

Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität
Graz

&

Institut für Physik der Universität Graz

LABORÜBUNGEN 2: ELEKTRIZITÄT, MAGNETISMUS, OPTIK

Übungstitel: [Spektralphotometer](#)

Betreuer:

Gruppennummer: [41](#)

Name: [Tanja Maier, Johannes Winkler](#)

Kennzahl: [033 678](#)

Matrikelnummer: [11778750, 00760897](#)

Datum: [20.11.2020](#)

WS [20](#)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1 Aufgabenstellung	3
2 Voraussetzungen und Grundlagen	3
2.1 Transmission, Extinktion, Absorptionsquerschnitt	3
2.2 Interferenzen an einer planparallelen Platte	4
3 Geräteliste	5
4 Beschreibung der Versuchsanordnung	5
5 Versuchsdurchführung und Messwerte	7
5.1 Bestimmung der Transmission und der Extinktion für verschiedene Farbfiler	7
5.2 Bestimmung der Stoffmengenkonzentration einer Methylenblaulösung	8
5.3 Bestimmung der Dicke einer Glasplatte durch das Transmissionspektrum	9
6 Auswertung	10
6.1 Bestimmung von Transmission und Extinktion für verschiedene Farbfiler	10
6.2 Bestimmung der Stoffmengenkonzentration einer Methylenblaulösung	13
6.3 Bestimmung der Dicke einer Glasplatte durch das Transmissionspektrum	14
7 Diskussion	16
8 Zusammenfassung	17
9 Literaturverzeichnis	17

1 Aufgabenstellung

1. Messen Sie mit dem Spektralphotometer die optische Transmission von Farbfiltern. Stellen Sie die Transmission und die (als logarithmisches Maß definierte) optische Extinktion als Funktion der Lichtwellenlänge dar.
2. Zeigen Sie an zwei Farbfiltern die Additivität der Extinktion.
3. Bestimmen Sie die Stoffmengenkonzentration einer Methylenblaulösung.
4. Diskutieren und erklären Sie anhand der gemessenen Spektren den Farbeindruck der jeweiligen Proben.
5. Messen Sie die Dicke einer Glasplatte durch Auswertung der Interferenzmaxima im Transmissionsspektrum

2 Voraussetzungen und Grundlagen

2.1 Transmission, Extinktion, Absorptionsquerschnitt

Wenn Licht auf verschiedene Stoffe und Materialien scheint, kann es in unterschiedlichen Frequenzen oder Wellenlängen reflektiert, absorbiert und gestreut werden. Trifft Licht auf eine glatte Oberfläche oder einen homogenen Körper, so wird die Streuung Reflexion genannt. Beim Einfall auf eine teiltransparente Schicht ist das Verhältnis der transmittierten (als durch das Medium durchgelassenen) Intensität I_T und der auf das Medium scheinende Lichtintensität I_0 gegeben durch

$$T = \frac{I_T}{I_0} \quad (1)$$

wobei T als Transmission bzw. Transmissionsgrad bezeichnet wird. Wichtig ist, dass $T < 1$ ist, da immer ein gewisser Teil des Lichts beim Kontakt mit dem Medium in eine andere Energieform (z.B. Wärme) umgewandelt (also absorbiert) oder einfach in andere Richtungen reflektiert (bzw. gestreut) wird.

Allerdings kann aus der Messung der transmittierten Intensität meist nicht auf jene Intensitätsanteile, die gestreut bzw. die absorbiert werden rückgeschlossen werden. Daher wird in der Spektroskopie oft das dekadisch logarithmische Maß der Lichtabschwächung (Extinktion) verwendet:

$$E = -\log(T) = -\log\left(\frac{I_T}{I_0}\right) = \log\left(\frac{I_0}{I_T}\right) \quad (2)$$

Falls mehrere Extinktionsprozesse stattfinden, so können diese wegen der Gesetze für Logarithmen addiert werden. Außerdem können durch das logarithmische Maß Variationen von Lichtabschwächung über mehrere Größenordnungen übersichtlich dargestellt werden.

