie der Wellenvektor \mathbf{k} einer ebenen Welle aus. Für verschiedene Ausbreitungswinkel Θ eines Lichtstrahles im Film unterscheidet man drei Fälle. Je nach Betrag der möglichen Ausbreitungswinkel der Strahlen Θ , werden die mit Hilfe des Strahlenmodells beschriebenen Wellen als Luftmoden, Substratmoden oder Wellenleitermoden bezeichnet.

Luftmoden:

Für den Ausbreitungswinkel Θ im Film gilt:

$$\Theta < \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \quad (\text{Gleichung 3})$$

Ist der Ausbreitungswinkel Θ des Strahles im Film kleiner als der Grenzwinkel der Totalreflexion für die Grenzfläche Film-Luft, findet an keiner der Grenzflächen Totalreflexion statt. So kann der Strahl in das Substrat und bei umgekehrter Ausbreitungsrichtung in die Luft gebrochen werden (Abbildung 2).

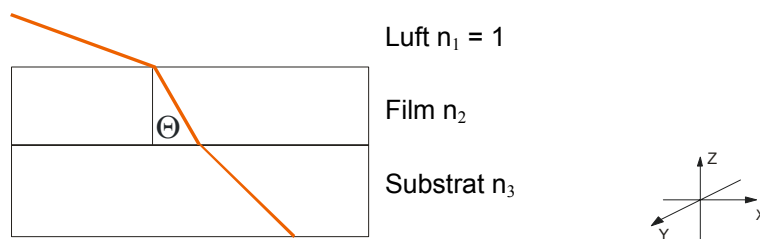


Abbildung 2: Strahlenverlauf Luftmoden

Substratmoden:

Für den Ausbreitungswinkel Θ im Film gilt:

$$\arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right) < \Theta < \arcsin\left(\frac{n_3}{n_2}\right) \quad (\text{Gleichung 4})$$

Für den Fall, dass der Ausbreitungswinkel Θ zwischen den Grenzwinkeln der Grenzflächen Film-Luft und Film-Substrat liegt, breitet sich der Strahl im Substrat und im Film aus (Abbildung 3). An der Grenzfläche Film-Luft findet Totalreflexion statt, so dass kein Licht in die Luft gebrochen wird.

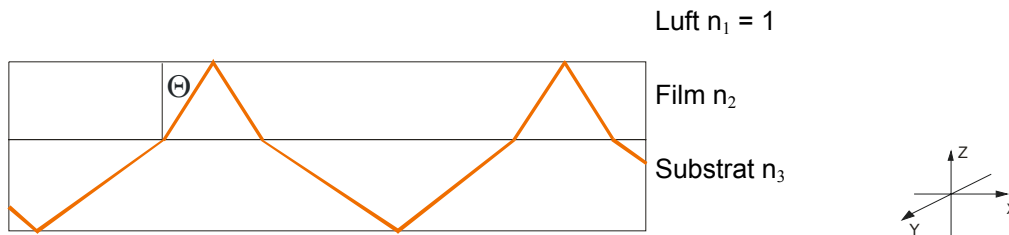


Abbildung 3: Strahlenverlauf für Substratmoden

Wellenleitermoden:

Für den Ausbreitungswinkel Θ im Film gilt:

$$\Theta > \arcsin\left(\frac{n_3}{n_2}\right) \quad \text{(Gleichung 5)}$$

Wenn der Ausbreitungswinkel größer als der Grenzwinkel für die Grenzfläche Film-Substrat ist finden sowohl an der Grenzfläche Film-Luft als auch an der Grenzfläche Film-Substrat Totalreflexion des geführten Strahles statt (Abbildung 4). Der Lichtstahl breitet sich unter dem Winkel Θ relativ zur Filmebene aus.

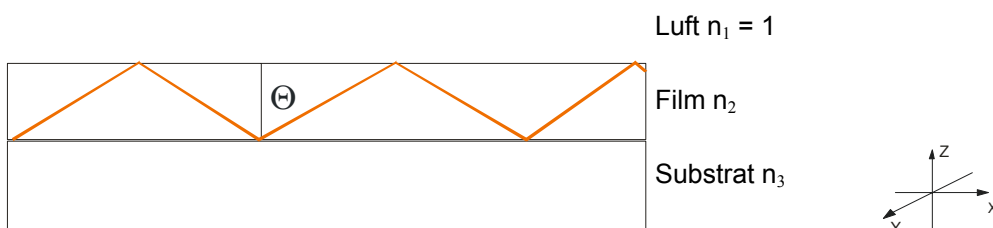


Abbildung 4: Strahlenverlauf für Wellenleitermoden

Beschreibung der Lichtleitung als Ausbreitung einer ebenen Welle

Es soll jetzt gezeigt werden, dass für einen dünnen Film mit der Schichtdicke d und dem Brechungsindex n_2 auf einem Substrat mit dem Brechungsindex n_3 nur bestimmte diskrete Winkel Θ_m existieren, unter denen eine Ausbreitung von Licht im Wellenleiter möglich ist. Die in einem Wellenleiter ausbreitungsfähigen Wellen werden als Wellenleitermoden oder kurz Moden bezeichnet. Für Filme mit Schichtdicken in der Größenordnung der verwendeten Wellenlänge, ist für die Ausbreitung von Wellenleitermoden eine feste Phasenbeziehung der reflektierten Wellen nötig. Es muss die Bedingung für konstruktive Interferenz erfüllt sein.

Interferenzbedingung der geführten Wellenleitermoden:

Nimmt man das Licht als ebene Welle an, die sich unter dem Ausbreitungswinkel Θ im Wellenleiter fortpflanzt, kann man die Wellenvektoren \mathbf{A} und \mathbf{B} in Komponenten zerlegen (Abbildung 5). Für die Komponenten in Ausbreitungsrichtung (X-Komponente) gilt:

$$A_x; B_x = kn_2 \sin \Theta \quad (\text{Gleichung 6})$$

mit $k = \text{Betrag des Wellenvektors}$ $\frac{\omega}{c}$ oder $\frac{2\pi}{\lambda}$

In Abbildung 5 ist die Ausbreitungsrichtung einer ebenen Welle und die Ebene, in der alle Wellenfronten die gleiche Phase besitzen, eingezeichnet. Nach zweifacher Totalreflexion der Welle bzw. nach dem Durchlaufen der Punkte a, b und c erfährt sie die Phasenverschiebung:

$$\Delta\phi = -2dkn_2 \cos \Theta \quad (\text{Gleichung 7})$$

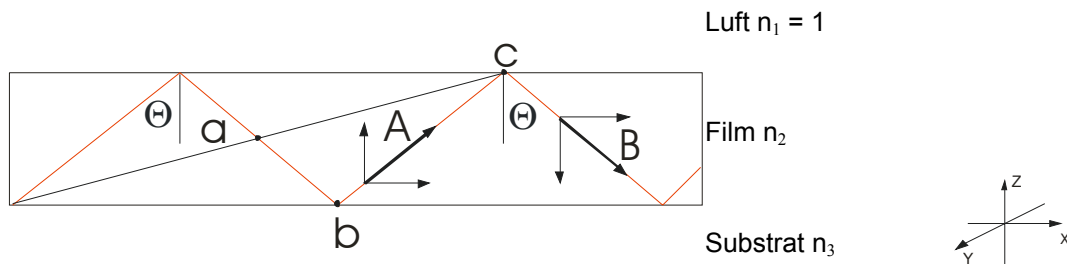


Abbildung 5: Phasenbeziehung der Wellenleitermoden

Durch die Reflexionen an den Grenzflächen Film-Luft und Film-Substrat entstehen zusätzliche kleine Phasenverschiebungen. Goos und Hänchen beschrieben, dass der reflektierte Strahl seine Richtung nicht an der Stelle ändert, an der er auf die Grenzflächen trifft, sondern versetzt zurückläuft. Hierfür verantwortlich ist das außerhalb des Wellenleiters abklingende evaneszente Feld der totalreflektierten Welle.

$$\phi_2(n_2, n_1, \Theta) \quad \text{und} \quad \phi_3(n_2, n_3, \Theta)$$

Diese Phasenverschiebungen sind von den Brechungsindizes der Medien und dem Ausbreitungswinkel Θ abhängig. Sie unterscheiden sich je nach Polarisation (TE oder TM) der Wellenleitermode.

Aus der Bedingung für konstruktive Interferenz $\Delta\phi = 2m\pi$ mit $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ erhält man die charakteristische Gleichung des Wellenleiters:

$$\phi_{ges} = -2dkn_2 \cos\Theta + \phi_2 + \phi_3 = 2m\pi \quad (\text{Gleichung 8})$$

Alle ausbreitungsfähigen Moden breiten sich unter einem Winkel Θ_m aus, der die charakteristische Gleichung des Wellenleiters (Gleichung 8) erfüllt.

Polarisation der Wellenleitermoden:

Je nach Polarisation der Wellenleitermoden spricht man von TM- oder TE-Moden. TE bedeutet **T**ransversal **E**lektrisch. Der **E**-Vektor (elektrische Feldstärke) ist parallel zur Ebene des Wellenleiters orientiert:

$$(E_y, H_z, H_x)$$

In Ausbreitungsrichtung besitzen TE-Moden nur eine magnetische Komponente. TM bedeutet **T**ransversal **M**agnetisch. Hier schwingt der Vektor der magnetischen Feldstärke **H** in der Ebene des Wellenleiters:

$$(H_y, E_z, E_x)$$

In Ausbreitungsrichtung besitzen TM-Moden nur eine elektrische Komponente.

Wichtige Größen zur Charakterisierung der Wellenleitermoden:

Auf die mathematische Beschreibung der Ausbreitung von Licht als ebene Welle wird nicht näher eingegangen. Jedoch soll gezeigt werden, welche Ergebnisse die Lösung der Wellengleichung für monochromatisches Licht mit den Randbedingungen des Wellenleiters liefert:

Die für die Ausbreitung im Wellenleiter relevante X-Komponente bezeichnet man als Ausbreitungskonstante der Moden.

$$\beta_m = kn_2 \sin \Theta_m \quad (\text{Gleichung 9})$$

Nur für bestimmte diskrete Werte der Ausbreitungskonstante und somit für Θ_m ergeben sich physikalisch sinnvolle Feldverteilungen im Wellenleiter.

Wenn die Werte für β zwischen kn_3 und kn_2 liegen findet Wellenleitung statt und ein Großteil der Feldverteilung $E(z)$ befindet sich im Film. Die Ausläufer der Feldverteilung klingen im Substrat und in der Luft exponentiell ab (Abbildung 6).

3.2 Prismenkopplung

Licht kann mit Hilfe eines Koppelprismas in einen Wellenleiter eingekoppelt werden. Um die Bedingungen für die Anregung der Wellenleitermoden zu erläutern, wurden im vorherigen Abschnitt die Ausbreitungskonstante β und die Feldverteilungen der Moden vorgestellt. Diese sind unmittelbar mit dem Einkoppelvorgang am Luftspalt zwischen Koppelprisma und Wellenleiter verbunden.

Durch die frustrierte Totalreflexion an der Prismenbasis entsteht eine in Z-Richtung stehende Welle mit einer winkelabhängigen Geschwindigkeitskomponente in X-Richtung (Abbildung 7). Wellenleitermoden werden angeregt, wenn das evaneszente Feld der totalreflektierten Welle im Koppelprisma und die Feldverteilung einer der ausbreitungsfähigen Wellen im Wellenleiter (Wellenleitermoden) überlappen und die X-Komponenten der Ausbreitungsgeschwindigkeiten der in Z-Richtung stehenden Welle im Koppelprisma und der Wellenleitermode gleich sind.

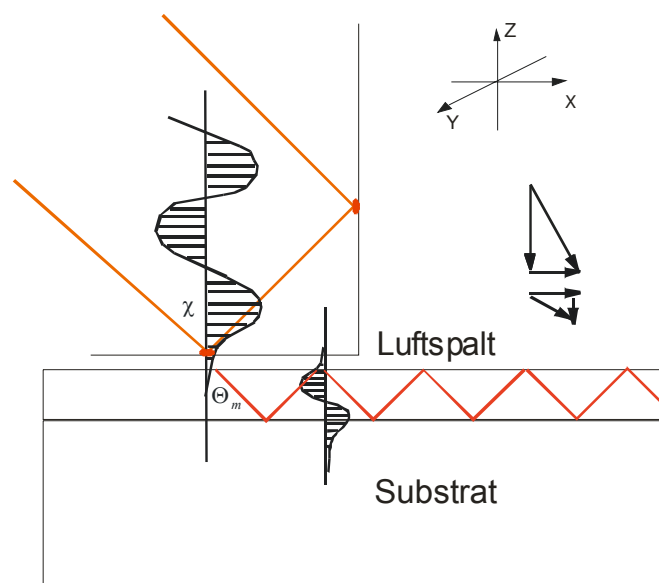


Abbildung 7: Anregung der Wellenleitermoden

Anders formuliert bedeutet das, dass die Ausbreitungskonstanten der ebenen Welle im Koppelprisma mit der einer der Wellenleitermoden übereinstimmt.

$$\beta_p = kn_p \sin \chi = \beta_m = kn_2 \sin \Theta_m \quad (\text{Gleichung 12})$$

χ ist der Ausbreitungswinkel der Welle im Prisma.

Daraus ergeben sich Anforderungen an die experimentelle Technik, die im nächsten Abschnitt behandelt werden.

Das Koppelprisma

Für Prismenkopplung werden entweder symmetrische Dreiecksprismen oder Halfcut-Prismen (Abbildung 8) verwendet. Beide Prismen sind durch den Prismenwinkel ε den Brechungsindex n_p der verwendeten Glassorte gekennzeichnet. Bei Halfcut-Prismen wird der linear polarisierte Laserstrahl in die Nähe der Koppelkante gebrochen. Diese ist möglichst scharf d.h. ohne Fase ausgebildet.

Für die quasistationäre Fokussierung des Lasers auf die Koppelkante ist es vorteilhaft, wenn das Koppelprisma möglichst kleine Abmessungen (z.B. l_p in der Größenordnung 5 mm) und einen hohen Brechungsindex besitzt. Die Prismenwinkel sollten keine ganzzahligen Brüche von 360° sein. Vielmehr sollten die Winkel um 1° von solchen Werten abweichen (z.B. $\varepsilon = 59^\circ$). Für Halfcut-Prismen gilt, dass der größte Prismenwinkel $\gamma = 91^\circ$ betragen soll. Die Eintrittsfläche des Prismas und die Prismenbasis müssen eine Ebenheit von $\lambda/2$ aufweisen.

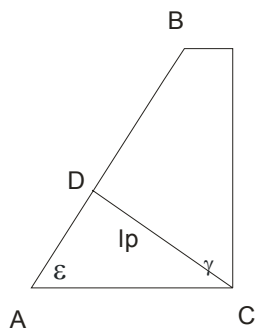


Abbildung 8: Halfcut-Koppelprisma

Der Bereich der effektiven Brechungsindices des Koppelprismas:

Der Brechungsindex n_p des Prismas bestimmt den Bereich der effektiven Brechungsindices der Wellenleitermoden $n_{eff,m}$, der mit einem Prisma eingekoppelt werden kann. Die der effektive Brechungsindex der Welle im Prisma ist mit dem Einfallswinkel α über folgende Formel verknüpft:

$$n_{eff,p} = \sin \alpha \cdot \cos \varepsilon + (n_p^2 - \sin^2 \alpha)^{\frac{1}{2}} \cdot \sin \varepsilon \quad (\text{Gleichung 13})$$

ε = Prismenwinkel

Für Einfallswinkel $\pm 90^\circ$ kann der Bereich theoretisch möglicher Werte für $n_{eff,p}$ errechnet werden. Für einen Film mit n_2 auf einem Substrat mit n_3 liegen die effektiven Brechungsindices der Moden im Bereich:

$$n_3 < n_{eff,m} < n_2$$

In der Praxis muss der Bereich der theoretisch möglichen effektiven Brechungsindices im Prisma $n_3 < n_{eff,p} < n_p$ dieses Intervall etwas überdecken, weil der nutzbare Querschnitt des einfallenden Strahles für den seitlichen Einfall zu stark abnimmt.

Ausbreitungskonstanten der Moden:

Für die Grundmode ist der Wert der Ausbreitungskonstanten β_m maximal. Die Ausbreitung im Wellenleiter erfolgt dann unter maximalem Winkel Θ_m . Daraus folgt, dass der effektive Brechungsindex der Grundmode maximal wird und das die Mode für den größten Prismeneinfallswinkel α die Mode mit der niedrigsten Ordnung ist. Ist der Bereich der effektiven Brechungsindices des Koppelprismas groß genug, ist die Ordnung der ersten Mode $m = 0$.

Einkoppelbedingungen für die Prismenkopplung:

An der Prismenbasis findet frustrierte Totalreflexion statt. Über das evaneszente Feld koppeln Anteile des Feldes der stehenden Welle aus und überlappen über einen mikroskopischen Spalt hinweg in den Wellenleiter. Der Spalt entsteht durch Anpressen des auf dem Substrat befindlichen Filmes an das Koppelprisma. Das Anpressen erfolgt mit Hilfe des Koppeldorns. Dieser ist in einem Abstand von wenigen Millimetern zur Koppelkante positioniert (Abbildung 9).

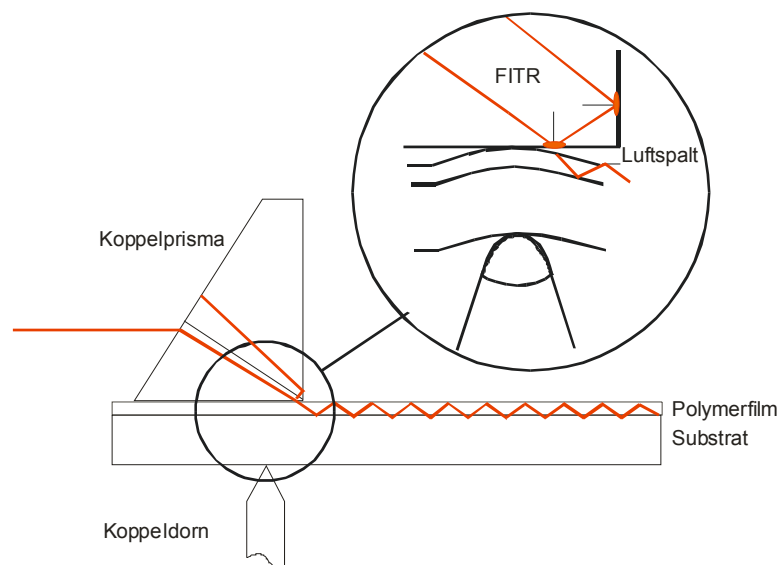


Abbildung 9: Koppelprisma und Koppeldorn

Justage des Koppelprismas:

Das Koppelprisma ist so zu justieren, dass beim systematischen Suchen der Wellenleitermoden der auf das Koppelprisma treffende Laserstrahl für möglichst große Winkelbereiche in die Nähe der Koppelkante gebrochen wird [1]. Dies ist der Fall, wenn die Drehachse des Spiegels für Einfallswinkel $\alpha > 0^\circ$ im Mittelpunkt M1 und für Einfallswinkel $\alpha < 0^\circ$ im Mittelpunkt M2 verläuft (Abbildung 10).

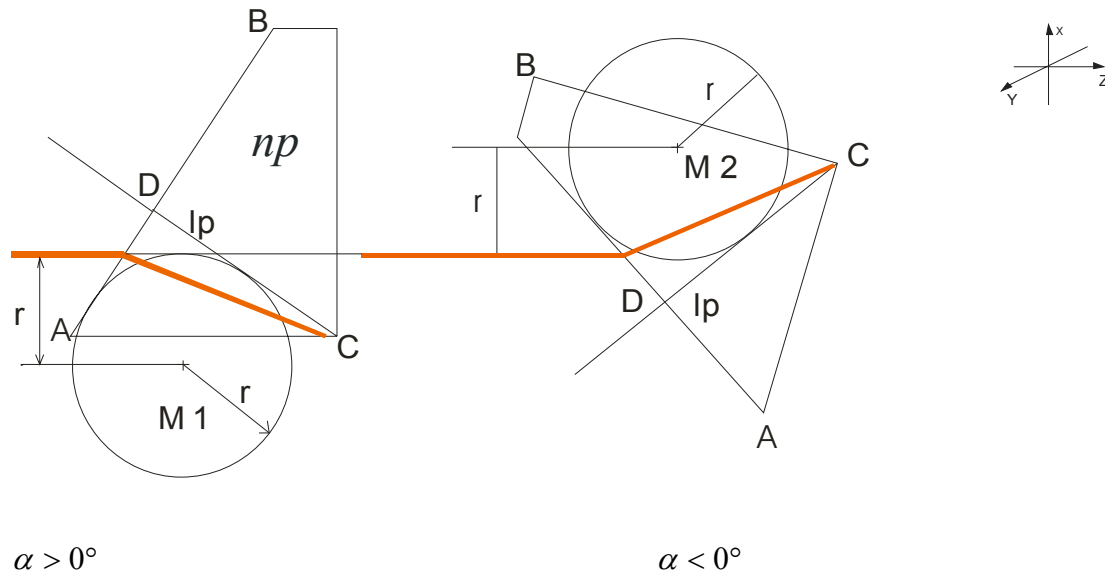


Abbildung 10: Drehachsen des Koppelprismas

Die Kreise um die Mittelpunkte liegen Tangential an l_p und der Strecke \overline{AB}
 Der Radius der Kreise ist:

$$r = \frac{l_p}{n_p} \quad \text{(Gleichung 14)}$$

mit

$$l_p = \overline{AC} \cdot \sin \varepsilon \quad \text{(Gleichung 15)}$$

und n_p = Brechungsindex des Prismas

Die Justage ist optimal, wenn für Winkel $\alpha > 0^\circ$ der Laserstrahl tangential auf den Kreis mit dem Mittelpunkt M1 trifft, wobei der Strahl über M1 auf das Prisma treffen muss. Für $\alpha < 0^\circ$ muss der Strahl unterhalb von M2, tangential auf den Kreis um M2 treffen.

Um beim Suchen der Wellenleitermoden das Koppelprisma auf nur eine Drehachse justieren zu müssen, errechnet man aus Gleichung 13 und der Bedingung das für die Anregung von Wellenleitermoden die effektiven Brechungsindices der Welle im Prisma und Wellenleiter gleich sein müssen, den Prismenwinkel ε , für den α entweder $> 0^\circ$ oder $< 0^\circ$ wird.

3.3 Wellenleiterverluste

Das geführte Licht verliert entlang des Weges im Wellenleiter an Intensität. Die möglichen Ursachen der Wellenleiterverluste werden im Folgenden zusammengefasst. Aus ihnen ergeben sich Anforderungen an einen Wellenleiter mit geringer Dämpfung. Die Grundlagen zu den Wellenleiterverlusten wurden der Literatur entnommen. [2, 3, 4, 5, 9].

Wellenleiterverluste durch Streuung:

Inhomogenitäten und Partikel im Film wirken als Streuzentren und verursachen Intensitätsverluste der gestreuten Welle. Man unterscheidet die Streumechanismen nach der Größe der Streuzentren. Für Streuzentren kleiner λ spricht man von Rayleigh-Streuung. Sie legt die theoretische Untergrenze der erreichbaren Dämpfung eines Wellenleiters fest [6].

$$I_{Ray} \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

Streuzentren in der Größenordnung der Wellenlänge verursachen die so genannte Mie-Streuung, wobei m von der Größe des Streuzentrums abhängig ist.

$$I_{Mie} \sim \frac{1}{\lambda^i}$$

mit

i = 0 bis 4

λ = Wellenlänge des geleiteten Lichtes

Wellenleiterverluste durch Oberflächenrauheit:

Reale Wellenleiter besitzen eine unvollkommene Oberflächenbeschaffenheit der Grenzflächen. Die Reflexion des Strahles unter verschiedenen Winkeln kann zu einer Anregung von Moden höherer Ordnung sowie von Substrat- und Luftmoden führen, so dass Intensität verloren geht. Für die Moden höherer Ordnung sind, wegen des kleineren Winkels Θ und der damit verbundenen höheren Anzahl an Reflexionen, die Reflexionsverluste besonders groß.

Wellenleiterverluste durch Absorption:

Werden durch die geführte Welle Elektronen oder Molekülschwingungen angeregt, finden Wellenleiterverluste durch Absorption statt.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Dämpfung eines Wellenleiters hauptsächlich abhängig ist von:

1. Oberflächengüte (Reflexionsverluste)
2. der Schichtdicke d (große Schichtdicke bedeutet weniger Reflexionen an der Grenzflächen)
3. der Homogenität des Filmes (Inhomogenitäten sind Partikel oder ein ungleichmäßiger Brechungsindex des Filmes)

Sie nimmt mit der Ordnung der Wellenleitermoden zu und ist für TM-Moden kleiner als für TE-Moden.

Daraus ergeben sich für die Herstellung von Wellenleitern mit geringer Dämpfung mittels Schleuderbeschichtung folgende Anforderungen [4]:

1. Hohe Konzentration des Polymers in der Lösung
2. Hohe Schleuderdrehzahl
3. Herstellung der Filme bei Raumtemperatur
4. Günstige Form des Substrates (möglichst quadratisch bzw. rund)

Um die Wellenleiterverluste zu quantifizieren und einen Polymerfilm zu charakterisieren wird als Maß für die Dämpfung der Dämpfungskoeffizient α_{gw} eingeführt.

Der Dämpfungskoeffizient α_{gw} :

Der Dämpfungskoeffizient α_{gw} (α guided waves) ist ein Maß für die Güte eines Lichtwellenleiters bzw. dessen Dämpfungsverhalten und lässt sich aus dem Extinktionsgesetz ableiten. Dieses beschreibt die durch Wellenleiterverluste verursachte exponentielle Intensitätsabnahme des geführten Strahles.

