

V400

Connor Magnus Böckmann

email: connormagnus.boeckmann@tu-dortmund.de

Tim Theissel

email: tim.theissel@tu-dortmund.de

25. Mai 2021

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Reflexion	4
2.2 Brechung	4
2.3 Reflexion und Transmission	5
2.4 Beugung	5
3 Versuchsaufbau	6
4 Durchfuehrung	7
4.1 Reflexion	7
4.2 Brechung	7
4.3 Brechung am Prisma	7
4.4 Beugung am Gitter	8
5 Auswertung	8
5.1 Reflexionsgesetz	8
5.2 Brechungsgesetz	9
5.3 Planparallele Platten	10
5.4 Prisma	11
5.5 Beugung am Gitter	11
6 Diskussion	13
6.1 Reflexionsgesetz	13
6.2 Brechungsgesetz	13
6.3 Planparallele Platten	13
6.4 Beugung am Gitter	13

1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen grundsätzliche Gesetze der Optik dargestellt und bearbeitet werden. Dazu wird die Reflexion, die Beugung und die Transmission untersucht.

2 Theoretische Grundlagen

Licht ist elektromagnetische Strahlung, wobei das optische Spektrum mit dem ultravioletten Spektrum mit einer Wellenlänge von etwa 100nm bis 380nm beginnt und sich bis ins infrarote Spektrum erstreckt mit etwa 780nm bis 1mm Wellenlänge. Vom Menschen wahrgenommen kann dabei jedoch nur das Spektrum zwischen 380nm und 780nm. Die Maxwellgleichungen beschreiben dabei die Ausbreitung der elektromagnetischen Welle, können jedoch durch die einfacheren Gesetze der Strahlenoptik ersetzt werden für Phänomene wie Brechung an Grenzflächen oder Reflexion.

Die Ausbreitungsrichtung der Welle wird in der Strahlenoptik durch die Wellennormale charakterisiert, welche senkrecht auf der Wellenfront steht. Diese wird vereinfachend Lichtstrahl genannt. Die Ausbreitung dieser Welle erfolgt in verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Aus diesem Grund wird der Lichtstrahl beim Übergang von einem Material in ein anderes mit anderem Brechungsindex gebrochen. Der Brechungsindex ist dabei ein Maß für die Änderung der Lichtgeschwindigkeit im jeweiligen Medium verglichen mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit im anderen Medium höher ist, spricht man von einem optisch dichteren Material, wohingegen ein Material mit geringerer Ausbreitungsgeschwindigkeit optisch dünner genannt wird. Außerdem ist wichtig, dass sich Lichtstrahlen in der Strahlenoptik nicht gegenseitig beeinflussen können, wenn sie sich kreuzen. Der Strahl muss außerdem umkehrbar sein und sich geradlinig verbreiten, sollte das Medium homogen sein.

2.1 Reflexion

Ein Lichtstrahl wird an einer Grenzfläche reflektiert. Das Reflexionsgesetz gibt dann, dass der Einfallswinkel α_1 dem Reflexionswinkel/Ausfallswinkel α_2 entspricht.

$$\alpha_1 = \alpha_2 \quad (1)$$

Dies ist noch einmal graphisch in Abbildung 1 dargestellt.

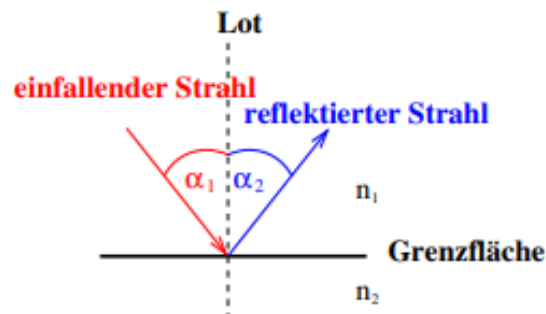


Abbildung 1: Reflexion an einer Grenzfläche
[1]

