

Szintillierende Fasern

Lukas Bertsch

lukas.bertsch@tu-dortmund.de

Tabea Hacheney

tabea.hacheney@tu-dortmund.de

Tom Troska

tom.troska@tu-dortmund.de

Durchführung: 21.04.2024

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
2	Durchführung	3
2.1	Aufbau	3
2.2	Messprogramm	3
2.2.1	Spektrometermessung	3
2.2.2	Radialsymmetrie	3
2.2.3	Simulation	4
2.2.4	Intensitätsmessung	4
2.2.5	Winkelintensitätsmessung	4
3	Auswertung	4
3.1	Spektrometermessung mit- und ohne Raumlicht	5
3.2	Radialsymmetrie	6
3.3	Simulationsdaten	6
3.4	Absorptionsverhalten	8
3.5	Winkelintensitätsmessung	10
4	Diskussion	11
	Literatur	12

1 Theorie

[1]

2 Durchführung

Zur Analyse der Funktionsweise des SciFi Detektors wird in diesem Versuch eine einzelne szintillierende Faser genauer betrachtet. Der dafür verwendete Versuchsaufbau ist in Unterabschnitt 2.1 beschrieben und das Messprogramm wird in Unterabschnitt 2.2 erklärt.

2.1 Aufbau

Eine szintillierende Faser ist entlang der x-Achse eines xy-Tisches eingespannt, sodass eine LED präzise über eine Länge von 0 mm bis 2000 mm der Faser gefahren werden kann. An einem Ende der Faser sitzt ein Spektrometer, welches mit Schrittmotoren entlang der Horizontalen und der Vertikalen bewegt werden kann. Ein angeschlossener Computer erlaubt die Steuerung der Motoren und der LED sowie die automatische Datenerfassung.

2.2 Messprogramm

Bevor die Messungen starten können, muss der Raum abgedunkelt werden, damit Streulichteffekte unterdrückt werden können. Darüber hinaus wird bei jeder Messung sowohl die Anregung der Faser mittels der LED gemessen, als auch die Dunkelzählrate, sodass die Messdaten um diese bereinigt werden können. Für sämtliche Messungen wird eine Integrationszeit von 10 000 μ s und einem Strom von 20 mA gewählt

2.2.1 Spektrometermessung

Zur Illustration der Auswirkungen von angeschaltetem Raumlicht wird eine Spektrometermessung bei eingeschaltetem und eine bei ausgeschaltetem Raumlicht durchgeführt. Dazu wird an dem Steuerungscomputer in einer GUI eine Spektrometermessung gestartet. Die Intensität der Messungen wird für die beiden Messreihen gegenüber der Wellenlänge aufgetragen. Außerdem wird in einem weiteren Schritt die Dunkelzählrate abgezogen und das Ergebnis erneut graphisch dargestellt.

2.2.2 Radialsymmetrie

Die Intensität des aus der Faser austretenden Lichts folgt einer Radialsymmetrie, welche in dieser Messung verifiziert werden soll. Dazu wird für eine feste Position der LED auf der Faser das Spektrometer entlang der horizontalen und vertikalen Achse verfahren. An dem Computer wird ein Programm aufgerufen, mit dem der aufzufahrende Bereich sowie die Schrittweite eingestellt werden kann. Der horizontale Winkelbereich soll von -18° bis 30° und der vertikale von -6° bis 35° verlaufen.

2.2.3 Simulation

Neben den aufzunehmenden Messdaten werden ebenfalls Simulationsdaten analysiert. Dabei enthalten die Daten Informationen über die Anregungsorte der Faser, den Austrittsort am Faserrande, den Erzeugungsort des Photons mit dazugehörigem Impuls und Wellenlänge, die Anzahl der Reflexionen an der Core-Cladding und Cladding-Cladding Grenzfläche, die Anzahl der Raleighstreuungen, sowie die zurückgelegten Wegstrecken in den verschiedenen Medien.