Das Extinktionsgesetz lautet:

$$I(X) = I_0 \cdot e^{-K(\Delta X)} \quad (\text{Gleichung 16})$$

mit

$I(X)$ = Intensität in Abhängigkeit vom Weg im Wellenleiter

I_0 = Anfangsintensität

K = Proportionalitätskonstante

ΔX = Weg im Wellenleiter

Logarithmieren führt zu:

$$K = \frac{\ln\left(\frac{I(X)}{I_0}\right)}{\Delta X} \quad (\text{Gleichung 17})$$

$$[K] = \frac{1}{cm}$$

In der Praxis gibt man die Proportionalitätskonstante in Dezibel (dB) an, so dass α_{gw} durch die folgende Gleichung definiert wird:

$$\alpha_{gw} = \frac{-10 \log\left(\frac{I(X)}{I_0}\right)}{\Delta X} \quad (\text{Gleichung 18})$$

mit

α_{gw} = Dämpfungskoeffizient der geführten Welle $[\alpha_{gw}] = \text{dB} / \text{cm}$

ΔX = Weg im Wellenleiter $[\Delta x] = \text{cm}$

Alle für die Wellenleiterdämpfung verantwortlichen Effekte wie Streuung und Absorption beeinflussen α_{gw} , dass heißt ihre Wirkungen werden in dieser Größe zusammengefasst.

4 Herstellung von Schichtwellenleitern

Um für die erforderlichen Experimente Probefilme zur Verfügung zu haben, wurden eigene Filme hergestellt. Im Folgenden werden die Vorbereitung der Substrate und die Herstellung der Schichtwellenleiter beschrieben.

Verwendete Substrate:

Die Polymere wurden in Form von dünnen Filmen auf Substrate aus Glas (BK 7) mit einem Brechungsindex für $\lambda = 633 \text{ nm}$ von ca. 1,54 oder Quarzglas mit einem Brechungsindex von 1,46 durch Spincoating aufgebracht. Die Glassubstrate waren Standardobjektträger aus der Mikroskopie. Die Quarzsubstrate mit der Bezeichnung Spectrasil 2000 wurden von der Fa. PGO geliefert. Sowohl Glas als auch Quarzsubstrate hatten entweder die Abmessungen ca. $26 \times 76 \times 1 \text{ mm}$ oder die instituts-eigenen Standardgröße ca. $26 \times 35 \times 1 \text{ mm}$. Die kleinen Glassubstrate wurden durch Zerteilen der Objektträger hergestellt.

Um Verunreinigung im Schichtwellenleiter möglichst zu vermeiden erfolgte vor dem eigentlichen Herstellungsprozess der Filme eine standardisierte Reinigungsprozedur der Substrate.

Reinigung der Substrate:

Zunächst wurden die Substrate mit einem Handspülmittel unter der Verwendung von hochreinem Wasser (Milli-Q-Wasser erzeugt durch Filteranlage der Fa. Millipore) vorgereinigt. Die stets mit Flüssigkeit benetzten Substrate wurden dann in eine Färbebox mit einer 1%-igen Hellmanex-Lösung (verdünnte Kaliumhydroxidlösung der Hellma-Worldwide GmbH) gestellt. Anschließend erfolgte eine etwa 15 Minuten lange Reinigung im Ultraschallbad. Um Reste von gelösten Verunreinigungen und der Hellmanex-Lösung zu entfernen wurden die Substrate nun durch wiederholtes Leeren und Auffüllen der Färbebox mit Milli-Q-Wasser (bis zu zehnmal) gespült. Nach dem letzten Auffüllen der Färbebox wurden die Substrate direkt in eine zweite Färbebox mit Ethanol umgesetzt. Das Ethanol wurde verwendet, um das Abblasen der Substrate mit Stickstoff zu erleichtern. Um eine sofortige Verunreinigung der Substrate durch Staubpartikel in der Raumluft zu vermeiden, erfolgte das Abblasen in der Laminar-flow-box des Spin-Coaters, weil die hier strömende gefilterte Luft eine

geringe Partikeldichte aufwies. Die gereinigten Substrate wurden in einer Färbebox im Trockenofen bei ca. 55° C gelagert.

Verwendete Polymere

Zur Herstellung der Proben wurden Polystyrol (PS) und Polymethacrylat (PMMA) verwendet. Das verwendete PS wurde im Institut hergestellt und hatte ein mittleres Molekulargewicht von 161740 bzw. 158256 g/Mol. Das verwendete PMMA war laut Beschriftung mittelmolekular. Die Polymere wurden aufgrund ihrer Verfügbarkeit und ihrer Eignung zur Herstellung von Schichtwellenleitern gewählt. Das PMMA wurde verwendet, weil es so möglich war, im Vergleich zu Polystyrolfilmen robustere Filme herzustellen.

Herstellung der Polymerlösungen:

Das verwendete Lösemittel musste die Polymere lösen und durfte keinen zu hohen Dampfdruck besitzen, um ein frühzeitiges schnelles Verdunsten auf dem benetzten Substrat vor dem Beginn des Schleuderns zu vermeiden. Aus diesem Grund wurden die, in Flocken oder Granulat vorliegenden Polymere, in Toluol gelöst. Die Konzentrationen der Lösungen wurden so gewählt, dass eine für die Filmherstellung nicht zu hohe Viskosität der Lösungen resultierte. Für Polystyrol wurden zwischen 0,8 und 1 g Polymer für 10 g Lösung verwendet. PMMA Lösungen wurden mit 8 Gew.-% angesetzt. Um Verunreinigungen aus den Lösungen zu entfernen, wurden, nachdem das eingewogene Polymer vollständig gelöst war, die Lösungen mit Spritzenfiltern (Porengröße 0,45 µm) der Fa. Millipore gefiltert und in Schraubgläsern aufbewahrt bzw. sofort für die Filmherstellung verwendet.

Filmherstellung mit Spin-Coater:

Der Spin-Coater befand sich in einer Laminar-Flow-Box. Der in der Laminar-flow-box herrschende Überdruck verhinderte, dass ungefilterte Raumluft die gereinigten Substrate oder die Polymerlösungen verunreinigten. Die auf Raumtemperatur abgekühlten Substrate wurden in einer Substrathalterung auf die drehbare Achse des Spin-Coaters gesetzt und mit einer Pasteur-Pipette vollständig und möglichst gleichmäßig, von einer Seite aus beginnend, mit der Polymerlösung benetzt. Eine Nut in der Substrathalterung verhindert, dass sich Polymerlösung durch Kapillar-

wirkung zwischen die Unterseite des Substrats und die Substrathalterung gezogen wird. Für große Substrate wurden ca. 1 ml Lösung, für die kleineren Standardsubstrate ca. 0,5 ml Lösung aufgebracht. Die Drehzahl des verwendeten Spin-Coaters war stufenlos einstellbar und wurde bereits nach kurzer Zeit erreicht (große Beschleunigung ohne Vorschleudern). Es wurden relativ niedrige Drehzahlen im Bereich zwischen 1000 und 1250 Upm verwendet. Die Rotationszeit betrug etwa 20 Sekunden.

Tempern im Vakuumofen:

Nach der Herstellung wurden die Filme für mehrere Stunden bei erhöhter Temperatur (50-60°C) in einem Vakuumofen getempert. Hierdurch sollten Lösemittelreste entfernt und eine maximale Beständigkeit der Filme (mechanisch und chemisch) erreicht werden.

Bestimmung der Schichtdicke d:

Mit dem Stufenprofilometer P 10 der Fa. Tencor Instruments wurden an Stichproben die Schichtdicke und die Oberflächenrauheit der Filme bestimmt [R_a]. Hierzu wurden die Filme mit einer Nadel bis auf das Substrat geritzt. Es wurden Schichtdicken zwischen 0,8 und 2 μm gemessen. Es zeigte sich, dass bei der Verwendung der kleinen Substrate, bei gleicher Konzentration der Lösung und gleicher Schleuderdrehzahl ein besseres Ergebnis erzielt wurde.

Substratgröße und Oberflächengüte:

Für Vorversuche wurden schmale Substrate hergestellt (Länge ca. 70 mm, Breite ca. 13 mm). Die Herstellung dieser Filme erwies sich als schwierig. Später wurde erkannt, dass die Oberflächengüte zunimmt, wenn die Substratfläche der eines Quadrates ähnelt, so dass für die kurzen Standardsubstrate die besten Ergebnisse erzielt werden konnten.

5 Methoden zur Dämpfungsmessung

Bisher wurden in der Literatur drei unterschiedliche Messmethoden für die Dämpfungsmessung an Schichtwellenleitern beschrieben. Diese werden im Folgenden kurz beschrieben.

5.1 Streulichtmethode

Die Bestimmung des Dämpfungskoeffizienten α_{gw} dünner Filme erfolgte am MPI-P bisher durch die Messung der Streulichtintensität entlang des Ausbreitungsweges im Wellenleiter [8]. Hierzu wird das Streulicht des im Wellenleiter geführten Strahls mit einer Linse auf eine Diodenzeile abgebildet (Abbildung 11). Nach einer Kalibrierungsmessung kann den Kanalnummern der Diodenzeile eine Weglänge zugeordnet werden. Laut Literatur [2] erfolgt die Dämpfungsmessung durch Streulichtmessung unter der Annahme, dass die Wellenleiterverluste durch Streuung homogen über den Film verteilt sind. Dies ist aber speziell bei Spin-Coat-Filmen nicht immer der Fall, weil Mikrobblasen und andere Defekte im Film als Streuzentrum wirken können und lokal hohe Verluste verursachen.

Die Methode ist geeignet um Wellenleiter mit großen Dämpfungskoeffizienten ($\alpha > 0,5$ dB/cm) zu untersuchen [8]. Bei Filmen mit kleiner Dämpfung und geringen Streuverlusten wird diese Methode zunehmend ungenau, weil die Rauschamplitude relativ zum Signal groß wird. Für Filme mit geringer Dämpfung ist es außerdem schwierig das Streulicht auf die Diodenzeile abzubilden.

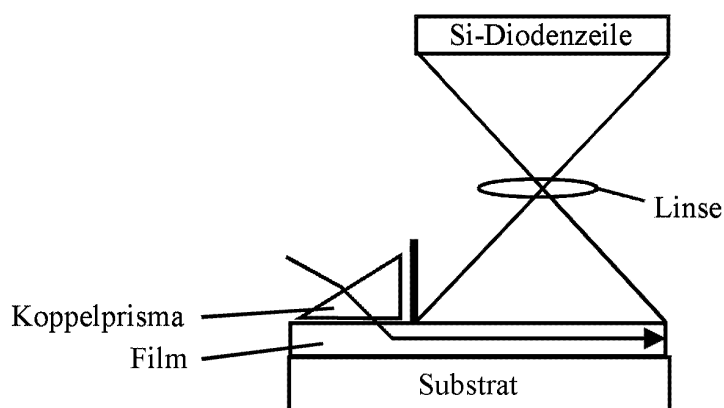


Abbildung 11: Schema der Streulichtmethode [4]

5.2 Sliding-Prism Methode

Der geführte Strahl wird bei dieser Methode durch eine hochbrechende Indexflüssigkeit, die sich zwischen dem Wellenleiter und einem verschiebbarem Koppelprisma befindet ausgekoppelt. Analog zum Einkoppeln von Licht mittels Prismenkopplung, wird der ausgekoppelte Strahl auf die Austrittsfläche des Koppelprismas gebrochen. Auf dieser Fläche ist eine Diode aufgebracht, so dass die Intensität des geführten Strahles in Abhängigkeit des Weges im Wellenleiter gemessen werden kann (Abbildung 12).

In der Veröffentlichung von Teng [2] wird diese Methode im Vergleich zu der Streulichtmessung als kompliziert beschrieben. Sie erfordert einen relativ komplexen Mechanismus und das bewegliche Prisma kann Beschädigungen am Film verursachen.

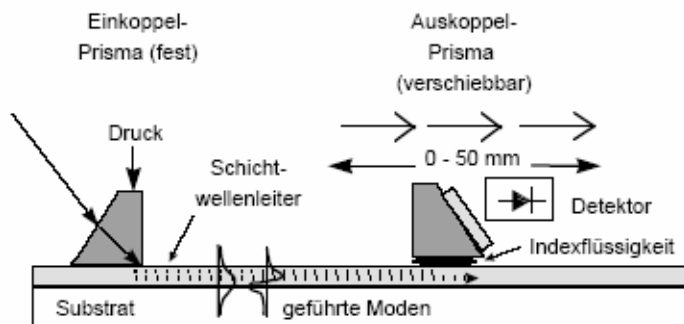


Abbildung 12: Schema der Sliding-Prism Methode [5]

5.3 Auskopplung durch Eintauchen in eine hochbrechende Flüssigkeit

Nach der von Teng [2] beschriebenen Methode, wird der geführte Strahl durch Eintauchen des Wellenleiters in eine Flüssigkeit mit einem Brechungsindex n_{fl} vollständig ausgekoppelt. Der Brechungsindex der Flüssigkeit ist größer als der Brechungsindex des zur Herstellung des Wellenleiters verwendeten Polymers. Der Laser mit den optischen Komponenten, der Drehtisch mit dem Koppelprisma, die Küvettenhalterung, die abbildende Optik, der Detektor und die Verschiebevorrichtung bilden eine Einheit. Die Einfallswinkel werden durch Drehen des Koppelprismas auf dem Drehtisch (Abbildung 13) eingestellt. Zusätzlich wird auch die komplette Einheit gedreht, um zu erreichen, dass der Eintauchwinkel zwischen Substrat und Flüssigkeitsoberfläche größer als der Winkel des ausgekoppelten Strahles wird.

Laut Literaturangabe wurden Dämpfungskoeffizienten $> 0,1$ dB/cm mit einer Messunsicherheit von $\pm 5\%$ bestimmt [2]. Speziell bei Spin-Coat-Filmen treten Mikrobblasen und andere Defekte auf, die als Streuzentrum wirken können und lokal hohe Verluste verursachen. Solche lokalen Effekte können mit dieser Methode im Gegensatz zur Streulichtmethode erkannt werden.

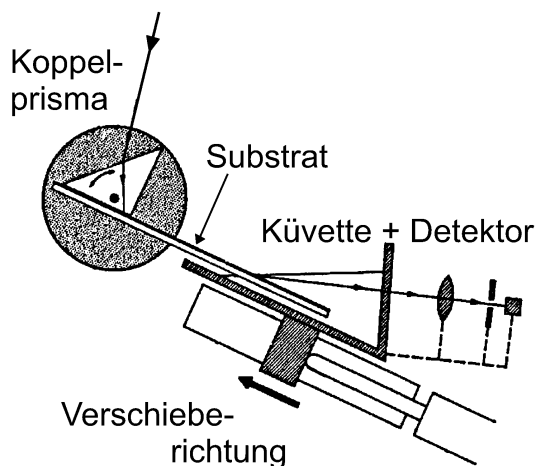


Abbildung 13: Auskopplung durch Eintauchen in eine Flüssigkeit [2]

6 Aufbau eines Messplatzes für Dämpfungsmessungen

Zur Bearbeitung der Aufgabenstellung dieser Arbeit wurde ein Messaufbau mit Auskopplung des Lichtes aus dem Wellenleiter durch Eintauchen in eine hochbrechende Flüssigkeit gewählt. Dieses Prinzip wurde bereits von Teng (1993) [2] verwendet, jedoch sollte bei Berücksichtigung der speziellen Anforderungen (Kapitel 6.1) eine Vereinfachung des Messaufbaus erreicht werden. Im Anschluss an die Anforderungen werden die durchgeführten Experimente (Kapitel 6.2) und der fertige Messaufbau einschließlich der Auswertungsmethoden beschrieben (Kapitel 6.3 bis Kapitel 6.5).

6.1 Anforderungen an den Dämpfungsmessplatz

Gemäß der Aufgabenstellung dieser Arbeit (Kapitel 2) sind folgende Anforderungen an den zu entwickelnden Messplatz zu stellen:

- Dämpfungsmessungen an Wellenleitern mit geringer Dämpfung
- Verwendung der Koppelvorrichtung von Heinz (1989) [3]
- Schrittmotorgetriebene Verstellung mit synchroner Messsignalerfassung
- Messung von Filmen auf MPI-Standardsubstraten
- Justierbarkeit der Apparatur für die Messung unterschiedlicher Filme
- Auskopplung des Lichtes durch Eintauchen in eine hochbrechende Flüssigkeit
- Hochbrechende Flüssigkeit mit geringer Absorption
- Detektion mittels Diode

Der neue Aufbau sollte Dämpfungsmessungen an Wellenleitern mit geringer Dämpfung ($\alpha_{\text{gw}} < 1 \text{ dB/cm}$) ermöglichen. Dabei sollten die Messungen mit einer größeren Genauigkeit als mit der am MPI-P bisher durchgeführten Streulichtmethode erfolgen. Das bedeutete, dass die geringe Intensitätsänderung des geführten Strahles groß gegenüber dem statistischen Rauschen des Messsignals sein muss, um eine hinreichend genaue Aussage über die Dämpfung des untersuchten Wellenleiters treffen zu können.

Um die in der Literatur beschriebene Methode des Eintauchens des Wellenleiters in eine hochbrechende Flüssigkeit [2] zu vereinfachen, sollte die im Institut vorhandene Koppelvorrichtung für Schichtwellenleiter verwendet werden. Diese ermöglicht eine Variation der Winkel der in das Koppelprisma einfallenden Laserstrahlen bei stationärem Wellenleiter. Um eine hohe Präzision zu erhalten, sollten erforderliche Bewegungen mit einem Schrittmotor realisiert werden. Die Messsignalerfassung sollte synchron erfolgen.

Die Apparatur sollte die Messung unterschiedlicher Filme ermöglichen. Da die zu untersuchenden Polymerfilme in einen standardisierten Herstellungsprozess unter der Verwendung von Substraten der Größe 26 x 75 x 1 mm bzw. 26 x 37 x 1 mm präpariert wurden war es erforderlich eine Messung mit diesen Standardsubstraten durchführen zu können.

Dies erforderte eine exakte Abbildung des ausgekoppelten Lichtes auf eine geeignete Diode. Die verwendete Flüssigkeit durfte keine zu große Absorption im Wellenlängenbereich des verwendeten Lasers besitzen.

6.2 Entwicklung

Es wird nun beschrieben, welche Überlegungen zu den ersten Vorversuchen führten. Die Beobachtungen, die bei verschiedenen Versuchen gemacht wurden, führten schrittweise zu dem hier beschriebenen Aufbau. Bei der Auswahl der für den Aufbau verwendeten Bauteile wurde aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und schnellen Verfügbarkeit meist auf Standardteile zurückgegriffen.

Grundgedanke:

In der Publikation zur Dämpfungsmessung durch schräges Eintauchen in eine hochbrechende Flüssigkeit [2], wurde beschrieben, dass die gesamte Einheit, u. a. bestehend aus Laser, Koppelprisma, Wellenleiter, Flüssigkeitstrog und abbildender Optik, komplett gedreht wurde. Dies geschah, um zu erreichen, dass der Winkel des Substrates zur Flüssigkeitsoberfläche größer als der Auskoppelwinkel des Strahles wurde und der Strahl nicht die Flüssigkeitsoberfläche traf. Für senkrechtetes Eintauchen, sollte dies immer der Fall, so dass durch die Verwendung der Koppelvorrichtung [3] der von Teng beschriebene Aufbau [2] zu vereinfachen sein sollte.

Optimierung der Prismenkopplung:

Erste Vorversuche dienten dazu die praktische Durchführung der Prismenkopplung zu optimieren, wobei das Streulicht der im Wellenleiter geführten Moden beobachtet wurde (Abbildung 14).

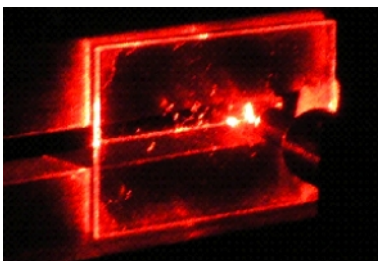


Abbildung 14: Streulicht einer Wellenleitermode

Außerdem musste geklärt werden, ob der geführte Strahl wirklich durch senkrechtetes Eintauchen auszukoppeln war. Diese Versuche erfolgten an einem Aufbau für M-Linien-Spektroskopie, der am MPI-P vorwiegend genutzt wurde, um Brechungs-

indices von Polymerfilmen zu bestimmen und an der Koppelvorrichtung für planare Lichtwellenleiter (Kapitel 3.4).

Der Aufbau für M-Linien-Spektroskopie bestand im Wesentlichen aus einem auf einem Präzisionsdrehtisch montiertem Koppelprisma und einer parallel zur Tischebene verstellbaren Linse. Für das systematische Suchen der Wellenleitermoden, wurde der Einfallswinkel des Lasers auf das Koppelprisma in kleinen Schritten verändert und gleichzeitig der Fokus im Koppelprisma, durch Verstellen der Linse, zwischen Koppelkante und Koppeldorn verschoben. Das Koppelprisma wurde so justiert, dass der Laser bei einer Änderung des Einfallswinkel α , möglichst in die Nähe der Koppelkante gebrochen wird (Kapitel 3.2).

Anfangs war die Koppelvorrichtung mit einem He-Ne-Laser auf einer Führungsschiene montiert. Die Linse, zur Fokussierung des Laserstrahls war fest in die Koppelvorrichtung integriert. Die Justage des Koppelprismas in der Koppelvorrichtung auf die Drehachse des Spiegels und des Umlenkprismas stellte sich wegen der kompakten Bauweise als sehr schwierig heraus und gelang auch nicht vollständig. Nachdem eine verstellbare Linse zwischen Laser und Koppelvorrichtung gesetzt wurde, konnte dieser Nachteil der nicht optimalen Justage kompensiert werden, da für das Suchen der Wellenleitermoden die Position des Fokus, wie zuvor beschrieben, verändert werden konnte.

Es zeigte sich, dass eine effektive Einkopplung schon durch geringe Beschädigungen oder Verunreinigungen am Koppelprisma unmöglich wird. Ebenso wichtig ist die Qualität bzw. der Zustand verwendeten Filme.

Verbesserung der Koppelbedingungen:

Ein neues Koppelprisma wurde in eine modifizierte Prismenhalterung montiert. Nachdem das Koppelprisma in der Koppelvorrichtung ausgetauscht war und neue Filme zur Verfügung standen (Kapitel 4), wurde Wellenleitung beobachtet. Für die Vorversuche zum senkrechten Eintauchen wurde die Führungsschiene mit der Koppelvorrichtung, der verstellbaren Linse und dem Laser, senkrecht auf dem Optischentisch verschraubt. Eine Küvette mit einer hochbrechenden Flüssigkeit ($n = 1,7$) wurde manuell positioniert. Da diese für die Verwendung von Standardsubstraten zu klein war, mussten Filme auf schmalen Substraten (Breite ca. 17,5 mm) hergestellt oder die Standardsubstrate in die horizontal um 45° gedrehte Küvette eingetaucht werden.

Optischer Aufbau und definierte Polarisation:

Nachdem ein ausgekoppelter Strahl in der Flüssigkeit zu beobachten war, wurde ein optische Aufbau konzipiert, der eine exakte Justage des Lasers und eine definierte Polarisation des Strahles vor dem Koppelprisma ermöglichen sollte. Um dies zu ermöglichen wurde die Koppelvorrichtung zunächst wie in den Vorversuchen hängend montiert. Der Laser, ein Fresnel-Rhombus, ein Polarisator, die erforderlichen Justierspiegel und Blenden wurden mit Führungsschienen auf dem Optiktisch verschraubt. Um den Strahl in die hängende Koppelvorrichtung zu führen wurde er mit Hilfe von drei zusätzlichen Spiegeln umgelenkt. Diese Anordnung (Abbildung 15) war nur sehr umständlich zu justieren.

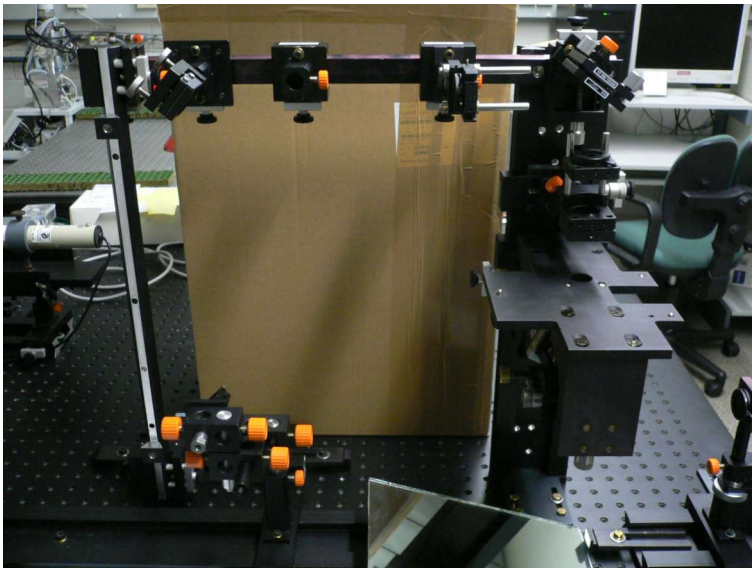


Abbildung 15: Ein Aufbau zur Justage des Lasers

Der optische Aufbau wurde dann dadurch vereinfacht, dass der Laser seitlich in die Koppelvorrichtung eingestrahlt wurde, statt wie bisher in die dafür vorgesehene Bohrung in der Grundplatte. Hierzu wurden alle optischen Komponenten auf eine Höhe von 25 cm justiert.

Eintauchen mit Verstelleinheit:

Um eine schrittmotorgetriebene Verstellung durchführen zu können, wurde eine Verstelleinheit aus Standardteilen zusammengebaut. Ein Schrittmotor mit Linearstelltisch wurde hierzu mit einem verschiebbaren Reiter an eine, senkrecht auf dem Tisch stehende Führungsschiene montiert. Die vorhandene Küvette wurde in einer provisorischen Halterung an der Verstelleinheit befestigt. Die Position der Küvette konnte mit zwei Linearverstellern eingestellt werden. Die Küvette hatte einen mattierten Boden, der als Streuscheibe wirkte. Um die Intensität des ausgekoppelten Strahles am Boden der Küvette zu bestimmen, wurde eine Diode mit Messverstärker verwendet. Anfangs wurde die Diode mit einer Haltehilfe (Dritte Hand) direkt unter der Küvette angebracht.

