

TU DRESDEN

FORTGESCHRITTENENPRAKTIKUM

PRAKTIKUMSBERICHT

Optischer Spektralbereich

Autoren:

Toni EHMCKE
Christian SIEGEL

Betreuer:

Felix LEMKE

Dresden, 9. März 2016

Durchführungstag, 29. Januar 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Grundlagen	2
1.1	Reflexion und Transmission an Grenzflächen	2
2	Versuchsdurchführung	4
2.1	Messung spektraler Transparenz und Reflexion	4
2.2	Lumineszenzspektrometrie	4
3	Auswertung	5
3.1	Ermitteln des Brechungsindex einer Glasprobe	5
3.2	Transmissions- und Reflexionsvermögen verschiedener Filter .	7
3.2.1	Farbstoffaufdampfschicht	7
4	Diskussion und Zusammenfassung	9

1 Einführung und Grundlagen

Bevor der eigentliche Versuch besprochen wird, sollen noch einige Grundlagen erörtert werden.

1.1 Reflexion und Transmission an Grenzflächen

Trifft elektromagnetische Strahlung auf eine ladungs- und stromfreie Grenzfläche, so erfüllen die elektrischen und magnetischen Felder, die die Welle beschreiben, bestimmte Stetigkeitsbedingungen und es treten Reflexions- und Transmissionseffekte auf. Im Allgemeinen muss man dabei eine Fallunterscheidung vornehmen, die die parallel und senkrecht zur Oberfläche polarisieren Anteile der einfallenden Welle voneinander trennt. Im vorliegenden Experiment wird allerdings ein Lichtstrahl (mit Amplitude E_0) betrachtet, der senkrecht von Luft (Brechungsindex $n_{Luft} = 1,000292 \simeq 1$) in ein optisch dichteres Medium mit Brechungsindex n propagiert. Dabei verhalten sich parallel und senkrecht polarisierte Komponenten - bis auf Phasenfaktoren, die bei einer Intensitätsmessung ohnehin verloren gehen - äquivalent, weshalb die Fallunterscheidung entfällt. Die Amplitudenverhältnisse der dabei auftretenden partiellen Grenzflächeneffekte werden durch die *Reflexions- und Transmissionkoeffizienten* beschrieben:

$$r_s \equiv r := \frac{E_r}{E_0} = \frac{n_{Luft} - n}{n_{Luft} + n} \simeq \frac{1 - n}{1 + n}, \quad (1)$$

$$t_s \equiv t := \frac{E_t}{E_0} = \frac{2n_{Luft}}{n_{Luft} + n} \simeq \frac{2}{1 + n}. \quad (2)$$

Gleichungen (1) und (2) stellen somit den Spezialfall der *Fresnelschen Formeln* für senkrechten Einfall dar. Analog ergibt sich für den Übergang vom optisch dichteren Medium zu Luft:

$$r'_s \equiv r' \simeq \frac{n - 1}{1 + n} = -r_s, \quad (3)$$

$$t'_s \equiv t' \simeq \frac{2n}{1 + n} = n \cdot t_s. \quad (4)$$

Da mit den vorliegenden Detektoren nur Intensitäten $I = |\vec{E}|^2$ gemessen werden und somit Phaseninformationen verloren gehen, definiert man den sogenannten *Reflexions- und Transmissionsgrad* als Verhältnis der reflektierten/transmittierten Leistung des elektrischen Feldes zu der des einfallendes Feldes. Im vorliegenden Spezialfall senkrechtem Einfalls (s.E.) ergeben sich diese zu:

$$R := \frac{P_r}{P_e} = \left| \frac{E_r}{E_0} \right|^2 = \frac{I_r}{I_0} = r^2 \stackrel{(1)}{=} \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2} = R', \quad (5)$$

$$T := \frac{P_t}{P_e} \stackrel{s.E.}{=} \left| \frac{E_t}{E_0} \right|^2 = \frac{I_t}{I_0} = t^2 \stackrel{(2)}{=} \frac{4}{(n + 1)^2} = \frac{1}{n^2} T', \quad (6)$$

Diese vier Größen werden im Experiment durch Vergleich der Intensität des Probestrahls mit einem Referenzstrahl, welcher kein Medium durchläuft, aber sonst den gleichen Weg passiert, ermittelt.

