

Mach-Zehnder Interferometer

Harald Krüger, Gruppe 2B

4. Januar 2015

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	2
1.1 Mach-Zehnder Interferometer	2
1.2 Phasenbeziehungen	2
1.3 Verwendung von Polarisatoren	3
2 Durchführung	4
3 Auswertung	4
3.1 Vermessung der optischen Geräte	4
3.2 Interferenzmuster	5
3.3 Diskussion	8
A Vollständige Intensitätsprofile	9
B Intensitätsextrema und Kontraste	10

1 Grundlagen

1.1 Mach-Zehnder Interferometer

Ein Mach-Zehnder Interferometer besteht, wie in Abb. 1 zu sehen, aus einem Laser, zwei Strahlteilern, zwei Spiegeln und zwei Schirmen. Der Lichtstrahl wird ausgehend vom Laserstrahl auf den ersten Strahlteiler geleitet. Dort spaltet sich der Strahl auf. Ein Teil geht auf den Spiegel 1, ein anderer auf Spiegel 2. Danach treffen beide Strahlen im zweiten Strahlteiler wieder aufeinander und interferieren miteinander. Dadurch können Interferenzmuster auf den Schirmen entstehen.

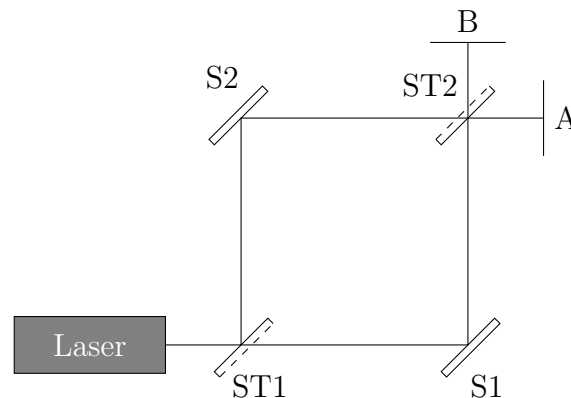


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Mach-Zehnder Interferometers bestehend aus einem Laser, zwei Strahlteilern ST1 und ST2, zwei Spiegeln S1 und S2 sowie den Schirmen A und B.

1.2 Phasenbeziehungen

Für die Interferenz ist der Weg den die Strahlen gehen von besonderer Bedeutung, sie nehmen unterschiedliche Phasenfaktoren auf. So nimmt eine Welle bei der Reflexion an einem optisch dickeren Medium eine Phase von π auf.

Die Strahlteiler bestehen aus einer beschichteten Seite, die eine Hälfte des Lichtes reflektiert und die andere Hälfte transmittiert und einer unbeschichteten Seite (in Abb. 1 ist die beschichtete Seite durchgezogen, die unbeschichtete gestrichelt). Bei der Transmission nimmt die Welle den Phasenfaktor $2\pi t/\lambda$ auf, wobei t die Weglänge innerhalb des Strahlteilers und λ die Wellenlänge des Lichtes ist.

Für den Fall, dass zunächst die unbeschichtete Seite durchdrungen wird, nimmt die reflektierte Welle die Phase $4\pi t/\lambda$ (da doppelter Weg) auf, die transmittierte hingegen $2\pi t/\lambda$.

Solche Reflektions/-Transmissionsstrahlengänge sind in Abb. 1 dargestellt. Es seien hierbei beide Wege, über S1 und S2 von der Länge l . Dann ergibt sich

die Phase der Welle die über S1 auf Schirm A trifft zu

$$\phi = 2\pi \left(1 + \frac{l+t}{\lambda} \right) .$$

Analog ergibt sich für den Schirm A über S2 die gleiche Phase

$$\phi = 2\pi \left(1 + \frac{l+t}{\lambda} \right) .$$

Aufgrund der Phasendifferenz $\Delta\phi = 0$ ergibt sich konstruktive Interferenz auf dem Schirm A. Die Phasendifferenz an Schirm B ist hingegen

$$\Delta\phi = 2\pi \left(1 + \frac{l+2t}{\lambda} \right) - \pi - 2\pi \frac{l+t}{\lambda} = \pi .$$

Daher kommt es an Schirm B zu destruktiver Interferenz.

1.3 Verwendung von Polarisatoren

Mit Hilfe des Einbaus eines $\lambda/4$ -Plättchens vor ST1 wird bei richtigem Stellwinkel aus dem linear polarisierten Licht des Lasers zirkular polarisiertes Licht. Verwendet man zusätzlich zwei Polarisatoren auf beiden Wegen zwischen beiden Strahlteilern, so wird aus dem zirkular polarisierten Licht wiederum linear polarisiertes Licht. Je nach Ausrichtung sind die Polarisationsrichtungen der beiden Strahlengänge unterschiedlich. Bei gleicher Ausrichtung der Polarisatoren lässt sich Interferenz beobachten. Stehen sie allerdings senkrecht aufeinander, so findet keine Interferenz statt. Es sind dann lediglich zwei Lichtpunkte auf den Schirmen zu sehen.