Verbesserung der Detektion:

Mit einer neuen Küvette konnten Standardsubstrate parallel zur Küvettenwand eingetaucht werden. Für diese Küvette mit Klarglasboden wurde ein Halterahmen entworfen und gefertigt, der mit Hilfe eines Kreuzstücks und Stangen (Systemkomponenten für optische Aufbauten) an der Verstelleinheit verstellbar befestigt wurde. Durch die Vereinfachung der Küvettenhalterung konnte die Diode höhenverstellbar auf zwei Linearverstellern unter der Küvette montiert werden.

Versuchsmessungen mit dieser Anordnung der Diode brachten keine befriedigenden Ergebnisse. Deshalb wurden Versuche zur erforderlichen Positionierungsgenauigkeit der Diode durchgeführt, die zu der Erkenntnis führten, dass der Auskoppelpunkt an der Flüssigkeitsoberfläche mit einer Sammellinse auf die Diode abgebildet werden musste.

Beobachtungen des Strahles in der Flüssigkeit:

Während des Eintauchens eines unbenetzten Wellenleiters, kam es zu einer sprunghaften Winkeländerung und einem Auffächern des Strahles in der Flüssigkeit. Die Ursachen dieser Winkeländerung waren vermutlich Reflexionen an der Grenzfläche Flüssigkeit-Film, an der es zur Ausbildung eines Meniskus kam. Die Form des Meniskus variierte und verursachte das Auffächern des Strahles in der Flüssigkeit. Dies machte eine präzise Detektion der Strahlintensität auch mit Linse unmöglich.

Um eine gleichmäßige Benetzung des Polymerfilmes mit der Flüssigkeit zu erreichen um ein Auffächern des Strahles zu vermeiden, wurden verschiedene Lösungsansätze verfolgt:

1. Messung beim Austauchen
2. Überlagern der Flüssigkeit mit Wasser
3. Aufbringen einer hydrophoben Schicht
4. Schräges Eintauchen
5. Verbesserung der Oberflächengüte der Filme

Zu 1.: Für einen einmal eingetauchten Wellenleiter wurde der Strahl, beim Austauchen in der Flüssigkeit unter einem weitestgehend konstanten Winkel beobachtet. Es wurden Austauschversuche gemacht, bei denen sich aber zeigte, dass die Filme von der Flüssigkeit angelöst und zu stark verändert wurden. Quellprozesse führten zu Änderungen der Schichtdicke und der optischen Eigenschaften. Daher stellte die keine geeignete Vorgehensweise dar.

Zu 2.: Die Überlagerung der Flüssigkeit ($\rho \approx 1,5 \text{ g/cm}^3$) mit Wasser war möglich. Erst durch Mischversuche im Ultraschallbad kam es zu einer Mischung der sonst getrennten Phasen. Jedoch wurde beim Eintauchen der Wellenleiter zu einer Delaminierung. Der Polymerfilm löste sich schnell und vollständig vom Substrat, so dass der Wellenleiter zerstört wurde.

Zu 3.: Um die Benetzungseigenschaften des Films zu verändern wurde versucht eine dünne Schicht eines hydrophoben Materials in der Größenordnung 20 nm aufzubringen, die für eine eingeschnürte Form des Meniskus sorgen sollte. Bei einer solchen Meniskusform sollte eine unregelmäßige Formänderung keinen so großen Einfluss auf den Strahlverlauf haben, da Reflexionen an der Flüssigkeitsoberfläche vermieden würden. Eine Kontaktwinkelmessung der Flüssigkeit auf den verwendeten Polymerfilmen ergab ähnliche Werte wie die für Wasser. Es wurden nun drei Möglichkeiten überprüft mit denen am Institut üblicherweise hydrophobe Silanschichten hergestellt werden. Zwei Methoden, bei denen die Schicht durch Kondensation abgeschieden wird waren nicht erfolgreich. Die Schichtherstellung durch Plasmapolymerisation war geeignet, um den Kontaktwinkel der Flüssigkeit auf dem Polymerfilm stark zu vergrößern. Bei der Begutachtung der Testfilme wurden allerdings Risse beobachtet. Es wurde vermutet, dass die Leistung zur Aufrechterhaltung des Plasmas zu hoch oder die Prozesszeit zu lange eingestellt wurde.

Zu 4.: Test Schräges Eintauchen: Um zu untersuchen, welchen Einfluss der Eintauchwinkel des Wellenleiters in die Flüssigkeit auf die Form des Meniskus hat wurde ein PMMA-Plättchen senkrecht und schräg in Wasser eingetaucht. Es wurde beobachtet, dass schräges Eintauchen dazu führt, dass eine zuvor leicht konkave Benetzung zu einer eingeschnürten Meniskusform wird (konvexe Benetzung).

Zu 5.: Parallel wurde die Oberflächengüte der Filme durch die Wahl der Herstellungsparameter (Art des Polymers, Konzentration der Polymer-Lösung, Drehzahl) verbessert. Diese offensichtlich homogeneren Filme zeigten ein gleichmäßigeres Benetzungsverhalten und waren resistenter gegenüber der verwendeten Flüssigkeit. Wenn der Film wenige Millimeter eingetaucht und angehalten wurde, war der Strahl unter einem flachen Winkel zu beobachten. Nachdem die Messung gestartet und mit konstanter Schrittweite die Position der Küvette verstellt wurde, war der Strahl unter einem großen Winkel zu beobachten. Es konnte kein Springen oder Auffächern mehr beobachtet werden, so dass der Ansatz, die Koppelvorrichtung samt Verstelleinheit schräg zu stellen (Schräges Eintauchen) nicht weiter verfolgt wurde. Als nächster Entwicklungsschritt wurde die Abbildung des Strahles auf die Linse optimiert.

Abbildung des Strahles auf die Linse:

Um die Intensitätsmessungen durchführen zu können musste die Linse kipp- und verschiebbar sein. Die Linse wurde in einer Gegenstandsweite außerhalb der zweifachen Brennweite angebracht, da sich so die Diode durch die Verwendung von Mikrobaukomponenten (Fa. Linos) konzentrisch unter der Linse halten ließ. Außerdem wurde davon ausgegangen, dass der Strahl, bei Filmen mit hoher Oberflächengüte und einer geeigneten Eintauchgeschwindigkeit, unter einem festen Winkel auf den Boden der Küvette trifft, so dass keine Notwendigkeit bestand, die Linse möglichst dicht unter dem Küvettenboden anzubringen. Verschiedene Lösungsvarianten für die Winkeleinstellung und Arretierung der Linse wurden getestet. Die gewählte Lösungsvariante ermöglichte eine optimierte Handhabbarkeit.

Verbesserte Abbildung des Strahles auf die Diode:

Wie oben beschrieben, kam es bei Beginn der Messung zu einer einmaligen Winkeländerung des Strahles. Die Linse und die Diode mussten schnell auf die endgültige Position des Strahles eingestellt werden. Diese Einstellung erfolgte während der ersten Millimeter des Eintauchvorganges. Dazu war es notwendig, die Diode unabhängig von der Linse nachstellen zu können. Hierzu wurde die Diode in der Fokusebene der Linse parallel verschiebbar gehalten.

6.3 Aufbau des Messplatzes

Der Gesamtaufbau (Abbildung 16) besteht aus drei Teilen: Teil 1 ist der optische Aufbau, Teil 2 ist die eigentliche Apparatur zur Dämpfungsmessung und der 3. Teil besteht aus den Komponenten zur Messung und Signalverarbeitung.

Die wesentlichen Bauelemente werden hinsichtlich Ausführung und Funktion beschrieben. Zeichnungen der entworfenen und gefertigten Teile befinden sich im Anhang (Kapitel 9). Die Herstellerangaben und verfügbaren Spezifikationen der zum Aufbau verwendeten Komponenten sind im Kapitel 9 zusammengefasst. Für nicht mehr lieferbare Komponenten des Aufbaus werden äquivalente aktuelle Alternativen vorgeschlagen (Kapitel 9).

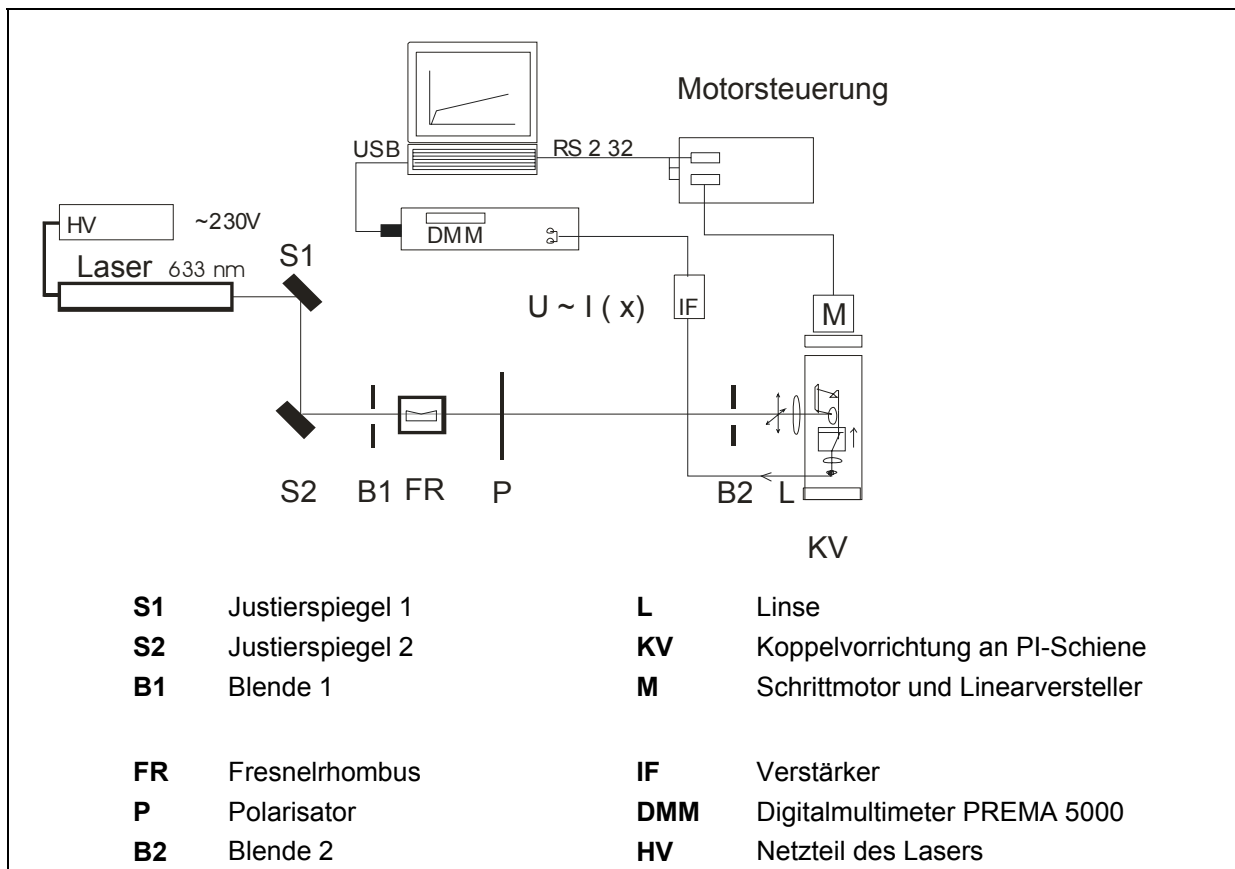


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Gesamtaufbaus

6.3.1 Optischer Aufbau

Als Lichtquelle für die Messungen diente ein Helium-Neon-Laser. Die übrigen optischen Komponenten waren zwei Justierspiegel, zwei Lochblenden, ein Fresnel-Rhombus, ein Polarisator und eine Linse. Die Blenden und die Linse waren in Komponentenhalterungen gefasst (Abbildung 17 und 18). Alle Komponenten des optischen Aufbaus wurden mit Reitern, Säulen und Stiften auf Führungsschienen (PI-Schienen) montiert (Abbildung 19). Die Schienen wurden mit einem Optiktisch verschraubt.

Dieser optische Aufbau diente dazu, das Experiment auf eine feste optische Achse zu justieren. Außerdem war es so möglich, die Polarisation des verwendeten Lichtes (TM oder TE) einzustellen.

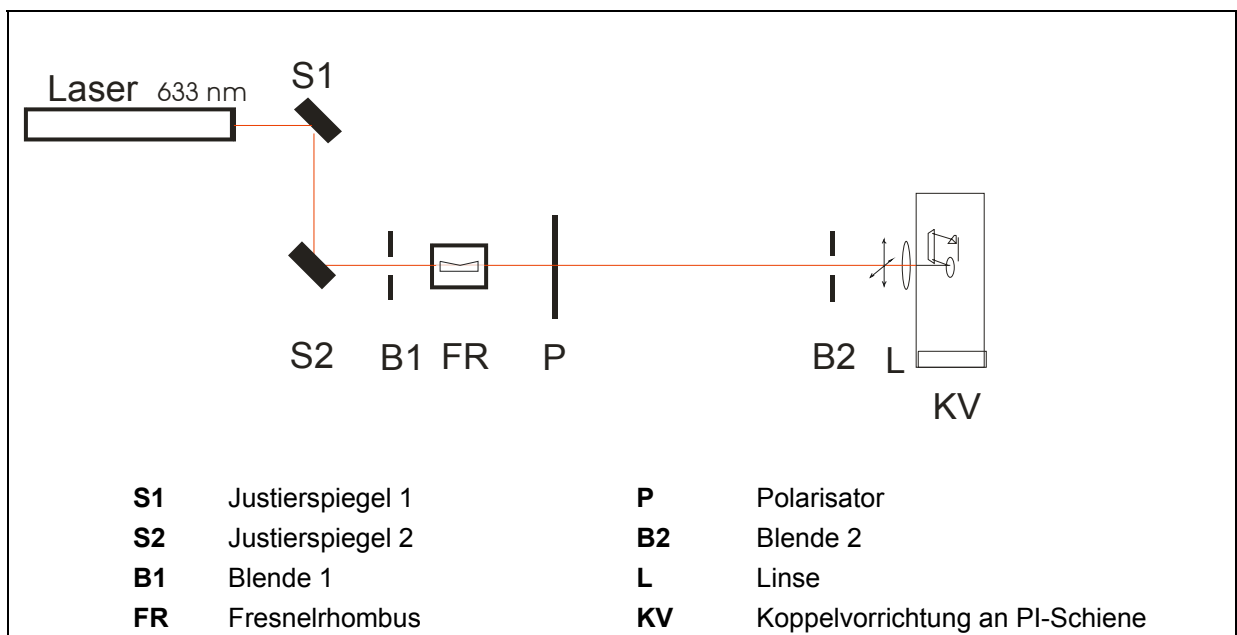


Abbildung 17: Schematische Darstellung des optischen Aufbaus

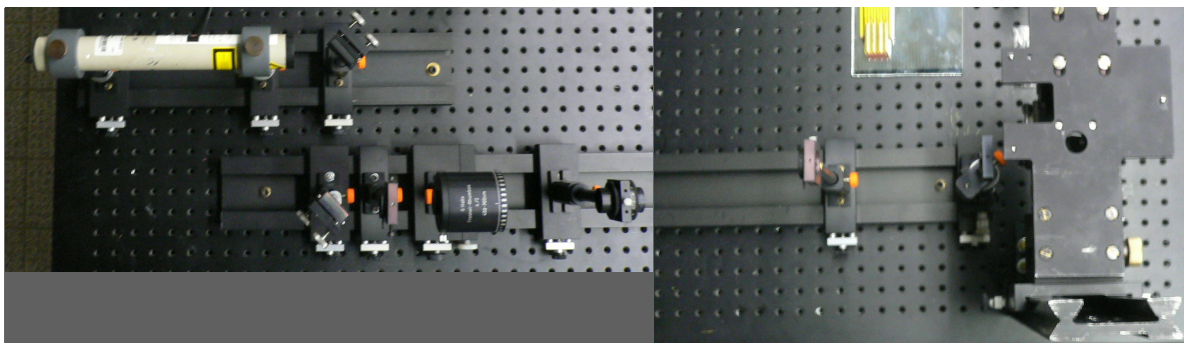


Abbildung 18: Optischer Aufbau

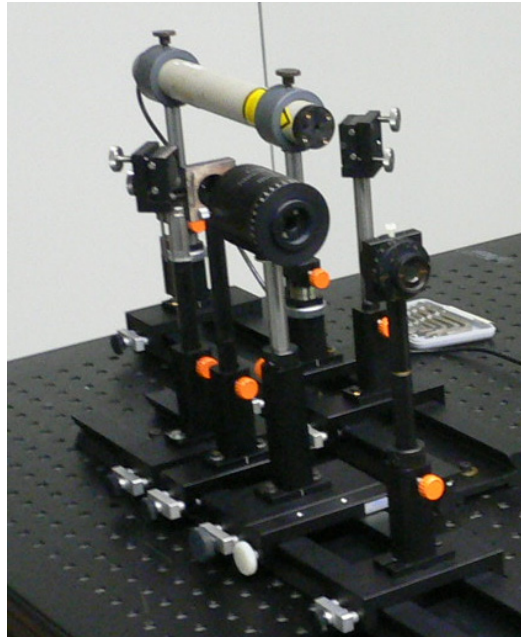


Abbildung 19: Halterung der optischen Komponenten

Verwendete Komponenten des optischen Aufbaus:

- **Laser:**
Der Helium-Neon-Laser liefert linear polarisiertes Licht mit einer Wellenlänge von 633 nm. Aufgrund seiner Leistung ist er in die Laserschutzklasse 3b einzuordnen. ($P \leq 5 \text{ mW}$). Zum Betrieb der Laserröhre wurde diese an ein Hochspannungsnetzteil angeschlossen. Die Stabilität der Laserintensität wurde überprüft (Kapitel 6.5).
- **Justagespiegel:**
Die Justagespiegel ermöglichen es den Laserstrahl parallel und konzentrisch zu der optischen Achse einzustellen, die durch die zwei Blenden B1 und B2 definiert ist. Die Spiegel sind beweglich gelagert und lassen sich über zwei Stellschrauben kippen. Mit dem Spiegel S1 wird der Strahl auf die Blende B1 und mit dem Spiegel S2 auf die Blende B2 eingestellt.

- **Blende:**

Bei den verwendeten Blenden handelt es sich um Irisblenden, deren Lochdurchmesser einstellbar ist. Somit kann der Laserstrahl erst auf die Blende B1 und dann, bei geöffneter Blende B1, auf die Blende B2 und somit auf die optische Achse justiert werden. Die Blenden wurden in gleicher Höhe montiert, so dass die optische Achse parallel zur Tischebene verläuft.
- **Fresnel-Rhombus:**

Der Fresnel-Rhombus diente dazu, die Polarisationssebene des linear polarisierten Laserstrahls zu drehen. Der Wellenlängenbereich des Fresnel-Rhombus war mit 400 nm bis 700 nm angegeben. Die Bezeichnung $\lambda/2$ gibt an, dass durch vierfache Totalreflexion des einfallenden Lichtes eine Drehung der Schwingungsebene um 180° gedreht wird. Verwendet wurde der Fresnel-Rhombus der Fa. B. Halle Nachfolger mit der Bezeichnung RFB 400.
- **Polarisator:**

Der Polarisator diente dazu, die Intensität des Laserstrahls im Experiment zu variieren und das, nach der Reflexion an den Justierspiegeln nicht mehr rein linear polarisierte Licht, zu filtern.
- **Linse:**

Die Linse mit einer Brennweite von 150 mm fokussierte den Laserstrahl in der Nähe der Koppelkante. Um die zum systematischen Suchen der Wellenleitermoden nötige Variation der Position des Fokus zwischen Koppeldorn und Koppelkante zu ermöglichen, wurde die Linsenhalterung auf einem Linearversteller montiert.

6.3.2 Apparatur zur Dämpfungsmessung

Der zweite Teil des Gesamtaufbaus ist die eigentliche Apparatur zur Dämpfungsmessung (Abbildung 20 und 21).

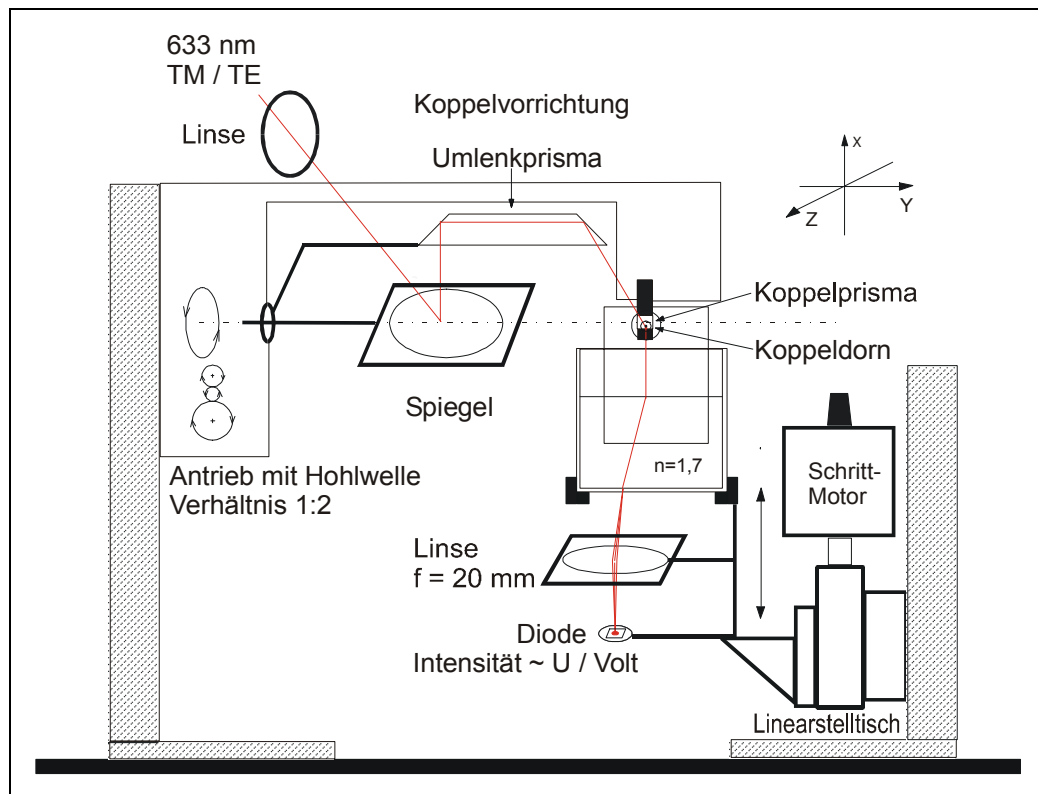


Abbildung 20: Schema der Apparatur zur Dämpfungsmessung

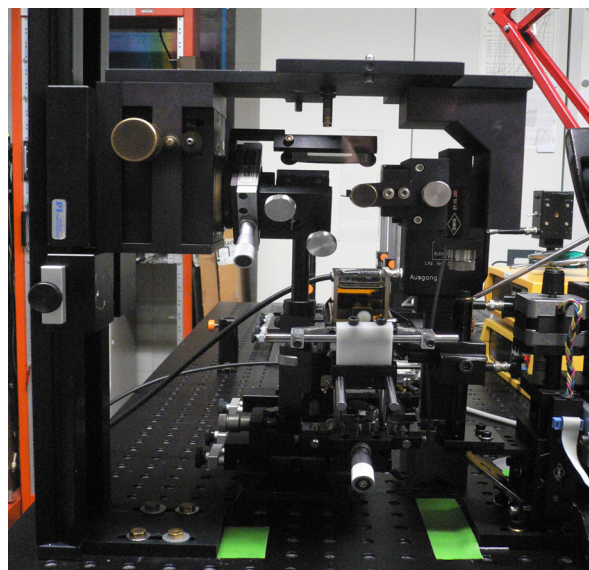


Abbildung 21: Koppelvorrichtung und Küvettenhalterung

Im Wesentlichen bestand Teil 2 des Aufbaus aus der Koppelvorrichtung [3], mit der das Licht in den Wellenleiter gekoppelt wurde und der höhenverstellbaren Küvettenhalterung (Abbildung 22) mit abbildender Linse und Diode zur Detektion der Strahlintensität. Beide Einheiten waren mit Reitern an senkrecht auf dem Optiktisch verschraubten PI-Schienen verschiebbar gehalten. Die Verstelleinheit mit Küvettenhalterung wurde zum Wechsel der Filme abgelassen und war deshalb über eine Platte mit zwei Einzelreitern verbunden. Diese Anordnung ermöglichte eine sichere Handhabung der Höhenverstellung. Der Maximale Verstellweg betrug 18 mm und ergab sich aus den Abmessungen der Koppelvorrichtung, der Küvette und der Substrate.

Die Koppelvorrichtung ermöglichte das Suchen der Wellenleitermoden bei stationärem Koppelprisma. Sie wurde so auf die optische Achse justiert, dass durch Drehen des gekoppelten Antrieb von Spiegel und Umlenkprisma der Einfallswinkel α verändert werden konnte. Das Koppelprisma wurde mit Hilfe zweier Linearversteller auf die Drehachse des Spiegels eingestellt, so dass für große Bereiche von α der Fokus quasistationär in der Nähe der Koppelkante verblieb und mit der Linse verschoben werden konnte. Im Gegensatz zu den Anordnungen, die in der Arbeit zur Entwicklung der Koppelvorrichtung [3] beschrieben wurden, traf der Laser nicht durch eine Bohrung in der Adapterplatte auf den Umlenkspiegel, sondern wurde seitlich eingestrahlt.

Die Küvettenhalterung war mit einem Kreuzstück aus dem Mikrobanksystem an einer Stange befestigt. Dadurch konnte die komplette Küvettenhalterung bei Bedarf parallel verschoben werden. Diese Stange war über einen Winkel aus Standardteilen, der zusätzlich gestützt wird, mit dem Linearversteller verbunden.