Im ersten Teil des Versuches wird der Brechungsindex n einer Glasprobe ermittelt werden. Dafür wird nun ein funktionaler Zusammenhang $n = n(R, R', T, T')$ gesucht. Dafür wird ein auf das Glas senkrecht einfallender Strahl mit Intensität I_0 betrachtet. Trifft dieser auf die Grenzfläche, wird ein Teil reflektiert ($I_r \stackrel{(5)}{=} RI_0$) und ein Teil transmittiert ($I_t \stackrel{(6)}{=} TI_0$). Anschließend tritt dies erneut an der Grenzfläche Glas-Luft auf, d.h. ein Teil des vorher transmittierten Strahles wird reflektiert ($I = TR'I_0$) oder es verlässt das Medium ($I = TT'I_0$). Dieser Vorgang wiederholt sich unendlich oft und wird in Abbildung 1 skizziert. Bei einem senkrecht einfallenden Strahl

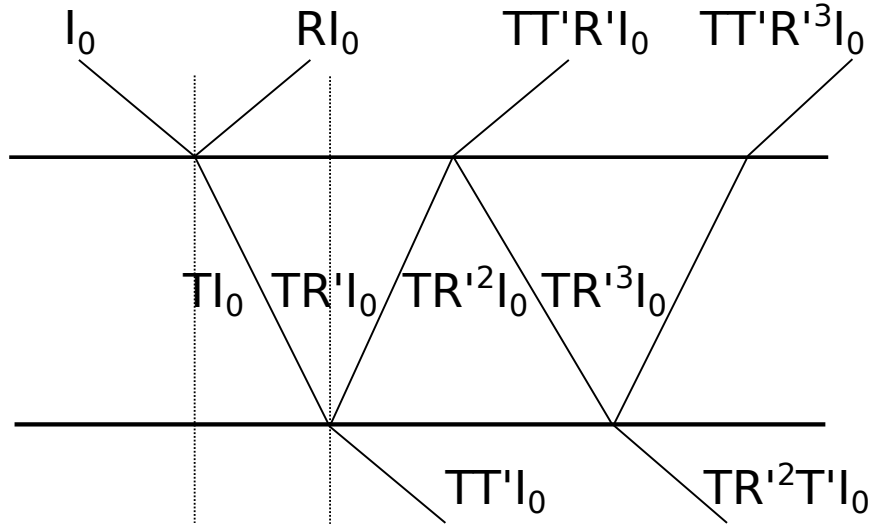


Abbildung 1: Intensitätsverhältnisse einer an einer Grenzfläche unendlich oft transmittierten und reflektierten elektromagnetischen Welle.

ergibt sich somit die Intensität des Strahles, der das Medium verlässt als Überlagerung aller Strahlen mit geraden Potenzen von $R = R'$. Analog ist der reflektierte Strahl die Superposition aller Strahlen mit den ungeraden Potenzen.

$$I_{t,ges} = \sum_{k=0}^{\infty} T \cdot T' \cdot (R'^2)^k \cdot I_0 =: T_{ges} \cdot I_0 \quad (7)$$

$$I_{r,ges} = \left(R + \sum_{k=0}^{\infty} T \cdot T' \cdot (R')^{2k+1} \right) \cdot I_0 =: R_{ges} \cdot I_0 \quad (8)$$

Unter Verwendung der Gleichungen (5) und (6) und der geometrischen Reihe ergibt sich das gemessene gesamte Reflexions- und Transmissionsvermögen zu:

$$T_{ges}(n) = T \cdot T' \cdot \frac{1}{1 - R^2} = \frac{2n}{n^2 + 1}, \quad (9)$$

$$R_{ges}(n) = R \cdot \left(1 + T \cdot T' \cdot \frac{1}{1 - R^2}\right) = R(1 + T_{ges}) = \frac{(n - 1)^2}{n^2 + 1}, \quad (10)$$

$$T_{ges} + R_{ges} = 1. \quad (11)$$

Daraus erhält man durch Lösen der sich ergebenden quadratischen Gleichung den Brechungsindex:

$$n(T_{ges}) = \frac{1}{T_{ges}} \left(1 + \sqrt{1 - T_{ges}^2}\right), \quad (12)$$

$$n(R_{ges}) = \frac{1}{1 - R_{ges}} \left(1 + \sqrt{1 - (1 - R_{ges})^2}\right) \quad (13)$$