2.2 Brechung

Breitet sich ein Lichtstrahl in einem Medium mit anderem Brechungsindex aus, nachdem es durch eine Grenzfläche eingetreten ist, ist wie bereits genannt die Ausbreitungsgeschwindigkeit verschieden. Nach dem Fermatschen Prinzip erfährt der Lichtstrahl dann eine Richtungsänderung an der Grenzfläche. Der Lichtstrahl wird gebrochen. Das Snellius'sche Brechungsgesetz liefert dann:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta \quad (2)$$

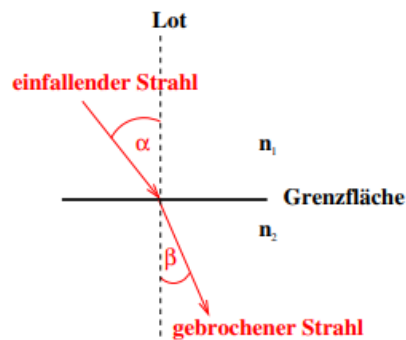


Abbildung 2: Brechung an einer Grenzfläche
[1]

2.3 Reflexion und Transmission

Ein Lichtstrahl wird fuer gewoehnlich an einer Grenzflaeche nicht vollstaendig reflektiert oder gebrochen. Es wird nur ein Teil reflektiert und ein Teil gebrochen. Die Anteile an der Gesamtintensitaet sind also der Reflexionsanteil R und der Transmissionsanteil T . Es muss ausserdem immer $R + T = 1$ gelten.

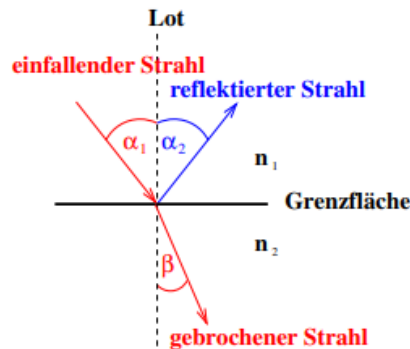


Abbildung 3: Reflexion und Transmission an einer Grenzflaeche
[1]

2.4 Beugung

Bei Licht kann ein weiteres interessantes Phaenomen beobachtet werden, die Ausbreitung im Schattenraum nach Kollision mit einem Hindernis. Hierzu benoetigt die Erklaerung den Bereich der Wellenoptik, da die Strahlenoptik nicht in der Lage ist dieses Verhalten zu erklaren. Zur Beschreibung einer elektromagnetischen Welle sind vor allem die Frequenz μ beziehungsweise die Wellenlaenge λ und die Ausbreitungsgeschwindigkeit v interessant. Kommt zu einer Ueberlagerung von zwei oder mehr Wellen, addieren sich die Amplituden nach dem Superpositionsprinzip in jedem Punkt auf. Dabei kann es zu konstruktiver Interferenz, also einer Erhoehung der Amplitude, oder destruktiver Interferenz, einer Verringerung der Amplitude kommen. Diese destruktive Interferenz ist bei gleicher Frequenz, gleicher Intensitaet und einem Gangunterschied von einer halben Wellenlaenge, also $\lambda/2$ am deutlichsten. Die Welle wird komplett ausgeloescht.

Zum Verstaendnis des Verhaltens des Lichts im Beugungsversuch am Gitter ist das Huygenssche Prinzip zu verstehen. Dieses besagt, dass jeder Punkt einer Welle, Quelle einer neuen Elementarwelle der selben Frequenz ist. Die Einhuellende dieser Elementarwellen stellt dann die eigentliche Wellenfront dar.

Wird nun das Licht durch einen Spalt geschickt, erfahrt jeder Punkt im Spalt Beugung. Alle diese neu gebeugten Wellen haben die selbe Frequenz und die gleiche Phasenbeziehung. Stellt man nun dahinter im Abstand L vom Spalt einen Schirm auf, laesst sich ein Muster aus Streifen mit grosser und geringer Helligkeit erkennen. Diese so genannten Interferenzstreifen entstehen- wie der Name schon vermuten laesst- durch konstruktive Interferenz in den hellen Bereichen und destruktive Interferenz in den dunklen Teilen.

