

Experiment E121 - Elektro-optischer Effekt

Robin Hoffmann*, Arik Bürkle[†], Valentin Ertl[‡]

10. Juni 2025

Kurzfassung

In diesem Experiment wurde ein Mach-Zehnder-Interferometer aufgebaut und ein Lithiumniobat-Kristall integriert, um den Elektro-optischen Effekt zu beobachten. Das aufgebaute Interferometer konnte dann durch Bestimmung des Kontrasts $C_{opt} = 76(5)\%$ qualitativ eingeordnet werden. Außerdem konnte der Pockels-Koeffizient des Lithiumniobat-Kristall auf $r_{33} = 31,3(6) \text{ pm/V}$ bestimmt werden.

*robin.hoffmann@student.uibk.ac.at

[†]arik.buerkle@student.uibk.ac.at

[‡]valentin.ertl@student.uibk.ac.at

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theorie	2
2.1	Brechungsindex	2
2.2	Elektro-optischer Effekt	2
2.3	Pockels-Effekt	3
2.4	Phasenverschiebung und Halbwellenspannung	3
2.5	Mach-Zehnder-Interferometer	4
3	Versuchsaufbau und -durchführung	5
3.1	Versuchsaufbau	5
3.2	Durchführung	7
4	Experimentelle Ergebnisse	8
5	Anwendungsgebiete von elektro-optischen Schaltern	9
6	Diskussion	9

1 Einleitung

Der elektro-optische Effekt ist ein grundlegendes Phänomen in der Optik und Photonik, bei dem die optischen Eigenschaften eines Materials durch ein angelegtes elektrisches Feld verändert werden. Dieser Effekt kann in zwei Hauptkategorien unterteilt werden: der lineare elektro-optische Effekt (Pockels-Effekt) und der quadratische elektro-optische Effekt (Kerr-Effekt). Beim Pockels-Effekt ändern sich die Brechungsindizes eines Materials linear mit der angelegten elektrischen Feldstärke, während beim Kerr-Effekt die Änderung quadratisch zur Feldstärke ist [1]. Diese Änderungen der Brechungsindizes führen zu einer Modulation der Phasengeschwindigkeit des Lichts, was für zahlreiche Anwendungen in der modernen Optik und Photonik genutzt wird. Eine der wichtigsten Anwendungsgebiete des elektro-optischen Effekts liegt in der Telekommunikation, insbesondere in elektro-optischen Modulatoren. Diese Modulatoren verwenden Materialien wie Lithiumniobat (LiNbO_3) oder Galliumarsenid (GaAs), um Lichtsignale in Glasfasernetzwerken effizient zu modulieren. Durch die schnelle und präzise Änderung des Lichtsignals kann eine hohe Datenübertragungsrate erreicht werden, was für die moderne Internetkommunikation und Datentransfer unerlässlich ist. Ein weiteres wesentliches Anwendungsgebiet findet sich in der Lasertechnologie. Elektro-optische Modulatoren und Schalter sind entscheidend für die Erzeugung und Manipulation von gepulsten Laserstrahlen. Diese Geräte ermöglichen die Erzeugung von kurzen, intensiven Lichtpulsen, die in der Materialbearbeitung, der Medizin und der wissenschaftlichen Forschung verwendet werden. Zum Beispiel können ultrakurze Laserpulse zur Bearbeitung von Materialien mit hoher Präzision oder in der Lasermikrochirurgie eingesetzt werden. In der Messtechnik ermöglichen elektro-optische Sensoren und Modulatoren hochpräzise Messungen von elektrischen Feldern, Spannungen und anderen physikalischen Größen. Diese Sensoren werden in der Forschung und in industriellen Anwendungen eingesetzt, um genaue und schnelle Messungen durchzuführen [2]. Zusammenfassend ist der elektro-optische Effekt ein zentrales Phänomen mit vielfältigen Anwendungen in der Telekommunikation, Lasertechnologie, Messtechnik und auch in der Quantenoptik. Durch die Fähigkeit, Licht präzise und schnell zu modulieren, eröffnet dieser Effekt zahlreiche Möglichkeiten zur Weiterentwicklung und Innovation in der optischen und photonischen Technologie.

2 Theorie

In diesem Kapitel wird der elektro-optische Effekt, insbesondere der Einfluss des Pockels-Effekts auf anisotropen Materialien, im Hinblick auf ihren Brechungsindex n genauer erläutert.