2 Versuchsdurchführung

2.1 Messung spektraler Transparenz und Reflexion

2.2 Lumineszenzspektrometrie

Die Messung der spektralen Verteilung des emittierten Fluoreszenzlichtes einer Probe wird im FLOUROMAX-Lumineszenzspektrometer vorgenommen. Dabei wird eine Probe mit einer ausgewählten Wellenlänge angeregt und es wird mit einem Detektor die Intensitätsverteilung des emittierten Lichtes gemessen. Zum Ausfiltern der entsprechenden Wellenlängen (sowohl des einfallenden, als auch des ausfallenden Lichtes) werden 2 Monochromatoren verwendet. Diese bestehen aus optischen Gittern mit Gitterkonstante d , die in einem bestimmten Winkel θ platziert werden, so dass die gewünschte konstruktive Interferenzbedingung für $m \in \mathbb{Z}$ erfüllt ist:

$$m \cdot \lambda \stackrel{!}{=} d \cdot \sin \theta. \quad (14)$$

Zu Beginn wurde die Funktionstüchtigkeit des Monochromators überprüft, indem bei geöffneter Klappe ein weißes Blatt Papier in den Strahlengang gehalten wurde und anhand der Farbe die Richtigkeit der herausgefilterten Wellenlänge geprüft wurde. Dabei fällt auf, dass bereits im normalerweise für das menschliche Auge nicht sichtbare UV-Bereich ein grün-blauer, und somit langwelligerer, Lichtfleck erscheint. Dies kann mit der freien Wahl von m in Gleichung (14) bei konstanter rechter Seite erklärt werden. Dieses Phänomen trat insbesondere auch bei der Messung des Emissionsspektrums der in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Farbstoffaufdampfschicht unter Bestrahlung mit Licht der Wellenlänge 280 nm auf. Der rote Graph in Abbildung 2 zeigt

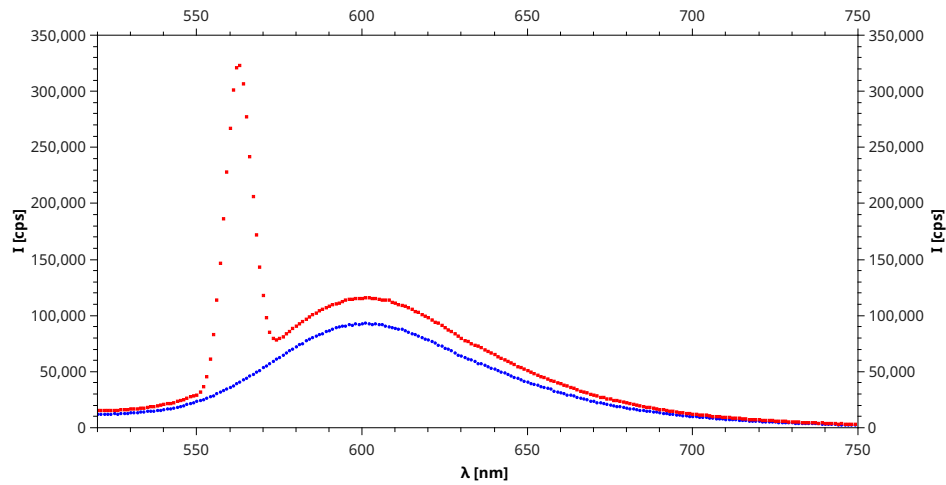


Abbildung 2: Emissionsspektrum der Farbstoffaufdampfschicht ohne (rot) und mit geeignetem Filter (blau).

einen deutlichen Peak bei $\lambda = 560 \text{ nm} = 2 \cdot 280 \text{ nm}$. Der Monochromator am Eingang der Messkammer lässt wegen (14) sowohl 280 nm als auch 560 nm konstruktiv interferieren, wodurch am Ausgang nach entsprechender Transmission durch die Probe der störende Peak entsteht. Diese kann beseitigt werden, indem man am Eingang einen Kantenfilter (Bezeichnung: WG320) verwendet, der Wellenlängen unterhalb einer gewissen Grenzwellenlänge absorbiert. Das so korrigierte Spektrum entspricht dem blauen Graph in Abbildung 2. Da der Filter auch ein gewisses Absorptionsvermögen in anderen Wellenlängenbereichen hat entsteht weiterhin eine leichte Abschwächung des Signals.