Die Lichtabschwächung bei einem homogenen Medium kann durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben werden

$$I_T(d) = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot d) \quad (3)$$

wobei d die Schichtdicke des Mediums und α der Extinktionskoeffizient ist. Der Extinktionskoeffizient α hängt dabei vom molaren Extinktionskoeffizienten ε_n und von der Stoffmengenkonzentration c des gelösten Stoffes ab. Es gilt $\alpha = \varepsilon_n \cdot c$. Dadurch ergibt sich für das Lambert-Beer'sche Gesetz

$$I_T(d) = I_0 \cdot \exp(-\varepsilon \cdot c \cdot d) \quad (4)$$

Dadurch kann die Extinktion mit ε als dekadisch molarem Extinktionskoeffizienten $\varepsilon = \varepsilon_n / \ln(10)$ definiert werden als

$$E = \log\left(\frac{I_0}{I_T}\right) = \varepsilon \cdot c \cdot d. \quad (5)$$

Der Beitrag eines einzelnen Moleküls zur Extinktion wird als Absorptionsquerschnitt q bezeichnet und definiert als

$$q = \varepsilon \cdot \ln(10) / N_A \quad (6)$$

wobei N_A die Avogadro-Konstante ist. Der Absorptionsquerschnitt kann jedoch (da er eine effektive Fläche angibt) erheblich vom geometrischen Molekülquerschnitt abweichen.

2.2 Interferenzen an einer planparallelen Platte

Wenn Weißlicht auf eine planparallele Platte trifft, so kommt es zur Interferenz. Das Interferenzmuster entsteht durch Auslöschung der Wellenlänge (destruktive Interferenz) oder Verstärkung der Wellenlängen (konstruktive Interferenz) und kann dabei sowohl einer Reflexion als auch einer Transmission entsprechen. Der Gangunterschied Δs ist gegeben durch

$$\Delta s = 2 \cdot n_p \cdot d = m \cdot \lambda_m \quad (7)$$

wobei n_p die Brechzahl des Mediums und d die Schichtdicke ist. Wenn der Gangunterschied einem ganzzahligen Vielfachen m der Wellenlänge entspricht, so bildet sich ein Interferenzmaximum (konstruktive Interferenz). λ_m sind die Wellenlängen, bei denen ein solches Maximum auftritt.

Die Wellenzahl $\nu = 1/\lambda$ ergibt daher

$$\nu_m = \frac{m}{2 \cdot n_p \cdot d} \quad (8)$$

Durch Auftragen der Wellenzahlen der Maxima als Funktion von m kann aus der Steigung der Geraden und der bekannten Brechzahl n des Mediums die Schichtdicke d ermittelt werden.

3 Geräteliste

Tabelle 1: Liste der verwendeten Geräte

Abk.	Gerätename	Hersteller	Modell
S	Spektralphotometer	THOR-Labs	CCS200/M
L	Lampe	THOR-Labs	QTH10/M
FR	Filter Rot		
FB	Filter Blau		
KW	Küvette mit Wasser		
KM	Küvette mit Methylenblau		
GP	Glasplatten		
PC	Computer mit Software SPLICCO		

Sämtliche Daten wurden nach den Versuch mit Python3.8 ausgewertet, wobei für Grafiken die Library `Matplotlib` verwendet wird.

4 Beschreibung der Versuchsanordnung

Der Versuchsaufbau ist in als Foto in Abbildung 1 dargestellt, in Abbildung 2 ist der schematische Aufbau gezeigt.

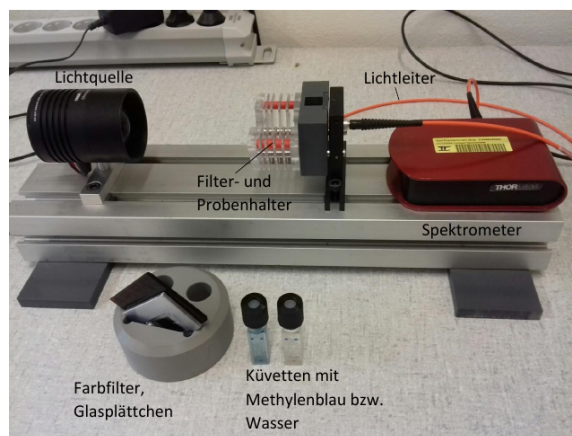


Abbildung 1: Versuchsaufbau, Arbeitsplatz 3.

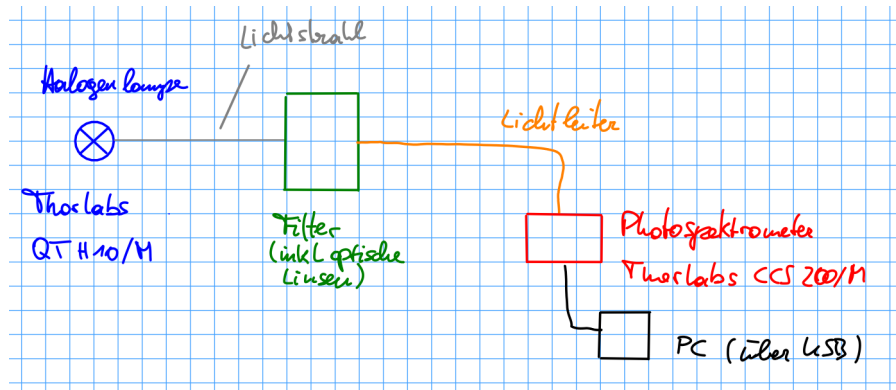


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des Versuchs. Gezeichnet mit Wacom Tablet im Programm Xournal.

