

# Polarisationsfilter und Strahlteiler

Kurztext im Rahmen von „Quanten auf Reisen“

Physikdidaktik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg



Weitere Kurztexte hier: <https://physikdidaktik.uni-freiburg.de/kurztexte/>

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

universität freiburg



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Polarisationsfilter und Strahlteiler</b>	<b>3</b>
1.1	Polarisationsfilterfolie . . . . .	3
1.2	Polarisationsdreher . . . . .	4
1.3	Nicht-polarisierende Strahlteiler . . . . .	5
1.4	Polarisierende Strahlteiler . . . . .	8

# Kapitel 1

## Polarisationsfilter und Strahlteiler

*Autor: Anja Kuhnhold, Version vom: 26.07.2025*

<sup>1</sup>

Häufig vorkommende Elemente in Experimenten mit Licht sind Polarisationsfilter, Polarisationsdreher, polarisierende und nicht-polarisierende Strahlteiler. Diese finden beispielsweise Anwendung im Mach-Zehnder-Interferometer, beim Quantenradierer und beim quantenkryptographischen Schlüsselaustausch nach dem BB84-Protokoll. Im Folgenden werden Aufbau und Funktionsweise dieser Bauteile erklärt und auf die Unterschiede in ihrer Wirkung auf klassisches Licht und auf Einzelphotonen eingegangen.

### 1.1 Polarisationsfilterfolie

Polarisationsfilterfolien bestehen meistens aus gestreckten und dadurch in einer bestimmten Richtung ausgerichteten langen Molekülen (z.B. Polyvinylalkohol). Die Achse dieser Moleküle definiert die Richtung, in der Licht absorbiert wird; die Polarisationsrichtung des durchgelassenen Lichts liegt senkrecht dazu und wird als Transmissionsachse des Filters bezeichnet. Der Anteil des Lichts, dessen elektrischer Feldvektor in der Richtung der Molekülachsen schwingt, erzeugt Schwingungen von beweglichen Ladungen und wird somit absorbiert. Der übrige Anteil (senkrecht zu den Molekülachsen) kann den Filter passieren. Da nicht alle Moleküle des Filters perfekt ausgerichtet sein können, absorbiert ein Filter auch dann etwas Licht, wenn dessen Polarisationsrichtung genau der Filterachse entspricht.

Trifft polarisiertes Licht auf eine Polarisationsfilterfolie, wird nach dem Gesetz von Malus der Anteil  $\cos^2(\Delta\varphi)$  der Intensität transmittiert, wobei  $\Delta\varphi$  der Winkel zwischen der Polarisationsrichtung des Lichts und der Achse der Polarisationsfilterfolie (senkrecht zu den Molekülachsen) ist. Bei Einzelphotonen entspricht das Auftreffen auf einen Filter einer Messung in der vom Filter vorgegebenen Polarisationsbasis. Passiert das Photon den Filter, war es vorher definitiv nicht im Polarisationszustand, der den Molekülachsen entspricht, und hinter dem Filter hat es definitiv den Polarisationszustand, der der Filterachse entspricht.

---

<sup>1</sup>Bei der Überarbeitung und Gliederung dieses Textes, sowie der Erstellung von Abbildungen wurde ChatGPT zu Rate gezogen (Zugang: HAWKI, <https://hawki.uni-freiburg.de/interface>, ChatGPT-4.1 (Provider: Firma OpenAI), bzw. Open WebUI, <https://openwebui.uni-freiburg.de/> OpenAI: ChatGPT-5/5.2).

Der Zustand vor dem Filter kann nicht genauer festgestellt werden. Kennt man den Zustand vor dem Filter (weil man diesen präpariert hat), gibt der Wert  $\cos^2(\Delta\varphi)$  an, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Photon den Filter passiert. Allgemeiner ist bei einem Superpositionszustand bezüglich horizontaler und vertikaler Polarisation,  $|\psi\rangle = \alpha|H\rangle + \beta|V\rangle$ , mit  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ , die Wahrscheinlichkeit der Transmission  $|\alpha \cos(\Delta\varphi) + \beta \sin(\Delta\varphi)|^2$ , wobei  $\Delta\varphi$  dann den Winkel zwischen horizontaler Richtung und Transmissionsachse meint.