Zunächst werden unphysikalische Simulationseffekte bereinigt, indem alle Photonen, deren Austrittsort außerhalb des Faserradius liegt, entfernt werden. Außerdem werden alle Photonen, die Raleighstreuungen durchgeführt haben, ebenfalls entfernt. Der Datensatz wird anschließend in Kern- und Mantelphotonen aufgeteilt. Der Winkel θ des Photons zur x-Achse wird berechnet und als neue Variable eingeführt. Die Intensität der verschiedenen Winkel θ wird in einem Histogramm sowohl für die Kern- als auch für die Mantelphotonen aufgetragen. Der maximale Winkel unter dem noch Totalreflexion auftreten kann wird berechnet und ebenfalls im Histogramm eingezeichnet.

In einem nächsten Schritt wird der minimale Abstand der Kern- und Mantelphotonen zur Fasermittte berechnet und in einem zweidimensionalen Histogramm in Abhängigkeit zum Winkel θ gesetzt.

Als nächstes wird die Intensität für verschiedene Winkel in Abhängigkeit zum Anregungsort auf der x-Achse bestimmt und abermals graphisch dargestellt. Mithilfe eines exponentiellen Fits kann der Absorptionskoeffizient der szintillierenden Fasern bestimmt werden.

2.2.4 Intensitätsmessung

In einem weiteren Schritt wird die x-Abhängige Intensität bestimmt. Dazu werden entlang der x-Achse 20 verschiedene Positionen der Faser angeregt und für jede dieser Positionen der horizontale oder vertikale Winkel in zehn Schritten von 0° bis 40° variiert. Diese Daten werden analog zu den Simulationsdaten ausgewertet und mit diesen verglichen.

2.2.5 Winkelintensitätsmessung

Zur Bestimmung des Winkels, bei dem die Intensität am größten ist, wird für einen festen Anregungsort und festen vertikalen Winkel der horizontale Winkel feinschrittig von 0° bis 45° verändert. Die Intensität wird gegen die Winkelverteilung histogrammiert und das Maximum dieser Verteilung bestimmt.

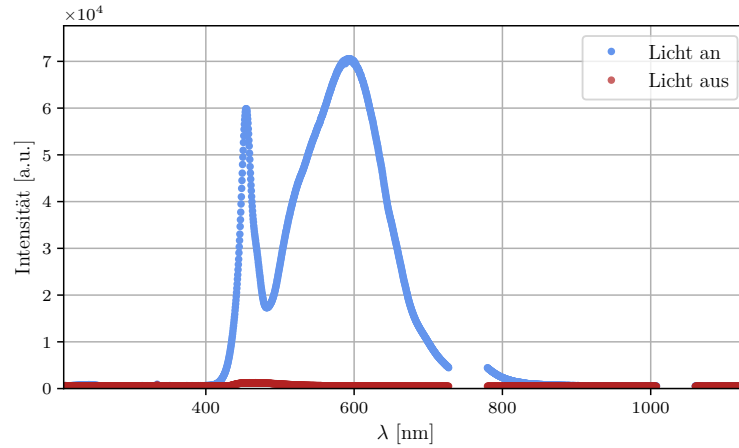
3 Auswertung

In diesem Versuch werden Messdaten aufgenommen und zusammen mit zuvor simulierten Daten analysiert. So lassen sich die gemessenen Größen mit dem Theoriemodell abgleichen. Die Messdaten werden bei ausgeschaltetem Raumlicht aufgenommen und zu jedem Messwert werden die Dunkelzählraten (Zählraten ohne LED Signal) subtrahiert,

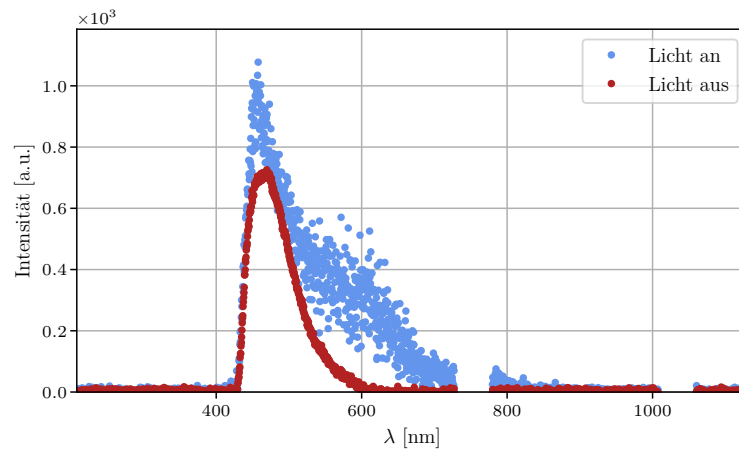
um ein Maß für die bereinigte Intensität zu erhalten. Jede Messung erfolgt mit einer Integrationszeit von $10\,000\,\mu\text{s}$ und wird fünfmal gemittelt.