Die hellen Interferenzstreifen erscheinen dabei an Orten, welche diese Beziehung erfuehlt:

$$a \sin \alpha = k\lambda \quad (3)$$

Dabei stellt a die Breite des Spalts dar, welcher mit Licht der Wellenlaenge λ beleuchtet wird. Die k -ten Maxima an Intensitaet entstehen dann in einem Winkel α zur der Ausbreitungsrichtung.

Dieser Umstand laesst sich nun auf n -viele Spalte verallgemeinern. Das Mass fuer die Anzahl an Spalten nennt sich Gitterkonstante d und ist der Kehrwert der Anzahl an Spalten pro Millimeter des Gitters. Wie bereits beim einzelnen Spalt auch laesst sich das k -te Intensitaetsmaximum mit dieser Beziehung herleiten:

$$d \sin \alpha = k\lambda \quad (4)$$

3 Versuchsaufbau

Der Versuch besteht aus einer durchsichtigen Bodenplatte, auf welcher sich zwei Laserdioden im Halbkreis bewegen lassen. Eine der Dioden ist gruen mit einer Wellenlaenge von $\lambda_G = 532$, wohingegen die andere Diode rot ist mit $\lambda_R = 635nm$. Im Zentrum des Halbkreises lassen sich verschiedene Elemente wie Spiegel, Prismen oder planparallele Platten befestigen. Die umgebende Luft ist in diesem Experiment immer das optisch duennere Medium mit Lichtgeschwindigkeit c und einem Brechungsindex von $n \approx 1$. Zum Schutz vor dem Laserlicht laesst sich in Reflexionsrichtung ein Schirm aufstecken, welcher bei Verwendung beider Dioden erhoehet werden soll. Zur Bestimmung der Winkel muss eine Vorlage unter den Versuchsaufbau gelegt werden. Die moeglichst genaue Ausrichtung ist hierbei sehr wichtig. Alle zu untersuchenden Elemente sind der Einfachheit halber mit Vertiefungen zum Aufstecken auf kleine Alustifte in der Platte ausgestattet, welche benutzt werden muessen. Ausserdem ist es wichtig nicht direkt auf die Einstrahlflaechen der Elemente zu fassen, da diese dadurch zerstoert werden koennten.

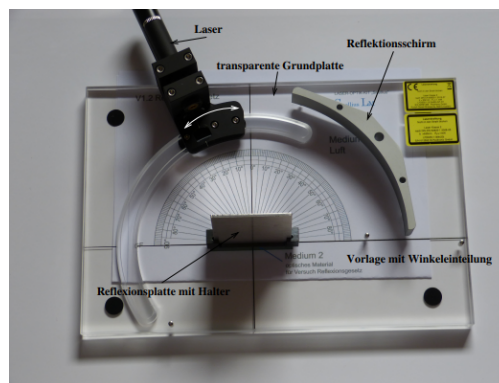


Abbildung 4: Die Versuchsaapparatur
[1]

4 Durchfuehrung

4.1 Reflexion

Zur Beobachtung des Reflexionsgesetzes ist die grueene Laserdiode der Wellenlaenge $\lambda_G = 532$ zu verwenden. Ausserdem wird der Spiegel als reflektierendes Element benutzt, welcher in der Mitte des Halbkreises auf die Apparatur aufgesteckt wird. Als Vorlage wird Vorlage A benoetigt, welche, wie bereits genannt, unter die Grundplatte gelegt wird. Auf ihr ist eine Winkelskala abgebildet auf, welcher der Einfallswinkel sowie der Ausfallswinkel abgelesen werden kann. Es sollen sieben Einfalls- und Ausfallswinkel gemessen werden.

4.2 Brechung

Fuer diesen Teil des Versuchs wird ebenfalls der grueene Laser, sowie die Vorlage A verwendet. Als optisches Element dient hierbei jedoch ein planparalleler Quader. Dieser muss ebenfalls auf die dafuer vorgesehenen Stifte gesteckt werden, um Reproduzierbarkeit und Ablesbarkeit zu garantieren. Der Einfallswinkel kann erneut an der Vorlage abgelesen werden; der Brechungswinkel wird aber nun an einer Skala abgelesen, welche an der Rueckseite des Quaders aufgebracht ist, abgelesen. Erneut sollen sieben Einfallswinkel und ihr zugehoeriger Brechungswinkel gemessen werden. Ausserdem soll der Strahlversatz s mit

$$s = d \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos\beta} \quad (5)$$

$$\text{hier : } d = 5.85\text{cm (Tiefe der Platte)} \quad (6)$$

bestimmt werden.