Im Alltag kennt man Polarisationsfilterfolien beispielsweise aus dem Bereich der Fotografie, wo sie unerwünschte Reflexionen herausfiltern können. Aus demselben Grund setzt man auch bei Sonnenbrillen solche Filter ein. Sie bilden außerdem die Grundlage technischer Anwendungen wie Flüssigkristallbildschirme (LCD) oder Polarisationsmikroskope, bei denen die Substanz (Flüssigkristalle oder Probenmaterial) zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren dafür sorgt, dass Licht teilweise gedreht wird und so den zweiten Filter passieren kann.

## 1.2 Polarisationsdreher

Polarisationsdreher, in der Praxis meist als Halbwellenplatten realisiert, bestehen aus doppelbrechendem Material, beispielsweise Quarz oder Kalkspat. Die zur optischen Achse des Materials parallelen und senkrechten Komponenten des elektrischen Feldes des Lichts haben eine unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb des Materials, sodass sich ihre Phasen beim Durchlaufen des Polarisationsdrehers verschieben. Die Dicke des Materials wird so gewählt, dass es eine Phasenverschiebung der beiden Anteile um  $\pi$  erzeugt. Damit wird das Licht um einen Winkel von  $2\theta$  gedreht, wenn  $\theta$  der Winkel zwischen der optischen Achse und der Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts ist. In Abb. 1.1 ist dies für  $\theta = 45^\circ$  veranschaulicht. Es gibt auch Viertelwellenplatten; diese verwandeln linear polarisiertes Licht in elliptisch polarisiertes Licht und umgekehrt, indem eine Phasenverschiebung von  $\pi/2$  erzeugt wird. Beträgt der Winkel  $\theta$  in dem Fall  $45^\circ$ , wird aus linear polarisiertem Licht zirkular polarisiertes Licht. Da die Phasenverschiebung von der Wellenlänge des einfallenden Lichts abhängt, funktionieren Polarisationsdreher optimal nur für eine bestimmte Wellenlänge.

Für Einzelphotonen in einem allgemeinen Polarisationszustand  $|\psi\rangle = \alpha|H\rangle + \beta|V\rangle$ , mit  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ , wirkt eine Wellenplatte als unitäre Transformation

$$U_{\text{WP}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi} \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

in der Basis der optischen Achse der Wellenplatte, wobei  $\phi$  die Phasenverschiebung zwischen den beiden Eigenrichtungen ist. Für den Polarisationsdreher ( $\phi = \pi$ ) und den Winkel  $\theta$  zwischen der H/V-Basis und der Basis des Drehers ergibt sich

$$|\psi_{\text{out}}\rangle = \begin{pmatrix} \cos(2\theta) & \sin(2\theta) \\ \sin(2\theta) & -\cos(2\theta) \end{pmatrix} |\psi_{\text{in}}\rangle. \quad (1.2)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass das Photon bei einer Messung horizontale Polarisation zeigt ändert sich also von  $|\alpha|^2$  (vor dem Dreher) zu  $|\cos(2\theta)\alpha + \sin(2\theta)\beta|^2$  (hinter dem Dreher).

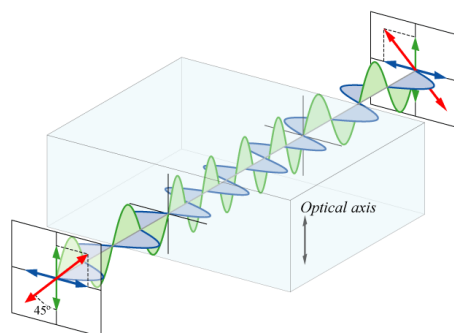


Abbildung 1.1: Schema eines Polarisationsdrehers (Halbwellenplatte). Linear polarisiertes Licht trifft unter einem Winkel von  $\theta = 45^\circ$  zur optischen Achse auf das doppelbrechende Medium (roter Doppelpfeil). Die Komponenten des Lichts, bei denen das elektrische Feld parallel (grün) und senkrecht (blau) zur optischen Achse schwingt, durchlaufen das Material unterschiedlich schnell, sodass am Ausgang eine Phasenverschiebung von  $180^\circ$  zwischen ihnen entsteht. Es ergibt sich dann eine Polarisationsrichtung von  $-45^\circ$  zur optischen Achse, also eine Drehung um  $2\theta = 90^\circ$ . Grafik von Bob Mellish, eigene Arbeit, [CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=760346](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=760346).