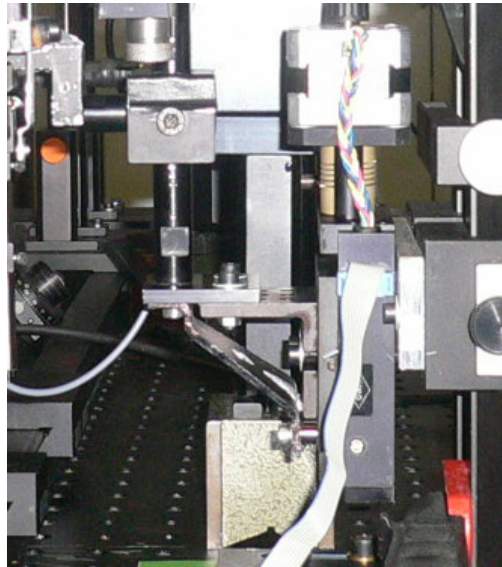


Abbildung 22: Verstelleinheit

Verwendete Komponenten:

- Koppelvorrichtung:
Die genaue Beschreibung der Koppelvorrichtung ist der Arbeit von Heinz (1989) zu entnehmen [3]. Um die eine maximale Eintauchtiefe der Substrate in die Küvette zu ermöglichen, wurde der Halteblock des Koppeldorns sowie die Prismenhalterung modifiziert. Ein neues Koppelprisma wurde in eine neu gefertigte Prismenhalterung eingeklebt.
- Koppelprisma:
Der Prismenwinkel ε des Koppelprismas (Abbildung 23) betrug 59° , der Winkel γ 91° . Der Brechungsindex der zur Herstellung des Koppelprismas verwendete Glassorte LaSFN18 ist für $\lambda = 633 \text{ nm}$ ca. 1,9. Die Kantenlänge der Prismenbasis betrug 5 mm, die Höhe und die Breite jeweils 6 mm.

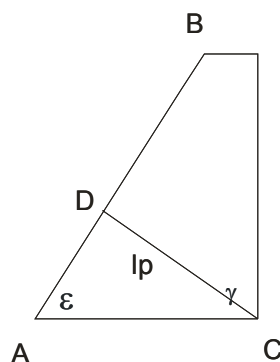


Abbildung 23: Verwendetes Koppelprisma

- **Küvette:**

Die Küvette der Fa. Hellma Worldwide hatte die Innenmaße $30 \times 30 \times 30 \text{ mm}^3$ und wurde aus optischem Glas gefertigt. Sie wurde für die Messungen bis zu einer Höhe von 20 mm mit einer hochbrechenden Flüssigkeit befüllt. Ein Deckel verminderte Verunreinigung der Flüssigkeit durch Staub. Die Abmessungen der Küvette erlaubten Dämpfungsmessungen bei verschiedenen großen Substraten. Der Abstand zwischen Substrat und Küvettenwand, war so groß, so dass für leicht unterschiedlich eingespannte Substrate, die Verschiebeeinheit nur selten parallel verschoben werden musste.
- **Hochbrechende Flüssigkeit:**

Die verwendete Flüssigkeit der Fa. Cargille hatte einen definierten Brechungsindex n_D von 1,700. Sie enthält neben Schwefel hauptsächlich 1-Iodnaphthalin. Für diese klare Flüssigkeit mit gelb-brauner Färbung sind im MSDS (Material Safety Data Sheet) weder Gefahrensymbole noch Sicherheitsätze verzeichnet. Es wird darauf hingewiesen das die toxikologischen Eigenschaften der Substanz noch nicht vollständig ermittelt wurden. Mögliche Auswirkungen sind Reizung von Haut und Atemwegen. Es wird empfohlen, Kontakt zu vermeiden. Die Tatsache, dass der Strahl in der Flüssigkeit zu beobachten war, weist darauf hin, dass es sich bei der verwendeten Flüssigkeit nicht um eine echte Lösung handelt, sondern um eine kolloidiale Flüssigkeit.
- **Verstelleinheit:**

Die Küvettenhalterung wurde durch einen schrittmotorgetriebenen Linearstell Tisch verfahren. Der Stell Tisch hatte einen durch Endanschläge begrenzten Verstellweg von 25 mm. 800 Schritte des Motors bewirkten eine volle Umdrehung der Welle des Linearverstellers, die einen Verstellweg von 0,5 mm ergab. Der Linearversteller wurde über die Motorsteuerung kalibriert, justiert und bewegt. Die Versorgungsspannung betrug 12 V bei 0,3 A.
- **Küvettenhalterung:**

Die Küvettenhalterung (Abbildung 24 und 25) wurde neu konstruiert und besteht aus einem Halterahmen, in dem die Küvette sitzt und durch zwei Kunststoffschrauben gesichert wird. Kipp- und verschiebbar an diesem Rahmen ist die Führung der Linsenhalterung angebracht. Das Diodengehäuse kann mit einer Stellschraube und der Führung der Diodenhalterung unter der Linse justiert werden. Durch die Justierbarkeit von Sammellinse und Diode erfolgt für verschiedene Winkel des Strahles in der Flüssigkeit eine Abbildung des Auskoppelpunktes auf die Diodenfläche. Die Führungselemente, die Führungsstangen, die Linsen-

halterung und die Stellschraube sind Mikrobankkomponenten der Fa. Linos. Ein Halterahmen mit Scharnier für die Linsenhalterung und die verschiebbare Halterung des Diodengehäuses wurden neu konstruiert (Abbildung 24).

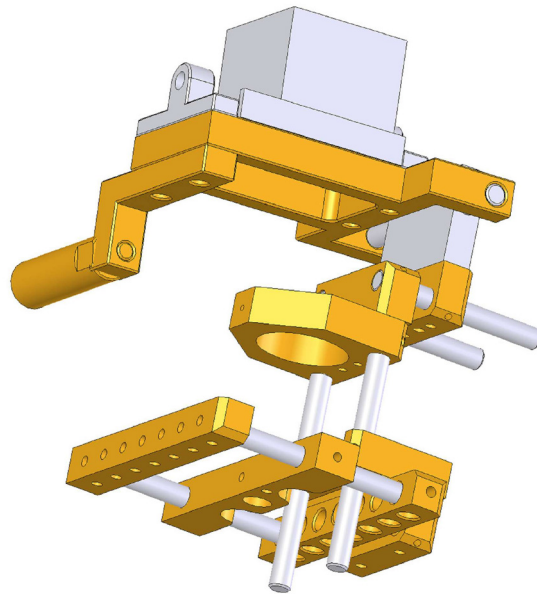


Abbildung 24: Küvettenhalterung (mit Küvette)



Abbildung 25: Küvettenhalterung

- Sammellinse:

Die zur Abbildung des ausgekoppelten Strahls (Abbildung 26) wurde eine bikonvexe Linse mit einer Brennweite von 20 mm verwendet. Der Abstand g des Auskoppelpunktes an der Flüssigkeitsoberfläche wurde größer als die zweifache Brennweite der Linse gewählt, so dass eine umgekehrte und verkleinerte Abbildung entsteht. Die Diode wird im nächsten Kapitel beschrieben.

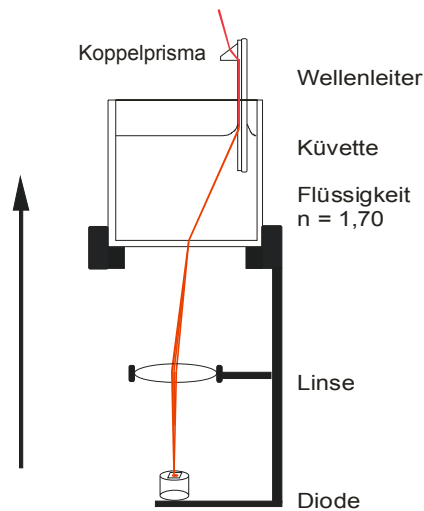


Abbildung 26: Schema der Küvettenhalterung mit Linse und Diode

6.3.3 Aufbau zur Erfassung der Diodenspannung

Um eine kontinuierliche Messung der Diodenspannung über den Abstand zum Koppelprisma bzw. entlang des Ausbreitungsweges der Wellenleitermoden im Polymerfilm durchzuführen wurde der folgende Aufbau verwendet (Abbildung 27). Er ermöglichte die Erfassung und Speicherung der intensitätsproportionalen Diodenspannung und des zugehörigen Verstellweges des Linearverstellers.

Die Diodenspannung wird mit einem Spannungsverstärker verstärkt und mit einem Digitalmultimeter (DMM) gemessen. Das DMM ist mit einem PC verbunden, dessen Software die gemessenen Spannungen speichert und über die Elektronik der Motorsteuerung die Verstelleinheit bewegt.

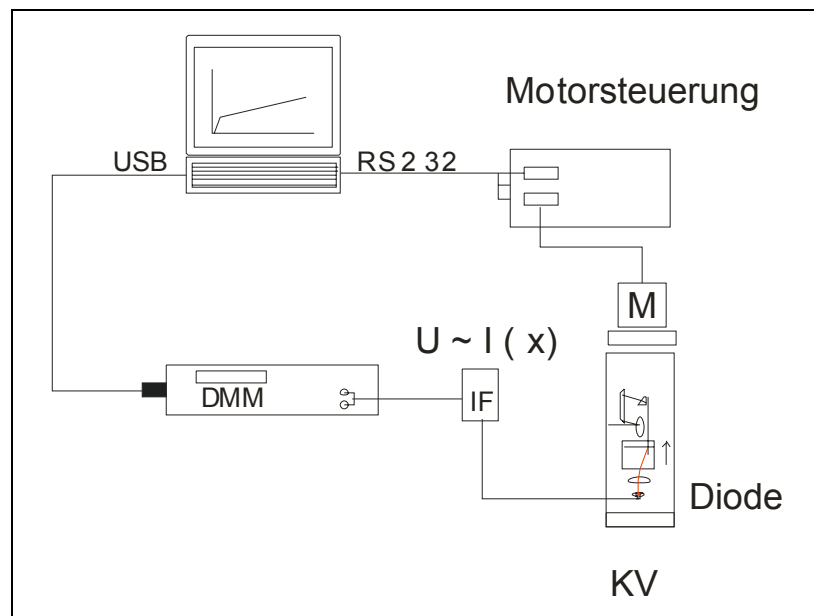


Abbildung 27: Messtechnik

Verwendete Komponenten:

- Diode:

Es wurde eine Silizium-Diode mit einer bestahlungsempfindlichen Fläche von $2,71 \times 2,71 \text{ mm}^2$ verwendet. Die relative spektrale Empfindlichkeit bei der verwendete Wellenlänge 633 nm beträgt ca. 80 % (Datenblatt siehe Anhang). Um die Diode in der Praxis handhaben zu können, wurde sie in einem Kunststoffgehäuse eingesetzt und verdrahtet. So konnte die Diode unter der Linse gehalten und mit einer Steckverbindung an den Verstärker (Detektor) angeschlossen werden.

- **Detektor:**

Es wurde ein in der Elektronikwerkstatt des Instituts gebauter Verstärker verwendet der als IF-Detektor bezeichnet wurde. Die Spannungsversorgung erfolgte durch eine Batterie, so dass ein rauscharmes Signal gemessen werden konnte. Die Verstärkerschaltung ist in einem Gehäuse untergebracht, in dem der Anschluss für die Diode und eine BNC-Buchse für die Verbindung mit dem Digitalmultimeter vorgesehen wurden. Die Leuchtdiode des IF-Detektors erlaubte eine Überwachung der Versorgungsspannung.
- **Digital-Multimeter (DMM):**

Verwendet wurde ein Prema DMM 5000. Es bot die Möglichkeit, die gemessenen Spannungen über eine USB-Schnittstelle auszulesen und zu speichern. Die Wahl des Messbereiches und der Integrationszeit erfolgte mit Hilfe der Software Dämpfung 1.1.
- **Motorsteuerung:**

Wie der Detektor wurde die Motorsteuerung am Institut gebaut. Sie ermöglichte eine Positionierung des Schrittmotors durch Ansteuerung und Beschaltung der Spulenpaare mit der Versorgungsspannung des Motors. Die Motorsteuerung wurde über eine RS 232-Schnittstelle mit dem PC verbunden.
- **Software:**

Das Programm Dämpfung 1.1 des MPI-P wurde in LabView programmiert. Die Software ermöglichte es, die Verstelleinheit mittels der Motorsteuerung zu positionieren und mit unterschiedlichen Schrittweiten zwischen wählbaren Positionen zu bewegen. Mit dem PC konnten die Messwerte und Daten wie Messbereichseinstellung und Integrationszeit eingestellt und ausgelesen werden. Die während der Messung erfassten Spannungen wurden über den Verstellweg des Motors aufgetragen und als Kurve sichtbar angezeigt, so dass schon während der Messung eine Aussage über die Homogenität des Filmes getroffen werden konnte. Die Erfassung von Diodenspannung und Verstellweg erfolgte synchron, das heißt nach jedem Schritt des Motors erfolgte eine Spannungsmessung. Nach Abschluss der Messung wurden die Messdaten in Form von Ascii-Dateien gespeichert.

6.4 Auswertungsmethoden

Während der Messung erfolgte eine synchrone Erfassung der Diodenspannung und des Verstellweges des Schrittmotors (programmintern wurden Schritte gezählt). Der enthaltene Datensatz wurde für die Darstellung und Auswertung in Origin 7.5 gespeichert. Der beispielhafte Datensatz (Abbildung 28) zeigt die gemessenen Spannungen (2. Spalte) in Abhängigkeit zum Verstellweg in Millimeter (1. Spalte). Die Schrittweite wurde in diesem Beispiel mit 0,02 mm festgelegt. Die Messung erfolgte über einen Verstellweg von 12 mm. Während eines Schrittes mit der Schrittweite 0,02 mm führte der Motor 32 Einzelschritte aus. In der Version 1.1 der Messsoftware wurde zusätzlich die Zeit gespeichert (Spalte 3).

23.03.2007 15:23	Datum Uhrzeit (Speichern)	Date Time (Save)
23.03.2007 15:16:14	Datum Uhrzeit ('Start')	Date Time ('Start')
PMMA	Kommentar	Comment
	Schrittmotor	Stepper Motor
	0 Schrittmotortyp	Stepper Motor Type
	0 Schrittmotor	Stepper Motor
	2 Modus	Modus
	0 Startposition	Start-Position
	19200 Endposition	End-Position
	32 Schrittweite	Increment
	600 Anzahl	Number Of
	0 Schrittweite=Master	Increment=Master
	1 Anzahl=Master	Number Of=Master
PREMA	Detektor	Detector
	0 Geraetetyp	Device Type
	0 Funktion	Function
	1 Bereich	Range
	0 Bereichsautomatik	Auto-Range
	0 Zeit & Genauigkeit	Time & Resolution
	10 Kanal	Channel
	0,00E+00 2,01E-02	3,47E+02
	2,00E-02 2,07E-02	1,07E+03
	4,00E-02 2,04E-02	1,83E+03
	6,00E-02 2,04E-02	2,56E+03
	8,00E-02 2,02E-02	3,26E+03
	1,00E-01 2,03E-02	3,96E+03
	1,20E-01 1,97E-02	4,66E+03
	1,40E-01 1,99E-02	5,37E+03
	1,60E-01 1,95E-02	6,09E+03
	1,80E-01 1,85E-02	6,79E+03
	2,00E-01 1,95E-02	7,52E+03

Abbildung 28: Beispielhafter Datensatz

Darstellung der Daten:

Die der Strahlintensität proportionale Diodenspannung (in Volt) wurden an der logarithmisch skalierten Y-Achse aufgetragen. Um den Sachverhalt zu verdeutlichen, dass die Intensität des geführten Strahles mit zunehmendem Weg im Wellenleiter abnimmt, wurde der Verstellweg in den Abstand zum Koppelprisma (in Millimeter) umgerechnet und auf der linearen X-Achse aufgetragen (Abbildung 29). Dieser Abstand ist somit die Entfernung des Auskoppelpunktes zum Koppelprisma. Für den Abstand zum Koppelprisma und die gemessenen Intensitäten wurde eine Korrektur eingerechnet (siehe Kapitel 6.5).

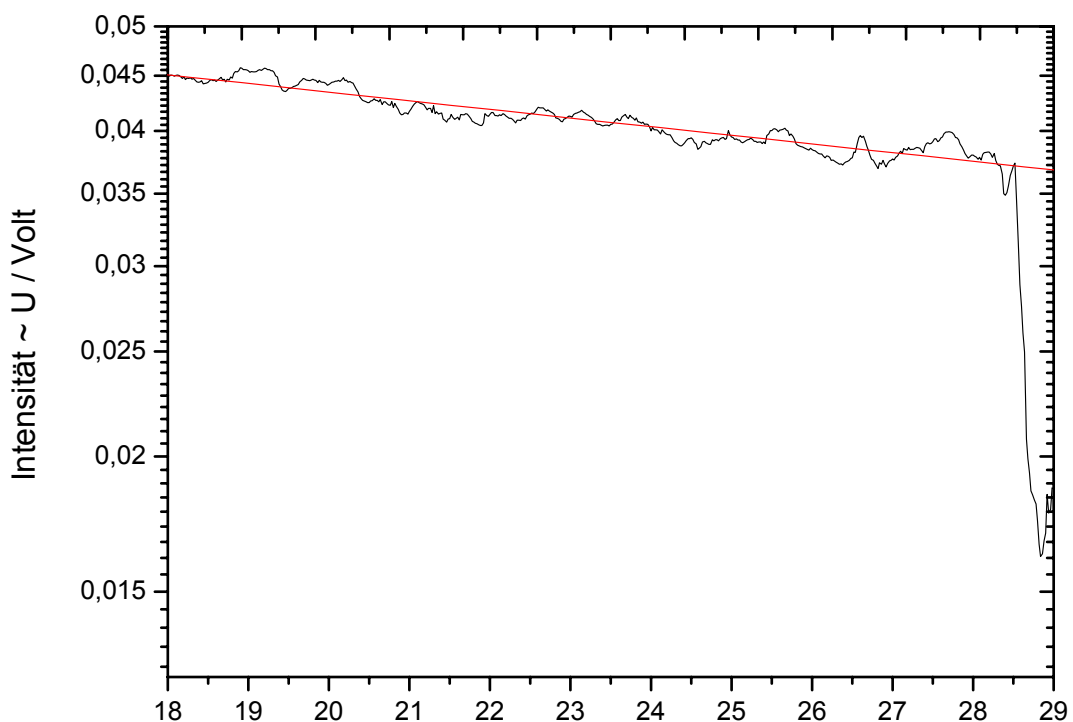


Abbildung 29: Beispielhafte Messkurve

Erklärungen zum Kurvenverlauf:

Die Messung wurde im maximalen Abstand zum Koppelprisma begonnen. Die Dämpfung der Filme war herstellungsbedingt am Rand besonders hoch. Dies verursachte einen steilen Anstieg der gemessenen Spannung innerhalb der ersten Millimeter der Messung und führte in der graphischen Darstellung der Messdaten zu einem steilen Abfall der Intensität am Ende der Kurve. Die gemessene Intensitätsabnahme im Wellenleiter wurde durch eine Ausgleichsgerade genähert. Die Steigung dieser Gerade ist der Wellenleiterdämpfung proportional.

Auswertung der Diagramme:

Die Auswertung der Messdaten erfolgte über die oben beschriebene Ausgleichsgerade. Diese Gerade wurde so generiert, dass die Summe der Fehlerquadrate möglichst kleiner war (Funktion linear fit der Auswertungssoftware Origin 7.5). Die Daten der Ausgleichsgerade der Form $Y_i = A + BX_i$ wurden unter Angabe des linearen Korrelationskoeffizienten R, der Standardabweichung SD und des Standardfehlers ausgegeben (Abbildung 30).

```
[05.06.2007 11:48 "/Graph1" (2454256)]
Linear Fit for Data1_D on linearized scales.
yscale(Y) = A + B * xscale(X)
where scale() is the current axis scale function.
```

Parameter	Value	Error
A	-1,2021	0,00296
B	-0,00799	1,26841E-4

R	SD	N
-0,94112	0,00853	514

Abbildung 30: Ergebnisse der linearen Regression

(A = Y-Achsenabschnitt, B = Geradensteigung, R = Korrelationskoeffizient, SD = Standardabweichung, N = Anzahl der Wertepaare des gewählten Datenbereiches. Der absoluten Wert des Y-Achsenabschnittes konnte durch die Berechnung von 10^4 erhalten werden. In der Geradensteigung B ist der Dämpfungskoeffizient α_{gw} enthalten.)

Ermittlung von α_{gw} aus den Daten der Ausgleichsgeraden:

Der Dämpfungskoeffizient α_{gw} wurde ermittelt, indem die Werte für $I(X)$ und I_0 mit zugehörigen Wegkoordinaten aus den Daten der Ausgleichsgeraden entnommen (Tabelle 1) und in Gleichung 18 eingesetzt wurden. Die in der halblogarithmischen Darstellung erzeugte Ausgleichsgerade entspricht in einer linearen Darstellung einer Parabel. Die Werte für $I(X)$ und I_0 müssen daher symmetrisch ausgewählt werden (z.B. erstes und letztes Wertepaar des Datensatzes).

Bei den Messungen wurde keine Reverenzsignalmessung durchgeführt, so dass mit I_0 die größte gemessene Intensität, bzw. der maximale Y-Wert der Ausgleichsgeraden bezeichnet wurde.

Tabelle 1: Daten der Ausgleichsgeraden (Abstand zum Koppelprisma / mm, Intensität ~ U / Volt)

mm	16,974	17,622	18,270	18,918	19,566	20,214	20,862	21,510	22,158	22,806
U / Volt	0,0460	0,0454	0,0449	0,0443	0,0438	0,0433	0,0428	0,0423	0,0418	0,0413
mm	23,454	24,102	24,750	25,398	26,046	26,694	27,342	27,990	28,638	29,286
U / Volt	0,0408	0,0403	0,0398	0,0394	0,0389	0,0384	0,0380	0,0375	0,0371	0,0366

In diesem Beispiel folgt:

$$\alpha_{gw} = \frac{-10 \log\left(\frac{0,0366}{0,0460}\right)}{29,286 - 16,974 \text{ mm}} = 0,806 \text{ dB/cm}$$

Ermittlung von α_{gw} aus der Geradensteigung B:

Laut Definition (Kapitel 3.3) gilt:

$$\alpha_{gw} = \frac{-10 \log \left(\frac{I(X)}{I_0} \right)}{\Delta X} \quad (\text{Gleichung 18})$$

$I(X)$ = gemessene Intensität ~ U / Volt

I_0 = maximale Intensität ~ U / Volt

ΔX = Weg im Wellenleiter / cm

Anders formuliert lautet Gleichung 18 wie folgt:

$$\alpha_{gw} = -10 \left[\frac{\log I(X) - \log(I_0)}{X_2 - X_1} \right] = -10 \left[\frac{\Delta \log I}{\Delta X} \right] \quad [\alpha_{gw}] = \frac{dB}{cm}$$

$$\left[\frac{\Delta \log I}{\Delta X} \right] \text{ ist die Geradensteigung B}$$

Der Abstand zum Koppelpisma wurde in Millimetern gemessen, so dass gilt:

$$\alpha_{gw} = -100 \text{ B} \quad (\text{Gleichung 19})$$

Der Dämpfungskoeffizient α_{gw} ist in diesem Beispiel 0,8 dB/cm.

Auswirkung eines unterschiedlichen Datenbereiches bei der Auswertung:

Wichtig für die Größe von α_{gw} war die Wahl des Datenbereiches, für den die Regressionsanalyse durchgeführt wurde. Durch die Wahl des Datenbereiches konnten Störstellen von der Auswertung ausgenommen werden. Das resultierende Ergebnis war dann charakteristisch für einen Polymerfilm mit einer bestimmten Schichtdicke und Oberflächengüte.

6.5 Fehlerbetrachtung

Die verschiedenen die Messung beeinflussenden Fehler, beispielsweise der Fehler durch das Eintauchen der Substrate in die Flüssigkeit, werden im Folgenden beschrieben. In der Auswertung der Daten wurden verschiedene dieser Fehler durch Korrekturen kompensiert.

6.5.1 Änderung des Füllstandes

Das Eintauchen des Substrats in die Flüssigkeit führt zu einem Anstieg des Flüssigkeitsspiegels in der Küvette. Dies hat zur Folge, dass der Auskoppelpunkt mit zunehmender Eintauchtiefe immer weiter in Richtung des Koppelprisma verschoben wird. Es entsteht ein systematischer Fehler Δx für den im Wellenleiter zurückgelegten Weg. Der im Diagramm dargestellte Abstand des Auskoppelpunktes zum Koppelprisma wurde berechnet durch:

$$A = A_0 - (\Delta X + \Delta x) \quad (\text{Gleichung 20})$$

A = Abstand des Auskoppelpunktes zum Koppelprisma

A_0 = Abstand des Auskoppelpunktes zum Koppelprisma zu Beginn der Messung

ΔX = Verstellweg in mm

Δx = systematischer Fehler für ΔX und A

Für alle Werte von ΔX wurde zur Korrektur des Abstandes zum Koppelprisma der Anstieg der Füllhöhe Δx errechnet.

$$\Delta x = \frac{(\Delta X \cdot A_{Sub})}{A_{Fl}} \quad (\text{Gleichung 21})$$

A_{Sub} = Querschnittsfläche der Substrate = 26mm^2

A_{Fl} = Flüssigkeitsoberfläche

$(\Delta X \cdot A_{Sub})$ = Verdrängte Volumen in Abhängigkeit des Verstellweges

Die Flüssigkeitsoberfläche A_{Fl} in der Küvette mit den Innenmaßen $30 \times 30 \text{ mm}^2$ abzüglich der Querschnittsfläche der Substrate (26 mm^2) ist 874 mm^2 .

