

Gruppe Nr. _____

Kurs: **Mo1** ~~**Mo2**~~ **Mi3**
zutreffendes bitte ankreuzen

WS 23/24

aktuelles Semester angeben

Versuch: _____

Namen: Carl Jarschke ()

Jona Umlauf ()

Assistent: Josephine Spiegelberg

durchgeführt am: 22.1.2024

Protokollabgabe am: 5.2.2024

vom Betreuer auszufüllen

Note gesamt

Anerkannt: _____

(Datum Unterschrift)

Datum Rückgabe: _____

Bemerkung:

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung (entnommen aus [Rad])	3
1 Ziel des Versuchs, Theoretische Grundlagen	6
1.1 Streuende Medien	6
1.1.1 Absorption	6
1.1.2 Streuung	6
1.1.3 Lambert-Beersches Gesetz	7
1.1.4 Diffusionsgleichung	7
1.1.5 Berechnung konkret für den Versuch	8
1.1.6 Tarnkappe	8
2 Experimenteller Aufbau	9
3 Durchführung	10
3.1 Ballistische Transmissionsmessung	10
3.2 Diffuse Transmissionsmessung	10
3.3 Tarnkappe	10
4 Auswertung, Fehlerrechnung und Diskussion der Messergebnisse	11
4.1 Ballistische Transmissionsmessung	11
4.1.1 Messdaten	11
4.1.2 Abhängigkeit der Messkonzentration	12
4.1.3 Abhängigkeit der Dicke	13
4.2 Diffuse Transmissionsmessung	14
4.2.1 Vergleich zwischen der ballistischen und der diffusen Transmissionsmessung	16
4.3 Tarnkappe	17
Quellen	20

4 Durchführung

4.1 Aufgabe 1: Alltägliche Gegenstände

Im ersten Versuchsteil sollen einige Gegenstände aus dem Alltag untersucht werden. Dies kann beispielsweise Salz, Zucker, Schnee, eine Milch-Wasser-Mischung, ein Milchglas oder Ähnliches sein. Verwendet wird der erste Versuchsaufbau mit Kamera und Monitor, vor den die jeweilige Probe in einem geeigneten Gefäß gestellt wird. Es dürfen gerne auch selbst Gegenstände mitgebracht und untersucht werden. Öffnen Sie das Haupt- und Anzeigeprogramm und starten Sie das Hauptprogramm. Stellen Sie im ersten Schritt mithilfe der Bedienelemente “X”, “Y”, “Breite” und “Höhe” Größe und Position des Rechtecks, das im Anzeigeprogramm als Lichtquelle dient ein, sodass die zu untersuchende Probe vollständig ausgeleuchtet wird. Prüfen Sie nun die Grafiken neben dem Vorschau-Bild, um sicherzugehen, dass keiner der Farbkanäle übersättigt ist. Gleichen Sie dies gegebenenfalls mithilfe der Belichtungszeit aus. Nehmen Sie nun durch Betätigen der Bedienelemente “Bild aufnehmen” und “HG-Bild aufnehmen” ein Bild der Probe und eine Hintergrundmessung auf. Denken Sie im Voraus daran die Anzahl der Bilder einzustellen und bei der Aufnahme des Hintergrundbildes den Kameradeckel zu schließen. Führen Sie anschließend einen Weißabgleich durch und nehmen Sie erneut ein Bild der Probe auf. Schneiden Sie dieses Bild durch klicken auf die Schaltfläche “Bereich auswählen” so zu, dass nur noch die Probe zu sehen ist und speichern Sie es ab. Führen Sie den Versuch mit den anderen, selbst mitgebrachten Proben genauso durch.

4.2 Aufgabe 2: Ballistische Transmissionsmessung

In diesem Versuchsteil wird der zweite Versuchsaufbau mit dem Laser verwendet. Im gesamten Versuch muss daher eine Schutzbrille getragen werden. Im ersten Schritt dieses Versuchs wird der Laserstrahl justiert. Hierzu müssen die beiden Blenden ganz geschlossen werden und der Laserstrahl sollte nach der Justage direkt in den Detektor treffen. Die Justage sollte zudem bei ausgeschaltetem Detektor stattfinden, da dieser sonst durchbrennen kann. Zusätzlich zum Versuchsaufbau stehen in diesem Versuch noch drei Filter zur Verfügung, durch die 10%, 1% und 0,1% der Strahlung transmittieren. Achten Sie darauf, dass zum Schutz des Detektors, während des Betriebs wenn nötig immer ein Filter im Strahlengang steht. Im Laufe des Versuchs, bei Verwendung der Proben können die Filter natürlich gegebenenfalls entfernt werden.

Öffnen und starten Sie für den Versuch das Programm TimeHarp und prüfen Sie anhand der Anzeigen “Sync” und “Input”, ob Signale von Laser und Detektor ankommen. Wichtig ist, dass die Anzahl der Photonen, die im Anzeigefeld “Input” zu sehen ist im Bereich von $1 \cdot 10^4$ bis $5 \cdot 10^6$ liegt. Ansonsten ist der Einfluss der Totzeit und damit die Dunkelzählrate des Detektors auf die Messergebnisse bzw. die Gefahr des Durchbrennens zu groß. Achten Sie hierbei auf das Warnsignal rechts unten. Regeln Sie die Anzeige “Input”, indem Sie die Intensität des Lasers verändern. Stellen Sie nun die erste Probe auf den Probekhalter in den Strahlengang und führen Sie eine Messung durch. Notieren Sie sich die Teilchenkonzentration der Probe, die Zählrate der Photonen die am Detektor ankommen, also die ballistisch transmittierte Leistung P und die Filter, die Sie für die Messung verwendet haben. Führen Sie dies nun bei allen vorhandenen quadratischen Proben, mit Konzentrationen von 0,0 mg/ml bis 0,3 mg/ml durch. Die Probe mit einer Konzentration von 0,0 mg/ml dient als Referenzprobe für die transmittierte Leistung ohne Streuer. Achten Sie im Laufe des gesamten Versuchs darauf, dass die Kiste während der

Messung immer geschlossen ist, um ein möglichst präzises Ergebnis zu erhalten.

Im zweiten Teil dieser Aufgabe soll die ballistisch transmittierte Leistung in Abhängigkeit der Dicke der Probe gemessen werden. Hierzu existieren drei Proben mit der Konzentration 0,1 mg/ml, von denen zuerst eine, dann zwei und anschließend drei direkt hintereinander in den Strahlengang gebracht werden sollen. Notieren Sie sich jeweils die kombinierte Dicke, die dazugehörige Anzahl an Photonen, die den Detektor erreichen und die Filter, die Sie verwendet haben.