Formel (7) wird durch Grafik 3 veranschaulicht. Damit lässt sich aus den Interferenzmaxima der Rückschluss auf die Dicke einer Glasplatte ziehen.

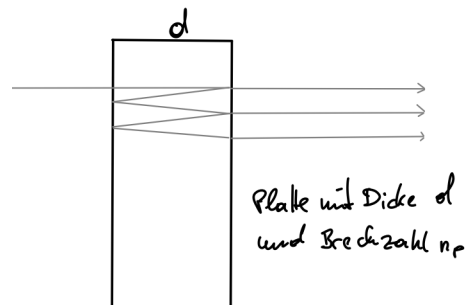


Abbildung 3: Strahlengang bei Glasplatten. Gezeichnet mit Wacom Tablet im Programm Xournal.

Das Spektralphotometer benutzt für die Zerlegung des Lichtes einen Czerny-Turner Monochromator, wie er in Abbildung 4 dargestellt ist. Das einfallende Licht A wird durch eine Blende gebündelt und gelangt dann auf einen Hohlspiegel C. Von dort wird es zu einem Gitter D reflektiert, wo es in die Bestandteile gebrochen wird. Diese Bestandteile werden auf einen zweiten Hohlspiegel E reflektiert, danach werden diese durch eine verschiebbare Blende F selektiert und je nach Wellenlänge gemessen.

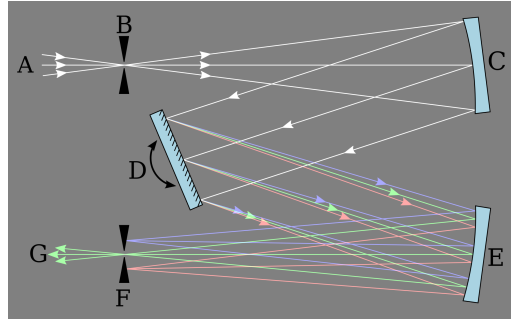


Abbildung 4: Czerny-Turner Monochromator, (Quelle: [3], Creative Commons by-sa 3.0 de)

5 Versuchsdurchführung und Messwerte

Als erstes wurde die Halogen-Lampe eingeschaltet und die Spektralphotometer-Software SPLICCO gestartet. In der Software wurde dann der Wellenlängenbereich auf 400 – 800 nm eingestellt, die Integrationszeit (integration time) auf 0.9 ms eingestellt, sodass das Spektrum der Lichtquelle über den gesamten angezeigten y-Achsenabschnitt gut skaliert wird. Die durchschnittlichen Aufnahmen (average scans) wurden auf 50 eingestellt. Zur Korrektur der Hintergrundbeleuchtung musste die Halogen-Lampe wieder ausgeschaltet werden und mit Save Background Correction gespeichert werden. So wird die Hintergrundbeleuchtung bei den folgenden Messungen automatisch abgezogen. Falls sich die Hintergrundbeleuchtung im Laufe des Experiments ändern sollte, so muss diese Korrektur wiederholt werden.

Bei allen Messungen der Intensität ist es vor der Messung nötig, dass ein Spektrum ohne Filter aufgenommen wird. Dieses wird als Referenzspektrum bezeichnet. Das Referenzspektrum ist nötig, um die Extinktion zu berechnen.

5.1 Bestimmung der Transmission und der Extinktion für verschiedene Farbfilter

Danach wurden die Intensitätsspektren für den roten und den blauen Farbfilter gemessen, insbesondere auch die Kombination dieser beiden. Die Intensitätsspektren sowie das Referenzspektrum liegen im csv Format vor. Die gemessenen Intensitäten sind in Grafik 5 zusammengefasst.