Auswirkung der Korrektur auf α_{gw} :

Der Weg, über den die Auswertung stattfindet, wird durch die Korrektur um den Fehler Δx vergrößert. Die Kurve verläuft etwas flacher. Die Steigung der Ausgleichsgeraden und somit der Wert für α_{gw} nehmen ab. Der Fehler für die unkorrigierte Geradensteigung, verursacht durch Δx , beträgt 3 %. Dies entspricht dem Verhältnis der Grundfläche des Substrates ($A_{Sub} = 26 \text{ mm}^2$) zur Flüssigkeitsoberfläche ($A_{Fl} = 874 \text{ mm}^2$).

Die beschriebene Korrektur beinhaltet Ungenauigkeiten, die sich aus den Fehlern für den Verstellweg ΔX und den Abmessungen von Küvette und Substrat ergeben. Diese sind vernachlässigbar gering und werden daher nicht berücksichtigt.

6.5.2 Intensitätsverluste in der Flüssigkeit

Um den Intensitätsverlust in der hochbrechenden Flüssigkeit zu ermitteln, wurde ein Transmissionsspektrum aufgenommen (Abbildung 31):

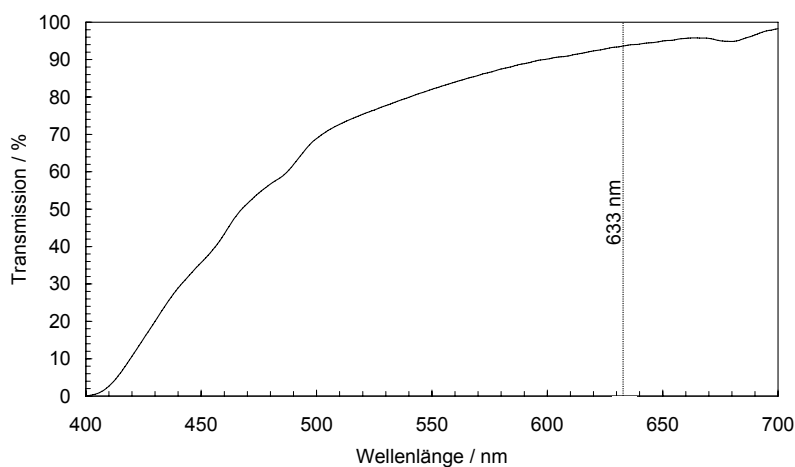


Abbildung 31: Transmissionsspektrum der Flüssigkeit

Bei 633 nm wurde ein Transmissionsgrad $\tau = \left(\frac{I(l)}{I_0} \right)$ von 93,6 % ermittelt.

Das Extinktionsgesetz in der Form

$$I(l) = I_0 \cdot e^{-\mu l} \quad (\text{Gleichung 22})$$

beschreibt die Intensitätsabnahme des Strahles in der Flüssigkeit in Abhängigkeit der Weglänge l .

Der Extinktionskoeffizient ist somit:

$$\mu = \frac{-\ln\left(\frac{I(l)}{I_0}\right)}{l} = -6,5659 \frac{1}{m}$$

l = Weg des Strahles in der Flüssigkeit.

Wenn die Füllhöhe durch das Eintauchen der Substrate zunimmt, kommt es zu einer vom Winkel des Strahles abhängigen Vergrößerung der Weglänge des Strahles in der Flüssigkeit. Hieraus ergibt sich ein systematischer Fehler für die gemessene Intensität, der mit kleiner werdendem Abstand zum Koppelprisma zunimmt.

Die Abschätzung der Verluste in der Flüssigkeit wird für einen PS-Film gezeigt:

$$I(l) = I_0 \cdot e^{(-\mu l)}$$

mit

μ = Extinktionskoeffizient $6,5659 \frac{1}{m}$

l = Weg des Strahles in der Flüssigkeit

Durch Eintauchen des Substrates ergibt sich eine Änderung Δl , die für einen Winkel von $64,49^\circ$ maximal wird.

$$\Delta l = \frac{\Delta X \cdot A_{Sub}}{A_{Fl}} \cdot \frac{1}{\alpha'} \quad (\text{Gleichung 23})$$

A_{Sub} = Querschnittsfläche der Substrate = 26 mm^2

A_{Fl} = Flüssigkeitsoberfläche = 874 mm^2

α' = Winkel des Strahles in der Flüssigkeit = $64,49^\circ$

Dieser Winkel α' resultiert aus dem kleinsten Winkel des Strahles im Wellenleiter (Kapitel 3.1) und dem Brechungsgesetz.

Bei einer Eintauchtiefe von 10 mm ist $\Delta l = 0,33 \text{ mm}$. Für diese Wegänderung ergibt sich das Verhältnis der Intensitäten I/I_0 aus

$$I(\Delta l) = I_0 \cdot e^{\left(-6,5659 \frac{1}{m} \cdot \Delta l\right)}$$

bzw.
$$\frac{I(\Delta l)}{I_0} = e^{\left(-6,5659 \frac{1}{m} \cdot \Delta l\right)}$$

mit
$$\frac{I(0,33)}{I_0} = 0,997838.$$

Dieses Verhältnis entspricht einer zusätzlichen Dämpfung von $0,0094 \text{ dB/cm}$. Für einen sehr großen Ausbreitungswinkel im Wellenleiter Θ von 89° erhält man $0,0091 \text{ dB/cm}$. Für Wellenleiter mit α_{gw} von 1 bis $0,5 \text{ dB/cm}$ liegt der relative Fehler, verursacht durch Verluste in der Flüssigkeit, bei $1-2 \%$. Erst für Filme mit sehr kleiner Dämpfung ($\alpha_{gw} \approx 0,1 \text{ dB/cm}$) wird der maximale Fehler durch Verluste in der Flüssigkeit groß und beträgt dann ca. 10% .

Die Korrektur wird wie folgt berechnet:

$$I_0 = \frac{I(X)}{e^{(-\mu \cdot \Delta X \cdot 0,000032839)}} \quad (\text{Gleichung 24})$$

I_0 = korrigierte Intensität

$I(X)$ = gemessene Intensität

μ = Extinktionskoeffizient = $6,5659 \frac{1}{m}$

ΔX = Verstellweg in mm

Der Zahlenwert 0,000032839 errechnet sich aus $\frac{A_{Sub}}{A_{Fl} \cdot \sin \alpha'}$
1000

A_{Sub} = Querschnittsfläche der Substrate = 26 mm^2

A_{Fl} = Flüssigkeitsoberfläche = 874 mm^2

α' = Winkel des Strahles in der Flüssigkeit = $64,49^\circ$

Die Korrektur der gemessenen Intensitäten in Abhängigkeit vom Weg des Strahles in der Flüssigkeit erfolgt nur mit einer begrenzten Genauigkeit. Es ergibt sich eine Unsicherheit durch den Winkel. Der tatsächliche Winkel des Strahles in der Flüssigkeit wurde nicht gemessen und lässt sich nur abschätzen. Der Einfluss der möglichen Winkel ist klein. Die zusätzliche Dämpfung unterscheidet sich um maximal 3 %. Die Korrektur hat für Wellenleiter mit mittlerer bis hoher Dämpfung keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis der Messung, so dass keine Korrektur vorgenommen wurde. Für Wellenleitern mit kleiner Dämpfung, für die der relative Fehler durch Intensitätsverluste in der Flüssigkeit groß ist, wurde die Korrektur der Intensitäten durchgeführt, da die Ungenauigkeit der Korrektur kleiner als der systematische Fehler, verursacht durch ΔI , ist. Der Fehler des Extinktionskoeffizienten μ und der Flächen A_{Sub} und A_{Fl} wurde vernachlässigt.

6.5.3 Schwankung der Laserintensität

Der zeitliche Verlauf der Laserintensität wurde einmalig gemessen. Es stellte sich heraus, dass erst nach ca. 3 Stunden Dauerbetrieb die Schwankungen der Laserintensität klein gegen das Rauschen der Dämpfungsmessungen sind. Der Laser musste also vor einer Messung bereits mehrere Stunden eingeschaltet sein. Um die Laserintensität mit der Messkurve vergleichen zu können, wurde diese mit Hilfe eines Polarisators auf die mittlere Intensität der Messkurve eingestellt (Abbildung 32). Die hier betrachtete Messkurve wurde für einen Wellenleiter mit einer Dämpfung von 0,8 dB/cm gemessen.

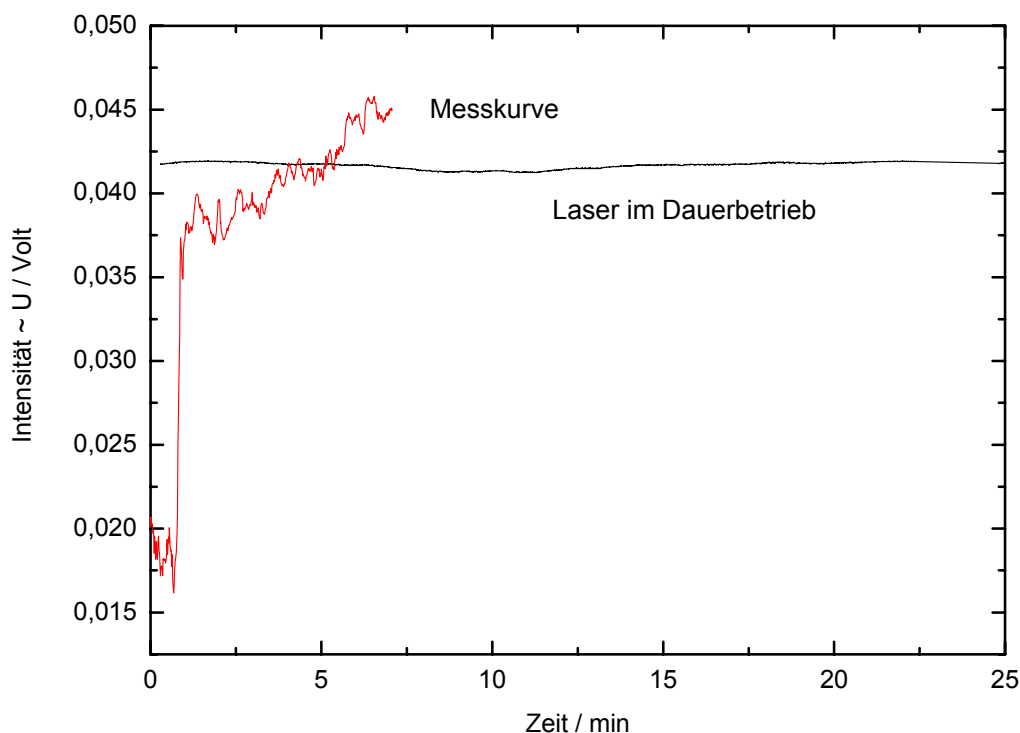


Abbildung 32: Vergleich Laserintensität und Messkurve

Abbildung 32 zeigt, dass das Rauschen in der Messkurve nicht durch Schwankungen der Laserintensität verursacht wurde. Die Schwankung der Laserintensität ist aber so groß, dass sie Einfluss auf das Messergebnis hat. Im gezeigten Beispiel entspricht die Intensitätsänderung des Lasers im Dauerbetrieb ca. 7,5 % der gemessenen Intensitätsänderung. Die Änderung der Laserintensität entspricht einer Dämpfung von $\pm 0,04$ dB/cm. Für $\alpha_{\text{gw}} = 1,0$ dB/cm ergibt sich ein relativer Fehler von etwa 4 %.

Für Wellenleiter mit sehr kleiner Dämpfung ($\alpha_{gw} = \text{ca. } 0,1 \text{ dB/cm}$) beträgt der Fehler 40 %. Wird diese, durch eine einmalige Messung ermittelte Schwankung der Laserintensität berücksichtigt, stellt sie den größten systematischen Fehler dar. Eine Korrektur der Intensitätsschwankungen des Lasers durch Referenzsignalenerfassung erfolgte nicht (vergleiche Kapitel 6.6).

6.5.4 Abweichungen der Messwerte von der Regressionsgerade

Zur Beschreibung der Streuung der Messwerte um die Ausgleichsgerade wurde Standardfehler der Steigung B ermittelt (Kapitel 6.4). Dieser beträgt etwa 2 bis 15 % des Dämpfungskoeffizienten α_{gw} .

Dieser Fehler korrespondiert mit dem Fehler der Geradensteigung, der durch verschiedene Möglichkeiten der Positionierung einer Ausgleichsgerade entsteht (grafisch ermittelbarer Fehler). Die Genauigkeit, mit der die Steigung der Ausgleichsgerade angegeben werden kann, hängt von der Verteilung der Messwerte ab.

6.5.5 Detektion

Die wesentlichen Komponenten der Detektion sind die Diode BPW 34 B und das Digital-Multimeter PREMA 5000.

Die Messgenauigkeit des DMM für den Messbereich bis 2 V beträgt nach Herstellerangaben $\pm (0,003 \% \text{ des Messwertes} + 0,00001 \text{ Volt})$. Eine Abschätzung des relativen Fehlers durch die Ungenauigkeit der Spannungsmessung erfolgte anhand der Ausgleichsgeraden. Hierzu wurde geprüft wie sich die Steigung der Ausgleichsgeraden ändert, wenn diese durch zwei Punkte definiert wäre und die gemessenen Spannungswerte den maximalen positiven bzw. negativen Fehler aufweisen würden. Es zeigte sich, dass die Dämpfungswerte sich um maximal 0,3 % ändern. Die Ungenauigkeit der Spannungsmessung ist zudem von der Homogenität der Signalerzeugung auf der Diodefläche abhängig.

Die Ungenauigkeit von α_{gw} durch DMM und Diode ist klein gegen die durch andere Fehlerquellen verursachten Fehler und wurde nicht berücksichtigt.

6.6 Mögliche Erweiterungen des Messplatzes

Im diesem Kapitel werden mögliche Erweiterungen zur Verbesserung des bestehenden Aufbaus beschrieben.

Referenzsignalmessung der Laserintensität

Die genaue Untersuchung der Laserstabilität zeigte, dass mögliche Intensitätsschwankungen dazu führen, dass der Fehler der Messung für kleine Dämpfungswerte α_{gw} sehr groß werden kann. Bei Dämpfungswerten um 0,1 dB/cm beträgt dieser Fehler 40 %. Um diese Schwankungen kompensieren zu können, ist eine Referenzsignalmessung erforderlich. Wenn ein kleiner Teil (z.B. 5 %) der in das Experiment eingestrahlten Laserintensität während der laufenden Dämpfungsmessung synchron detektiert würde, könnte eine relative Änderung der Strahlintensität in die Messwerte eingerechnet werden. Hierzu erforderlich sind ein Strahlteiler, ein Zweikanal-AD-Konverter, ein zweites DMM und eine weitere Diode. Dieser Aufbau erfordert außerdem eine Erweiterung der Software Dämpfung 1.1.

Verwendung einer alternativen hochbrechende Flüssigkeit

Um Wiederholungsmessungen an einem Film durchzuführen und Aussagen über die Reproduzierbarkeit der Messung treffen zu können, darf die Flüssigkeit den Film weder Anlösen noch zum Quellen bringen. Jede mit Quellprozessen verbundene Änderung der Schichtdicke d führt zu einer Veränderung der optischen Eigenschaften des Filmes. Aufgrund des niedrigen Brechungsindex des PMMA ist es beispielsweise denkbar, das in der Mikroskopie als Immersionsmittel verwendete Zedernholzöl zu verwenden. Der Brechungsindex wird mit 1,51 bis 1,52 angegeben. Der nicht genau definierte Brechungsindex stellt keinen Nachteil für die Dämpfungsmessung dar. Möglicherweise wird der Polymerfilm durch dieses Öl weniger angegriffen. Ob sich das Zedernholzöl aufgrund seiner Viskosität zu einer gleichmäßigen Benetzung der Filme eignet wäre zu klären.

7 Messungen

Anhand beispielhafter Messungen werden typische Kurvenverläufe gezeigt. Die Messergebnisse werden zusammen mit dem maximalen Fehler angegeben, der aus der Summe der abgeschätzten relativen Fehler errechnet wurde (Kapitel 6.5).

7.1 Wellenleiter mit typischem Kurvenverlauf

Abbildung 33 zeigt über eine Messstrecke von zehn Millimeter eine gleichmäßige Intensitätsabnahme, d.h. Dämpfung. Am Ende ist der typische, steile Abfall der Intensität am Rand des PMMA-Wellenleiters zu erkennen.

Die Auswertung der Kurve im mittleren Bereich ergab einen Dämpfungskoeffizient α_{gw} von $0,78 \pm 0,07$ dB/cm. Der maximale relative Fehler betrug 8,5 %. Der Wellenleiter wurde bei dieser Messung mit einer Schrittweite von 0,02 mm eingetaucht.

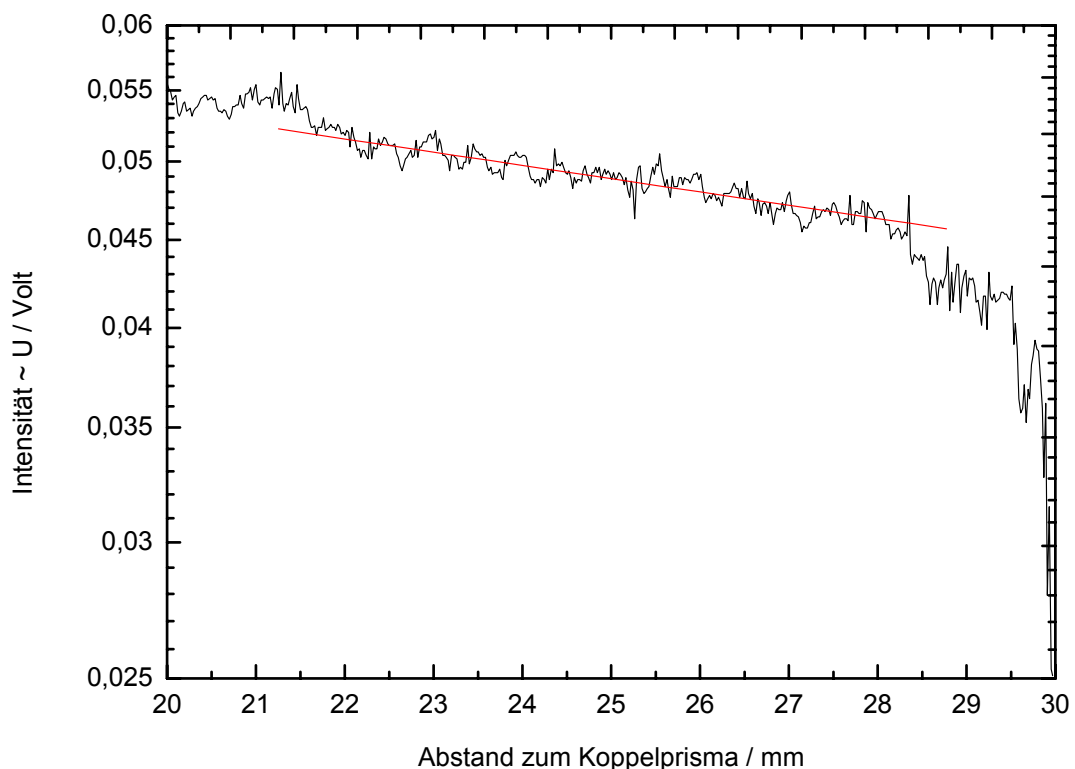


Abbildung 33: Dämpfungsmessung Wellenleiter (PMMA, $\alpha_{\text{gw}} = 0,78$ dB/cm)

7.2 Wellenleiter mit Störstelle

In Abbildung 34 ist die Dämpfungsmessung eines PMMA-Filmes mit $\alpha_{\text{gw}} = 1,2 \pm 0,08 \text{ dB/cm}$ dargestellt. Der maximale relative Fehler betrug 7 %. Die Schrittweite betrug 0,04 mm.

Eine lokale Störstelle verursachte einen Sprung im Intensitätsverlauf. Die Auswertung der Messung erfolgte ohne Berücksichtigung der großen Intensitätsverluste, die durch das Streuzentrum verursacht wurden (rote Gerade in Abbildung 34).

Im Vergleich zur Abbildung 33 ist die Rauschamplitude in Abbildung 34 kleiner. Daraus resultierte eine bessere Übereinstimmung der Ausgleichsgerade mit der Messkurve.

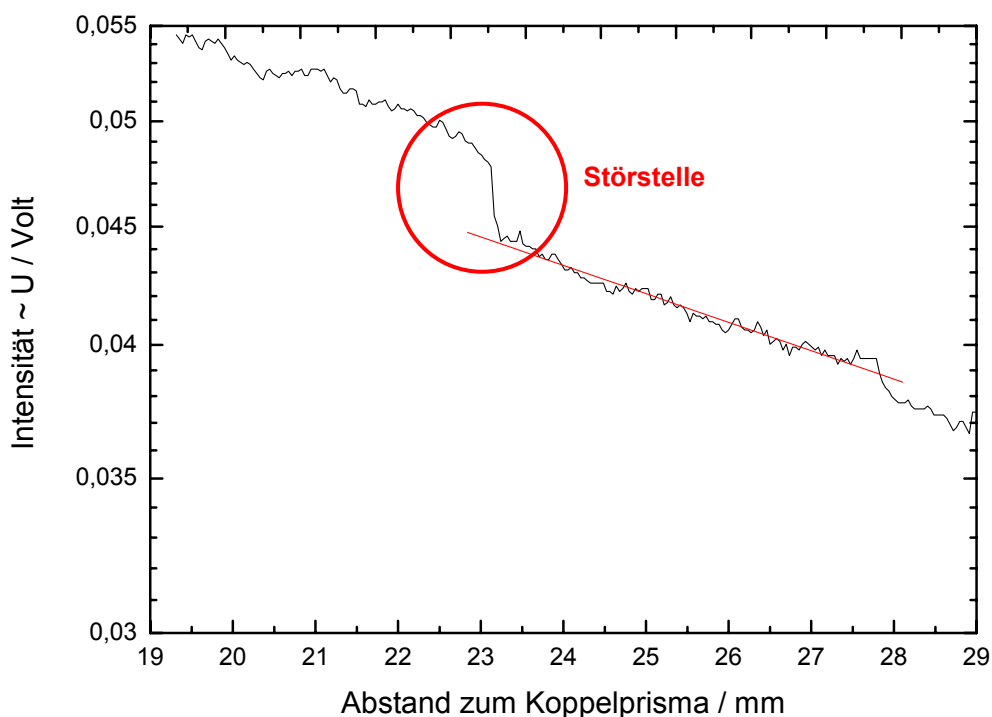


Abbildung 34: Dämpfungsmessung Wellenleiter (PMMA) mit Störstelle

7.3 Wellenleiter mit geringer Dämpfung

Abbildung 35 zeigt die Dämpfungsmessung eines PS-Filmes mit einem geringen Dämpfungskoeffizienten $\alpha_{\text{gw}} = 0,08 \pm 0,05 \text{ dB/cm}$. Die Dämpfungsmessung erfolgte für die TM_0 -Mode. Die Schrittweite betrug $0,02 \text{ mm}$. Neben der sehr geringen Dämpfung fällt ein periodischer Signalverlauf auf.

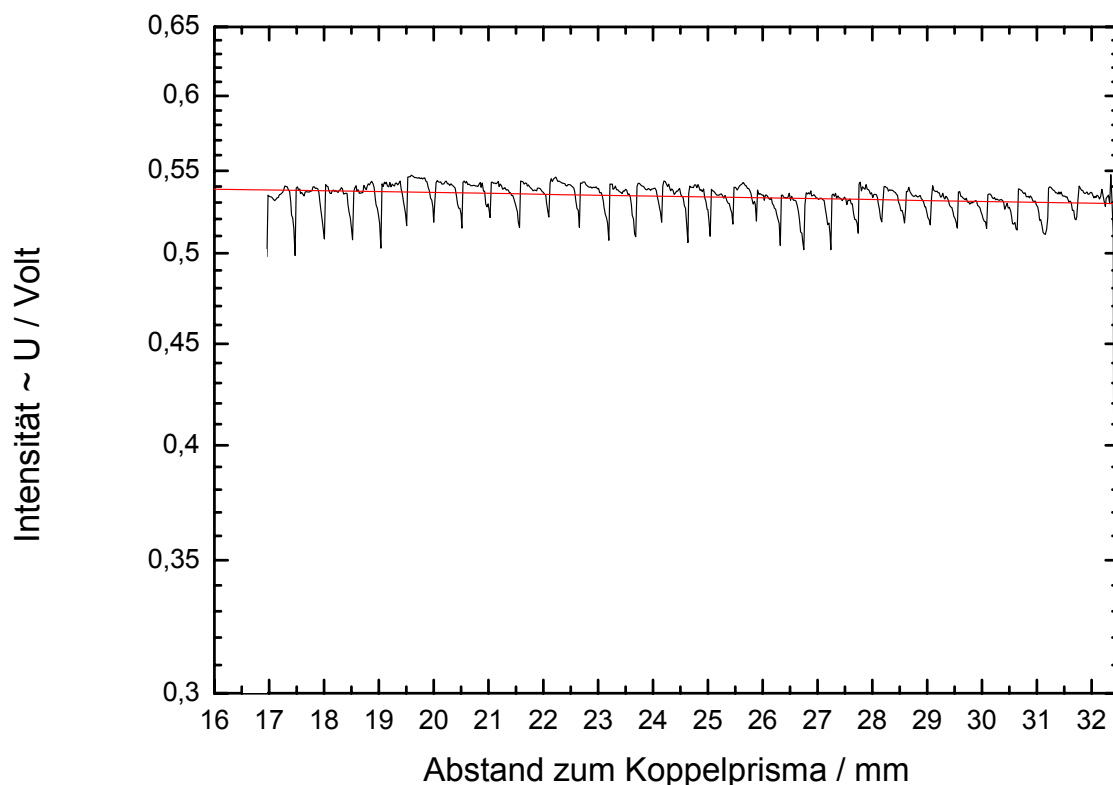


Abbildung 35: Dämpfungsmessung Wellenleiter mit geringer Dämpfung ($\alpha_{\text{gw}} = 0,08 \text{ dB/cm}$)

Wenn die Messwerte zu Abbildung 35 nicht als Kurve, sondern als Einzelwerte dargestellt sind (Abbildung 36 a), ist zu erkennen, dass in den abfallenden Flanken des periodischen Signals keine Messung erfolgte, sondern nur unmittelbar davor und danach, und dass der Intensitätseinbruch jeweils nach ca. 25 Messungen erfolgte. Die Software ist so programmiert, dass das Messsignal immer zwischen den einzelnen Schritten des Eintauchens gemessen wird (bei stehendem Motor). Daraus folgt, dass die Intensitätseinbrüche stets während einer Bewegung stattfanden.