3 Auswertung

3.1 Ermitteln des Brechungsindex einer Glasprobe

Nach der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Messung des spektralen Transmissions- und Reflexionsvermögens einer vorgegebenen (Quarz-)Glasprobe im Wellenlängenbereich von $\lambda = 250 \dots 800 \text{ nm}$ ergeben sich die in Abbildung 3 dargestellten Spektren. Dabei wurde angenommen, dass das Absorptionsvermögen durch $A = 1 - R - T$ gegeben ist. Man sieht deutlich, dass das Glas wie ein Kantenfilter wirkt, welcher elektromagnetische Wellen unterhalb einer Wellenlänge von 300 nm absorbiert. Im sichtbaren Bereich von etwa 400 bis 800 nm ist das Glas hauptsächlich transparent, da das Transmissionsvermögen etwa 90% beträgt.

Mit Hilfe der Formeln (12) und (13) kann aus dem Spektrum der wellen-

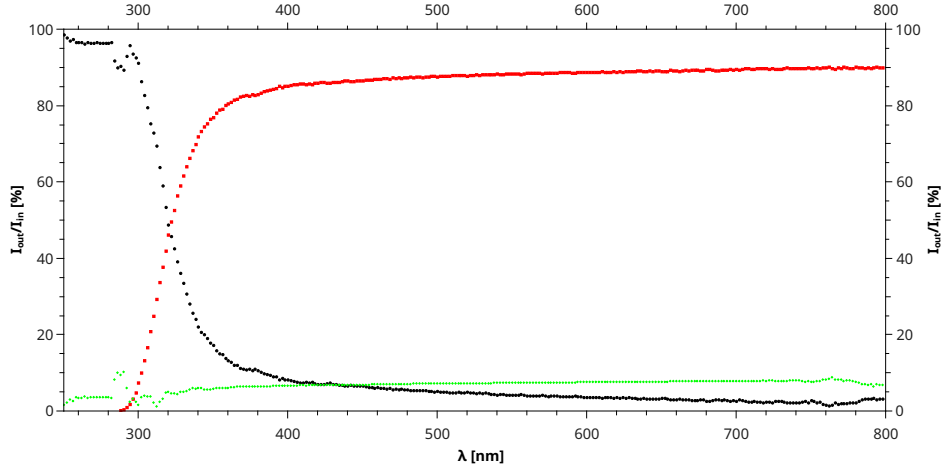


Abbildung 3: Spektrales Transmissions- (rot), Reflexions- (grün) und Absorptionsvermögen (schwarz) einer Glasprobe. Aufgetragen ist das Verhältnis der Intensität des Probestrahles I_{out} zu der des Referenzstrahles I_{in} in Abhängigkeit der Wellenlänge des Strahles λ .

längenabhängige Brechungsindex bestimmt werden. Abbildung 4 zeigt den Verlauf für die Berechnung aus dem Transmissions- und dem Reflexionsvermögen. Beide Berechnungen sollten theoretisch zu einem identischen Ergebnis führen, was offensichtlich nicht der Fall ist. Ein möglicher Grund dafür ist die Tatsache, dass Absorption im Medium stattfindet und somit die Relation $1 = T_{ges} + R_{ges}$, die in der Herleitung aus Abschnitt (1.1) verwendet wurde, nicht gültig ist. Da die Absorption allerdings schwach im Vergleich zur Transmission ist, ist die obige Herleitung eine akzeptable Näherung. Mittelt man beide errechnete Werte, erhält man den erwarteten Verlauf, dass der Brechungsindex im sichtbaren Bereich für große Wellenlängen immer weiter abnimmt. Dieser Effekt wird *Dispersion* genannt und er erklärt die spektrale Aufspaltung von Licht, die beispielsweise an einem Glasprisma auftritt. Mittelt man über den gesamten sichtbaren Wellenlängenbereich erhält man einen mittleren Brechungsindex für den vorliegenden Glasfilter von:

$$\bar{n} = 1,57 \pm 0,02. \quad (15)$$

Hierbei steht die Fehlerangabe für die Standardabweichung der aufgenommenen Messpunkte um den Mittelwert.

Für Wellenlängen unterhalb von 400 nm ist es nicht sinnvoll den Brechungsindex mit der oben angegebenen Methode zu berechnen, da Absorptionseffekte immer signifikanter werden. Um dies noch besser zu berücksichtigen müsste man den Brechungsindex als komplexe Größe auffassen, d.h. $n \rightarrow N := n(1 + \kappa) \in \mathbb{C}$.