3.1 Spektrometermessung mit- und ohne Raumlicht

Zuerst wird untersucht, welchen Effekt das Umgebungslicht auf die Auswertung des Versuches hätte. Dazu wird jeweils eine Spektrometermessung mit eingeschaltetem Raumlicht und eine Messung ohne Licht durchgeführt. In Abbildung 1a und Abbildung 1b sind die bereinigte und unbereinigte Intensität gegen die Wellenlänge aufgetragen. Wie sich



(a) Unbereinigte Intensität



(b) Bereinigte Intensität

Abbildung 1: Bereinigte- und unbereinigte Intensität der Lichtreflexe gegen die Wellenlänge für jeweils eine Spektrometermessung mit- und ohne eingeschaltetem Raumlicht.

erkennen lässt, liegt die unbereinigte Intensität der Messung mit äußerem Lichteinfluss

weit über jener ohne Raumlicht. Dies wirkt sich stark auf die Fluktuation der Dunkelzählraten bereinigten Messwerte aus, wie sich unschwer in Abbildung 1b erkennen lässt. Daher sollte immer ohne äußere Lichteinwirkung gemessen werden.

3.2 Radialsymmetrie

Für die Winkelverteilung des am Faserende austretenden Lichtes wird eine Radialsymmetrie erwartet. Um dies zu überprüfen wird die Lichtintensität einer Messung unter Variation der horizontalen- und vertikalen Winkel in einem zweidimensionalen Diagramm aufgetragen. Wie sich an Abbildung 2 erkennen lässt, folgt die Winkelverteilung

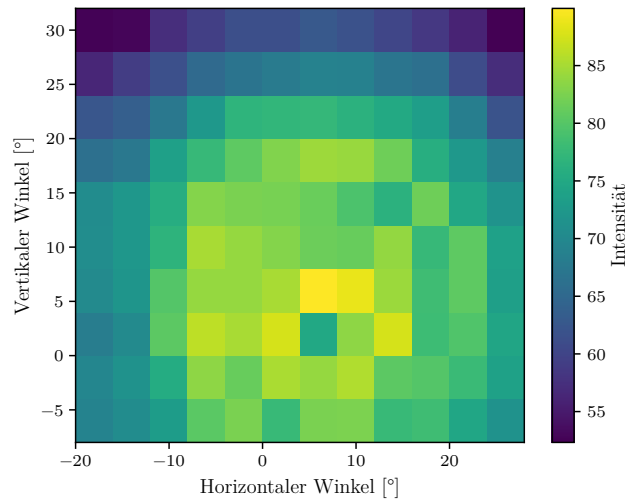


Abbildung 2: Gemessene Intensitätsverteilung gegen horizontalen und vertikalen Winkel.

tatsächlich einer Radialsymmetrie.

3.3 Simulationsdaten

Im nächsten Schritt der Analyse werden die Simulationsdaten vorbereitet. Dazu werden die Dateien der einzelnen Fasern und simulierten Anregungspunkte eingelesen. Unphysikalische Simulationsfehler, welche einen Austrittsradius größer dem Faserradius vorweisen werden entfernt. Dazu wird ein Schnitt auf die Variable `r_exit > 0.125` angewendet, welche sich über die Austrittspositionen `y_exit` und `z_exit` berechnen lässt. Die Auswirkung dieser Selektion ist in Abbildung 3 zu sehen. Als nächstes werden alle Photonen entfernt, die Rayleigh-Streuungen vollzogen haben. Der Datensatz wird in Kern- und Mantelphotonen (`length_clad > 0`) aufgeteilt. Der Winkel Θ zur Fasermittte lässt sich anhand des Kosinus des normierten Impulses zur x-Achse bestimmen. Nach ?? berechnet sich der maximale Winkel, bei welchem Totalreflexion auftreten kann für die Kern- und