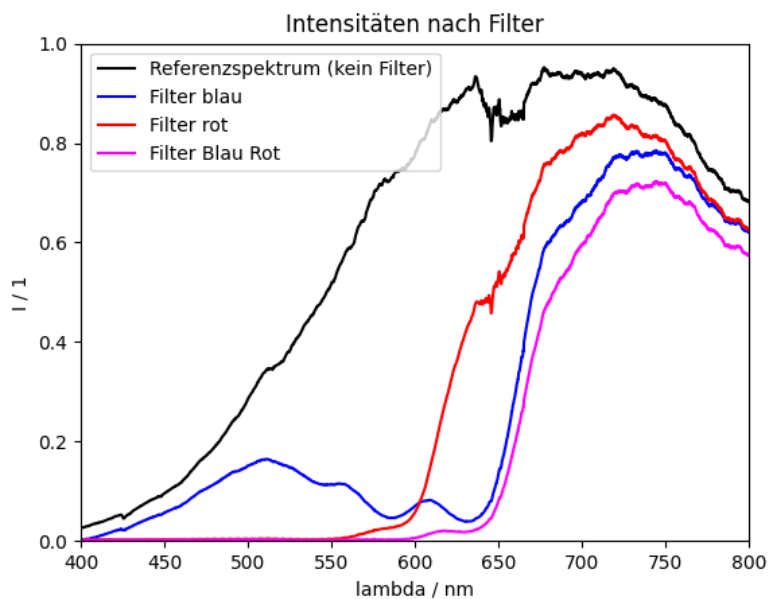


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen Intensität und Wellenlänge bei gegebenen Filter.

5.2 Bestimmung der Stoffmengenkonzentration einer Methylenblaulösung

Dafür wurde zuerst der Filterhalter gegen den Küvettenhalter ausgetauscht und die Küvette mit Wasser im Halter platziert und das Transmissionsspektrum von Wasser als Referenz gemessen. Dann wurde die Küvette mit Wasser gegen die Küvette mit Methylenblausäure ausgetauscht und ebenfalls das Transmissionsspektrum gemessen.

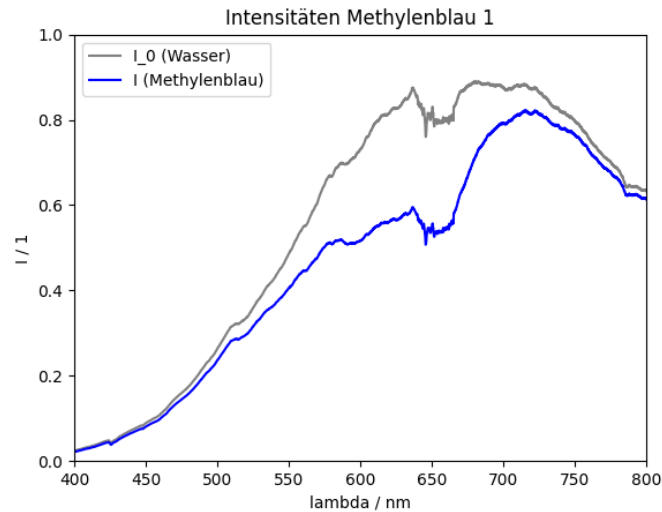


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Intensität und Wellenlänge einmal bei einer Küvette mit Wasser (grau) als Referenzspektrum und einmal bei einer Küvette mit einer Lösung mit Methylenblau (Probe 1 aus der Angabe).

5.3 Bestimmung der Dicke einer Glasplatte durch das Transmissionsspektrum

Zur Bestimmung der Dicke einer Glasplatte wird zuerst ein Referenzspektrum gemessen und danach die Glasplatte in den Strahlengang eingesetzt. Die Intensität von Glasplatte und das dazugehörige Referenzspektrum ist in Grafik 7 dargestellt.

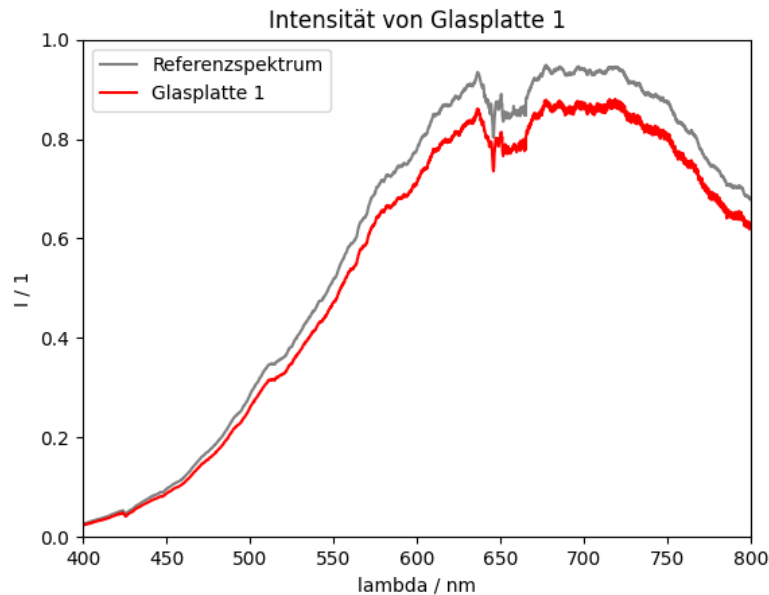


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Intensität und Wellenlänge von Glasplatte 1 und ein gemessenes Referenzspektrum. Es wird Probe 1 aus der Angabe verwendet.