2.1 Brechungsindex

Der Brechungsindex n eines Materials ist eine fundamentale Eigenschaft, die angibt, wie Licht beim Übergang von einem Medium in ein anderes gebrochen wird. Er hängt von der optischen Dichte des Materials ab und bestimmt die Geschwindigkeit des Lichts v_L gemäß Gleichung 1 sowie die Richtung des Lichts beim Eintritt in das Medium gemäß Gleichung 2.

$$v_L = c/n \quad (1)$$

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (2)$$

2.2 Elektro-optischer Effekt

Im Kontext des elektro-optischen Effekts in anisotropen Materialien spielt der Brechungsindex eine entscheidende Rolle, da er sich unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes E verändern kann. Anisotropie beschreibt hierbei die Eigenschaft eines Materials, in unterschiedlichen Richtungen eine Variation seiner physikalischen Eigenschaften aufzuweisen. In unserem Fall, für dieses Experiment, wird das anisotrope Material durch einen Lithiumniobat-Kristall (LiNbO_3) dargestellt. Dieser besitzt richtungsabhängige Brechungsindizes.

Die Veränderungen des Brechungsindex des Kristalls durch den Einfluss eines elektrischen Feldes sind proportional zur Intensität des elektrischen Feldes. Da diese Änderungen außerdem relativ klein sind, kann eine Taylor-Reihe für den Brechungsindex konstruiert werden:

$$n(E) = n_0 - \frac{1}{2} r n_0^3 E - \frac{1}{2} s n_0^3 E^2 + \dots \quad (3)$$

Hier bezeichnet n_0 den Brechungsindex des Kristalls ohne Einfluss des elektrischen Feldes. Der Koeffizient r wird als Pockels-Koeffizient und s als Kerr-Koeffizient bezeichnet. Eine lineare Zunahme des Brechungsindex mit der Änderung der elektrischen Feldstärke wird als linearer elektro-optischer Effekt oder Pockels-Effekt bezeichnet. Bei quadratischer Abhängigkeit des Brechungsindex von der angelegten elektrischen Feldstärke wird der Effekt als Kerr-Effekt bezeichnet. Für unser Experiment ist im Folgenden nur noch der Pockels-Effekt von Bedeutung, den wir mit dem Lithiumniobat-Kristall zeigen werden. Auf den Kerr-Effekt wird nicht weiter eingegangen.

2.3 Pockels-Effekt

Der Pockels-Effekt beschreibt, wie oben bereits erläutert, den linearen Zusammenhang zwischen dem Brechungsindex und der elektrischen Feldstärke:

$$n(E) = n_0 - \frac{1}{2} r n_0^3 E \quad (4)$$

Für die meisten Materialien ist dieser Effekt verschwindend gering, doch Lithiumniobat weist einen sehr hohen Pockels-Koeffizienten von $r = 31 \text{ pm/V}$ auf [1], wodurch wir den Pockels-Effekt mit unserem Kristall gut beobachten können.

Um die optischen Eigenschaften eines Kristalls vollständig zu erklären, reicht es nicht aus, einen eindimensionalen Wert für den Brechungsindex anzugeben, da die Lichtausbreitung auch von der Polarisation abhängen kann und der Kristall unterschiedliche richtungsabhängige Brechungsindizes besitzt. Um dieser mehrdimensionalen Natur des Brechungsindex zu verstehen, wird der Brechungsindex als Indexellipsoid dargestellt (siehe Abbildung 1), wobei die Radien der Ellipse entlang der drei Hauptachsen den Brechungsindizes in diese Richtung entsprechen. Der in unserem Experiment verwendete LiNbO_3 -Kristall gehört zur trigonalen Kristallgruppe (trigonal: drei äquivalente Hauptachsen), wobei das angelegte elektrische Feld in Richtung der optischen Achse zeigt. In anisotropen Kristallen kann r durch eine 6×3 -Matrix mit Koeffizienten r_{ij} dargestellt werden. Die Form ergibt sich dabei aus den sechs unabhängigen Komponenten des elektrischen Feldes und den drei unabhängigen Einträgen für jeden Brechungsindex. Der gewöhnliche Brechungsindex lässt sich durch folgenden Ausdruck beschreiben:

$$n_o(E) = n_0 - \frac{1}{2} r_{13} n_0^3 E \quad (5)$$

und für den außergewöhnlicher Brechungsindex:

$$n_e(E) = n_e - \frac{1}{2} r_{33} n_e^3 E \quad (6)$$

2.4 Phasenverschiebung und Halbwellenspannung

Durchläuft ein Laserstrahl mit einer Wellenlänge λ_0 ein Material der Länge L an welches ein elektrisches Feld E angelegt ist, erfährt er aufgrund der Ausbreitung im Medium eine Phasenverschiebung von $\Phi = (2\pi n(E)L)/\lambda_0$. Das elektrische Feld E in einem Kondensator, das von zwei Platten mit einem Abstand d und einer angelegten Spannung V erzeugt wird, kann durch den Zusammenhang $E = V/d$ beschrieben werden. Benutzen wir für unser elektrisches Feld im Kristall einen solchen Kondensator und ermitteln die Halbwellenspannung V_π , bei der das elektrische Feld genau so groß ist, dass die Phase um π verschoben ist, wobei $\Phi_0 = (2\pi n_0 L)/\lambda_0$, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\Phi = \Phi_0 - \frac{V}{V_\pi}, \quad (7)$$

mit

$$V_\pi = \frac{d\lambda_0}{r n_0^3 L} \quad (8)$$

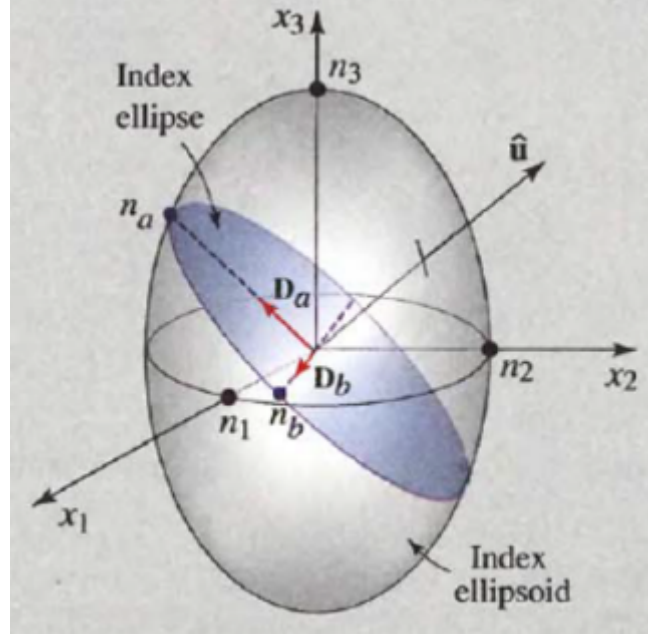


Abbildung 1: Geometrischer Aufbau des Indexellipsoids [1]

2.5 Mach-Zehnder-Interferometer

In diesem Experiment wird ein Mach-Zehnder-Interferometer verwendet (Aufbau siehe Abbildung 2), um den vom Kristall erzeugten Phasenunterschied durch Interferenz zu ermitteln. Beträgt der Phasenunterschied π zwischen den beiden Lichtstrahlen, so kommt es zu destruktiver Interferenz und kein Licht kann detektiert werden.

Die Transmission T beschreibt die Lichtdurchlässigkeit des Interferometers und stellt eine wichtige Größe für dieses Experiment dar, die von der angelegten Spannung V abhängt:

$$T(V) = \cos^2 \left(\alpha - \frac{\pi V}{2 V_\pi} \right) \quad (9)$$

Hierbei beschreibt α eine feste Phase. Beträgt die Phase α innerhalb des Interferometers ein Vielfaches von 2π , dann ist $T(0) = 1$ und $T(V_\pi) = 0$. Durch diese Eigenschaft fungiert das Interferometer als optischer Schalter, da über die angelegte Spannung die Transmission kontrolliert werden kann. Wird eine Spannung von 0 angelegt, dann ist das Interferometer lichtdurchlässig und der Schalter ist ein. Erhöht man nun die Spannung um V_π , so kommt kein Licht mehr durch das Interferometer und der Schalter ist aus.