### 1.3 Nicht-polarisierende Strahlteiler

Wie der Name andeutet, sorgt ein Strahlteiler dafür, dass eintreffendes Licht in zwei Teilstrahlen aufgeteilt wird. „Nicht-polarisierend“ bedeutet dabei, dass die Aufteilung unabhängig von der Polarisation des eintreffenden Strahls ist. In den meisten Anwendungen finden 50:50-Strahlteiler Einsatz, bei denen 50% des Lichts transmittiert und 50% abgelenkt werden; asymmetrische Aufspaltungen sind jedoch auch möglich.

Die mathematische Darstellung eines Strahlteilers wird im Kurztext zum Interferometer beschrieben. Die wesentlichen Punkte werden hier nur zusammengefasst:

Für die Aufteilung von Strahlen an den zwei Eingängen eines Strahlteilers gelten folgende Vorschriften:

$$|1\rangle_i \longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle_f + i|2\rangle_f) \quad |2\rangle_i \longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|2\rangle_f + i|1\rangle_f) \quad (1.3)$$

Hierbei wurde die in der Streutheorie übliche Konvention verwendet, die einlaufenden (‘initial’) Zustände durch  $i$  und die auslaufenden (‘final’) Zustände durch  $f$  zu kennzeichnen. Die Faktoren  $i$  in Gl. (1.3) beschreiben eine relative Phasenverschiebung um  $90^\circ$ . Diese Phasenverschiebung tritt immer auf, wenn eine Reflexion an einer Grenzschicht stattfindet, bei der der Winkel zwischen einfallender und ausfallender Welle gerade  $90^\circ$  beträgt. Wir können die Wirkung eines Strahlteilers daher durch eine unitäre Matrix beschreiben, welche für einen symmetrischen Strahlteiler wie folgt aussieht:

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix}. \quad (1.4)$$

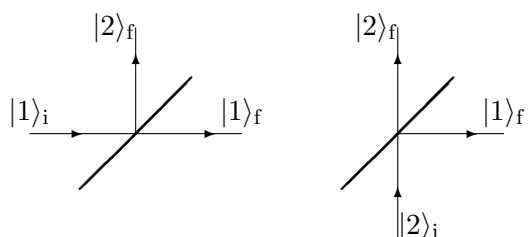


Abbildung 1.2: Die beiden Strahlengänge in einem Strahlteiler in Abhängigkeit vom Anfangszustand. Ordnet man jeder Reflexion einen Faktor  $i$  zu, erhält man die Matrix in Gl. (1.4).

Oft findet man auch die Form

$$S' = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1.5)$$

welche durch Vor- und Nachschalten von relativen optischen Weglängenänderungen (Phasen) aus Gl. (1.4) hervorgeht.

Physikalisch besteht ein Strahlteiler meist aus einer beschichteten Grenzfläche. Die Beschichtung ist gerade so gewählt, dass die Hälfte der Lichtintensität durchgelassen und die andere Hälfte abgelenkt wird. Es gibt auch Strahlteiler mit einer asymmetrischen Aufspaltung, wir beschränken uns hier aber auf die 50:50-Strahlteiler.

Eine einfache Umsetzung eines Strahlteilers ist ein halbdurchlässiger Spiegel, also eine flache Glasscheibe, die entweder mit einer sehr dünnen Schicht aus einem Metalloxid beschichtet ist oder auf der ein System aus dielektrischen Schichten aufgebracht wird. Bei der zweiten Variante werden Interferenzeffekte genutzt, um (nur) einen Teil des Lichts hindurchzulassen; man spricht auch von Interferenzfiltern (siehe Abb. 1.3). Eine spezielle Form solcher Filter sind dichroitische Spiegel, die Licht nach verschiedenen Wellenlängenbereichen aufteilen können. Trifft Licht unter  $45^\circ$  auf einen Strahlteiler, wird die Hälfte davon transmittiert und die andere Hälfte reflektiert, sodass zwischen beiden Teilstrahlen ein Winkel von  $90^\circ$  besteht.