6 Auswertung

6.1 Bestimmung von Transmission und Extinktion für verschiedene Farbfilter

Die Transmissionen und die Extinktionen der Filter bzw. Filterkombinationen werden durch die Formeln (1) und (2) bestimmt. Die Transmissionen sind in Grafik 8 und die Extinktionen in Grafik 9 zusammengefasst.

In Grafik 10 wurde zusätzlich grafisch gezeigt, dass die Extinktion vom blauen und roten Filter in Summe jene Extinktion ergibt, welche bei der Kombination aus den beiden Filtern gemessen wurde. Damit wurde die Additivität experimentell gezeigt. Nach den Regeln für Logarithmen muss auch die Multiplikation der Transmissionen erfüllt sein. Das wurde in Grafik 11 dargestellt.

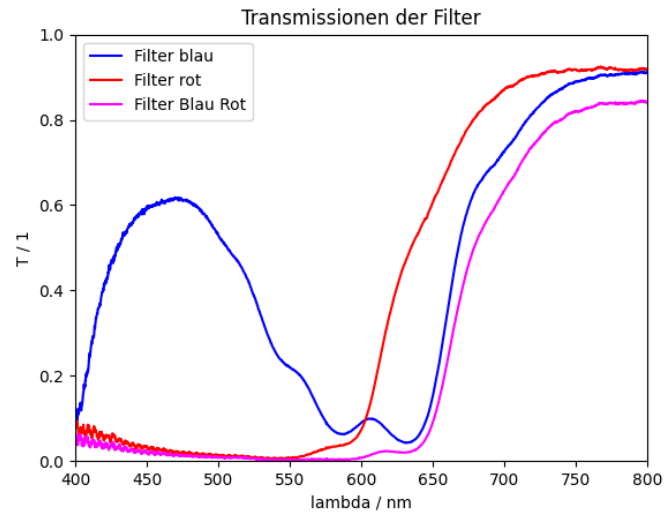


Abbildung 8: Zusammenhang zwischen Transmissionen und Wellenlänge bei gegebenen Filter.

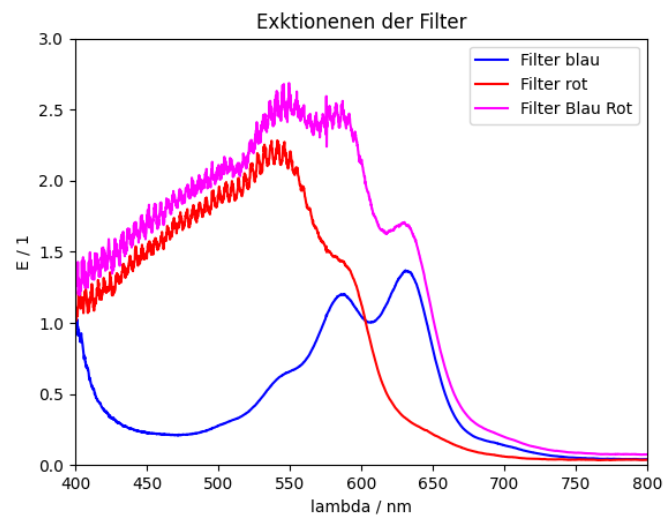


Abbildung 9: Zusammenhang zwischen Extinktion und Wellenlänge bei gegebenen Filter.

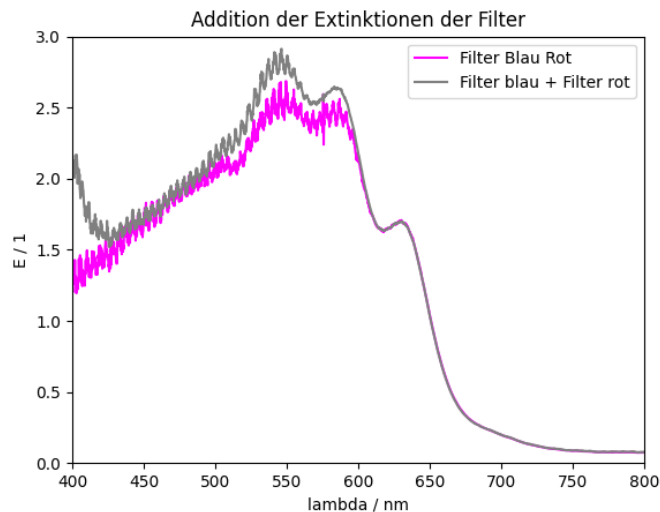


Abbildung 10: Summe der Extinktionen des roten und blauen Filters (jeweils extra gemessen) hier in grau verglichen mit der gemeinsam gemessenen Extinktion hier in magenta.