Eine weitere wichtige Größe bei Interferometern ist der Kontrast C . Er beschreibt die Fähigkeit des Interferometers, Unterschiede in der Lichtintensität I zu erfassen, und wird durch den folgenden Zusammenhang definiert:

$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (10)$$

Da in unserem Experiment die Lichtintensität proportional zur angelegten Spannung V am Kristall ist, kann der Kontrast in unserem Fall durch den folgenden Zusammenhang beschrieben

werden:

$$C = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} + V_{min}} \quad (11)$$

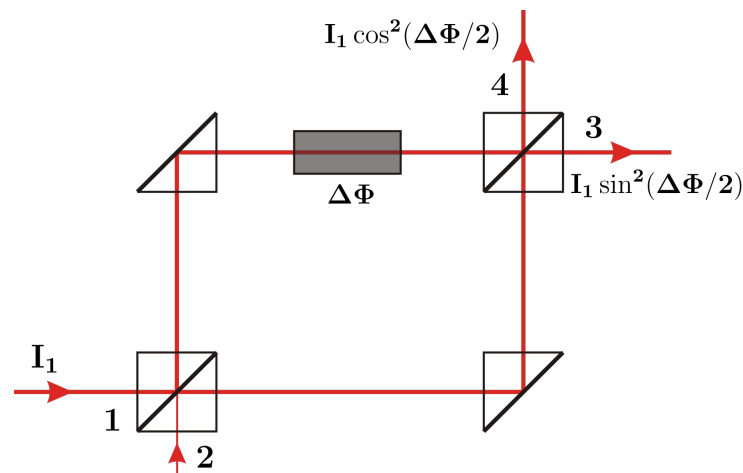


Abbildung 2: Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometer [3]

3 Versuchsaufbau und -durchführung

Die folgenden Textabschnitte veranschaulichen den Versuchsaufbau und erläutern die genaue Datenaufzeichnung und Durchführung des Experiments.

3.1 Versuchsaufbau

Ziel dieses Versuches ist es ein Mach-Zehnder-Interferometer, wie in Abbildung 2 gezeigt, aufzubauen. Unser Mach-Zehnder-Interferometer ist in Abbildung 3 zu sehen. Hierfür werden folgende Bauteile benötigt:

- (1) HeNe-Laser
- (2) Polarisator
- (3) Umlenkspiegel
- (4) 50/50-Strahlteiler
- (5) EOM
- (6) Filter
- (7) Linse
- (8) Photodiode

Der komplette Aufbau des Interferometers erfolgt auf einem optischen Tisch mit einer Gewin-derasterplatte, die es ermöglicht, die verwendeten optischen Elemente zu fixieren. Es wird ein HeNe-Laser mit einer Wellenlänge von $\lambda_0 = 632,8 \text{ nm}$ verwendet. Zuerst wird der Laserstrahl mit