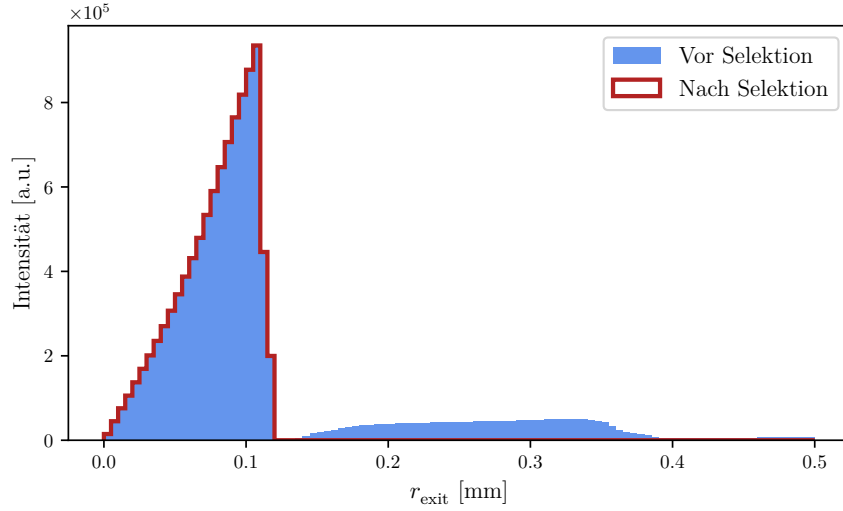


Abbildung 3: Simulationsdaten vor- und nach dem Entfernen unphysikalischer Simulationsfehler.

Mantelphotonen, die durch die Fasermitte verlaufen zu

$$\Theta_{\text{max1}} = \arccos\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = 21,37^\circ$$

$$\Theta_{\text{max2}} = \arccos\left(\frac{n_3}{n_1}\right) = 27,44^\circ,$$

wobei $n_1 \approx 1,6$, $n_2 \approx 1,49$ und $n_3 \approx 1,42$ die Brechungsindizes des Kernmaterials und der Mantelmaterialien sind. Um am Ende der Faser aus dem Material austreten zu können, dürfen die Photonen am Übergang von Faser zu Luft keine Totalreflexion erfahren. Die maximalen Winkel zur Faserachse ergeben sich für Photonen im Kern, in der ersten Ummantelung und in der äußeren Ummantelung zu

$$\Theta_{\text{max3}} = \arcsin\left(\frac{1}{n_1}\right) = 38,68^\circ$$

$$\Theta_{\text{max4}} = \arccos\left(\frac{n_2}{n_1} \cos\left(\arcsin\left(\frac{1}{n_2}\right)\right)\right) = 46,34^\circ$$

$$\Theta_{\text{max5}} = \arccos\left(\frac{n_3}{n_1} \cos\left(\arcsin\left(\frac{1}{n_3}\right)\right)\right) = 50,94^\circ,$$

respektive. Dabei wird $n \approx 1$ für Luft verwendet. In Abbildung 4 ist die Winkelverteilung der Kern- und Mantelphotonen histogrammiert. Die theoretisch zu erwartenden, maximalen Winkel sind markiert. Die maximalen Winkel der Simulationsdaten lauten