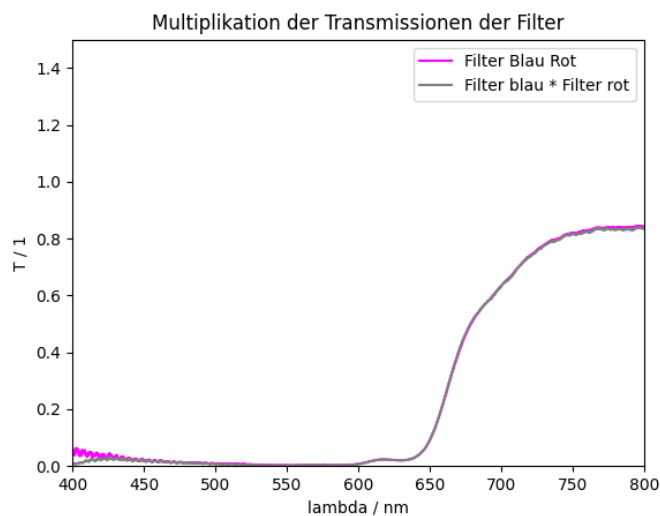


Abbildung 11: Produkt der Transmissionen des roten und blauen Filters (jeweils extra gemessen) hier in grau verglichen mit der gemeinsam gemessenen Transmission hier in magenta.

6.2 Bestimmung der Stoffmengenkonzentration einer Methylenblaulösung

Grafik 12 zeigt die Transmission und Extinktion der Lösung. Für die Messung wurde Probe 1 der Aufgabenstellung verwendet.

Zur Berechnung der Konzentration benötigt man Formel (5). Durch Umformungen, Regeln für Logarithmen und Fehlerrechnung erhält man

$$c = \frac{\log(I_0) - \log(I_T)}{\varepsilon \cdot d} \pm \left(\frac{\frac{\Delta I_0}{I_0} + \frac{\Delta I_T}{I_T}}{\varepsilon \cdot d} + \frac{\log(I_0) - \log(I_T)}{\varepsilon \cdot d^2} \cdot \Delta d \right)$$

Der Term $E = \log(I_0) - \log(I_T)$ kann aus den Grafiken abgelesen werden oder auch direkt durch die gemessenen Intensitäten berechnet werden. Gemäß [1] können wir den dekadischen Extinktionskoeffizienten von Methylenblau bei einer Wellenlänge von 664 nm bei

$$\varepsilon = 77790 \frac{\text{Liter}}{\text{mol cm}}$$

annehmen. Die Schichtdicke der Lösung in der Küvette beträgt außerdem 1 cm mit der angenommenen Unsicherheit von 10 μm . Insgesamt ergibt sich

$$c_1 = (2.04 \pm 0.08) \cdot 10^{-6} \text{ mol/Liter}$$

wobei die Werte für I_0 und I_T mit Hilfe eines Python Skriptes gemittelt wurden.

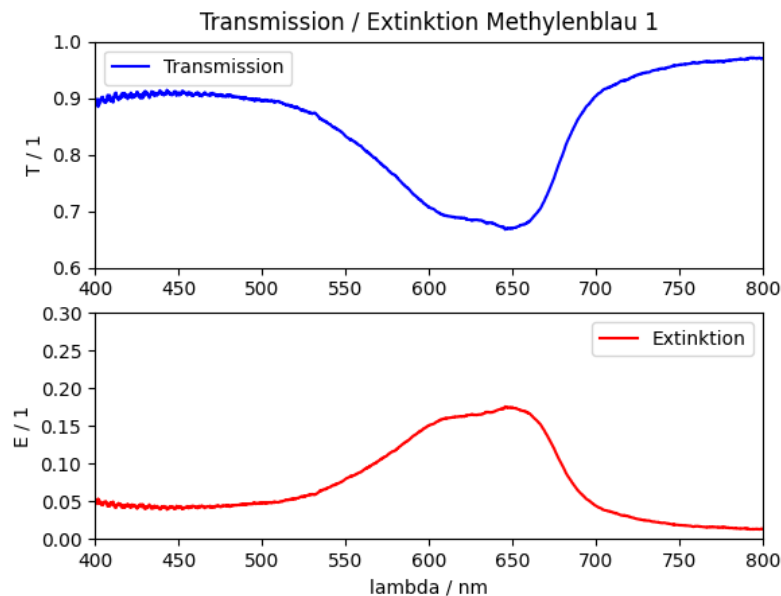


Abbildung 12: Transmission und Extinktion der Lösung mit Methylenblau 1.