Eine andere Art der Umsetzung sind Strahlteilerwürfel, die aus zwei Prismen bestehen, zwischen denen sich ein kleiner Luftspalt oder eine Schicht (Kunst-)Harz befindet. Diese Grenzfläche sorgt wiederum für die teilweise Reflexion. Das genutzte Phänomen ist dabei die verhinderte Totalreflexion: In Abwesenheit des zweiten Prismas würde das Licht totalreflektiert; die an der Grenzfläche entstehende evaneszente Welle würde exponentiell abklingen. In Anwesenheit des zweiten Prismas kann diese Welle jedoch den Spalt „überwinden“ und sich weiter ausbreiten; siehe dazu die Abb. 1.4. Die Dicke der Schicht und die Wahl des Materials beeinflussen, für welchen Wellenlängenbereich der Strahlteiler geeignet ist.

Trifft ein einzelnes Photon auf einen idealen nicht-polarisierenden Strahlteiler, wird es mit 50%-iger Wahrscheinlichkeit transmittiert oder reflektiert; es wird nicht geteilt. Solange keine Messung stattfindet, befindet sich das Photon hinter dem Strahlteiler in einem Superpositionszustand aus beiden möglichen Ausgängen. Dies führt zum Beispiel beim Mach-Zehnder-Interferometer dazu, dass selbst einzelne Photonen ein Interferenzmuster erzeugen, wenn viele Photonen detektiert werden.

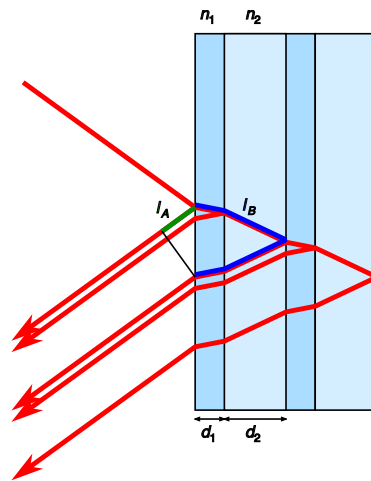


Abbildung 1.3: Schema eines Systems aus dielektrischen Schichten eines Interferenzfilters. Die Dicken der Schichten  $d_{1,2}$  und die Brechungsindizes  $n_{1,2}$  bestimmen den Unterschied der optischen Weglängen  $l_{A,B}$ . Grafik von en:hankwang, eigene Arbeit, [CC BY 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4498223](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4498223).

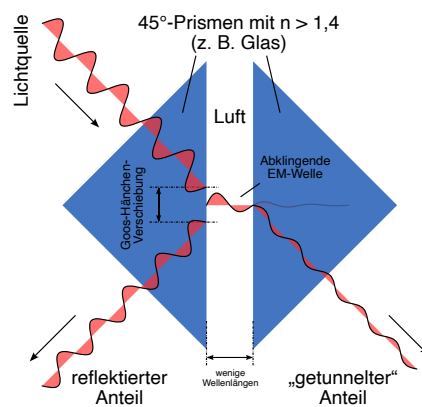


Abbildung 1.4: Schema der verhinderten Totalreflexion. Ist der Spalt schmal genug, kann die evaneszente Welle (abklingende EM-Welle) im zweiten Prisma weitergeleitet werden. Grafik von Benutzer:Cepheiden, eigene Arbeit, [CC BY-SA 2.0 de, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8541704](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8541704).