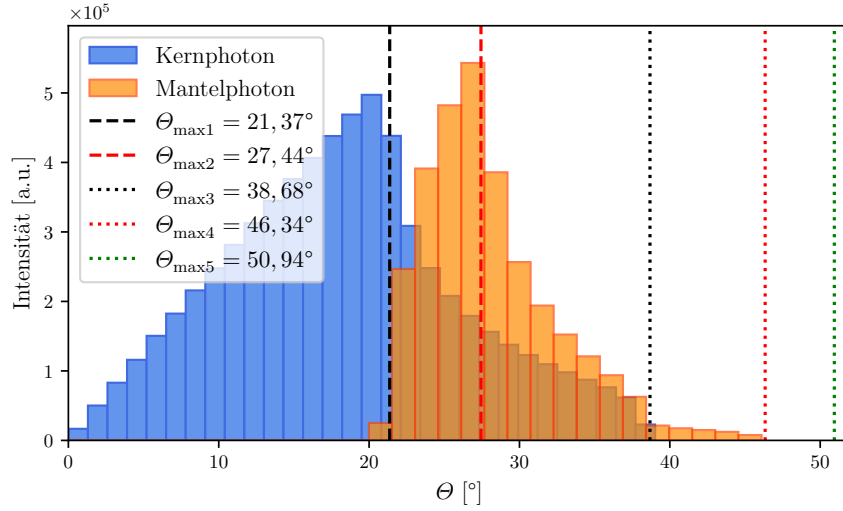


Abbildung 4: Winkelverteilung der Kern- und Mantelphotonen in den Simulationsdaten. Die Winkel Θ_{\max} beschreiben die theoretischen Grenzwinkel der Totalreflexion.

$$\Theta_{\max, \text{ Kern}} = 39,02^\circ$$

$$\Theta_{\max, \text{ Mantel}} = 46,10^\circ.$$

Im nächsten Schritt, wird der minimale Abstand \mathbf{r}_{\min} der Photonen zur Fasermitte (Abstand Gerade-Gerade) bestimmt. In Abbildung 5 ist die Intensitätsverteilung in einem zweidimensionalen Histogramm gegen den Winkel Θ und den minimalen Abstand zur Fasermitte \mathbf{r}_{\min} , jeweils für Kern- und Mantelphotonen aufgetragen. Wie sich erkennen lässt, steigt der maximal erreichte Winkel zur Faserachse mit dem Abstand zu dieser an, was der Erwartung entspricht. Das Band der Kernphotonen endet für $\mathbf{r}_{\min} = 0$ ungefähr, bei dem Maximalwinkel der Totalreflexion an der ersten Faserummantelung (Θ_1). Das Band der Mantelphotonen beginnt dort und endet bei dem Maximalwinkel der Totalreflexion an der Faserhülle (Θ_2), was ebenfalls den Erwartungen entspricht.

3.4 Absorptionsverhalten

Als nächstes wird das Absorptionsverhalten der Photonen in der Faser untersucht. Dazu wird zu jedem gemessenen Winkel der Intensitätsmessung die Abschwächung der Intensität abhängig vom Anregungsort betrachtet. Mittels *scipy* [2] wird eine exponentielle Funktion der Form $I(x) = I_0 e^{-ax}$ an die Messdaten gefittet. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 6 für die 10 gemessenen Winkel dargestellt. Es ergibt sich ein Durchschnittswert des Absorptionskoeffizienten von $a_{\text{avg, exp}} = 2,1653 \cdot 10^{-4} \text{ 1/mm}$. Ein analoges Verfahren wird auf die Simulationsdaten angewendet, wobei hier die Winkel kontinuierlich verlaufen und deshalb in 100 Bins unterteilt werden. Hier ergibt sich ein Mittelwert von $a_{\text{avg, theo}} = 1,9571 \cdot 10^{-4} \text{ 1/mm}$. Die Winkelabhängigkeit des Absorptionskoeffizien-

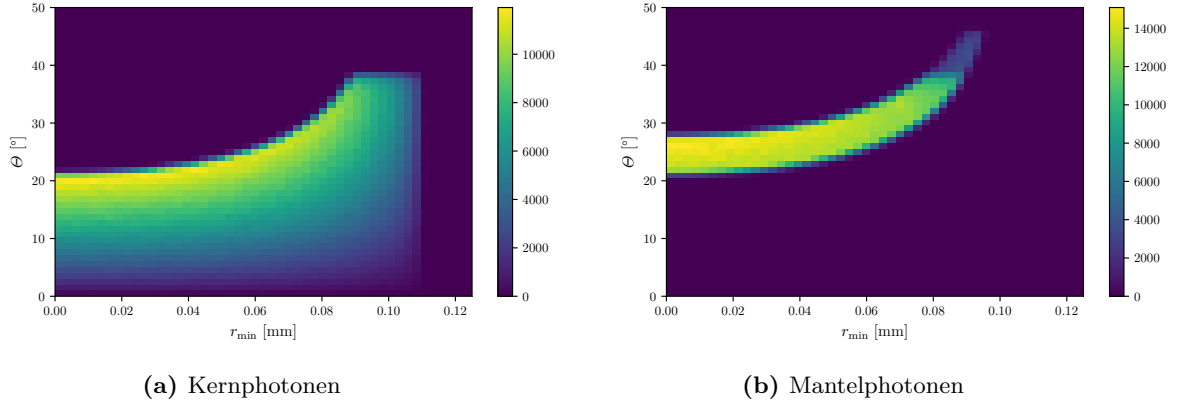


Abbildung 5: Zweidimensionales Histogramm der Intensitätsverteilung gegen den Winkel θ zur Faserachse und den minimalen Abstand zur Fasermittte r_{\min} für Kern- Mantelphotonen.