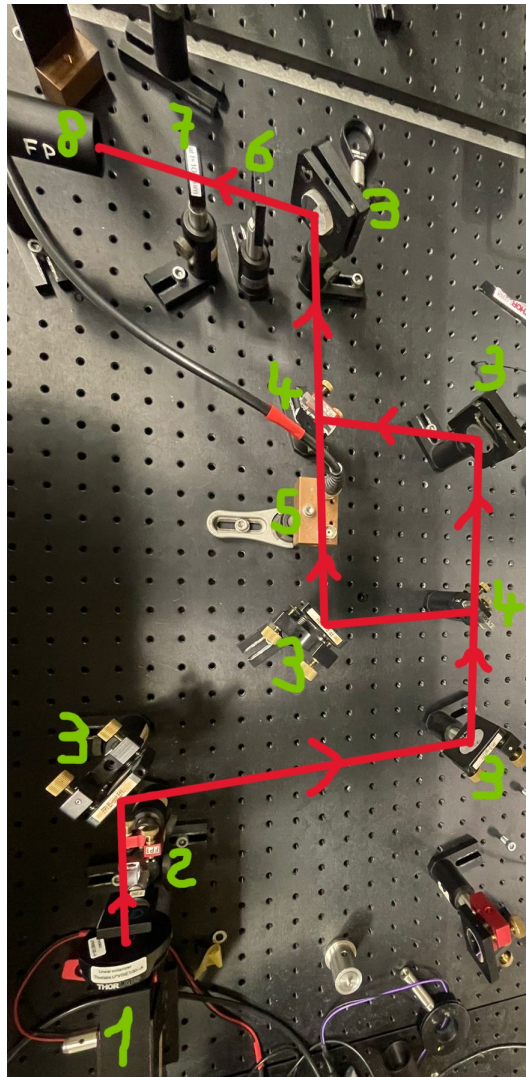


Abbildung 3: Aufbau des Mach-Zehnder-Interferometers im Praktikumsraum. Folgende Bauteile wurden verwendet: (1) HeNe-Laser; (2) Polarisator; (3) Umlenkspiegel; (4) 50/50-Strahlteiler; (5) EOM; (6) Filter; (7) Linse; (8) Photodiode.

einer Linse kollimiert und anschließend mit einer Wellenplatte und einem Strahlteiler horizontal polarisiert. Danach wird der Laserstrahl über zwei Spiegel in das Interferometer gelenkt. Diese Spiegel haben die Aufgabe, den Laserstrahl so auszurichten, dass er parallel zum Tisch verläuft, also überall auf der gleichen Höhe. Dies vereinfacht den Aufbau des Interferometers und kann leicht überprüft werden, indem die Höhe des Laserstrahls direkt hinter dem zweiten Spiegel sowie in großer Entfernung gemessen wird. Ist der Laserstrahl perfekt parallel zum Tisch ausgerichtet, ist die Höhe konstant. Der Laserstrahl betritt dann das Mach-Zehnder-Interferometer. Hier wird der Laserstrahl initial durch einen Strahlteiler aufgeteilt. Beide entstehenden Strahlen werden dann über jeweils einen Spiegel zum nächsten Strahlteiler gelenkt, wo sie wieder überlagert werden. Nun beginnt der Konfigurationsprozess des Interferometers, wobei die Herausforderung darin besteht, die beiden Laserstrahlen perfekt zu überlagern. Die Position der zwei Laserpunkte wird durch Einführen eines Stücks Papiers oder Ähnlichem in den Strahlengang des Lasers überprüft. Hierbei kann das Konzept genutzt werden, dass Verschiebungen in großer Entfernung deutlicher sichtbar sind. Durch mehrfache Wiederholung dieses Ausrichtungsprozesses können

die Laserstrahlen mit Hilfe der Feinausrichtungsschrauben an den Spiegeln immer besser überlagert werden. Eine gute Überlagerung ist daran zu erkennen, dass erstens beide Laserpunkte auch in großer Distanz übereinanderliegen. Zweitens sind im Laserpunkt Linien mit geringer bis keiner Intensität zu sehen, die durch Interferenz entstehen. Zuletzt wird ein EOM, der aus einem Lithiumniobat-Kristall (LiNbO_3) besteht, in einen der Strahlengänge des Interferometers eingefügt. Der EOM ist an einen Hochspannungsgenerator angeschlossen, der wiederum mit einem Frequenzgenerator verbunden ist. Durch diesen Aufbau lassen sich am EOM verschiedene Spannungssignale anlegen. Des Weiteren ist der EOM mit einem Oszilloskop verbunden, über das das Signal betrachtet werden kann. Nach Verlassen des Interferometers wird der Laserstrahl über einen weiteren Spiegel umgeleitet und durch einen Filter sowie eine Linse auf eine Photodiode gelenkt. Der Filter reguliert die Intensität, um die Photodiode nicht zu beschädigen, und die Linse fokussiert den Laserstrahl auf die Photodiode. Die Photodiode wandelt die Intensität des Laserstrahls (genauer: die Photonen) in ein Spannungssignal um, das dann auf dem Oszilloskop betrachtet und analysiert werden kann.

3.2 Durchführung

Nachdem der optische Aufbau vollendet ist, wird die erste Messung zur Bestimmung des Kontrasts C aufgenommen. Hierzu wird eine Dreiecksspannung an den EOM angelegt. Das Intensitätssignal des Laserstrahls wird dann am Oszilloskop betrachtet und sollte ungefähr die Form wie in Abbildung 4 haben. Nun soll das Interferometer weiter optimiert werden, indem ΔI maximiert wird. Dies wird durch weitere Feinjustage der Interferometerspiegel und Strahlteiler erreicht sowie durch den Prozess des "Beam-Walkings", bei dem der Laserstrahl schrittweise über zwei Spiegel ausgerichtet wird. Sobald ΔI maximal ist und somit das Interferometer optimal ausgerichtet ist, können die Daten des Oszilloskops aufgezeichnet und der Kontrast bestimmt werden.