Dies weist darauf hin, dass kein zufälliges Ereignis, sondern ein regelmäßiger systematischer Vorgang für dieses Signal verantwortlich ist.

Ein Vergleich der Messpunkte (Abbildung 36 a) mit den Messkurven in Form des gleitenden Durchschnitts (Abbildung 36 b) von Wellenleitern mit unterschiedlicher Dämpfung zeigt, dass für den Film mit geringer Dämpfung die einzelnen Punkte deckungsgleich mit der Darstellung der Messwerte durch einen gleitenden Durchschnitt sind. Die Messwerte des Wellenleiters mit höherer Dämpfung weisen eine größere Streuung der einzelnen Messwerte um den gleitenden Durchschnitt aus und ein u.U. ebenfalls vorhandenes periodisches Signal würde überlagert.

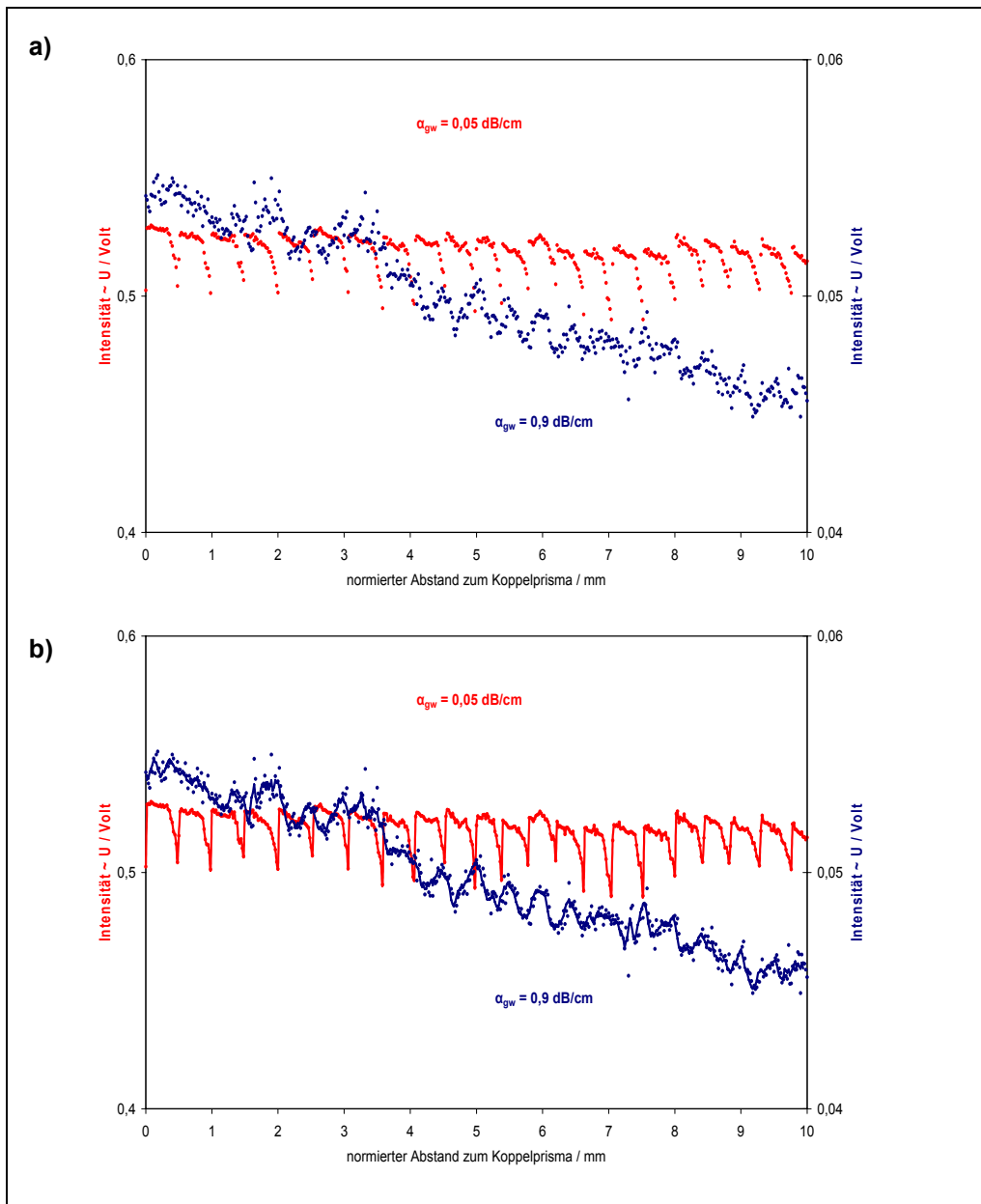


Abbildung 36: Messsignal eines Wellenleiters mit kleiner Dämpfung (rot) und höherer Dämpfung (blau), jeweils dargestellt als a) Einzelwerte und b) gleitender Durchschnitt

Bei der Messung an Filmen mit geringer Dämpfung wurde ein periodischer Signalverlauf beobachtet. Zur Erklärung dieses Phänomens wurde eine Hypothese aufgestellt. Diese Hypothese beruht auf folgenden Beobachtungen:

- Wenn der Film zur Vorbereitung einer Messung in die Flüssigkeit eingetaucht wurde (statischer Zustand), konnte der Strahl in der Flüssigkeit stets unter einem kleinen Winkel relativ zum Küvettenboden beobachtet werden. Der ausgekoppelte Strahl wurde dabei vermutlich an der Grenzfläche Flüssigkeit-Luft reflektiert.
- Mit Beginn der Messung kam es zu einer einmaligen, deutlich wahrnehmbaren, sprunghaften Winkeländerung des Strahles. Die Position der Diode wurde an diesen Zustand optimiert (vergleiche Kapitel 6.2). Dieser Winkel entsprach dem Brechungsgesetz für den Übergang des Strahles in ein optisch dichteres Medium. Daher kann davon ausgegangen werden, dass der Strahl nicht reflektiert, sondern größtenteils direkt in die Flüssigkeit gebrochen wurde.

Die Form des Meniskus der Flüssigkeit an der Grenzfläche Flüssigkeit-Film-Luft ist vermutlich entscheidend dafür, ob ein Strahl ausschließlich in die Flüssigkeit gebrochen oder zudem noch an der Grenzfläche Flüssigkeit-Luft reflektiert wird.

- Bei Vorversuchen an Filmen mit großer Oberflächenrauheit wurde ein Auffächern des Strahles in der Flüssigkeit beobachtet. Bei diesen Versuchen kam es vermutlich zu chaotischen Änderungen der Meniskusform, so dass es gleichzeitig zur direkten Brechung von Teilintensitäten in die Flüssigkeit und zu Reflexion unter verschiedenen Winkeln des ausgekoppelten Strahles kam.

Für Filme mit geringer Dämpfung (hoher Oberflächengüte, siehe Kapitel 3.3) wurde der beschriebene periodische Signalverlauf gemessen (siehe oben, Abbildung 35). Diese periodischen Intensitätseinbrüche wurden vermutlich durch Reflexionsverluste verursacht, die nicht mit dem Auge zu beobachten waren. Es kam also vermutlich zu einer Reflexion von Teilintensitäten, die nicht auf die Diode abgebildet und detektiert wurden. Beim Eintauchen des Wellenleiters in die Flüssigkeit verformte sich der Meniskus vermutlich so lange, bis es zu einer sprunghaften Formänderung kam. Durch ein solches Springen erreichte der Meniskus vermutlich eine dem statischen Zustand ähnliche Form.

Damit lässt sich ein höherer Anteil an reflektierten Teilintensitäten erklären, der somit eine gleichzeitige Verminderung der detektierten Intensität bewirkt. Nach weiterem Eintauchen wurde der Strahl vermutlich wieder zunehmend in die Flüssigkeit gebrochen, bis es erneut zu einer sprunghaften Formänderung kam.

Der periodische Signalverlauf konnte insbesondere bei Filmen mit einer hohen Oberflächengüte beobachtet werden. Bei Filmen mit mäßiger Oberflächengüte ist der periodische Signalverlauf vermutlich deshalb nicht so ausgeprägt, weil sich die Meniskusform unregelmäßiger ändert.

Zur Überprüfung der Hypothese wären weitere Untersuchungen nötig, u.a. zum möglichen Einfluss der Antriebsmechanik auf das Messsignal.

Fazit:

Unabhängig von der Ursache des beobachteten periodischen Signals zeigen die Messkurven wie die in Abbildung 35, dass mit dem konzipierten Messplatz für Dämpfungsmessungen an polymeren Schichtwellenleitern auch sehr geringe Dämpfungen gemessen werden können.

8 Literaturverzeichnis

- 1 R. ULRICH, R. TORGE, Appl Opt. 12 (Dec 1973) 2901, "Measurements of Thin Film Parameters with a Prism Coupler"
- 2 C.-C. TENG Appl Opt , 7 (1993) 1051, "Precision measurements of the optical attenuation profile along the propagation path in thin-film waveguides"
- 3 T. HEINZ, Diplomarbeit Fachhochschule Wiesbaden 1989 "Konstruktion einer Koppelvorrichtung für planare Lichtwellenleiter und deren Erprobung bei Raman-Spektroskopie und Dämpfungsmessungen"
- 4 J. ZIEGLER Doktorarbeit 2000 "Schichtpräparation und Charakterisierung von Wellenleitern aus Polymeren"
- 5 J. GRAF Doktorarbeit 1999 "Entwicklung und Untersuchung zur Herstellung verlustarmer passiver Wellenleiter und verstärkender Wellenleiter"
- 6 A. MATHY, H.-U. SIMMROCK, C. BUBECK Appl. Phys 24 (1991) 1003 "Optical waveguiding in thin films of polyelectrolytes"
- 7 H. Ma, A. K.-Y. JEN, L. R. DALTON Adv. Mater 19 (2002) 1339 „Polymer based optical waveguides: Materials, processing, and devices"
- 8 K. KOYNOV, A. BAHTIAR, T. AHN, Macromol. 39 (2006) 8692 "Molecular Weight Dependence of Chain Orientation and Optical Constants of Thin Films of the Conjugated Polymer MEH-PPV"
- 9 G. GANGLITZ, Praktische Spektroskopie 1983

9 Anhang

9.1 Systemkomponenten

Optischer Aufbau:

Lieferant: Owis GmbH
 Im Gaisgraben 7
 79219 Staufen

www.owis-staufen.de

Pos.	Anzahl	Bezeichnung	Bestellnummer	Bemerkung
1	1	Systemschiene SYS 90	19.011.0500	L = 500 mm
2	1	Systemschiene SYS 90	19.011.1000	L = 1000 mm
3	11	Reiter SYS 90	19.021.0060	B = 60 mm
4	2	Spiegelhalter	26.105.0001	kinematisch
5	2	Spiegelfassung	26.105.9226	D = 25 mm/1''
6	2	Irisblende	27.235.0014	Apertur 1-14 mm
7	3	Optikhalter	14.110.0000	D = 25 mm
8	11	Säule	20.118.6100	H = 100 mm
9	9	Fußplatte	20.915.6510	65 x 60 mm
10	11	Stift	21.115.6100	L = 100 mm
11	1	Verschiebetisch	31.041.2531	$\Delta X = 25$ mm

Lieferant Linos Photonics GmbH & Co. KG
 Königsallee 23
 37081 Göttingen

www.linos.de

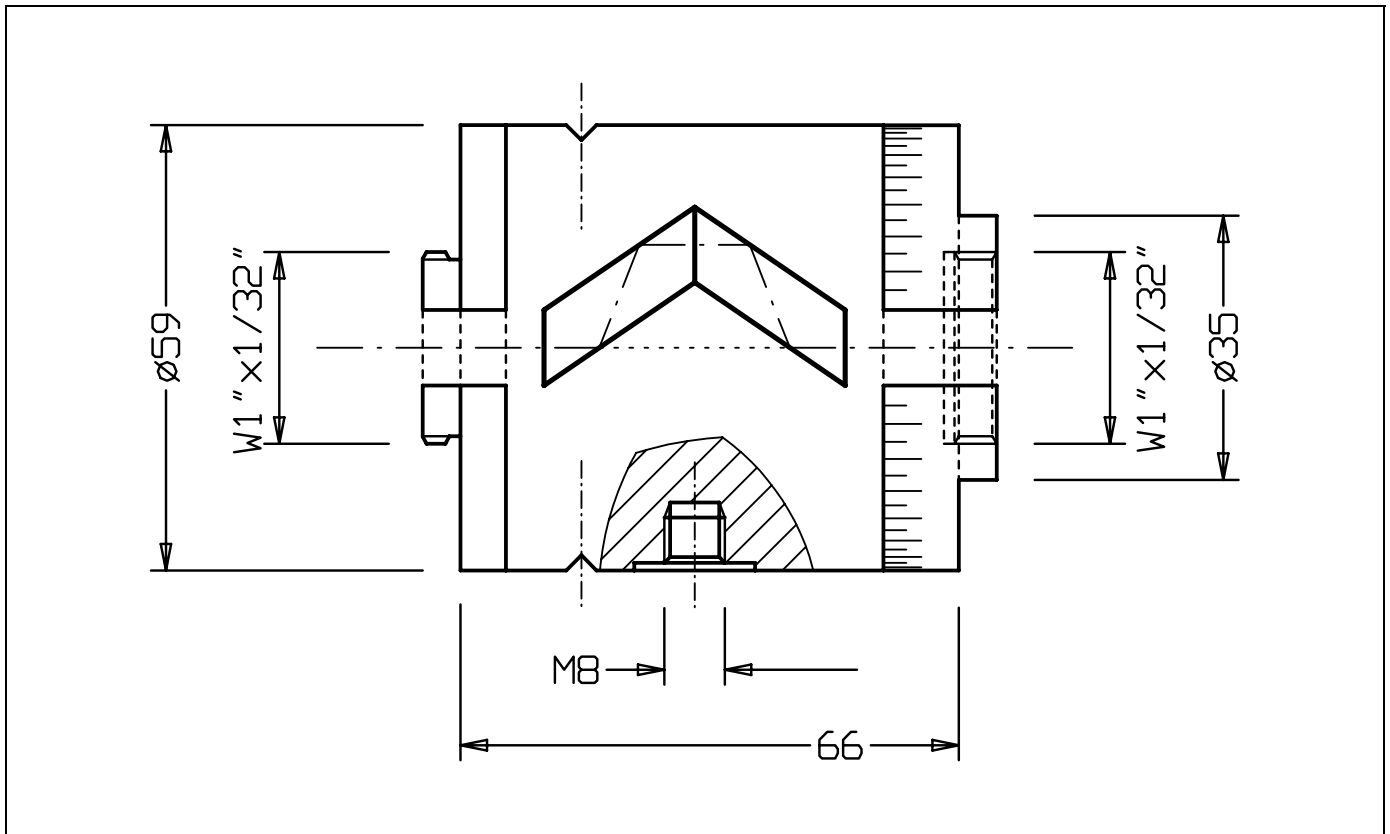
Pos.	Anzahl	Bezeichnung	Bestellnummer	Bemerkung
12	2	Planspiegel	34 0525	D = 25,4 mm
13	1	Sammellinse gefasst	06 3028	f = 150 mm D = 25,4 mm
14	1	He-Ne-Laser	04 0641	$\lambda = 633$ nm P = 5 mW
15	2	Adapterring	04 0102	
16	2	Klemmhalter	06 1244	
17	1	Lasernetzteil	04 0666	230 V

Küvettenhalterung:

Pos.	Anzahl	Bezeichnung	Bestellnummer	Bemerkung
1	4	Stange	06 1209	Linos, L = 75 mm
2	1	Stange	06 1210	Linos, L = 100 mm
3	2	Gegenhalter	06 1161	Linos
4	1	Gegenhalter für Mess- schraube	06 1160	Linos
5	1	Feinstellschraube	08 5593	Linos
6	2	Druckfeder	06 1159	Linos
7	1	Stangenhalter	06 1228	Linos
8	2	Eckverbinder	06 1120	Linos, L = 80 mm
9	1	Aufnahmeplatte	06 1010	Linos
10	1	Sammellinse gefasst	06 3020	Linos, f = 20 mm
11	1	Halterahmen	-	Aluminium
12	1	Führungsblock	-	PTFE
13	1	Diodenhalter	-	Aluminium
14	1	Unterleger	-	Aluminium

Fresnel-Rhomben

Fresnel Rhombs



Der Fresnelrhombus dient zur Drehung der Schwingungsebene linear polarisierten Lichtes. Er besteht aus zwei mit optischem Kontakt verbundenen Fresnelschen Parallelepipeden aus Kronglas BK 7 oder Quarzglas Suprasil, die durch vierfache Totalreflexion zusammen eine Phasendifferenz von 180° zwischen der senkrecht und parallel zur Einfallsebene schwingenden Komponente des Lichtes bewirken. Die Verzögerung ist über einen relativ weiten Bereich nur wenig von der Wellenlänge abhängig, siehe Diagramm.

Der Polarisationsdreher ist nur für sehr kleine Einfallswinkel verwendbar. Der Parallelitätsfehler der Prismenkombination ist kleiner als $2''$, die Endflächen sind senkrecht zur Drehachse justiert.

Die nutzbare Öffnung beträgt 9,5 mm. Die Fassung ist mit einer Gradteilung von 0° bis 360° versehen und wird mit Reiterstift geliefert. Der Rhombus ist in Kugellagern leicht drehbar gelagert, so dass auch ein Motorantrieb möglich ist, jedoch sind die drehenden Teile nicht ausgewuchtet.

Ausführung für das UV (215 - 450 nm):

Die Parallelepipede sind aus Suprasil hergestellt, die Verzögerung beträgt zwischen 215 nm und 450 nm $180^\circ \pm 5\%$ (230 - 350 nm: $\pm 3\%$). Die Endflächen sind mit Einfachschichten mit minimalem Reflexionsvermögen von 1,7% entspiegelt. RFR 215

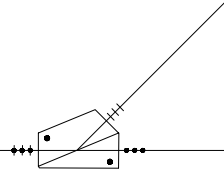
The Lambda/2 Fresnel rhomb is used to rotate the plane of vibration of linearly polarized light. It consists of two optically contacted Fresnel parallelepipeds of crown glass BK 7 or quartz glass Suprasil which by total internal reflection together create a path difference of 180° between the components of light polarized perpendicular and parallel to the plane of incidence. Over a relatively wide range the retardation is only minimally wavelength dependent, see curve.

This polarization rotator can only be used for very small acceptance angles. The parallelism error of the prism combination is less than $2''$. The end faces are adjusted perpendicular to the rotation axis.

The usable aperture is 9.5 mm. The holder is provided with a graduated circle marked from 0° to 360° and is supplied with a mounting rod. The rhomb is mounted in easily rotatable ball bearings so that a motor drive can be fitted; however, the rotating parts are not balanced.

Version for UV (215 - 450 nm):

The parallelepipeds are produced from Suprasil. The retardation is $180^\circ \pm 5\%$ between 215 and 450 nm (230 to 350 nm: $\pm 3\%$). The entrance and the exit faces are single layer antireflection coated with minimal residual reflectivity of 1.7%. RFR 215



Ausführung für das Sichtbare (400 - 700 nm):

Die Parallelepipede sind aus Kronglas BK 7 hergestellt, die Verzögerung beträgt zwischen 400 und 700 nm $180^\circ \pm 1\%$. Eine Abweichung vom senkrechten Einfall um $\pm 0,5^\circ$ ändert die Verzögerung um $\pm 0,5\%$. Die Austrittsflächen sind mit Mehrschichten (Reflexionsvermögen $< 0,2\%$ im Sichtbaren) entspiegelt.

RFR 400

Ausführung für 500 - 1300 nm:

Die Parallelepipede sind aus Kronglas BK 7 hergestellt, die Verzögerung beträgt zwischen 500 nm und 1300 nm $180^\circ \pm 1\%$. Die Austrittsflächen sind nicht entspiegelt (Entspiegelungen für Teilbereiche auf Anfrage).

RFR 500

Ausführung für 650 - 1700 nm:

Die Parallelepipede sind aus Kronglas BK 7 hergestellt, die Verzögerung beträgt zwischen 650 nm und 1700 nm $180^\circ \pm 1\%$. Die Austrittsflächen sind nicht entspiegelt (Entspiegelungen für Teilbereiche auf Anfrage).

RFR 650

Version for the visible (400 - 700 nm):

The parallelepipeds are produced from crown glass BK 7. The retardation is $180^\circ \pm 1\%$ between 400 and 700 nm. Deviation of $\pm 0.5^\circ$ from normal incidence changes the retardation by $\pm 0.5\%$. The exit faces are multilayer antireflection coated (minimal residual reflectivity is less than 0.2% in the visible).

RFR 400

Version for 500 - 1300 nm:

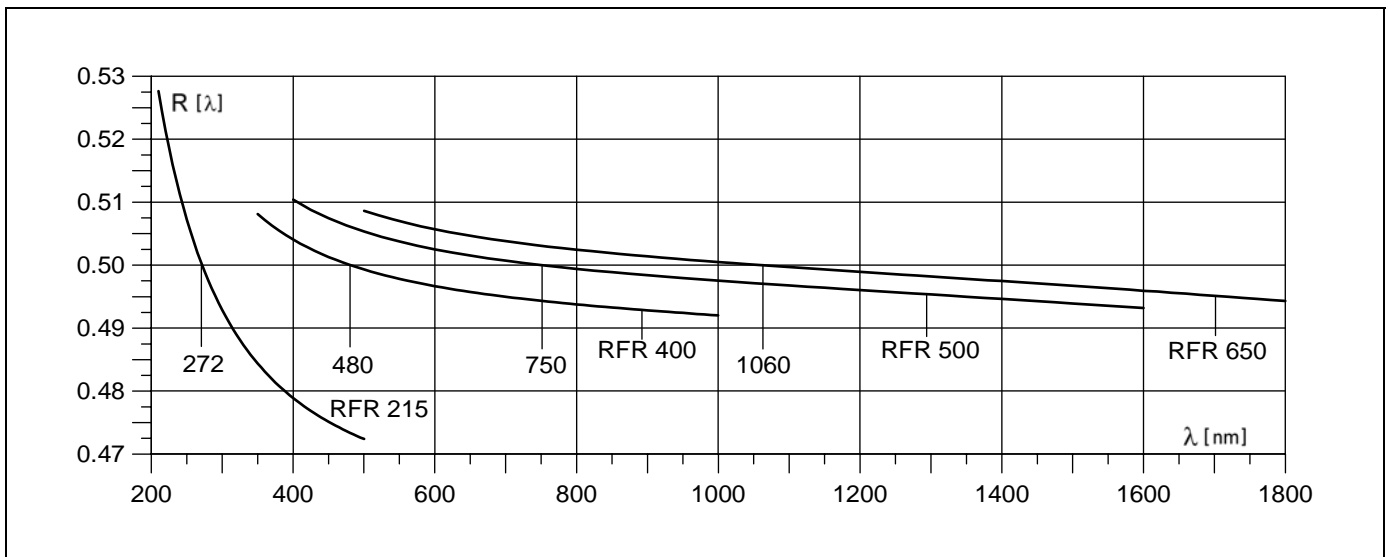
The parallelepipeds are produced from crown glass BK 7. The retardation is $180^\circ \pm 1\%$ between 500 and 1300 nm. The exit faces are not antireflection coated. Antireflection coatings are available for partial ranges upon request.

RFR 500

Version for 650 - 1700 nm:

The parallelepipeds are produced from crown glass BK 7. The retardation is $180^\circ \pm 1\%$ between 650 and 1700 nm. The exit faces are not antireflection coated. Antireflection coatings are available for partial ranges upon request.

RFR 650



Verwendete Küvette der Fa. Hellma-Worldwide

Katalognummer: 704.001

Material-Farbcode: **OG**

Schichtdicke: 30 +/- 0.2 mm

Volumen: 22500 μ l

Außenmaße:

Höhe: 32.5 mm

Breite: 35 mm

Tiefe: 35 mm

Innenmaße:

Höhe: 30 mm

Breite: 30 mm

Tiefe: 30 mm





CARGILLE LABORATORIES, INC.