4.3 Aufgabe 3: Diffuse Transmissionsmessung

Für die diffuse Transmissionsmessung wird der erste Teil des Versuchsaufbaus verwendet. Hier sollen Proben mit verschiedenen Partikelkonzentrationen untersucht werden. Die Konzentrationen an Titandioxidpartikeln der einzelnen Proben reichen dabei von 0.0 mg/ml bis 0.3 mg/ml. Diese Proben sollen mithilfe des Monitors beleuchtet und untersucht werden. Prüfen Sie dazu im ersten Schritt, ob die Kamera in Betrieb ist und öffnen Sie anschließend die LabVIEW Programme mit den Namen "Hauptprogramm" und "Anzeigeprogramm". Starten Sie nun das Hauptprogramm. Das Anzeigeprogramm wird durch Starten des Hauptprogramms automatisch aufgerufen. Sehen Sie nach ob im Vorschau-Fenster das gewünschte Bild angezeigt wird und prüfen Sie, ob keiner der drei Farbkanäle übersättigt ist. Beheben Sie dies gegebenenfalls mithilfe der Belichtungszeit. Nun stellen Sie die Größe und Position des weißen Rechtecks, das im Anzeigeprogramm als Lichtquelle dient, mithilfe der Bedienelemente "X", "Y", "Breite" und "Höhe" ein, sodass es der Größe einer Probe entspricht. Nun beginnt der eigentliche Versuch. Stellen Sie die erste Probe vor das weiße Quadrat, fokussieren Sie die Kamera und nehmen Sie anschließend ein Bild und ein Hintergrundbild auf. Achten Sie dabei darauf, dass bei der Aufnahme des Hintergrundbildes der Objektivdeckel geschlossen ist. Machen Sie nun einen Weißabgleich und nehmen Sie ein weiteres Mal die beiden Bilder auf. Wählen Sie daraufhin einen Bereich des Bildes aus und speichern Sie das Bild ab. Notieren Sie sich die Belichtungszeit und fahren Sie nun mit den anderen Proben genauso fort.

4.4 Aufgabe 4: Tarnkappen

Im letzten Versuchsteil soll die zuvor beschriebene Theorie über Tarnkappen in trüben Medien experimentell nachgewiesen werden. Hierzu existieren fünf verschiedene Proben, die wie die in den vorherigen Aufgaben verwendeten Proben aus PDMS mit Titandioxidpartikeln bestehen. Die Partikelkonzentrationen können sich je nach Probe unterscheiden. Eine der Proben dient als Referenz und besteht nur aus dem Umgebungsmaterial, eine weitere besteht aus dem Umgebungsmaterial und einem Metallzylinder als Kern. In den drei übrigen Proben ist jeweils eine Tarnkappe, bestehend aus Kern und Schale eingebaut, wobei die Umgebungen der Proben unterschiedliche Titandioxidkonzentrationen und damit unterschiedliche Diffusivitäten aufweisen. Diese fünf Proben sollen nun mithilfe des ersten Versuchsaufbaus mit Kamera und Monitor genauer untersucht werden. Gehen Sie hierzu wie in Aufgabe 3 vor: Stellen Sie zuerst die Größe des weißen Rechtecks, das im Anzeigeprogramm als Lichtquelle dient ein, sodass es die Proben vollständig ausfüllt. Stellen Sie, nach Positionierung der Probe vor dem Monitor, die Belichtungszeit passend ein und nehmen Sie anschließend ein Bild und ein Hintergrundbild auf. Machen Sie einen Weißabgleich und wiederholen Sie die Messung. Stellen Sie nun einen Bereich ein, der ausgeschnitten werden soll und denken Sie daran Ihre Aufnahme zu speichern. Gehen Sie

nun genauso mit den anderen Proben vor und notieren Sie sich die jeweils eingestellte Belichtungszeit.

1 Ziel des Versuchs, Theoretische Grundlagen

Optische Tarnkappen dienen dazu etwas zu verbergen, indem sie Licht um das Objekt herum so beugen, dass es scheint, als wäre es nicht dort.

Aber da diese in nicht diffusen Medien schwer zu realisieren sind, weil dies bedeuten würde die Vakuumlichtgeschwindigkeit zu brechen, beschäftigt sich der Versuch damit eine Tarnkappe in einem diffusen Medium zu untersuchen in denen die Lichtgeschwindigkeit geringer ist.

1.1 Streuende Medien

Wenn Licht sich durch ein Medium bewegt, wird es an darin verteilten Partikeln gestreut, von diesen absorbiert, oder wechselwirkt auf andere Art mit ihnen.

In diesem Versuch werden nur die Streu und Absorptionsprozesse berücksichtigt und es wird davon ausgegangen, dass alle anderen Wechselwirkungen zu Vernachlässigen sind.

Zudem werden die Annahmen getroffen, dass die Absorption sehr gering ist, es eine hohe Streuwahrscheinlichkeit gibt und das das Medium groß genug ist, um als difuses Medium zu gelten. Dies hat zur Folge, dass die Strahlungstransport Gleichung, die die Absorption und Reflexion beschreibt zur Diffusionsgleichung vereinfacht werden kann

1.1.1 Absorption

Strahlung kann in einem Medium an den Molekülen des Hintergrundmediums oder an darin vorhandenen Streuteilchen absorbiert werden.

Im Versuch wird die Annahmen getroffen, dass die Absorption durch das Hintergrundmedium größer ist. Weshalb das Verhältnis der absorbierten zur einfallenden Strahlungsleistung pro Strecke, der Absorptionskoeffizient μ_a , über die Summation der verschiedenen Molekül Typen des absorbierenden Materials ermittelt werden kann.

Es gilt:

$$\mu_a = \sum_i N_i C_i \quad (1.1)$$

Wobei C_i der Absorptionsquerschnitt des Molekültyps und N_i die Anzahl dieser Moleküle pro Einheitsvolumen bezeichnet.

1.1.2 Streuung

Analog gibt es für die Streuung den Streukoeffizienten μ_s

Es wird angenommen, dass die Streuung am Hintergrundmedium zu vernachlässigen ist und das alle Streuer gleich groß sind, was zu

$$\mu_s = N C_s \quad (1.2)$$

führt, wobei N die Teilchenkonzentration ist und C_s der Streuquerschnitt.

Außerdem gibt es die mittlere freie Streulänge l_s die beschreibt wie Häufig ein Streuprozess in einem Medium auftritt.

$$l_s = \frac{1}{\mu_s} \quad (1.3)$$

Im Versuch wird ein Medium mit isotroper Streufunktion $p(s, s') = p(\theta)$ angenommen. Wobei die Streufunktion die Wahrscheinlichkeit für ein Photon, dass in s Richtung, läuft beschreibt um den Winkel θ abgelenkt zu werden und in s' Richtung zu laufen.