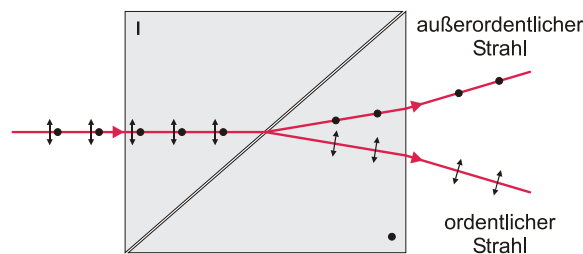


Abbildung 1.5: Schema des Wollaston-Prismas. Die optischen Achsen der Prismen sind in den Ecken gekennzeichnet. Beim ordentlichen Strahl schwingt das elektrische Feld senkrecht zur optischen Achse; beim außerordentlichen Strahl schwingt es parallel dazu. Grafik von Ansgar Hellwig, erstellt mit Corel Draw 11, gemeinfrei (Public Domain). <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1999346>.

## 1.4 Polarisierende Strahlteiler

Die Aufteilung des Lichts kann auch anhand der Polarisationsrichtung geschehen. Trifft unpolarisiertes Licht auf einen polarisierenden Strahlteiler, wird es in zwei zueinander orthogonale Polarisationsrichtungen aufgeteilt; z.B. ist das transmittierte Licht dann horizontal polarisiert und das reflektierte vertikal. Hat das eintreffende Licht eine bestimmte Polarisation, wird es entsprechend des Gesetzes von Malus bezüglich der vom Strahlteiler vorgegebenen Richtungen (also dessen Basis) aufgeteilt. Bei einem einzelnen Photon bestimmt dessen Polarisationszustand vor dem Strahlteiler die Wahrscheinlichkeit, dass es transmittiert oder reflektiert wird. Hinter dem Strahlteiler hat das Photon dann im Allgemeinen einen Superpositionszustand der beiden möglichen Ausgänge, z.B.  $|\psi\rangle = \alpha|\text{transmittiert, horizontal polarisiert}\rangle + \beta|\text{reflektiert, vertikal polarisiert}\rangle$ .

Eine Umsetzung eines solchen Strahlteilers basiert auf der Verwendung eines doppelbrechenden Mediums, z.B. Calcit (Kalkspat), in Form von zwei zusammengeklebten Prismen. Die optischen Achsen der beiden Prismen liegen orthogonal zueinander, sodass eine Aufspaltung des eintreffenden Lichts in zwei Strahlen orthogonaler Polarisationsrichtungen stattfindet (sog. Wollaston-Prisma (Abb. 1.5) bzw. Rochon- und Sénarmont-Prismen als Modifikationen). Der Winkel zwischen den Teilstrahlen ist abhängig von der Geometrie der Prismen und der Wellenlänge des Lichts und reicht typischerweise von  $1^\circ$  bis  $45^\circ$ .

Bei einer anderen Realisierung bilden zwei Glas-Prismen einen Strahlteilerwürfel. Eines der Prismen hat eine dielektrische Beschichtung auf der Basisfläche. An dieser Schicht wird s-polarisiertes Licht (senkrecht zur Einfallsebene schwingend) reflektiert, sodass p-polarisiertes Licht (parallel zur Einfallsebene schwingend) transmittiert wird. Dies funktioniert wiederum durch Interferenzeffekte, die in den dielektrischen Schichten der Beschichtung auftreten. Die Schichten sind so ausgelegt, dass für die eine Polarisationsrichtung konstruktive Interferenz bei Reflexion auftritt, während für die andere das Gegenteil gilt. Bei dieser Variante verlassen die beiden Teilstrahlen den Strahlteiler unter einem Winkel von  $90^\circ$  zueinander. In der Praxis ist die Effizienz der Trennung für eine Polarisationsrichtung oft höher

als für die andere, was aber im Allgemeinen nur für hochpräzise Experimente relevant ist.

## Literaturempfehlung

- M. Born, E. Wolf: Principles of Optics. Cambridge University Press.
- E. Hecht: Optics. Addison-Wesley.
- B.E.A Saleh, M.C. Teich: Fundamentals of Photonics. Wiley.
- R. Paschotta: RP Photonics Encyclopedia,  
<https://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>
- A. Zeilinger, G. Weihs, T. Jennewein, M. Aspelmeyer: “Happy centenary, photon” (Nature, 2005).