55 Commerce Road • Cedar Grove, New Jersey • 07009-1289 USA
Phone: 973-239-6633 Fax: 973-239-6096 Email: CargilleLabs@aol.com URL: http://www.cargille.com

CATALOG #18121, 18122, 18125, 1812X, 1812Y, 19122, 19123, 19124

IDENTITY (AS USED ON LABEL AND MANUF. LITERATURE) CARGILLE REFRACTIVE INDEX LIQUID SERIES B RANGE $n_D = 1.657 - 1.700$	NOTE: BLANK SPACES ARE NOT PERMITTED. IF ANY ITEM IS NOT APPLICABLE, OR NO INFORMATION IS AVAILABLE, THE SPACE MUST BE MARKED TO INDICATE THAT.
--	---

SECTION 1	
MANUFACTURER'S NAME CARGILLE LABORATORIES, INC.	EMERGENCY TELEPHONE NUMBER WEEKDAY 973 - 239 - 6633 24 HR CHEMTREC 800 - 424 - 9300
ADDRESS (NUMBER, STREET, CITY, STATE, AND ZIP CODE)	TELEPHONE NUMBER FOR INFORMATION 973 - 239 - 6633
55 COMMERCE ROAD	DATE PREPARED JUNE 3, 2005
CEDAR GROVE, NJ 07009	SUPERCEDES PRIOR DATED MSDS FOR THIS MATERIAL
SIGNATURE OF PREPARER (OPTIONAL)	
THE INFORMATION SUPPLIED IS BASED ON DATA AVAILABLE TO US AND IS BELIEVED TO BE CORRECT. HOWEVER, NO GUARANTEE OR WARRANTY OF ANY KIND EXPRESSED OR IMPLIED, IS MADE WITH RESPECT TO THE INFORMATION PRESENTED AND CARGILLE LABORATORIES ASSUMES NO RESPONSIBILITY FOR THE RESULTS OF THE USE OF THIS PRODUCT. THIS INFORMATION IS FURNISHED UPON THE CONDITION THAT THE PERSON RESPONSIBLE FOR ITS USE SHALL MAKE HIS OR HER OWN DETERMINATION OF THE SUITABILITY OF THE MATERIAL FOR HIS OR HER PARTICULAR PURPOSE.	
CONDITIONS OF INTENDED AND NORMAL USE: (ABBR. C.I.U.) AS AN OPTICAL REFRACTIVE INDEX LIQUID AT NORMAL ROOM PRESSURE (760 mm Hg), TEMPERATURE 65 °F TO 104 °F IN A NON MISTED / NON AIRBORN STATE IN A ROOM HAVING NORMAL AIR CHANGES, (2) / HR., IN A TRAINED AND SUPERVISED LABORATORY / INDUSTRIAL SETTING USING STANDARD GL / GM PROCEDURES. SEE SECTIONS 7 AND 8	

SECTION 2 - HAZARDOUS INGREDIENTS		SPECIFIC CHEMICAL IDENTITY INFORMATION			
HAZARDOUS COMPONENTS	(COMMON NAME (S))	OSHA PEL CEILING	ACGIH TLV T.W.A.	OTHER LIMITS RECOMMENDED	% (OPTIONAL)
	1 - IODONAPHTHALENE			5 mg / CUBIC METER *	
	1 - BROMONAPHTHALENE	N.E.		5 mg / CUBIC METER *	

*PEL CEILINGS & TLV T.W.A.s IF ANY SHOULD NOT OCCUR IF C.I.U. AND SECTIONS 7 & 8 FOLLOWED.

NOTE: PRODUCT NORMALLY SOLD IN 1/4 OZ. TO 16 OZ. QUANTITIES. USED IN SINGLE DROP TO A FEW CUBIC CENTIMETERS PER APPLICATION. SEE REQUISITIONER FOR SPECIFIC QUANTITIES INVOLVED.

SECTION 3 - PHYSICAL / CHEMICAL CHARACTERISTICS			
BOILING POINT AT 760 mm Hg > 279 °C	> 534 °F	SPECIFIC GRAVITY (H ₂ O = 1) TEMP. 23 °C / 73 °F	1.49 TO 1.75
VAPOR PRESSURE IN mm Hg (TEMP.) 73 °F	ca 1	MELTING POINT	ca 39 °F
VAPOR DENSITY (AIR = 1) AT (mm Hg & TEMP.) 760 73 °F	ca 1	EVAPORATION RATE AT 760 mm Hg & 23 °C / 73 °F (MINERAL OIL = 1)	ca 1
SOLUBILITY IN WATER AT (mm Hg & TEMP.) 760 73 °F	PRACTICALLY INSOLUBLE	APPEARANCE AND ODOR YELLOW OILY LIQUID, PUNGENT TO MOTH BALL ODOR	

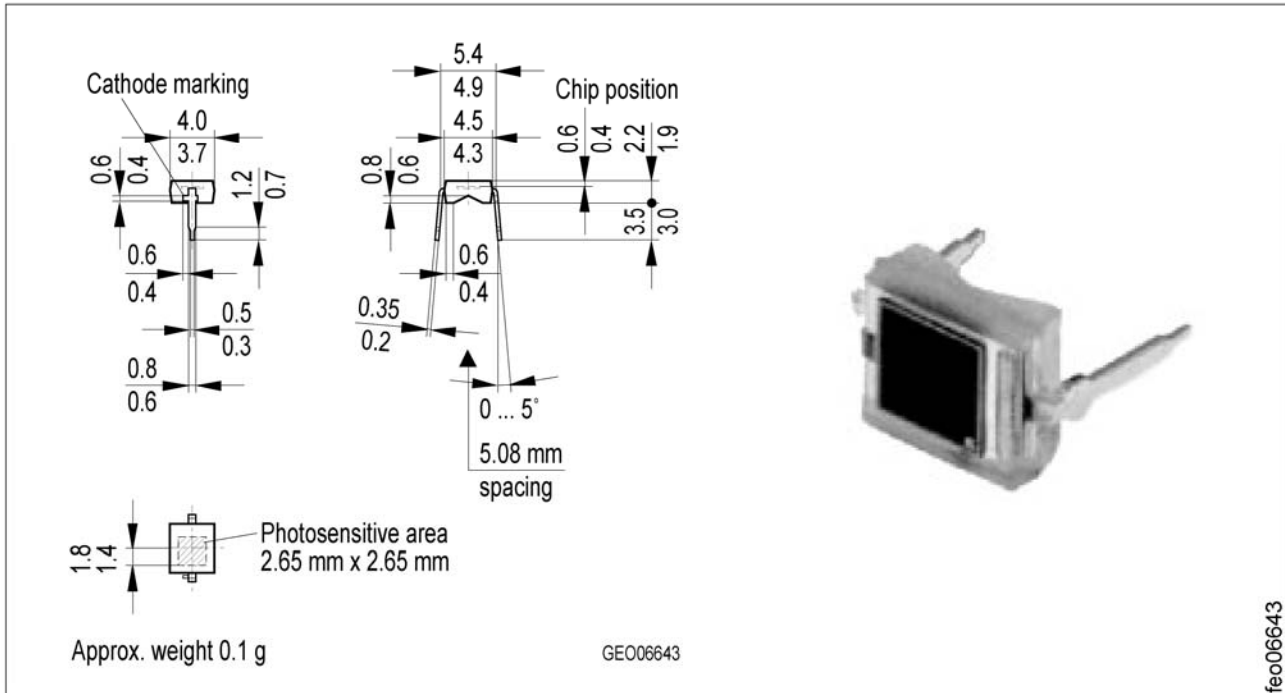
SECTION 4 - FIRE AND EXPLOSION HAZARD DATA			
FLASH POINT (CUP METHOD USED) > 199 °F. (> 93 °C) C.C.	FLAMMABLE LIMITS	LEL N.D.F.	UEL N.D.F.
EXTINGUISHING MEDIA CARBON DIOXIDE, FOAM, OR DRY CHEMICAL.			
SPECIAL FIRE FIGHTING PROCEDURES NONE			
UNUSUAL FIRE AND EXPLOSION HAZARDS FIRE OR EXCESSIVE HEAT MAY PRODUCE HAZARDOUS DECOMPOSITION PRODUCTS.			

ABBREVIATIONS: N.A. = NOT APPLICABLE; N.D.F. = NO DATA FOUND; TR.S. = TRADE SECRET; N.E. = NOT ESTABLISHED;
C.I.U. = CONDITIONS OF INTENDED USE; < = LESS THAN; > = GREATER THAN.

SECTION 5 - REACTIVITY DATA				
STABILITY	UNSTABLE			
	STABLE	YES		
INCOMPATIBILITY (MATERIALS AND / OR CONDITIONS TO AVOID) STRONG OXIDIZERS, HEAT ABOVE 150 °F. COMBUSTION WILL PRODUCE CARBON DIOXIDE AND PROBABLY CARBON MONOXIDE.				
HAZARDOUS POLYMERIZATION	MAY OCCUR		CONDITIONS TO AVOID	
	WILL NOT OCCUR	X	N.A.	
SECTION 6 - HEALTH HAZARD DATA				
ROUTE (S) OF ENTRY: (NOT LIKELY AT C.I.U.)	INHALATION? YES	SKIN? SLIGHT	MUCOUS MEMBRANES / EYES? YES	INGESTION? POSSIBLE
HEALTH HAZARDS (ACUTE AND CHRONIC). NONE KNOWN AT C.I.U.				
CARCINOGENICITY LISTED:	NTP? NO	IARC MONOGRAPHS? NO	OSHA CARCINOGEN? NO	
SIGNS AND SYMPTOMS OF EXPOSURE OILY FEEL, IF LIQUID IS MISTED OR ABOVE 150 °F (NOT A C.I.U.) HEADACHES AND NAUSEA POSSIBLE.				
MEDICAL CONDITIONS GENERALLY AGGRAVATED BY EXPOSURE N.D.F.				
EMERGENCY AND FIRST AID PROCEDURES: INCLUDE POSSIBLE MATERIAL THAT MAY HAVE BEEN MIXED WITH LIQUID DURING USE. INHALATION – IF CONCERN ARISES REMOVE TO FRESH AIR AND ADMINISTER OXYGEN OR ARTIFICIAL RESPIRATION.				
SKIN & CLOTHES – PROMPT SOAP AND WATER WASH – CALL PHYSICIAN IF SKIN IS IRRITATED.				
EYE - FLUSH WITH WATER, SLIGHT TEMPORARY IRRITATION POSSIBLE (CALL PHYSICIAN).				
INGESTION – DO NOT INDUCE VOMITING. DRINK 1 – 2 GLASSES OF WATER OR MILK. CALL PHYSICIAN.				
SECTION 7 - PRECAUTIONS FOR SAFE HANDLING AND USE – FOLLOW C.I.U. SEE SECTION 1				
STEPS TO BE TAKEN IN CASE MATERIAL IS RELEASED OR SPILLED ABSORB, PLACE IN PLASTIC (POLYETHYLENE OR POLYPROPYLENE) CONTAINER, CAP OR TWIST TIE CLOSURE WASH AREA WITH DETERGENT (SEE SECTION 8)				
WASTE DISPOSAL METHOD: ALL CHEMICAL DISPOSALS MUST BE IN ACCORDANCE WITH CURRENT LOCAL, STATE, AND FEDERAL REGULATIONS.				
PRECAUTIONS TO BE TAKEN IN HANDLING AND STORING STORE BETWEEN 65 °F AND 90 °F (18 °C AND 32 °C) KEEP FROM CONTACT WITH OXIDIZING MATERIALS.				
OTHER PRECAUTIONS AVOID CONTINUAL DIRECT LIGHT.				
SECTION 8 - CONTROL MEASURES; WHEN USED AS INTENDED (SEE SECTION 1)				
RESPIRATORY PROTECTION (SPECIFY TYPE) SEE "VENTILATION"				
VENTILATION	LOCAL EXHAUST * MANDATORY IF A WORKER IS SENSITIVE TO ODOR	SPECIAL	N.A.	
	MECHANICAL (GENERAL) *	OTHER	NORMAL ROOM AIR CHANGE / HR (2)	
PROTECTIVE GLOVES * SURGICAL TYPE OVER POLYETHYLENE TO INCREASE MANUAL DEXTERITY		EYE PROTECTION *		
OTHER PROTECTIVE CLOTHING OR EQUIPMENT *				
* = NOT MANDATORY EXCEPT AS GOOD LABORATORY INDUSTRIAL PRACTICES. ALWAYS USE GOOD HYGIENIC WORK / PRACTICES AS TO HOUSEKEEPING, PERSONAL HYGIENE, USE OF CHEMICAL LAB APRON AND SPLASH GOGGLES, AVOIDANCE OF VAPORS, PROLONGED AND REPEATED SKIN CONTACT.				
SPECIAL PRECAUTIONS N.A.				

Silizium-PIN-Fotodiode mit erhöhter Blauempfindlichkeit Silicon PIN Photodiode with Enhanced Blue Sensitivity

BPW 34 B



Maße in mm, wenn nicht anders angegeben/Dimensions in mm, unless otherwise specified

Wesentliche Merkmale

- Speziell geeignet für Anwendungen im Bereich von 350 nm bis 1100 nm
- Kurze Schaltzeit (typ. 25 ns)
- DIL-Plastikbauform mit hoher Packungsdichte
- SMT-Variante auf Anfrage

Anwendungen

- Lichtschranken für Gleich- und Wechsellichtbetrieb im sichtbaren Lichtbereich
- Industrieelektronik
- "Messen/Steuern/Regeln"

Features

- Especially suitable for applications from 350 nm to 1100 nm
- Short switching time (typ. 25 ns)
- DIL plastic package with high packing density
- SMT version on request

Applications

- Photointerrupters
- Industrial electronics
- For control and drive circuits

Typ Type	Bestellnummer Ordering Code
BPW 34 B	Q62702-P945

Grenzwerte Maximum Ratings

Bezeichnung Description	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Betriebs- und Lagertemperatur Operating and storage temperature range	$T_{op}; T_{stg}$	- 40 ... + 85	°C
Löttemperatur (Lötstelle 2 mm vom Gehäuse entfernt bei Lötzeit $t \leq 3$ s) Soldering temperature in 2 mm distance from case bottom ($t \leq 3$ s)	T_S	230	°C
Sperrspannung Reverse voltage	V_R	32	V
Verlustleistung, $T_A = 25$ °C Total power dissipation	P_{tot}	150	mW

Kennwerte ($T_A = 25$ °C, Normlicht A, $T = 2856$ K)

Characteristics ($T_A = 25$ °C, standard light A, $T = 2856$ K)

Bezeichnung Description	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Fotoempfindlichkeit, $V_R = 5$ V Spectral sensitivity	S	75	nA/lx
Wellenlänge der max. Fotoempfindlichkeit Wavelength of max. sensitivity	$\lambda_{S\ max}$	850	nm
Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit $S = 10$ % von S_{max} Spectral range of sensitivity $S = 10$ % of S_{max}	λ	350 ... 1100	nm
Bestrahlungsempfindliche Fläche Radiant sensitive area	A	7.45	mm ²
Abmessung der bestrahlungsempfindlichen Fläche Dimensions of radiant sensitive area	$L \times B$ $L \times W$	2.73×2.73	mm × mm
Abstand Chipoberfläche zu Gehäuseoberfläche Distance chip front to case surface	H	0.5	mm
Halbwinkel Half angle	φ	± 60	Grad deg.
Dunkelstrom, $V_R = 10$ V Dark current	I_R	2 (≤ 30)	nA

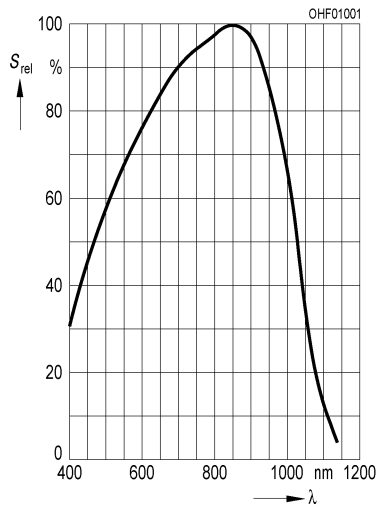
Kennwerte ($T_A = 25\text{ °C}$, Normlicht A, $T = 2856\text{ K}$)

Characteristics ($T_A = 25\text{ °C}$, standard light A, $T = 2856\text{ K}$) (cont'd)

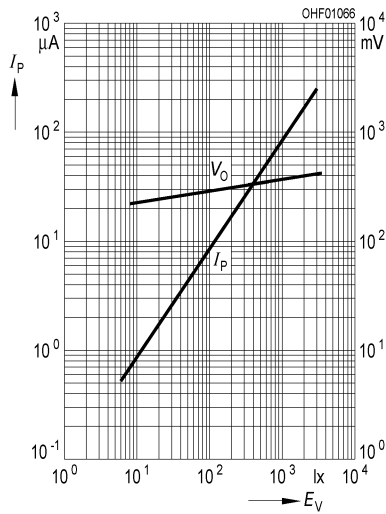
Bezeichnung Description	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Spektrale Fotoempfindlichkeit, $\lambda = 400\text{ nm}$ Spectral sensitivity	S_λ	0.2	A/W
Quantenausbeute, $\lambda = 400\text{ nm}$ Quantum yield	η	0.62	<u>Electrons</u> Photon
Leerlaufspannung, $E_V = 1000\text{ lx}$ Open-circuit voltage	V_O	390	mV
Kurzschlußstrom Short-circuit current $E_e = 0.5\text{ mW/cm}^2$, $\lambda = 400\text{ nm}$	I_{SC}	7.4 (≥ 5.4)	μA
Anstiegs- und Abfallzeit des Fotostromes Rise and fall time of the photocurrent $R_L = 50\ \Omega$; $V_R = 5\text{ V}$; $\lambda = 850\text{ nm}$; $I_p = 800\ \mu\text{A}$	t_r, t_f	25	ns
Durchlaßspannung, $I_F = 100\text{ mA}$, $E = 0$ Forward voltage	V_F	1.3	V
Kapazität, $V_R = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$, $E = 0$ Capacitance	C_0	72	pF
Temperaturkoeffizient von V_O Temperature coefficient of V_O	TC_V	- 2.6	mV/K
Temperaturkoeffizient von I_{SC} Temperature coefficient of I_{SC}	TC_I	0.18	%/K
Rauschäquivalente Strahlungsleistung Noise equivalent power $V_R = 10\text{ V}$, $\lambda = 400\text{ nm}$	NEP	1.3×10^{-13}	$\frac{\text{W}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
Nachweisgrenze, $V_R = 10\text{ V}$, $\lambda = 400\text{ nm}$ Detection limit	D^*	2.1×10^{12}	$\frac{\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}}{\text{W}}$

Relative spectral sensitivity

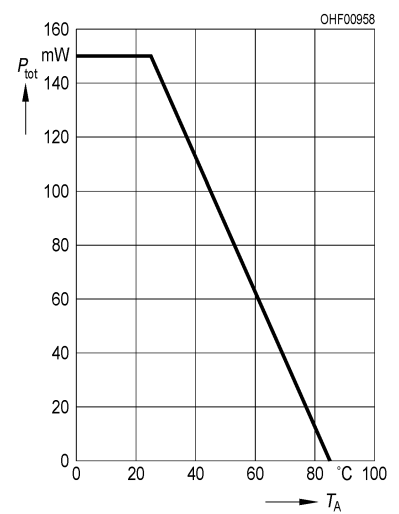
$$S_{rel} = f(\lambda)$$



Photocurrent $I_P = f(E_V), V_R = 5 V$ Open-circuit voltage $V_O = f(E_V)$

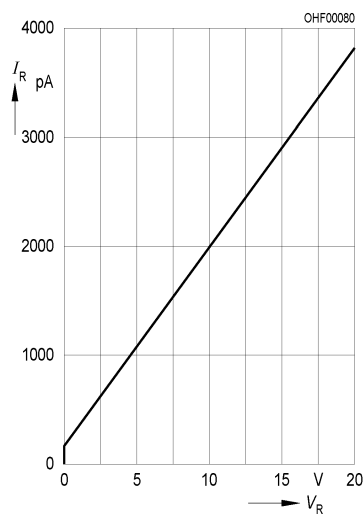


Total power dissipation $P_{tot} = f(T_A)$



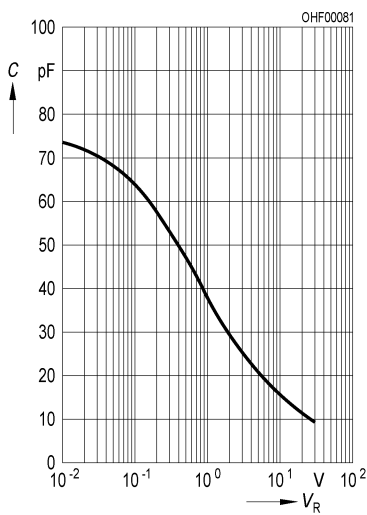
Dark current

$$I_R = f(V_R), E = 0$$



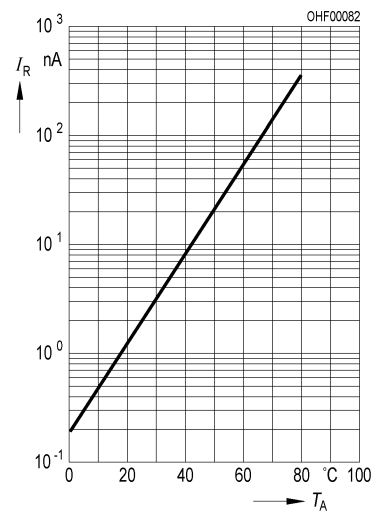
Capacitance

$$C = f(V_R), f = 1 \text{ MHz}, E = 0$$

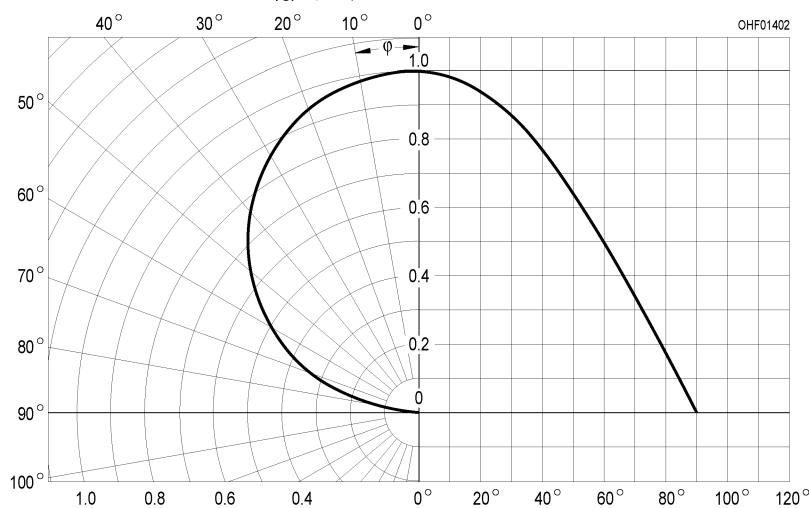


Dark current

$$I_R = f(T_A), V_R = 5 V, E = 0$$



Directional characteristics $S_{rel} = f(\varphi)$





DIGITALMULTIMETER

5000

BESCHREIBUNG

PREMA PRÄZISIONSELEKTRONIK UND MESSANLAGEN GMBH MAINZ

Geschäftsbereich Meßinstrumente

6500 Mainz 42

Robert-Koch-Straße 10

Telefon (06131) 5062-0

Telex 4187 666 PREM D

TECHNISCHE DATEN

Umgebungstemperatur bei der Kalibrierung 23°C.

Gleichspannung V=

BEREICHE +/-0,2V; +/-2V; +/-20V; +/-200V;
+/-1000V**

MESSZEITEN (sec.)	0,1	1+10
MAX. ANZEIGEBEREICH	199 999	1 999 999 (außer 1000V)
1000 V-Bereich	100 000	1 000 000
bei eingebautem		
Scanner 6000/01	25 000	250 000
AUFLÖSUNG	1µV	100nV

BEREICHSWAHL manuell, automatisch oder fernge-
steuert

GENAUIGKEIT +/-(% der Anzeige (%Az) + % der max. Anzeige
(%m.Az))*

	24h, 23°C +/-1°C	
	%Az	%m.Az
0,2V-Bereich	0,005	0,0007
2V-Bereich	0,003	0,0005
20V-Bereich	0,005	0,0015
200V-Bereich	0,005	0,0015
1000V-Bereich	0,005	0,0015

	1Jahr, 23°C +/-5°C	
	%Az	%m.Az
0,2V-Bereich	0,012	0,0007
2-V Bereich	0,010	0,0005
20V-Bereich	0,012	0,0015
200V-Bereich	0,013	0,0015
1000V-Bereich	0,013	0,0015

*) Werte jeweils +/- 1 Digit und nach Offsetkorrektur

Bei Angabe dieser Werte wird vorausgesetzt, daß der meßzeitabhän-
gige Anzeigeumfang groß genug eingestellt ist, um die entspre-
chende Genauigkeit darstellen zu können. Zum Fehler in % der
maximalen Anzeige (%m.Az.) ist der natürliche Rundungsfehler von
+/- 1 Digit hinzuzurechnen. Außerdem wird vorausgesetzt, daß die
"Guard"-Buchse mit der "V/Ohm-LO"-Buchse verbunden ist.

***) Max. 250V= wenn mit Scanner (Option 6000/01) ausgerüstet.

TEMPERATURKOEFFIZIENTEN (10°C-18°C und 28°C-40°C)		
	+/- (%.Az.+ %m.Az)/°C	
0,2V-Bereich	0,001	0,00015
2V-Bereich.....	0,0003	0,0001
20V-Bereich	0,001	0,0001
200V-Bereich	0,001	0,0001
1000V-Bereich	0,001	0,0001

TEMPERATURKOEFFIZIENTEN
(0°C-50°C) Werte bei (10°C-40°C) x 2

NULLPUNKT
Offsetspannung (nach einer Stunde Aufwärmzeit)

Temperaturkoeffizient besser als 0,3 µV/°C
Langzeitstabilität besser als 5 µV über 90 Tage

EINGANGSWIDERSTAND
+/- 0,2V, +/-2V,
Bereich 1 GOhm
+/- 20V, +/-200V, +/-1000V-
Bereich 10 MOhm

STÖRUNGSUNTERDRÜCKUNG

Serientaktunterdrückung
50 Hz Netz besser als 60 dB

Gleichtaktunterdrückung (Schirm niederohmig mit der schwarzen
("V,Ohm-Lo") Buchse verbunden, mit 1
kOhm in der "Lo"-Zuleitung)
Gleichspannung 140 dB
50 Hz Netz 140 dB

MESSPAUSEN 125 ms nach Bereichs- oder Funktions-
wechsel

Präzisions-Lineartische
Precision Linear Stages

LTM 60

9012.0052

Ausgabe 12.05.2006

- Stellweg 25 mm, 50 mm, 70 mm, 95 mm und 145 mm
- industrietauglich
- hochfeste Aluminium-Speziallegierung
- geschliffene Feingewindespindel mit spielfreier Axiallagerung
- Schlitten mit Kugelumlauf-führungen
- rostbeständige, geschliffene Stahl-Führungsschienen
- hochgenaue Endschalter (Hall-Effekt), mechanische oder induktive Endschalter
- mit Schritt- oder DC-Servo-motor
- travel 25 mm, 50 mm, 70 mm, 95 mm and 145 mm
- designed for industrial application
- high density aluminium alloy
- ground fine thread spindle with backlash-free axial bearings
- carriage with recirculating ball bearings
- stainless, ground steel guides
- high precision Hall-effect, mechanical or inductive limit switches
- with step or DC servo motor



Die preiswerten Lineartische der Serie LTM 60 eignen sich für den Einsatz im Dauerbetrieb und den Einbau in Maschinen.