Mit dem Anisotropie Faktor

$$g = \langle \cos\theta \rangle \quad (1.4)$$

lässt sich die freie Transportweglänge (mittlere Strecke zwischen zwei Streuungen) bestimmen.

$$l_t = \frac{l_s}{1 - g} \quad (1.5)$$

1.1.3 Lambert-Beersches Gesetz

Sei $\mu_{ex} = \mu_a + \mu_s$

so gibt für die Abnahme der Strahlungsleistung beim Durchlaufen eines Mediums mit Dicke z eines einfallenden Lichtstrahls mit Strahlungsleistung P_0 , laut L-B-G:

$$P(z) = P_0 \exp\left(-\int_0^z \mu_{ex}(z') dz'\right) \quad (1.6)$$

Unter der Bedingung eines homogenen Mediums mit $\mu_a \ll \mu_s$ ergibt sich dieses zu.

$$P(z) = P_0 \exp\left[-\frac{z}{l_s}\right] \quad (1.7)$$

1.1.4 Diffusionsgleichung

Über die Annahme, dass nur zeitungabhängige Zustände relevant sind ergibt sich.

$$\vec{J}(\vec{x}) = D \nabla \phi(\vec{x}) \quad (1.8)$$

mit dem Fluss

$$\vec{J}(\vec{x}) = \int_{4\pi} I(\vec{x}, s) s d\Omega \quad (1.9)$$

und der Fluenz

$$\phi(\vec{x}) = \int_{4\pi} I(\vec{x}, s) d\Omega \quad (1.10)$$

wobei $I(\vec{x}, s)$ die Strahldichte beschreibt.

Mit der Annahme, dass die Streuung die Absorption überwiegt, lässt sich die Strahlungstransportgleichung vereinfachen und es ergibt sich:

$$D = \frac{v l_t}{3} \quad (1.11)$$

$$v = \frac{c_0}{n} \quad (1.12)$$

Dadurch lässt sich die Diffusionsgleichung folgern

$$-\vec{\nabla} \cdot (D \vec{\nabla} \phi(\vec{x}) + v \mu_a \phi(\vec{x})) = v \int_{4\pi} \epsilon(\vec{x}, x) d\theta \quad (1.13)$$

wobei es sich bei $\epsilon(\vec{x}, x)$ um zeitabhängige Quellen handelt.

1.1.5 Berechnung konkret für den Versuch

Die Lösung der Diffusionsgleichung für ein in x,y Richtung unendlich ausgebreitetes Material mit Dicke L, welches von einer Seite konstant mit einer gleichbleibenden Menge an Photonen beleuchtet wird, führt über die Transmission und Reflexion dieser Photonen, da gilt:

$$|\vec{J}\vec{n}| = K\phi \quad (1.14)$$

$$K = \frac{c_0}{2An_1} \quad (1.15)$$

woraus folgt, dass

$$T_{diff} = \frac{1}{2 + \frac{KL}{D}} \quad (1.16)$$

wobei K die Photonenverlustgeschwindigkeit, und T_{diff} die diffuse Transmission unter vernachlässigung der Streuung ist.

Im Experiment wird PDMS benutzt, welches einen Brechungsindex von $n_1 = 1.4$ hat.

1.1.6 Tarnkappe

Um einen Gegenstand zu verstecken muss das Licht, welches auf ihn fällt um ihn herum geleitet werden. Für eine Tarnkappe deren Ziel es ist nicht nur eine Wellenlänge, sondern das ganze sichtbare Lichtspektrum abzudecken, was dazu führt, dass die Dispersion möglichst gering sein muss (eigentlich 0), ist dies im Vakuum nicht möglich, da es bedeuten würde, dass Phasen und Gruppengeschwindigkeit größer wären als die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

Bei durchlaufen eines diffusen Mediums ist allerdings die Lichtgeschwindigkeit im Medium aufgrund der Mehrfachstreuung im Medium kleiner als c_0 weshalb eine breitbändige Tarnkappe in diesem Medium möglich ist.

Dies funktioniert dadurch, dass die Tarnkappe, die um den zu verbergenden Kern gelegt wird, eine geringere Streukonzentration besitzt und so die verursachte Verringerung der Strahlenkonzentration durch den Kern ausgleicht. Ihn also unsichtbar macht. Das funktioniert allerdings nur wenn Diffusität von Schale und Kern folgendes Verhältnis besitzen:

$$\frac{D_S}{D_U} = \frac{R_S^2 + R_K^2}{R_S^2 - R_K^2} \quad (1.17)$$

wobei R_S der Innenradius der Tarnkappe ist und R_K der Außenradius, wie in Abbildung 1.1

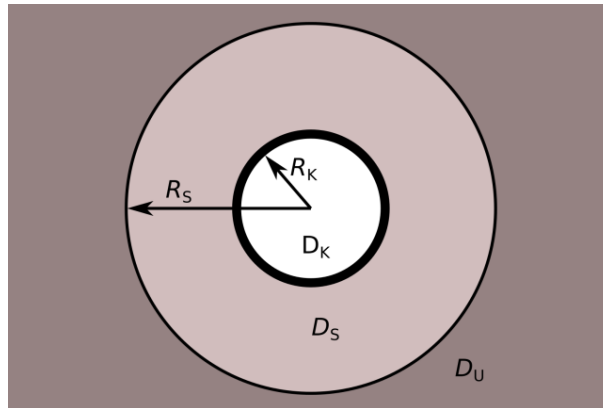


Abbildung 1.1: Zylindertarnkappe mit Kerndiffusität $D_K = 0$, Schalendiffusität D_S und Mediumsdiffusität D_U entnommen aus [Rad]

2 Experimenteller Aufbau

Der Aufbau besteht aus zwei Teilen um einmal die diffuse Transmission und einmal die Ballistische (eine bestimmte Wellenlänge) Transmission zu messen.

Dazu wird jeweils eine Probe mit Licht bestrahlt entweder im ersten Versuchsteil mit weißem Licht, oder im zweiten mit dem Licht eines Lasers, der über zwei Umlenkspiegel auf die Probe gelenkt wird und anschließend das durch die Probe fallende Licht mithilfe von einer Kamera, bzw. zwei Blenden und einem Detektor gemessen. Der Gesamtaufbau ist in Abbildung 2.1 zu sehen.

Kamera und Detektor sind mit einem Computer verbunden, mithilfe dessen die Versuchsteile ausgewertet werden können.