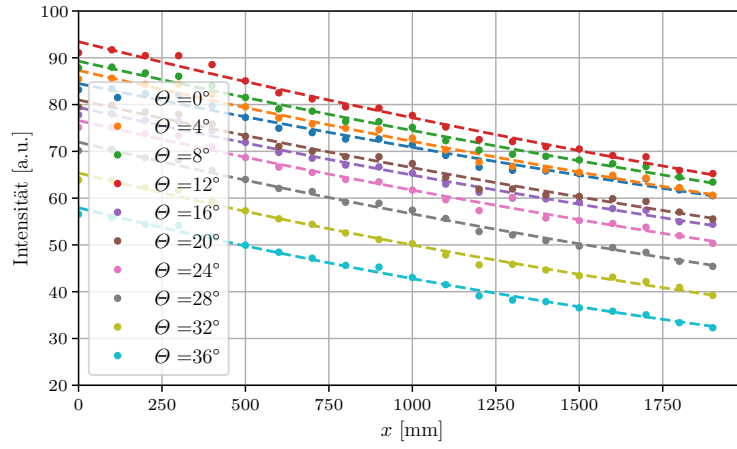
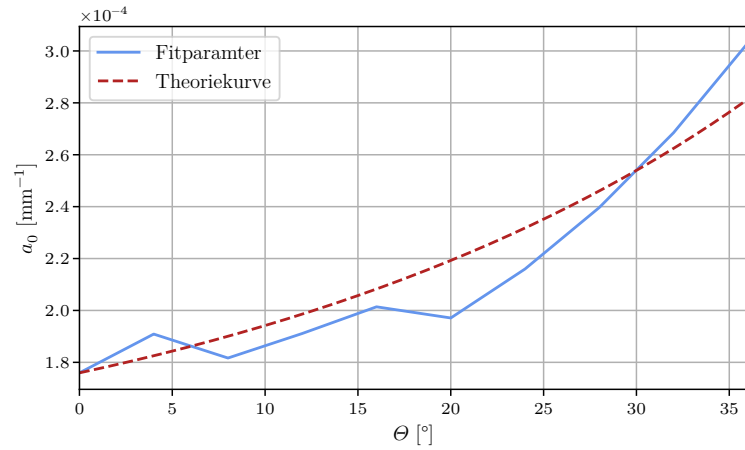
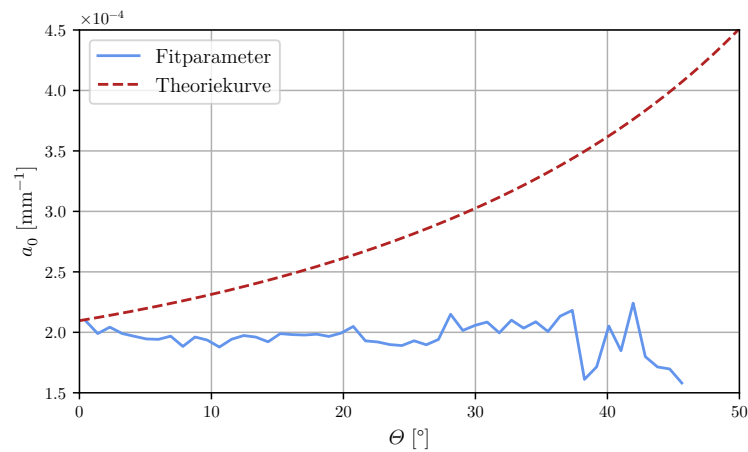


Abbildung 6: Fits zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten für die vermessenen Winkel. Die exponentiellen Fits sind mit einer gestrichelten Linie eingezeichnet.

ten kann Abbildung 7 entnommen werden. Die jeweiligen Fitparameter werden dabei gegen den Winkel aufgetragen. Ebenfalls ist die Theoriekurve des winkelabhängigen Absorptionskoeffizienten nach ?? eingezeichnet.