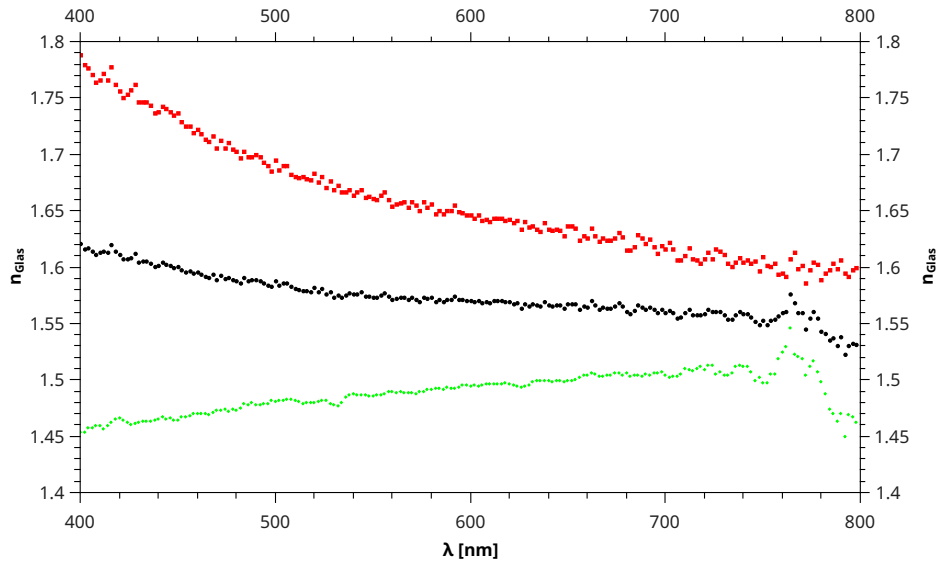


Abbildung 4: Wellenlängenabhängiger Brechungsindex. Dieser wurde aus dem Transmissionsvermögen (rot), dem Reflexionsvermögen (grün) bestimmt und anschließend gemittelt (schwarz).

3.2 Transmissions- und Reflexionsvermögen verschiedener Filter

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Messungen des spektralen Transmissions- und Reflexionsvermögens diverser Proben qualitativ diskutiert werden.

3.2.1 Farbstoffaufdampfschicht

Es wurde eine Glasplatte untersucht, auf die eine dünne Schicht eines lumineszierenden organischen Stoffgemisches aufgedampft wurde. Diese Schicht besteht zu 2% aus Dichlormethan (DCM), einer organischen Substanz, die man häufig als Lösungsmittel für Harze, Fette und Kunststoffe verwendet[01], und zu 18 % aus Aluminium-tris(8-hydroxychinolin) (Alq3), einer orange fluoreszierenden Komplexverbindung, welche zum Bau von organischen Leuchtdioden (OLED) verwendet wird. Abbildung 5 zeigt das spektrale Verhalten der Messung in Transmission und Reflexion, sowie das Absorptionsverhalten. Man erkennt, dass die Absorption für Licht im UV-Bereich stark zunimmt, was dem typischen Verhalten einer Glasplatte, auf die das Substrat aufgebracht ist, entspricht (vergleiche Abbildung 3). Man erkennt mehrere Peaks zum einen im Bereich von etwa 400 nm, welche mit dem Absorptionsverhalten von Alq3 erklärt werden können und in der Umgebung von etwa 500 nm,

die dem DCM zugeordnet werden können.

Das Fluoreszenzverhalten dieser Probe wurde mit der in Abschnitt 2.2 be-

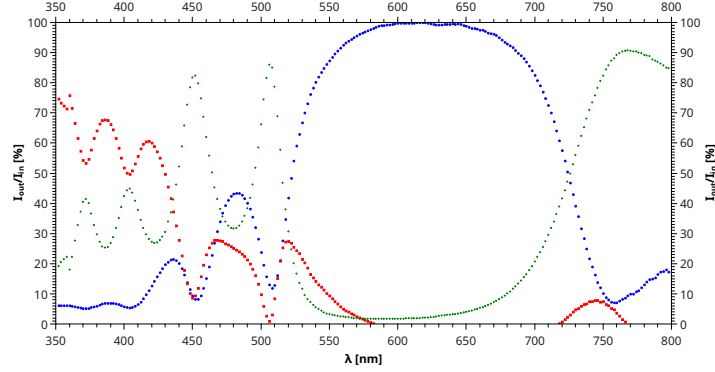


Abbildung 5: Spektrales Transmissions- (grün), Reflexions- (blau) und Absorptionsvermögen (rot) der Farbstoffaufdampfschicht. Aufgetragen ist das Verhältnis der Intensität des Probestrahles I_{out} zu der des Referenzstrahles I_{in} in Abhängigkeit der Wellenlänge des Strahles λ .