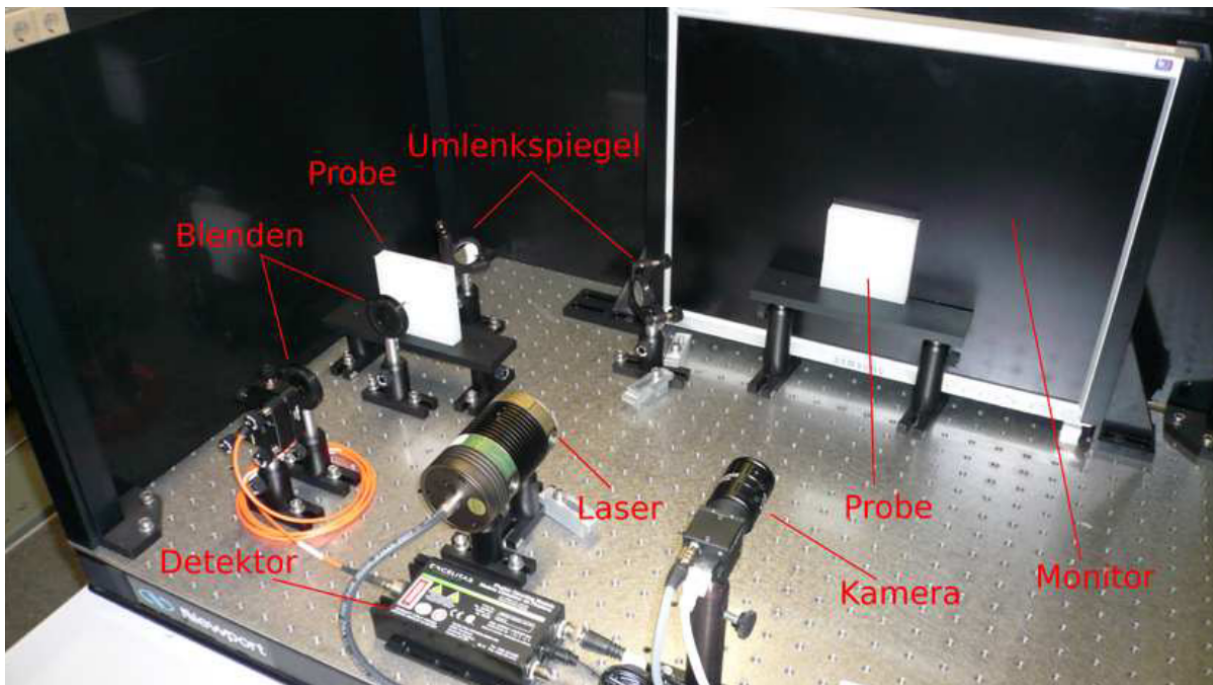


Abbildung 2.1: Versuchsaufbau entnommen aus[Rad]

3 Durchführung

3.1 Ballistische Transmissionsmessung

Die Ballistische Transmissionsmessung beschäftigt sich mit zwei Parametern. Der Konzentration der Titandioxidstreuteilchen und der Dicke der PDMS Probe.

Dazu werden die verschiedenen Proben in den zweiten Versuchsaufbau eingebaut, wobei dieser zuerst justiert wird.

Außerdem werden während des Versuches drei Filter verwendet um den Detektor zu schützen, welche jeweils 10 %, 1% oder 0.1% der Strahlung transmittieren.

Im Programm TimeHarp wird zuerst überprüft ob die Signale von Laser und Detektor ankommen, und ob der Input im Bereich von $1 \cdot 10^4$ bis $5 \cdot 10^6$ liegen. Ist dies nicht der Fall wird die Intensität des Lasers angepasst.

Bei der Durchführung der Messung werden folgende Größen Notiert:

- Zählraten der Photonen, die den Detektor treffen (ballistisch Transmittierte Leistung P)
- verwendete Filter
- Teilchenkonzentration der Probe (0.0 mg/ml-0.3 mg/ml (Versuchsteil 1))
- oder kombinierte Dicke der Probe (Versuchsteil 2)

Dabei ist im zweiten Versuchsteil die Teilchenkonzentration konstant bei 0.1 mg/ml.

3.2 Diffuse Transmissionsmessung

Verschiedene Gegenstände werden in den ersten Versuchsaufbau gestellt.

Im Computerprogramm wird die Belichtung so eingestellt, dass die Probe vollständig ausgeleuchtet ist und mithilfe der Belichtungszeit wird eine Übersättigung der einzelnen Farbkanäle ausgeschlossen

Anschließend wird ein Bild der Probe und eines des Hintergrundes aufgenommen.

Wichtig ist dabei davor die Anzahl der Bilder einzustellen und den Kameradeckel vor der Aufnahme des Hintergrundbildes zu schließen.

Der nächste Schritt besteht in einem Weißabgleich, der mithilfe des Programmes ausgeführt wird. Anschließend wird ein weiteres Bild der Probe aufgenommen und so zugeschnitten, dass lediglich die Probe noch zu sehen ist und das Bild abgespeichert.

Außerdem wird die Belichtungszeit notiert.

3.3 Tarnkappe

Wieder wird der erste Versuchsteil genutzt und der Versuch wie in Aufgabe 3 durchgeführt.

Bei den Proben handelt es sich diesmal um eine Referenzprobe bestehend aus Umgebungsmaterial, einer weiteren aus Umgebungsmaterial und einem Metallzylinderkern und drei Tarnkappen mit Kern, deren Proben verschiedene Umgebungskonzentrationen an Titandioxid aufweisen (also verschiedene Diffusitäten).

4 Auswertung, Fehlerrechnung und Diskussion der Messergebnisse

4.1 Ballistische Transmissionsmessung

4.1.1 Messdaten

Im folgenden sind die aufgenommenen Messdaten tabellarisch dargestellt. Es werden die Input-Daten zur Auswertung verwendet und über die selbe Messung gemittelt. Als Fehler werden die Standardabweichungen der gleichartigen Messungen verwendet und über gauß'sche Fehlerfortpflanzung entwickelt.