(a) Messdaten



(b) Simulationsdaten

Abbildung 7: Winkelabhängigkeit des Absorptionskoeffizienten für die Mess- und Simulationsdaten.

3.5 Winkelintensitätsmessung

Zuletzt wird der Winkel maximaler Intensität mithilfe einer feinschrittigen Winkelintensitätsmessung bestimmt. Dazu könne die in Abbildung 8 dargestellten Daten verwendet werden. Aus der Abbildung kann der Winkel maximaler Intensität als $\Theta = 11^\circ$ entnommen werden.

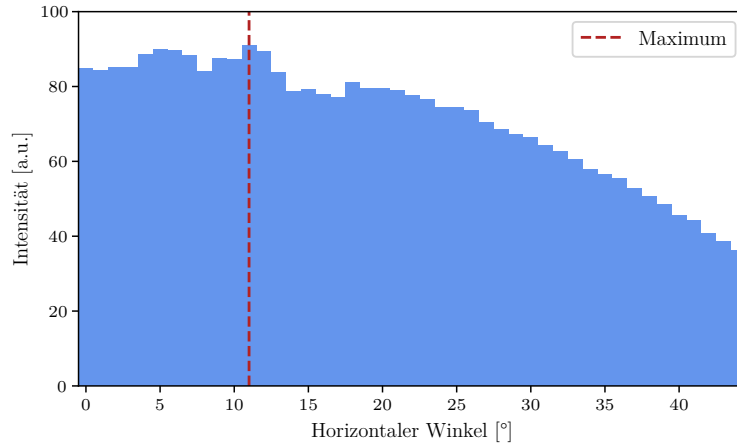


Abbildung 8: Intensitätsverteilung der Messdaten gegen den horizontalen Winkel.

4 Diskussion

Die Spektrometermessung für eingeschaltetes und ausgeschaltetes Raumlicht aus Unterabschnitt 3.1 zeigt deutlich die Notwendigkeit der Abdunklung des Raums. Hierbei ist zu beachten, dass die Bereinigung der Messwerte um die Dunkelzählrate erneut ein klareres Signal produziert.

Die radialsymmetrische Verteilung der Intensität der aus der Faser austretenden Photonen wird durch Abbildung 2 bestätigt. Das Maximum der Intensität liegt nicht bei 0° . Es ist möglich, dass ein systematischer Offset in Ausrichtung der Messapparatur vorliegt.

Die bereitgestellten Simulationsdaten lassen sich in Kern- und Manteldaten unterteilen und die unterschiedlichen Wirkungen lassen sich in Abbildung 4 deutlich erkennen. Das verschiedene Verhalten wird nochmals in Abbildung 5 verdeutlicht, wo der Winkel θ gegenüber dem minimalen Abstand zur Fasermitte r_{\min} aufgetragen wird.

Die Winkelabhängigkeit der experimentell bestimmten Absorptionskoeffizienten steht in Übereinstimmung mit der theoretisch zu erwartenden (siehe Abbildung 7a). Aus Abbildung 7b wird jedoch ersichtlich, dass die Simulationsdaten keine Übereinstimmung mit der Theorie aufweisen. Es ist denkbar, dass die Winkelabhängigkeit der Absorptionskoeffizienten in der Simulation nicht berücksichtigt wird.

Die Winkelintensitätsmessung liefert ein Maximum der Intensität für einen horizontalen Winkel von 11° . Auch hier ist es möglich, dass ein systematischer Offset der Ausrichtung von dem Spektrometer die Daten verzerrt. In Abbildung 8 wird auch ersichtlich, dass die Winkel, die kleiner als 11° sind, nur eine geringfügig kleinere Intensität als das Maximum aufweisen. Eine längere Messdauer könnte gegebenenfalls ein anderes Ergebnis liefern.

Literatur

- [1] *Versuch zum Literaturverzeichnis*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2022.
- [2] Pauli Virtanen u. a. „SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python“. In: *Nature Methods* 17 (2020), S. 261–272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.