In der zweiten Messung soll die Halbwellenspannung V_π bestimmt werden. Hierzu wird eine Rechtecksspannung an den EOM angelegt. Die Amplitude der Rechtecksspannung muss dann so eingestellt werden, dass das Intensitätssignal der Photodiode konstant ist. Die Form des Signals sollte dann ungefähr die Form wie in Abbildung 5 haben. Über die Amplitude des Rechtecksignals kann dann die Halbwellenspannung berechnet werden.

4 Experimentelle Ergebnisse

Im ersten Teil des Experiments sollte der Kontrast des Interferometers bestimmt werden. Hierzu wurde eine Dreiecksspannung an den EOM angelegt und dann das Signal der Lichtintensität am Oszilloskop analysiert. Die Intensitätsdifferenz ΔI wurde dann durch Anpassungen der Spiegel und Strahlenteiler weiter optimiert. Das Signal mit der besten Intensitätsdifferenz, dass wir erzeugen konnten, kann in Figure 4 betrachtet werden. Für unser optimiertes Interferometer ergibt sich

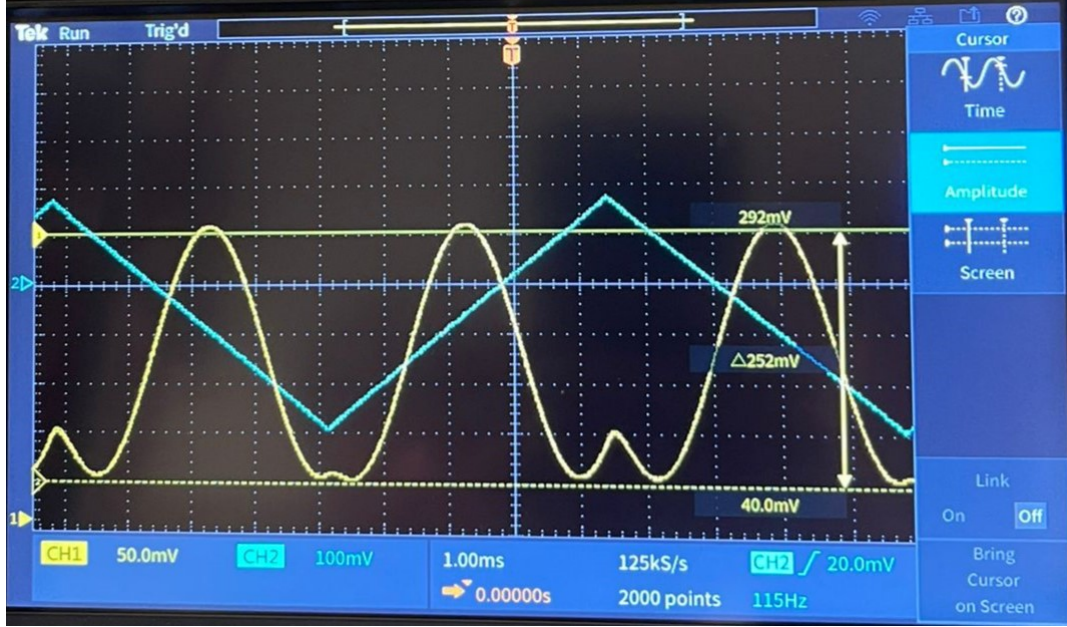


Abbildung 4: Bild der Oszilloskopssignale bei optimiertem Interferometeraufbau. Die Intensität des Lichts auf der Photodiode (gelb) bei einer angelegten Dreiecksspannung (blau). Die maximale und minimale Intensität wurden durch die Cursor-Funktion des Oszilloskops auf $V_{max} = 292(10)$ mV und $V_{min} = 40(10)$ mV bestimmt und durch die Amplitude-Linien (gelb) gekennzeichnet.

eine maximale und minimale Intensität von $V_{max} = 292(10)$ mV und $V_{min} = 40(10)$ mV. Daraus ergibt sich für unsere optimale Intensitätsdifferenz $\Delta I_{opt} = 252(14)$ mV. Den Kontrast C können wir nun mit Gleichung 10 zu $C_{opt} = 76(5)\%$ bestimmen.