Tabelle 4.1: Messdaten: Ballistische Transmissionsmessung - Massenkonzentration

Material	Filter	Input 1	Total 1	Input 2	Total 2	Input 3	Total 3
0	0,1 & 0,01 & 0,001	2.56e+06	1.27e+06	2.75e+06	1.36e+06	1.85e+06	9.14e+05
0,1a	0,1 & 0,001	3.40e+06	1.68e+06	3.81e+06	1.89e+06	3.84e+06	1.90e+06
0,1b	0,1 & 0,001	2.23e+06	1.10e+06	1.73e+06	8.55e+05	1.45e+06	6.65e+05
0,1c	0,1 & 0,001	3.44e+06	1.70e+06	3.32e+06	1.64e+06	2.48e+06	1.24e+06
0,15	0,1 & 0,01	1.58e+06	7.85e+05	2.24e+06	1.11e+06	2.14e+06	1.06e+06
0,2	0,1 & 0,01	1.24e+06	6.11e+05	8.80e+05	4.36e+05	9.11e+05	4.50e+05
0,25	0,1	8.97e+05	4.44e+05	1.06e+06	5.25e+05	1.54e+06	7.65e+05
0,3	0	3.69e+06	1.83e+06	3.34e+06	1.65e+06	3.36e+06	1.67e+06

Tabelle 4.2: Messdaten: Ballistische Transmissionsmessung - Dicke

Material	Filter	Input 1	Total 1	Input 2	Total 2	Input 3	Total 3
0,1a	0,1 & 0,001	3.40e+06	1.68e+06	3.81e+06	1.89e+06	3.84e+06	1.90e+06
0,1b	0,1 & 0,001	2.23e+06	1.10e+06	1.73e+06	8.55e+05	1.45e+06	6.65e+05
0,1c	0,1 & 0,001	3.44e+06	1.70e+06	3.32e+06	1.64e+06	2.48e+06	1.24e+06
0,1a & 0,1b	0,01	1.30e+06	6.42e+05	2.47e+06	1.22e+06	2.23e+06	1.11e+06
0,1a & 0,1c	0,01	4.73e+06	2.34e+06	3.68e+06	1.82e+06	4.94e+06	2.45e+06
0,1b & 0,1c	0,01	1.59e+06	7.86e+05	1.74e+06	8.55e+05	2.16e+06	1.07e+06
0,1a & 0,1b & 0,01c	0	4.44e+06	2.22e+06	4.58e+06	2.24e+06	9.44e+05	4.67e+05

4.1.2 Abhängigkeit der Messkonzentration

Nach Gleichung 1.7 gilt für die balistische Transmissionsmessung:

$$\frac{P}{P_0} = e^{-\mu_s z} \quad (4.1)$$

Mit $z = a \cdot \beta \cdot d$, wobei β die Massenkonzentration ist und d die Dicke der Probe, lässt sich über die mit $\beta = 0$ normierten Leistungen logarithmisch auftragen und den Fit-Wert α bestimmen.

$$\log\left(\frac{P}{P_0}\right) = -m \cdot \beta + b \quad (4.2)$$

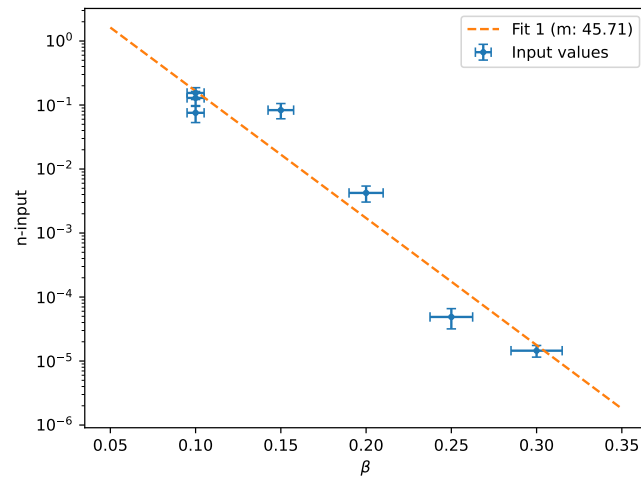


Abbildung 4.1: Fit 1

Mit dem ermittelten Parameter $m = 3.05 \pm 0.18 \frac{\text{ml}}{\text{mg}}$ lassen sich nun a , l_s , l_t und D folgendermaßen bestimmen:

$$a = \frac{m}{d} = 3.05 \pm 0.18 \frac{\text{ml}}{\text{mg} \cdot \text{mm}} \quad (4.3)$$

$$l_s = \frac{1}{a\beta} \quad (4.4)$$

$$l_t = \frac{l_s}{1 - g} \quad (4.5)$$

$$D = \frac{c_0 \cdot l_t}{3n} \quad (4.6)$$

Somit ergibt sich:

Tabelle 4.3: Ermittelte Diffusionsparameter bei Veränderung der Massenkonzentration

β in $\frac{\text{mg}}{\text{ml}}$	l_s in mm	l_t in mm	D in $10^8 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$
0.1	3.28 ± 0.19	6.9 ± 0.4	4.91 ± 0.29
0.15	2.19 ± 0.13	4.59 ± 0.27	3.27 ± 0.19
0.2	1.64 ± 0.10	3.44 ± 0.20	2.46 ± 0.15
0.25	1.31 ± 0.08	2.75 ± 0.16	1.96 ± 0.12
0.3	1.09 ± 0.06	2.29 ± 0.14	1.64 ± 0.10

4.1.3 Abhängigkeit der Dicke

Analog zur Auswertung mit Variation der Massenkonzentration wird nun für eine Massenkonzentration von $\beta = 0.1 \frac{\text{mg}}{\text{ml}}$ die Dicke variiert und die Leistungsabnahme beobachtet.

$$\frac{P}{P_0} = e^{-md} \quad (4.7)$$

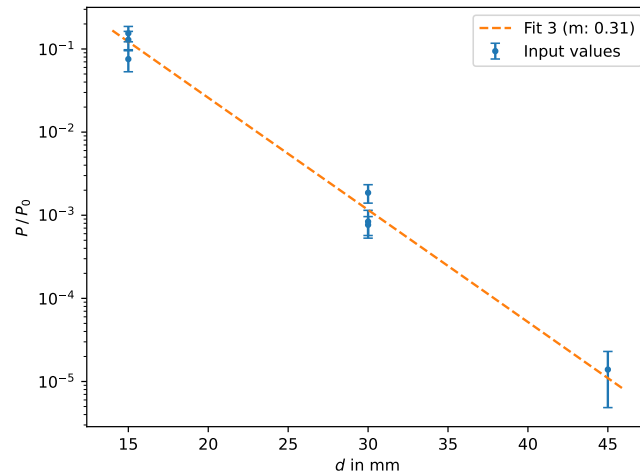


Abbildung 4.2: Fit3 - Normierte Leistung in Abhängigkeit von der Dicke

Mit dem ermittelten Parameter aus Fit 3 in Abbildung 4.2 $m = 0.311 \pm 0.013 \frac{1}{\text{mm}}$ lässt sich nun wieder a bestimmen um eine Aussage über $a \cdot \beta \cdot d$ zu treffen.

$$a = \frac{m}{\beta} = 3.11 \pm 0.13 \frac{\text{ml}}{\text{mg} \cdot \text{mm}} \quad (4.8)$$

Da sich die Werte für a aus der Variation der Massenkonzentration und Variation der Dicke nur um 2% unterscheiden sind die Ergebnisse aus Tabelle 4.3 auch hier anzunehmen. Als Fazit lässt sich sagen, dass, egal ob der Laserstrahl durch dünne Schicht mit höheren Massenkonzentration oder dickerer Schicht mit kleinerer Massenkonzentration, die Leistungsabnahme exponentiell mit dem Produkt aus Massenkonzentration und Schichtdicke $\beta \cdot d$ skaliert.