6.3 Bestimmung der Dicke einer Glasplatte durch das Transmissionsspektrum

Die Maxima der Intensität aus Grafik 7 ist gegeben durch

$$I_{1,\max} = 0.88 \quad \text{bei} \quad \lambda_1 = 718.74$$

In Grafik 14 wird die Skalierungen so gewählt, dass der Bereich zwischen 700 und 720 nm genauer betrachtet werden kann. Dort werden die Maxima der Transmission abgelesen. Diese sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Transmissionsmaxima im Bereich $\lambda_m \in [700, 720]$ nm. m Beugungsordnung, ν_m Wellenzahl, $T_{1,m}$ Wert der Transmission von Platte 1 gemäß Angabe.

m	λ_m / nm	ν_m / μm^{-1}	$T_{1,m}$ / 1
1	700.5	1.428	0.928
2	701.7	1.425	0.927
3	702.6	1.423	0.929
4	703.8	1.421	0.928
5	704.7	1.419	0.929
6	705.9	1.417	0.928
7	706.8	1.415	0.930
8	708.0	1.412	0.931
9	708.9	1.411	0.929
10	710.1	1.408	0.929
11	711.3	1.406	0.929
12	712.2	1.404	0.930
13	713.4	1.402	0.931
14	714.5	1.400	0.929
15	715.5	1.398	0.931
16	716.6	1.395	0.930
17	717.8	1.393	0.929
18	718.7	1.391	0.931
19	719.9	1.389	0.931

Aus [1] geht hervor, dass die Brechzahl bei Glas $n_p = 1.519$ ist, wenn $\lambda = 700$ nm. Wir nehmen zusätzlich $\Delta n_p = 0.001$ an. Zusätzlich besteht laut [1] ein linearer Zusammenhang

$$\nu_M = k \cdot m$$

Durch Lineare Regression lässt sich dieses k berechnen. Zusätzlich gilt

$$k = \frac{1}{2 \cdot n_p \cdot d}$$

wobei d unsere gesuchte Dicke ist. Durch Berechnung der Regression ergibt sich

$$k_1 = (-2.13 \pm 0.08) \cdot 10^{-6} \text{ nm}^{-1}$$

und daraus folgt

$$d = \frac{1}{2 \cdot n_p \cdot k} \pm \left(\frac{\Delta n_p}{2 \cdot n_p^2 \cdot k} + \frac{\Delta k}{2 \cdot n_p \cdot k^2} \right)$$

Die Regression kann grafisch verdeutlicht werden

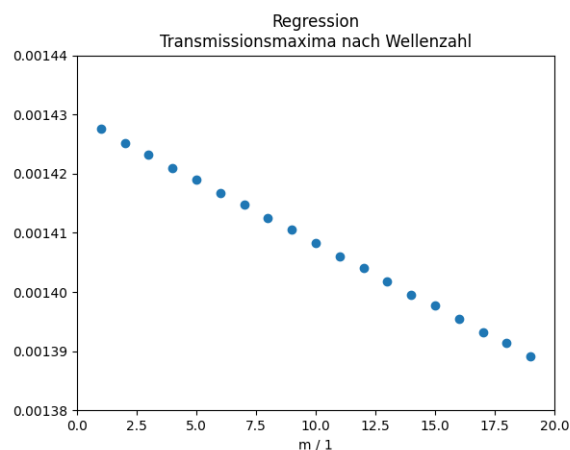


Abbildung 13: Regression: Zusammenhang zwischen Maxima und Wellenzahl. Auf der x-Achse ist jeweils die Ordnung des Maximums aufgetragen, während auf der y-Achse die Wellenzahl in der Einheit μm^{-1} aufgetragen ist.