Um die Halbwellenspannung zu messen wird an den EOM eine Rechtecksspannung angelegt. Dann muss die Amplitude der Rechtecksspannung so eingestellt werden, dass das Intensitätssignal der Photodiode im Oszilloskop eine konstante Linie ergibt (siehe Abbildung 5). Wenn das Intensitätssignal konstant ist, entspricht die Amplitude der Rechtecksspannung genau $2V_\pi$. Somit ergibt sich für unsere Messung eine Halbwellenspannung $V_\pi = 186(2)$ mV. Mit Gleichung 8 können wir jetzt mit der bestimmten Halbwellenspannung V_π , der Wellenlänge des Lasers λ_0 , der Länge L , Dicke d und dem Brechungsindex n_0 des Kristall den Pockels-Koeffizienten zu $r_{33} = 31,3(6)$ pm/V bestimmen.

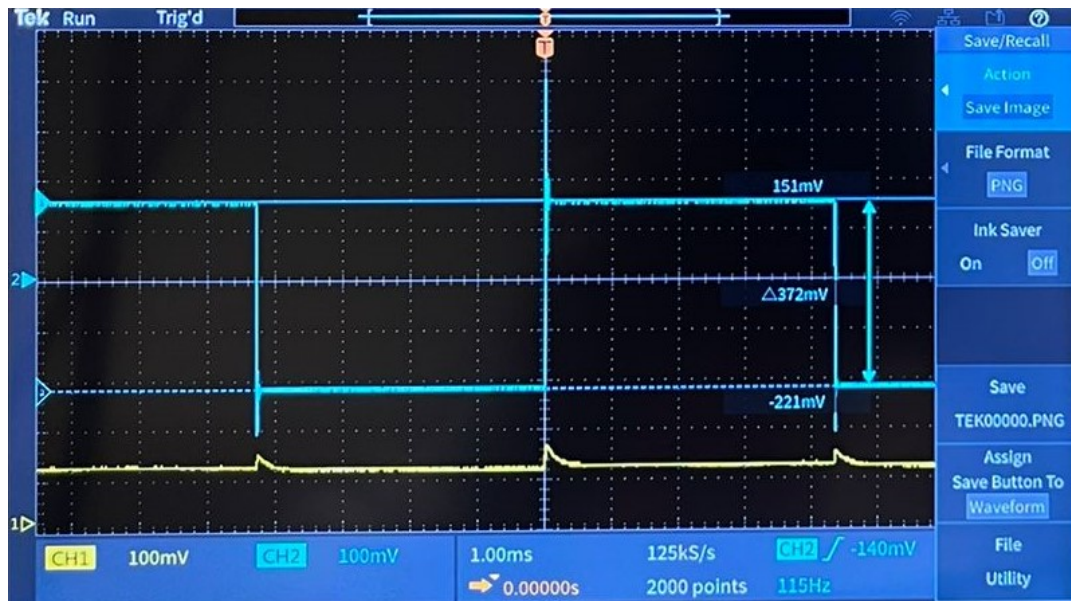


Abbildung 5: Bild der Oszilloskopssignale. Die Intensität des Lichts auf der Photodiode (gelb) bei einer angelegten Rechtecksspannung (blau). Die Halbwellenspannung V_π kann nun durch die Amplitude der Rechtecksspannung, die durch die Curser-Funktion (blau) gekennzeichnet ist, bestimmt werden

5 Anwendungsgebiete von elektro-optischen Schaltern

Elektro-optische Schalter haben zahlreiche Anwendungen in der modernen Technologie, insbesondere in der Optoelektronik und Kommunikationstechnik. Sie nutzen den elektro-optischen Effekt, um den Brechungsindex eines Materials durch ein angelegtes elektrisches Feld zu verändern und damit Lichtstrahlen präzise zu steuern.

Ein bedeutendes Anwendungsgebiet ist die optische Kommunikation, etwa in Glasfasernetzen, wo sie als Modulatoren verwendet werden, um Daten mit hoher Geschwindigkeit und Genauigkeit zu übertragen. Hierbei modulieren sie die Intensität, Phase oder Polarisation des Lichtsignals, was für den Betrieb von Hochgeschwindigkeits-Datenübertragungen essenziell ist.