4.2 Diffuse Transmissionsmessung

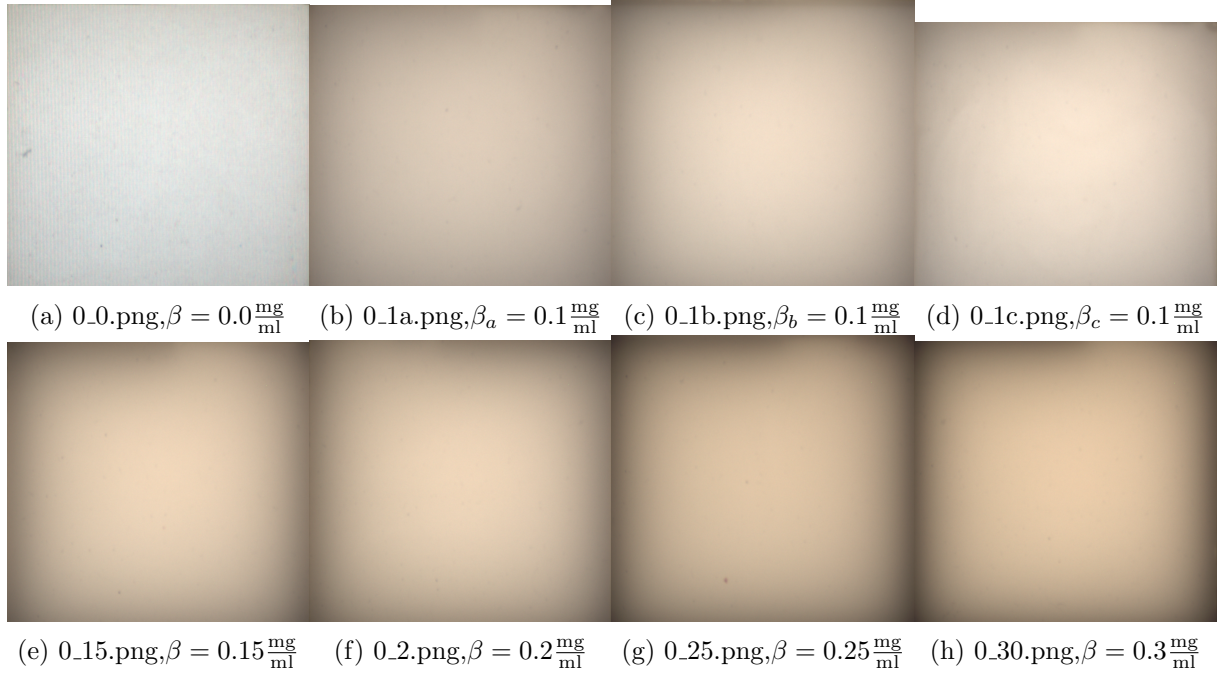


Abbildung 4.3: Aufnahme der Proben

In diesem Teil wird die Abnahme der normierten Helligkeit bestimmt. Um die absolute Helligkeit zu bestimmen wurde mithilfe von Python-*Image* von *PIL* die RGB-Werte der Pixel ermittelt und addiert. Um die Helligkeit des Bildes zu bestimmen wurde über den relevanten Bereich die Helligkeitswerte gemittelt. Zusätzlich muss diese Helligkeit in das Verhältnis mit der Belichtungszeit gebracht werden und mit der $\beta = 0.0 \frac{\text{mg}}{\text{ml}}$ Probe als Referenz normiert werden. Somit ergab sich der Quotient $\frac{H}{H_0}$ und somit T_{Diff} .

$$T_{Diff} = \frac{H}{H_0} = \frac{1}{2 + \frac{K \cdot L}{D}} = \frac{1}{2 + \frac{K \cdot L \cdot \beta}{D \cdot \beta}} \quad (4.9)$$

Hierbei ist L die Dicke der Probe und K die Photonenverlustgeschwindigkeit

$$K = \frac{v}{a \cdot A}. \quad (4.10)$$

Tabelle 4.4: Belichtungszeiten und relative Helligkeiten

Bild	Belichtungszeit in μs	T_{Diff}
0.3.png	36161	0.1108
0.25.png	30808	0.1258
0.2.png	26125	0.1644
0.15.png	26125	0.1659
0.1c.png	21441	0.2325
0.1b.png	21441	0.2155
0.1a.png	18096	0.2426
0.0.png	5382.99	-

Um die Diffusivität D zu berechnen werden die Daten Aufgetragen und gefittet mittels:

$$\frac{H(\beta)}{H_0} = \frac{1}{2 + k \cdot \beta} \quad (4.11)$$

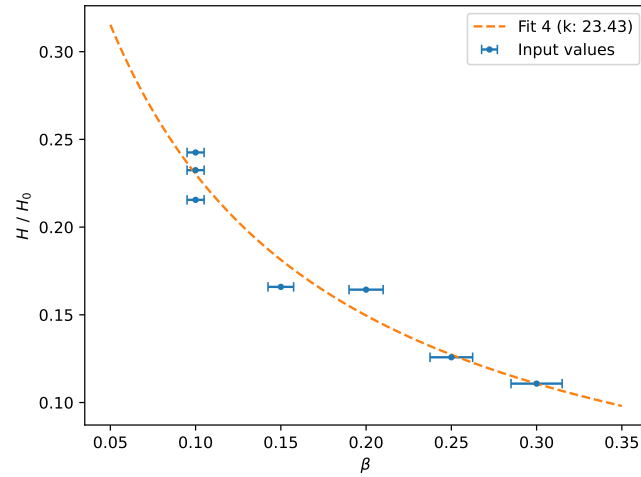


Abbildung 4.4: Fit 4 - relative Helligkeit der Aufnahmen über Messenkonzentration

Hierbei gilt:

$$k = \frac{K \cdot L}{D \cdot \beta} = 23.427 \pm 0.441 \frac{\text{ml}}{\text{mg}} \quad (4.12)$$

Daraus lässt sich D bestimmen mit

$$D = \frac{K \cdot L}{k \cdot \beta} \quad (4.13)$$

Tabelle 4.5: Ermittelte Diffusitäten

β in $\frac{\text{mg}}{\text{ml}}$	D in $10^8 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$
0.1	2.32 ± 0.12
0.15	1.55 ± 0.08
0.2	1.16 ± 0.06
0.25	0.93 ± 0.05
0.3	0.77 ± 0.04

4.2.1 Vergleich zwischen der ballistischen und der diffusen Transmissionsmessung

In Abbildung 4.5 sind die Diffusitäten der ballistischen und der diffusen Transmissionsmessung grafisch dargestellt. Dabei fällt besonders auf, dass die Diffusitäten der ballistischen Transmissionsmessungen doppelt so groß sind als die der diffusen Transmissionsmessung.