schriebenen Messmethode weiter untersucht. Dafür wurde die Probe mit 280, 400 und 500 nm angeregt und es wurde die spektrale Intensität des emittierten Fluoreszenzlichtes gemessen. Diese speziellen Wellenlängen wurden gewählt, da bei diesen besonders starke Absorption zu erwarten ist. Abbildung 6 veranschaulicht die Ergebnisse der Messung. Man sieht deutlich,

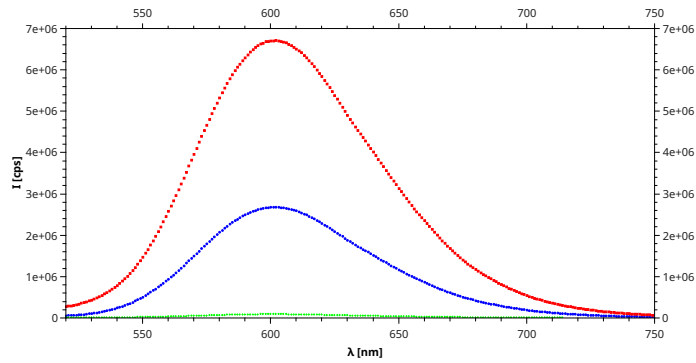


Abbildung 6: Emissionsspektrum der Farbaufdampfschicht unter Bestrahlung mit 280 nm (grün), 400 nm (rot), 500 nm (blau). Dargestellt ist die emittierte Intensität des Fluoreszenzlichtes I in Einheiten der Detektorzählimpulse pro Zeiteinheiten als Funktion der Wellenlänge λ .

dass in allen drei Fällen ein Intensitätspeak bei 600 nm entsteht, welcher das orangefarbene Fluoreszenzlicht erklärt. Das offensichtlich größte Maximum

entsteht, wenn man direkt mit 400 nm die Alq3-Moleküle in einen höheren Anregungszustand versetzt, welche bei Abregung dann Photonen der entsprechenden Wellenlänge emittieren. Mit 280 nm regt man hauptsächlich das Glasgitter an. Dieses gibt die Anregung zum Beispiel in Form von Gitterschwingungen (Phononen) an Alq3 weiter, welches dann fluoresziert. Der resultierende Peak ist allerdings sehr klein im Vergleich zur direkten Anregung. Bei 500 nm wird Dichlormethan besonders häufig angeregt. Auf organische Moleküle wie DCM wirkt sich eine Anregung auf den Schwingungs- und Rotationszustand aus, wodurch auch hier Energie an Alq3 weitergegeben werden kann.

4 Diskussion und Zusammenfassung

Im durchgeführten Experiment wurde die Abhängigkeit des Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsvermögens von der Wellenlänge des einfallenden Lichts verschiedener Proben untersucht. Klassische Farbfilter, wie man sie zum Beispiel in der Lichttechnik einsetzt, absorbieren Licht bis zu einer gewissen Grenzwellenlänge und besitzen ein kantenförmiges Spektrum. Die dabei untersuchte Probe einer fluoreszierenden Farbstoffaufdampfschicht ergab ein kompliziertes Spektrum mit Absorptionsmaxima um die der einzelnen Komponentenmoleküle (Glas, DCM, Alq3). Der einzig lumineszierende Stoff dabei ist Alq3 und dieser kann aufgrund der relativ geringen Anregungsenergie von etwa 3,1 eV den Halbleitern zugeordnet werden. Begünstigt man durch geeignete umgebende Materialien die Bildung von Exzitonen (gebundenen Elektronen-Loch-Zuständen), können diese beim Zerfall den Farbstoff anregen und somit gezielt die Aussendung von Fluoreszenzlicht auslösen. Aus diesem Grund trifft man dieses Material sehr häufig in der sogenannten Emitterschicht von organischen Leuchtdioden (OLED) an, die technologisch zum Bau von Handydisplays verwendet werden können.

Weiterhin wurde durch die gleiche Messung der frequenzabhängige Brechungsindex einer Glasplatte bestimmt, der mit zunehmender Wellenlänge abnimmt. Der mittlere Brechungsindex ergibt sich zu $n = 1,57$, was sehr gut mit der Erwartung für eine Quarzglasplatte übereinstimmt.

Literatur

- [01] unbekannter Autor. <https://de.wikipedia.org/wiki/Dichlormethan>. zuletzt geöffnet: 06.03.16