In der Lasertechnologie werden elektro-optische Schalter für die Pulsmodulation und das Q-Switching verwendet. Durch Q-Switching können Laserpulse mit hoher Leistung erzeugt werden, was in der Materialbearbeitung und in der medizinischen Lasertechnik von Vorteil ist.

Weitere Anwendungen umfassen die Laserstabilisierung und -frequenzmodulation, z.B. in der Pound-Drever-Hall-Methode zur präzisen Frequenzmessung. In wissenschaftlichen Experimenten und Messsystemen ermöglichen sie eine genaue Kontrolle und Modulation von Laserstrahlen.

Elektro-optische Schalter sind somit vielseitige Werkzeuge, die in vielen Bereichen der modernen Technik unverzichtbar sind, von der Telekommunikation über die Lasertechnologie bis hin zu wissenschaftlichen Messsystemen. [4]

6 Diskussion

Zusammengefasst war dieses Experiment sehr spannend und informativ. Wir haben gelernt, mit optischen Elementen wie Spiegeln, Linsen und Strahlteilern zu arbeiten und daraus sogar ein

funktionierendes Mach-Zehnder-Interferometer zu bauen. Um unser aufgebautes Interferometer qualitativ einzuordnen, ist es sinnvoll, unseren optimal erreichten Kontrast $C_{opt} = 76(5)\%$ mit einem Referenzwert zu vergleichen. Unser Betreuer gab an, dass Kontraste von bis zu über 90 % erreicht werden können. Das bedeutet, dass wir definitiv noch unsere Fähigkeiten beim Aufbau von optischen Systemen, wie zum Beispiel das "Beam-Walking", verbessern können. Trotzdem sind wir mit unserem ersten selbst aufgebauten Interferometer zufrieden, da eine tiefere Optimierung solcher optischer Systeme meist auch sehr zeitaufwendig ist und unsere Zeit begrenzt war. Beim zweiten Teil des Versuchs, der Bestimmung des Pockels-Koeffizienten über die Halbwellenspannung, liegt der Literaturwert aus dem Skript $r_{33Skript} = 30,8(2) \text{ pm/V}$ [1] im Fehlerbereich unseres ermittelten Werts $r_{33} = 31,3(6) \text{ pm/V}$.

Schlussendlich hat uns das Experiment und die weitere Recherche über die Anwendungsgebiete von optischen Schaltern gezeigt, dass der Brechungsindex eine entscheidende Rolle beim elektro-optischen Effekt in anisotropen Materialien spielt, da er sich unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes verändern kann. Diese Veränderungen ermöglichen die gezielte Manipulation von Licht durch elektrische Signale, was für eine Vielzahl von Anwendungen in der Optoelektronik und Photonik von Bedeutung ist.

Literatur

- [1] U. Innsbruck. *FP1 Versuch E121: Elektro-optischer Effek*. Skript; Status 21.03.24. retrieved on 27.05.24.
- [2] T. C. SME. *Pockels Effect In Optics: Understanding Electro-Optic Modulation*. Online; Status 20.11.23. Abgerufen am 29.05.2024. URL: <https://techiescience.com/pockels-effect-in-optics/>.
- [3] Wikipedia. *Mach-Zehnder-Interferometer*. Online; Status 10.09.23. retrieved on 27.05.24. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Mach-Zehnder-Interferometer#/media/Datei:Mach-Zehnder_interferometer+portlabels.svg.
- [4] R. Photonics. *Electro-optic Modulators*. Online; Status 02.03.24. Retrieved on 28.05.24. URL: https://www.rp-photonics.com/electro_optic_modulators.html.

Erklärung

Hiermit bestätigen wir, dass der vorliegende Bericht unabhängig verfasst wurde und dass alle erforderlichen Quellen und Referenzen angegeben wurden.

Arik Bürkle
Student 1

23.05.2024
Datum

Robin Hoffmann
Student 2

23.05.2024
Datum



Valentin Ertl
Student 3

23.05.2024
Datum

Arbeitsaufwand

Arik Bürkle

Vorbereitung:4h

Versuch:5h

Bericht:2h

Robin Hoffmann

Vorbereitung:4h

Versuch:5h

Bericht:11h

Valentin Ertl

Vorbereitung:4h

Versuch:5h

Bericht:8h