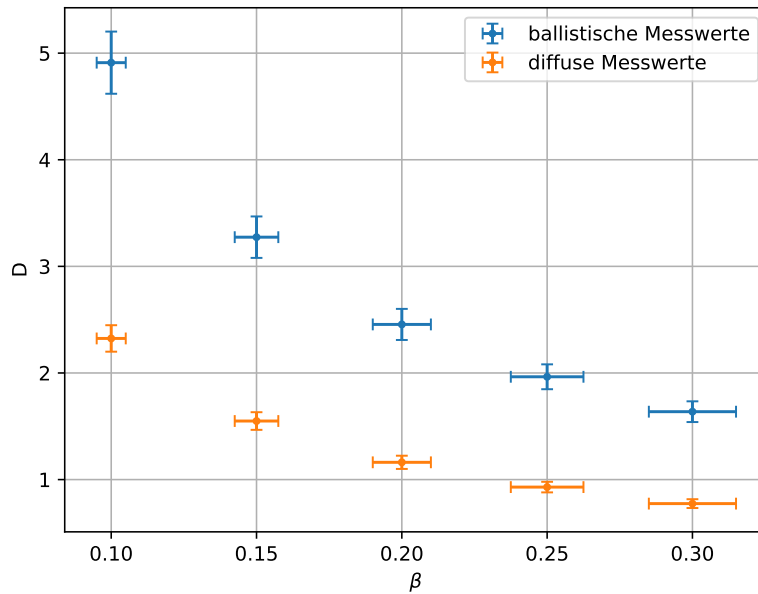


Abbildung 4.5: Vergleich der Diffusitäten

Beide Messungen zeigen, dass die Diffusität mit zunehmender Konzentration abnimmt. Aufgrund von Annäherungen in der theoretischen Herleitung treten natürlich verschiedene Fehler auf. Bei der ballistischen Messung stellt sich weiterhin das Problem ein, dass die Richtung der Photonen durch eine erhöhte Konzentration an Titandioxid beeinflusst wird, da diese häufiger gestreut werden. Wenn die Photonen zu stark abgelenkt werden, entgehen sie der Erfassung durch den Detektor.

4.3 Tarnkappe

Um die Bilder der Tarnkappe auszuwerten wird analog zu der Auswertung der Bilder der diffusen Transmissionsmessung die Helligkeit der Pixel bestimmt. Da für alle Bilder die maximale Belichtungsdauer verwendet wurde muss die Helligkeit nicht auf die Belichtungszeit normiert werden. Um Aussagen über die Funktionalität der Tarnkappe auszusagen werden zehn gleichmäßig verteilte horizontale Pixel-Linien grafisch dargestellt. Hierbei ist 'R' die Referenzprobe, also Material ohne Metallzylinder. 'O' ist die Probe mit Metallzylinder ohne Tarnkappe und 'C_1-3' sind die 3 zu vergleichenden Tarnkappen.