4.3 Brechung am Prisma

Das Prisma wird ausgezeichnet durch nicht parallele Grenzflaechen. Die Einfallsflaeche und die Ausfallsflaeche begrenzen den brechenden Winkel γ . Der Einfallswinkel α ist bei weissem Licht fuer alle Wellenlaengen gleich, jedoch ist der Brechungswinkel β bei nicht-monochromatischem Licht je nach Wellenlaenge verschieden. Dies nennt sich Dispersion. Beim Durchgang durch das Prisma erfahrt das Licht insgesamt eine Ablenkung von

$$\delta = (\alpha_1 + \alpha_2) - (\beta_1 + \beta_2) \quad (7)$$

Die Winkel β_1 und β_2 koennen mit Hilfe des Brechungsgesetzes und der Winkelbeziehung $\beta_1 + \beta_2 = \gamma$ bestimmt werden. Es soll sowohl der rote, als auch der grueene Laser benutzt werden. Der brechende Winkel des verwendeten Kronglasprismas betraegt $\gamma = 60^\circ$. Es sollen fuenf Einfallswinkel α_1 mit beiden Lasern gemessen werden. Als Vorlage dient dazu Vorlage C.

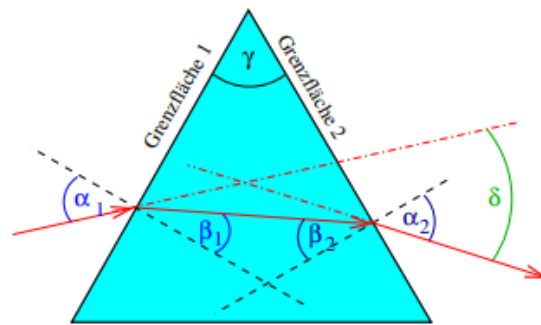


Abbildung 5: Darstellung der Lichtbrechung an den verschiedenen Grenzflächen des Prismas
[1]

4.4 Beugung am Gitter

Zur Beugung am Gitter wird der Laserdiodentraeger auf 0° eingestellt und der Schirmhalter neben der Bodenplatte auf die Vorlage in Strahlrichtung gestellt. Ausserdem muss ein Transmissionsschirm im auf der Vorlage markierten Abstand positioniert werden. Dieser ist ausserdem im Kreis zu positionieren, um die Winkel φ direkt ablesen zu koennen. Es sollen nun die Maxima fuer beide Laser und alle Gitter gemessen werden. So kann mit der Gitterkonstante d und der Beugungsordnung k die Wellenlaenge λ des Lasers berechnet werden:

$$\lambda = d \frac{\sin \varphi}{k} \quad (8)$$

5 Auswertung

5.1 Reflexionsgesetz

Zuerst soll der Lichtstrahl eines Lasers an einem Spiegel reflektiert werden. Damit wird das Reflexionsgesetz überprüft, welches besagt, dass Einfallswinkel α gleich Ausfallswinkel β ist. Bei der Messung entstehen folgende Wertepaare:

Tabelle 1: Messung der Einfallswinkel und Ausfallswinkel für das Reflexionsgesetz

Einfallswinkel [°]	Ausfallswinkel [°]
20	20
30	30
40	40
45	45
50	50
60	60
70	70

5.2 Brechungsgesetz

Bei der zweiten Messreihe wird ein Plexiglas Quader verwendet. Der durch ihn durch gerichtete Laser wird gebrochen. Nach der Messung des Brechungswinkels und dem Ablesen des Einfallswinkels kann mithilfe des Brechungsgesetzes der Brechungsindex von Plexiglas bestimmt werden. Dafür wird lediglich die Formel:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$$

benötigt. Mit den gemessenen Werten ergeben sich folgende Werte für den Brechungsindex:

Tabelle 2: Messwerte zur Berechnung des Brechungsindex von Plexiglas und dazu berechneter Brechungsindex

Einfallswinkel [°]	Brechungswinkel [°]	Brechungsindex
10	6.5	1.53
20	13.5	1.47
30	19.5	1.50
40	25.5	1.49
50	31.0	1.49
60	35.5	1.49
70	39.0	1.49
Mittelwert		(1.494±0.019)

Die Lichtgeschwindigkeit in Plexiglas ergibt sich indem, das folgende Verhältnis gebildet wird:

$$n = \frac{c_0}{c_M}$$

Dabei ist c_0 die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, c_M die Lichtgeschwindigkeit im Medium, in diesem Fall Plexiglas und n ist der berechnete Brechungsindex von Plexiglas. Diese Formel lässt sich wie folgt nach der Lichtgeschwindigkeit von Plexiglas umstellen:

$$c_M = \frac{c_0}{n}$$

Damit ergibt sich die Lichtgeschwindigkeit in Plexiglas zu $(2.007 \pm 0.026) \cdot 10^8 \frac{m}{s}$.

5.3 Planparallele Platten

Bei dieser Aufgabe wird der Strahlenversatz bestimmt. Dafür wurden erneut die Werte für Einfallswinkel und Brechungswinkel aus Aufgabe 2 verwendet. Mit der Formel:

$$s = d \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos(\beta)}$$

lässt sich der Strahlenversatz berechnen. Dabei entstehen folgende Werte:

Tabelle 3: Im Experiment gemessene Einfallswinkel und Brechungswinkel und dazu berechneter Strahlenversatz

Einfallswinkel [°]	Brechungswinkel [°]	Strahlenversatz [cm]
10	6.5	0.36
20	13.5	0.68
30	19.5	1.13
40	25.5	1.62
50	31.0	2.22
60	35.5	2.98
70	39.0	3.88

Mit dem Wissen aus der vorherigen Aufgabe ist es nun auch möglich den Brechungswinkel mithilfe des Brechungsgesetzes zu bestimmen und dann mit den berechneten Winkeln den Strahlenversatz zu bestimmen.

Tabelle 4: Strahlenversatz mit den durch das Brechungsgesetz bestimmten Brechungswinkeln

Einfallswinkel [°]	Brechungswinkel [°]	Strahlenversatz [cm]
10	4.35	0.57 ± 0.006
20	8.99	1.13 ± 0.011
30	12.91	1.76 ± 0.016
40	16.75	2.41 ± 0.019
50	20.17	3.10 ± 0.020
60	22.87	3.83 ± 0.018
70	24.91	4.57 ± 0.014

5.4 Prisma

Ziel dieser Aufgabe ist es die Ablenkung zu bestimmen. Dafür wurden die Winkel α_1 und α_2 gemessen. Daraus lassen sich nun mit dem Brechungsgesetz β_1 und β_2 bestimmen. Bei dieser Rechnung ergeben sich folgende Winkel:

Tabelle 5: Gemessene Einfallswinkel und dazu mit dem Brechungsgesetz berechnete Brechungswinkel des Prismas

Einfallswinkel [°]	Brechungswinkel 1 [°]	Brechungswinkel 2 [°]
35	22.58	37.42
40	25.48	34.52
45	28.25	31.75
50	30.85	29.15
60	35.43	24.57

Mit diesen Winkeln lässt sich nun die Dispersion bestimmen. Dafür wird die angegebene Formel verwendet. Für die Dispersion ergeben sich folgende Werte:

Tabelle 6: Aus den vorher bestimmten Winkeln berechnete Dispersion zu verschiedenen Einfallswinkeln

Einfallswinkel [°]	roter Laser [°]	grüner Laser [°]
35	42	43.0
40	39	40.0
45	38	38.5
50	37	38.0
60	38	39.0

5.5 Beugung am Gitter

Ziel dieser Aufgabe ist es die Wellenlänge des verwendeten Lasers zu bestimmen. Dafür kann die Beugung am Gitter verwendet werden. Durch diese entstehen Interferenzmuster auf dem Schirm. Für die auftretenden Beugungsmaxima gilt dann folgende Beziehung:

$$\lambda = d \frac{\sin \phi}{k}$$

Nach der Messung der Beugungswinkel ergeben sich für die Wellenlänge folgende Werte:

Tabelle 7: Gemessene Beugungswinkel und die daraus berechnete Wellenlänge der verschiedenen Laser bei einer Beugung am Gitter mit Gitterkonstante $d = 600\text{Lines/mm}$.