Die Dicke der Glasplatte beträgt letztendlich

$$d_1 = (0.15 \pm 0.01) \text{ mm}$$

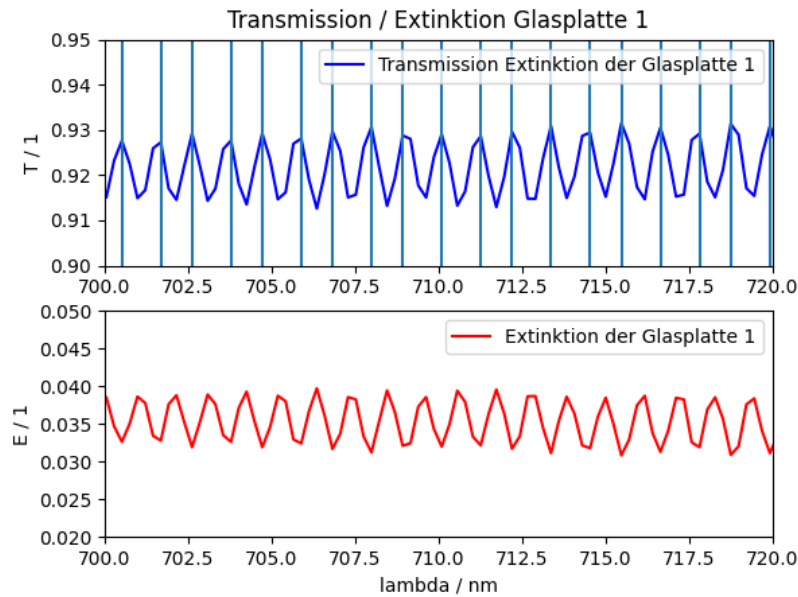


Abbildung 14: Transmission und Extinktion bei Untersuchung von Glasplatte 1. Die Maxima der Transmission sind mit einer vertikalen Linie gekennzeichnet.

7 Diskussion

Man kann in den aufgenommenen Spektren ein starkes Rauschen erkennen. Dies kann sich einerseits durch die Änderung von Lichtverhältnissen im Raum ergeben, andererseits durch leichte Unreinheiten auf den Linsen und Oberflächen der optischen Geräte.

Die Additivität von Extinktionen lässt sich auch mathematisch begründen. Sei I_0 die Intensität zu Beginn, I_1 nach Durchgang durch Filter 1 und I_2 die Intensität nach Durchgang durch Filter 2, dann gilt

$$E_1 + E_2 = \log\left(\frac{I_0}{I_1}\right) + \log\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = \log\left(\frac{I_0}{I_1} \cdot \frac{I_1}{I_2}\right) = \log\left(\frac{I_0}{I_2}\right) = E_{1,2}$$

Natürlich weicht die Summe in der Praxis durch das Rauschen etwas ab, aber insbesondere für Wellenlängen ab 600 nm ist eine sehr starke Übereinstimmung zu beobachten. Das Rauschen wird durch die Anwendung des Logarithmus verstärkt. Es ist mathematisch äquivalent die Multiplikativität der Transmissionen zu zeigen. Dies wurde in Grafik 11 gemacht. Hier sieht man deutlich eine stärkere Übereinstimmung.

Natürlich gibt es weder für die Glasplatte, noch für die Methylenblau Lösung einen Literaturwert, da diese individuell sind.

8 Zusammenfassung

Es wurde die Transmission und die Extinktion eines blauen und roten Farbfilters (und deren Kombination) berechnet und veranschaulicht. Man erkennt leicht, dass die Transmission beim blauen Farbfilter zwischen 400 nm und 550 nm größer ist, da sich in diesem Bereich das blaue Farbspektrum befindet. Im Gegensatz dazu ist beim roten Filter die Transmission bei höheren Wellenlängen größer. Die Extinktionen sind bei Wellenlängen unter 600 nm stark rauschend, was wir auf die numerischen Eigenschaften der Logarithmusfunktion zurückführen.

Zusätzlich war die Konzentration einer Methylenblaulösung zu bestimmen. Diese ist

$$c_1 = (2.04 \pm 0.08) \cdot 10^{-6} \text{ mol/Liter}$$

Eine weitere Aufgabe war die Dicke einer gegebenen Glasplatte zu bestimmen.

$$d_1 = (0.15 \pm 0.01) \text{ mm}$$

Die Ergebnisse bei den Farbfiltern stimmten mit unserem physikalischem Verständnis überein. Für die Dicke der Glasplatte und die Konzentration der Lösung gibt es klarerweise keine Vergleichswerte, da es sich um individuelle Eigenschaften der jeweiligen Probe handelt.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Unterlagen aus Moodle, J. Krenn, G. Paltauf, bereitgestellt von der KF Universität Graz.
- [2] W. Demtröder: *Experimentalphysik 2 - Elektrizität und Optik*, 7. Auflage, 2017.
- [3] <https://de.wikipedia.org/wiki/Monochromator>, zugegriffen am 21.11.2020.