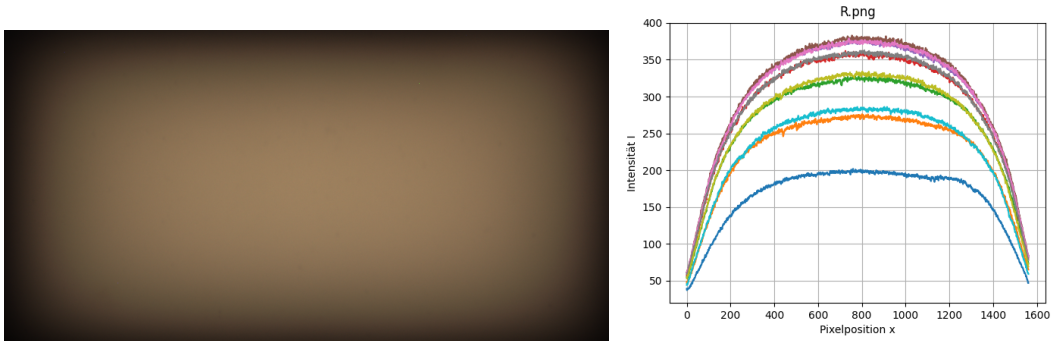


Abbildung 4.6: Referenzprobe

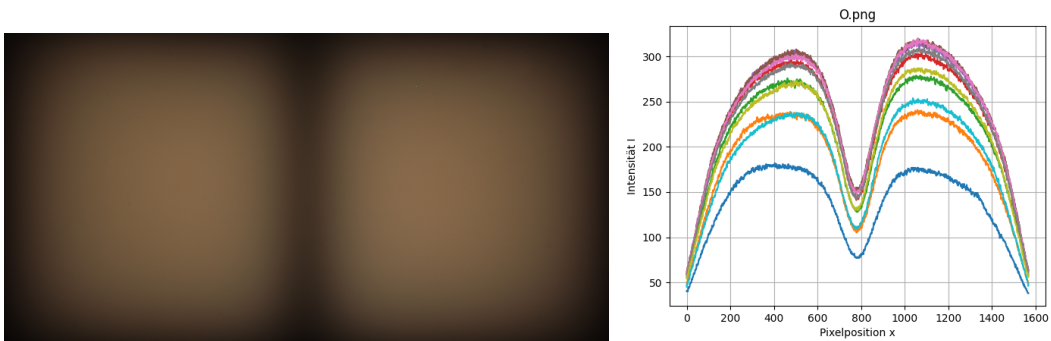


Abbildung 4.7: Material mit Metallzylinder

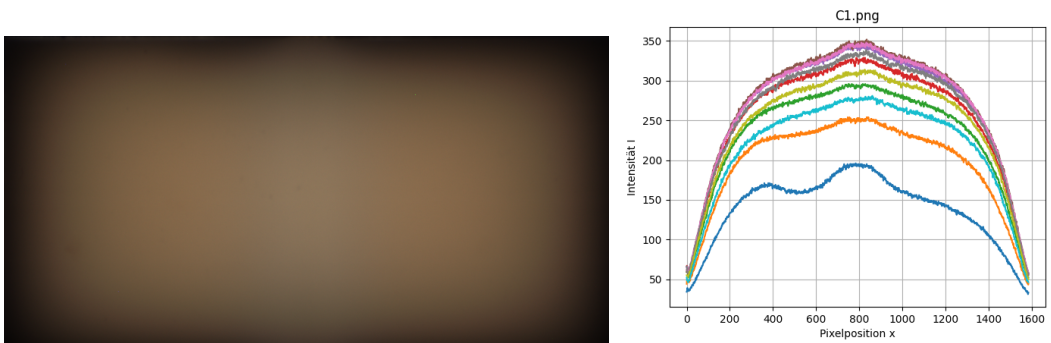


Abbildung 4.8: Probe mit Tarnkappe C1

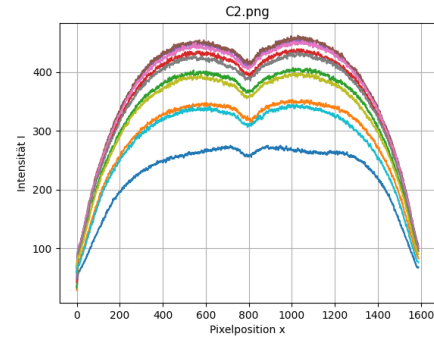


Abbildung 4.9: Probe mit Tarnkappe C2

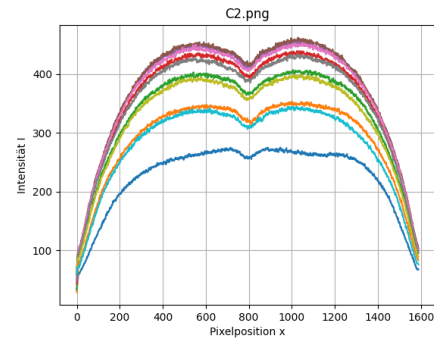
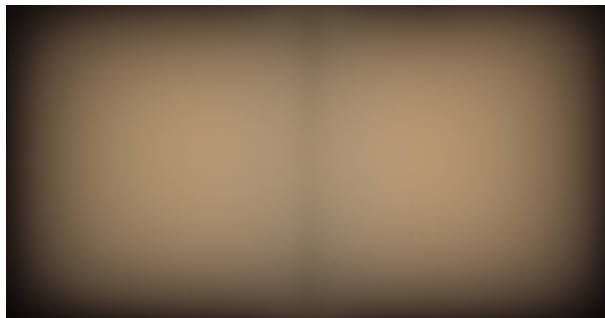


Abbildung 4.10: Probe mit Tarnkappe C3

In den jeweiligen Abbildungen ist auf jeden Fall ein schwarzer Rand zu erkennen, was durch Abnahme der Ausstrahlung der Probe zu erklären ist. Der Helligkeitsverlauf allgemein ist unabhängig von der Höhe, jedoch nimmt die Helligkeit zu den Rändern hin ab. Um die einzelnen Proben besser zu vergleichen, wird jeweils die mittlere Horizontale der Pixel in einer einzigen grafik dargestellt.

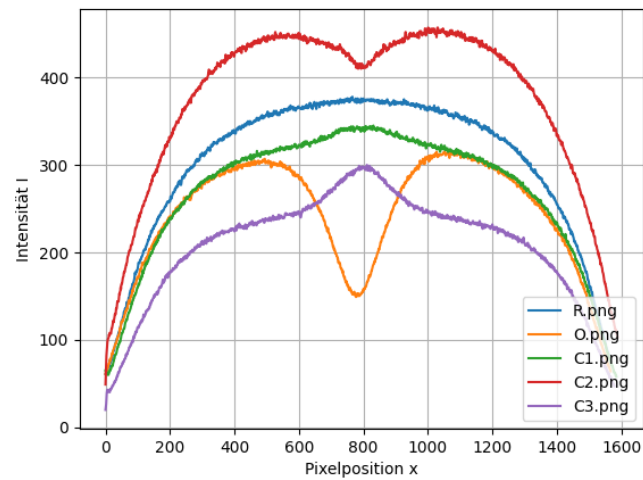


Abbildung 4.11: Vergleich der Proben

Das Ziel einer Tarnkappe besteht darin, sich so ähnlich wie möglich zur Referenzprobe 'R' zu verhalten und möglichst wenig wie die Probe mit dem Hindernis, aber ohne Tarnkappe 'O'. Bei der Probe mit dem Hindernis, aber ohne Tarnkappe, fällt auf, dass diese auf halber Breite des Bildes sehr dunkel wird, da sich dort das Hindernis befindet. Probe "C2" zeigt ebenfalls eine Verdunkelung in diesem Bereich. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Tarnkappe das Licht nicht vollständig um den Kern herum leitet, wodurch ein dunkler Schatten an der Stelle des Kerns zurückbleibt. Die Tarnkappe in der Probe "C3" zeigt ein anderes Verhalten. Dabei wird das Licht nicht nur vollständig um den Kern herum, sondern noch ein wenig weiter gestreut, wodurch hinter dem Kern mehr Licht herauskommt, als es bei einer guten Tarnkappe der Fall sein sollte. Die Tarnkappe in der Probe "C1" verhält sich am ehesten wie die Referenzprobe "R". Zwar ist ein leichter Knick in der Kurve an der Stelle, an der sich der Kern befindet, erkennbar, aber es sind keine lokalen Minima oder Maxima zu erkennen. Obwohl diese Probe dunkler ist als die Referenzprobe, sind die anderen Proben 'C2' und 'C3' deutlich heller bzw. dunkler als die Referenzprobe. Somit ist die Probe "C1" die beste optische Tarnkappe, die in diesem Versuch untersucht wurde.

Zusätzlich soll für die gegebenen Radien $R_1 = 8 \text{ mm}$ und $R_2 = 12 \text{ mm}$ das Optimale Verhältnis der Diffusitäten berechnet werden. Daraus folgt:

$$\frac{D_S}{D_U} = \frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 + R_1^2} = 2.6 \quad (4.14)$$

Im Vergleich mit den Erkenntnissen aus Abbildung 4.11 lässt sich schließen, dass 'C1' somit das beste Verhältnis mit $\frac{D_S}{D_U} \approx 2.6$ besitzt, wobei 'C2' ein Verhältnis von $\frac{D_S}{D_U} < 2.6$ und 'C3' ein Verhältnis von $\frac{D_S}{D_U} > 2.6$ aufweist.

Quellen

[Rad] RADBRUCH, Melanie: *Praktikum Moderne Physik Optische Tarnkappe in diffusiven Medien.* – 18 S.

Die Informationen im Protokoll wurden der Versuchsvorbereitung [Rad] entnommen.