Die speziellen Führungen sorgen für praktisch slip-stick-freien Lauf sowie für hohe Belastbarkeit. Die Werkstoffkombination von Gewindespindel und Mutter gewährleistet geringen Verschleiß und hohe Lebensdauer. Alle Aluminiumteile haben eine hochwertige schwarze Eloxal-Schutzschicht.

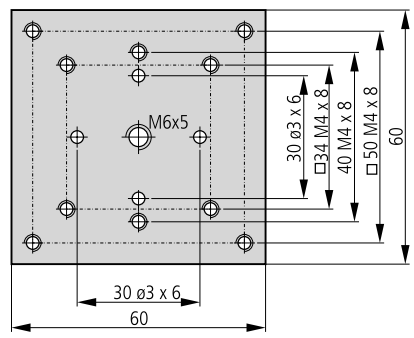
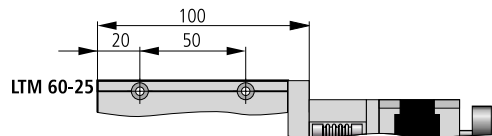
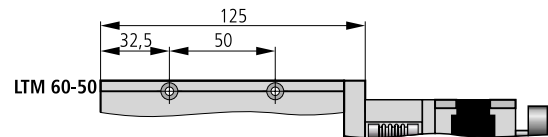
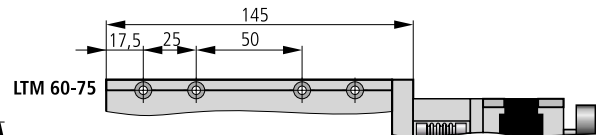
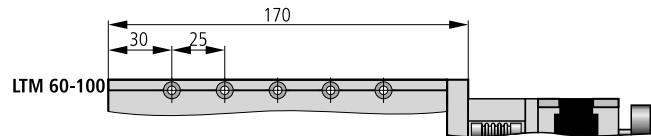
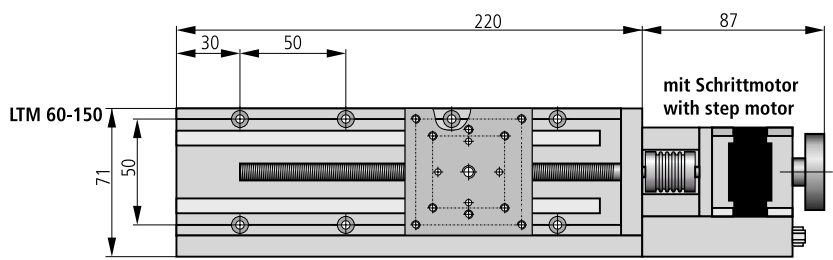
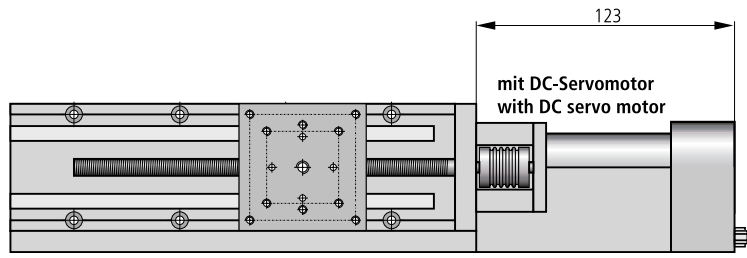
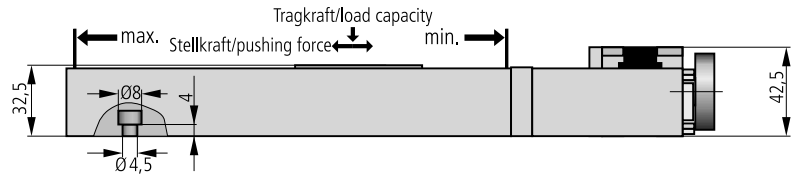
The economically priced linear stages of the series LTM60 series are particularly suitable for continuous operation and installation in machines.

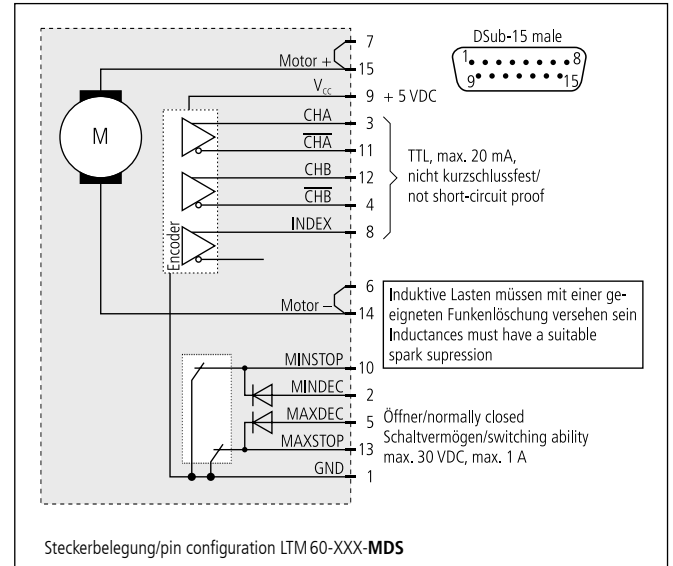
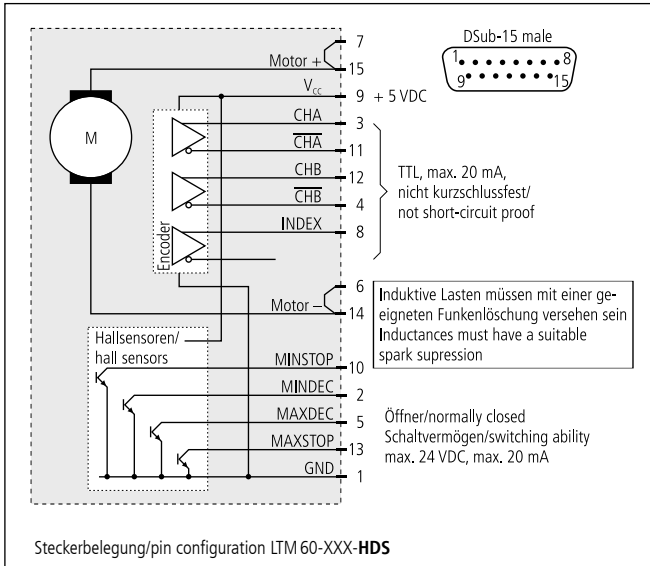
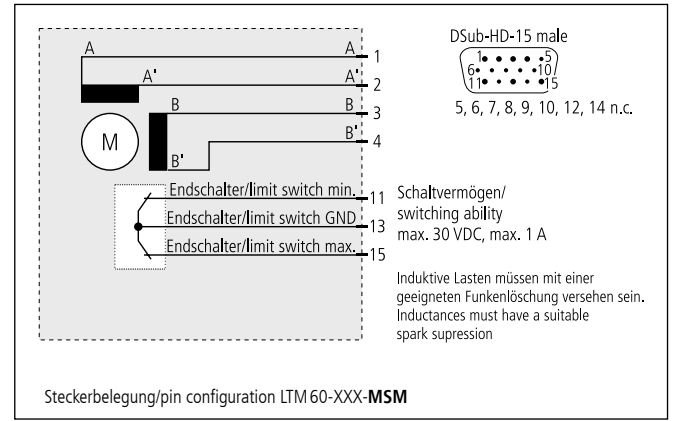
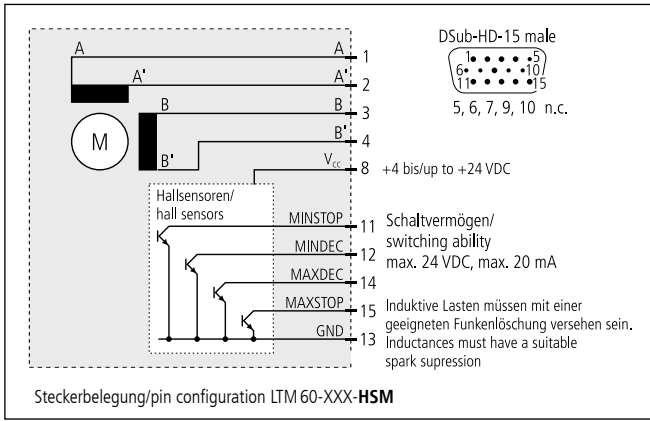
The special guides provide practically slip-stick free movement as well as high load capacity. The material combination of spindle and nut ensures low abrasion and long life time. All aluminium parts have a top quality black anodized protective coating.

Technische Daten/Technical Data (bei 20 °C/@20 °C, ohne Last/no load)

		Schrittmotor step motor	DC-Servomotor DC servo motor	
Geschwindigkeit	velocity		max. 10	mm/s
Tragkraft	load capacity		max. 100	N
Stellkraft	actuating force	max. 50	max. 30	N
Kippmoment (Mx, My, Mz)	moment of tilt (Mx, My, Mz)		max. 7,5	Nm
Spindelsteigung	spindle pitch		1	mm
Wiederholfehler (bidirektional)	repeatability (bidirectional)		<15	µm
Positionierfehler	positioning error		<35	µm/100 mm
Gierwinkel	yaw angle		<300	µrad
Nickwinkel	pitch angle		<250	µrad
Höhenschlag	vertical deviation		<7	µm
Seitenschlag	lateral deviation		<10	µm
Motorspannung	motor voltage	max. 40	max. 24	V
Motor-Haltespannung	holding voltage	2,0	—	V
Motorstrom	motor current	max. 1,8 ¹⁾	max. 1,9	A
Schritte/Impulse pro Motorumdrehung	steps/pulses per motor rev.	200 ³⁾	2000	
Betriebsumgebungstemperatur ²⁾	ambient operating temperature ²⁾		+10 bis/to +50	°C
Lagerungstemperatur ²⁾	storing temperature ²⁾		-20 bis/to +70	°C

¹⁾ pro Phase/per phase ²⁾ ohne Betauung/without condensation ³⁾ im Vollschrittbetrieb/in full-step-mode





Bestellangaben/Ordering Information

Präzisions-Lineartisch
Precision Linear Stage

mit Schrittmotor
with step motor

Stellweg/travel	und Hall-Endschaltern and Hall limit switches		und mechanischen Endschaltern and mechanical limit switches		und induktiven Endschaltern and inductive limit switches	
	Typ/type	Bestell-Nr./part no.	Typ/type	Bestell-Nr./part no.	Typ/type	Bestell-Nr./part no.
25 mm	LTM 60-25-HSM	41.063.25AC	LTM 60-25-MSM	41.063.25BC	LTM 60-25-ISM	41.063.25CC
50 mm	LTM 60-50-HSM	41.063.50AC	LTM 60-50-MSM	41.063.50BC	LTM 60-50-ISM	41.063.50CC
70 mm	LTM 60-75-HSM	41.063.75AC	LTM 60-75-MSM	41.063.75BC	LTM 60-75-ISM	41.063.75CC
95 mm	LTM 60-100-HSM	41.063.10AC	LTM 60-100-MSM	41.063.10BC	LTM 60-100-ISM	41.063.10CC
145 mm	LTM 60-150-HSM	41.063.15AC	LTM 60-150-MSM	41.063.15BC	LTM 60-150-ISM	41.063.15CC

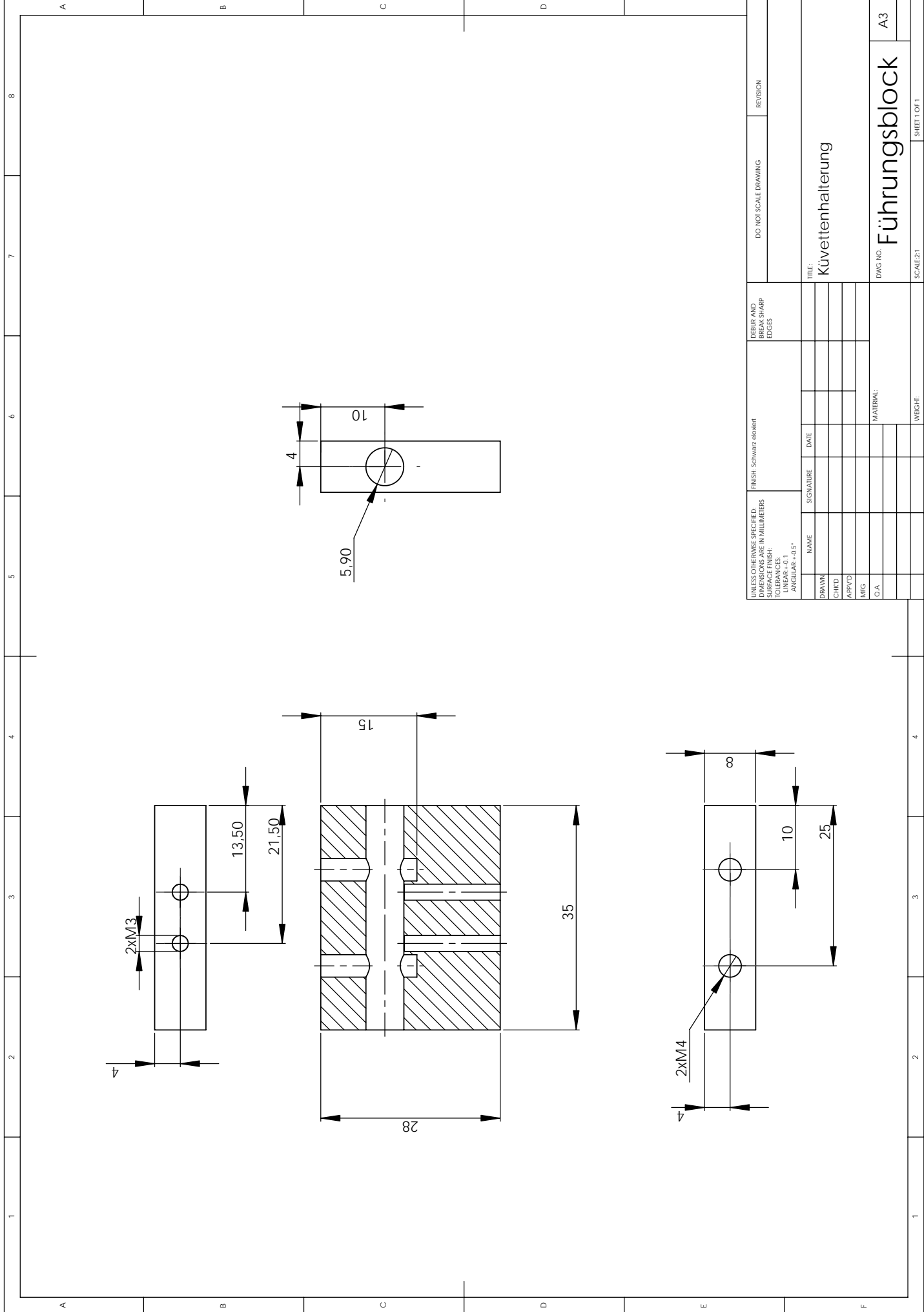
mit DC-Servomotor
with DC servo moto

Stellweg/travel	und Hall-Endschaltern und Hall limit switches		und mechanischen Endschaltern and mechanical limit switches		und induktiven Endschaltern and inductive limit switches	
	Typ/type	Bestell-Nr./part no.	Typ/type	Bestell-Nr./part no.	Typ/type	Bestell-Nr./part no.
25 mm	LTM 60-25-HDS	41.063.25LE	LTM 60-25-MDS	41.063.25PE	LTM 60-25-IDS	41.063.25TE
50 mm	LTM 60-50-HDS	41.063.50LE	LTM 60-50-MDS	41.063.50PE	LTM 60-50-IDS	41.063.50TE
70 mm	LTM 60-75-HDS	41.063.75LE	LTM 60-75-MDS	41.063.75PE	LTM 60-75-IDS	41.063.75TE
95 mm	LTM 60-100-HDS	41.063.10LE	LTM 60-100-MDS	41.063.10PE	LTM 60-100-IDS	41.063.10TE
145 mm	LTM 60-150-HDS	41.063.15LE	LTM 60-150-MDS	41.063.15PE	LTM 60-150-IDS	41.063.15TE

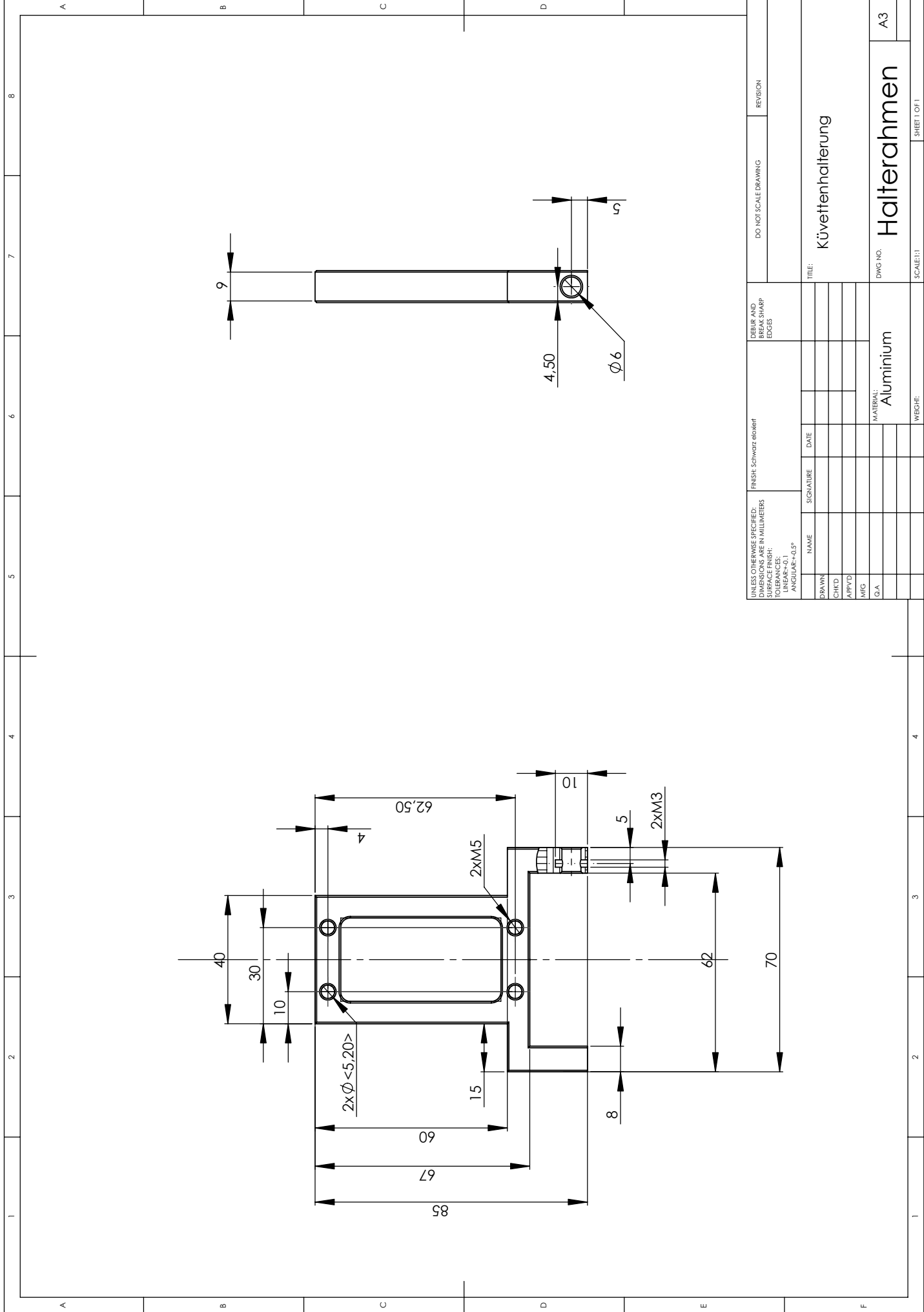
Zubehör/Accessories

		Typ/type	Bestell-Nr./part no.
Z-Montagesatz für Lineartische LT 60, LTM 60 und LIMES 60	Z assembly kit for series LT 60, LTM 60 and LIMES 60 linear stages	MONT-LT(M)60-Z	41.063.0001
Z-Montagesatz kurz, für LT 60, LTM 60 und LTM 60F	Z assembly kit short, for LT 60, LTM 60 und LTM 60F	MONT-LT(M)60-Z-K	41.063.0005
XY-Montagesatz für Lineartische LT 60, LTM 60 und LIMES 60	XY assembly kit for series LT 60, LTM 60 and LIMES 60 linear stages	MONT-LT(M)60-XY	41.063.0004
Sonderfett für Spindel und Führungen, 5 ml im Applikator	special grease for spindle and guides, 5 ml within applicator	SST.F11	90.999.0011

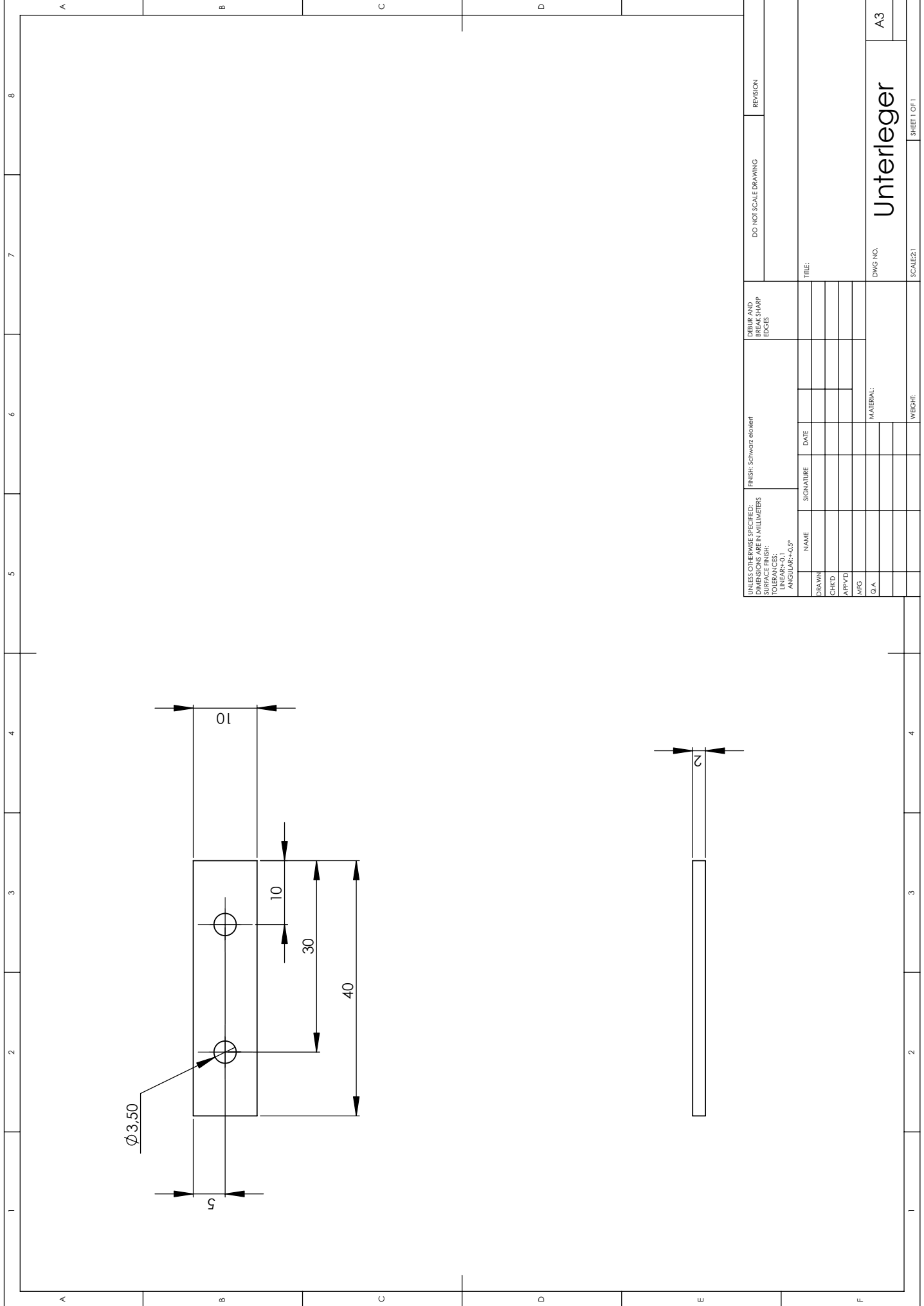
9.2 Fertigungszeichnungen



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS IN MILLIMETERS		FINISH: Schwarz eloxiert		DRAIN AND DRAIN HARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR: ± 0.1									
ANGULAR: $\pm 0.5^\circ$									
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:	
CHKD								Küvettenhalterung	
APPY'D									
MFG									
C.A.								DWG NO. Führungsblock	
								SCALE: 2:1	
								SHEET 1 OF 1	
								WEIGHT:	
								A3	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS IN MILLIMETERS		FINISH: Schwarz eloxiert		REPAIR AND REWORK EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH: LINEAR: ±0.1 ANGULAR: ±0.5°									
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:					
CHKD				Küvettenhalterung					
APP'D									
MFG									
G.A.				MATERIAL: Aluminium		DWG NO.		A3	
						SCALE: 1:1		SHEET OF 1	
						WEIGHT:			



$\varnothing 3,50$

10

10

30

40

5

2

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS IN MILLIMETERS		FINISH: Schwarz eloxiert		REBUR AND REPAIR EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR: ±0.1									
ANGULAR: ±0.5°									
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE	MATERIAL:		TITLE:			
CHKD									
APP'D									
MFG									
G.A.						DWG NO.		A3	
				WEIGHT:		SCALE: 2:1		SHEET 1 OF 1	

Unterleger

DWG NO.

A3

SCALE: 2:1

WEIGHT:

4

3

2

1

8

7

6

5

4

3

2

1

A

B

C

D

E

F