Beugungswinkel [°]	roter Laser [nm]	Beugungswinkel [°]	grüner Laser [nm]
-23	651.21	-19.5	556.34
0	0	0	0
23	651.21	19.5	556.34

Tabelle 8: Gemessene Beugungswinkel und die daraus berechnete Wellenlänge der verschiedenen Laser bei einer Beugung am Gitter mit Gitterkonstante $d = 300\text{Lines/mm}$.

Beugungswinkel [°]	roter Laser [nm]	Beugungswinkel [°]	grüner Laser [nm]
-22.5	638.00	-19	542.61
-11	636.03	-9	521.44
0	0	0	0
11	636.03	-9	521.44
22.5	638.00	19	542.61

Tabelle 9: Gemessene Beugungswinkel und die daraus berechnete Wellenlänge der verschiedenen Laser bei einer Beugung am Gitter mit Gitterkonstante $d = 100\text{Lines/mm}$.

Beugungswinkel [°]	roter Laser [nm]	Beugungswinkel [°]	grüner Laser [nm]
0	0	0	0
4	697.56	3	523.36
7.5	652.63	6	523.40
11	639.52	9.5	552.40
15	654.03	12.5	545.15
19	651.14	16	551.27
23	651.21	19.5	556.34
27	648.58	23	558.19
32	662.40	26	548.00
		29	538.70
		33	544.64
Mittelwert	657.13		544.14

6 Diskussion

6.1 Reflexionsgesetz

Die gemessenen Werte bestätigen das Reflexionsgesetz. Die Einfallswinkel sind alle gleich den Ausfallswinkeln. Die Werte sind allerdings nur auf 1° genau ablesbar. Das liegt an der Perspektive und auch der dicke des Laserpunktes. Diese Ablesungenauigkeiten setzen sich auch im weiteren Verlauf des Experimentes fort.

6.2 Brechungsgesetz

Mit dem Brechungsgesetz wurde der Brechungsindex für Plexiglas bestimmt. Dieser liegt mit 1.494 nur sehr knapp über dem Literaturwert von 1.49. Die Abweichung beträgt lediglich 0.3%. Der Fehler ist damit äußerst gering.

6.3 Planparallele Platten

Hier ist eine deutliche Abweichung zu erkennen alleine der gemessene Brechungswinkel hat mit 39° weicht von dem berechneten mit 24.91° um 56.56% ab. Das liegt vermutlich an dem Aufbau des Schirms. Da man diesen ausrichten musste sind dabei wahrscheinlich die größten Fehler entstanden. Dazu kommen dann noch die üblichen Ablesefehler. Damit ist es auch nicht verwunderlich das bei einem Einfallswinkel von 70° der Strahlenversatz um 15.1% abweicht.

6.4 Beugung am Gitter

Bei diesem Teil des Experiments wurden die Wellenlängen der Laser bestimmt. Dabei beträgt die Wellenlänge von rotem Licht 650nm. Der berechnete wert von 657.13 liegt nur um 1.1% daneben. Ähnliches ist zu erkennen bei dem grünen Licht. Das Licht sollte eine Wellenlänge von 550nm haben. der berechnete Wert von 544.14nm weicht nur um 1.06% ab. I Rahmen der gewöhnlichen Messfehler ist sind diese werte sehr genau bestimmt.

Literatur

- [1] *Versuchsanleitung V400*. TU Dortmund, Physik Fakultät. URL: https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1586975/mod_resource/content/4/V400.pdf (besucht am 05.10.2021).