2 Durchführung

Der erste Schritt besteht darin, die optischen Instrumente zu vermessen. Dazu wird der Laserstrahl durch einen Polarisator und ein $\lambda/4$ -Plättchen geleitet. Am Ende des Strahlenganges wird die Intensität durch eine Photodiode gemessen. Im Zuge der Messung werden die Winkeleinstellungen variiert. Daraufhin wird das Mach-Zehnde Interferometer aufgebaut. Eine Aufbau-Skizze hierzu ist in Abb. 1 dargestellt. Mit Hilfe einer Ccd-Camera werden dann die Interferenzmuster auf einem Schirm gemessen.

Zu Schluss werden Polarisatoren und $\lambda/4$ -Plättchen wie in Absch. 1.3 beschrieben zum Aufbau hinzugefügt. Dabei wird besonders auf die Genauigkeit bei der Justage geachtet, sodass alle Strahlen möglichst parallel zum optischen Tisch sind und somit für beide Wege die Weglänge l gleich ist.

3 Auswertung

3.1 Vermessung der optischen Geräte

Im ersten Schritt wurde die Intensität des transmittierten Lichtes durch einen Polarisator in Abhängigkeit vom Einstellwinkel α gemessen. Die Ergebnisse hierzu sind in Abb. 2 dargestellt.

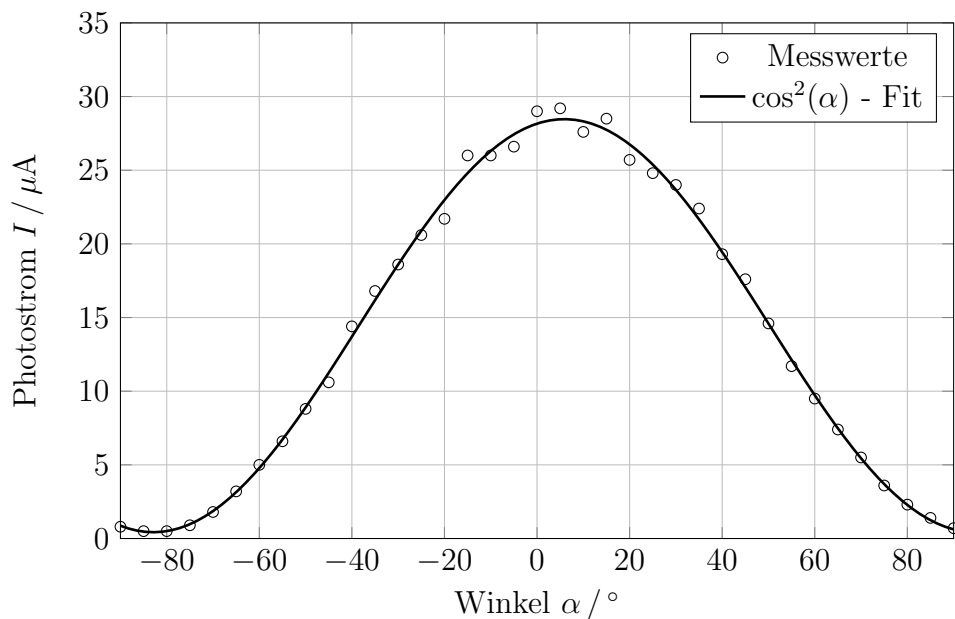


Abb. 2: Vom durch den Polarisator transmittierten Licht hervorgerufener Photostrom I in Abhängigkeit des Winkels des Polarisators.

Ein $\cos^2(\alpha)$ -Fit an die Messdaten liefert eine Verschiebung des zu erwartenden Intensitätsmaximums bei 0° . Dieses liegt nach Berechnung durch den

Fit um $5,9^\circ$ in positive Winkel-Richtung verschoben (positive Winkel bedeuten nach rechts gedrehte Winkel, negative nach links gedrehte Winkel). Diese Abweichung legt eine Verschiebung des Polarisators in der eigenen Halterung nahe. Für betragsmäßig große Winkel verschwindet die Intensität nahezu, der Polarisator wird lichtundurchlässig. Aus der Beziehung

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1)$$

lassen sich Rückschlüsse auf den Grad der Polarisation des Laserlichtes ziehen. $K = 1$ bedeutet total polarisiert, aus den Werten $I_{\max} = 28$ und $I_{\min} = 1$ ergibt sich nach (1) daher für den verwendeten Laser mit $K = 0,93$ annähernd total polarisiertes Licht.

Unter Verwendung eines $\lambda/4$ -Plättchens vor dem Polarisator in 0° Stellung wurde daraufhin der Photostrom in Abhängigkeit des Einstellwinkels β des $\lambda/4$ -Plättchens gemessen. Die Ergebnisse sind in Abb. 3 dargestellt.

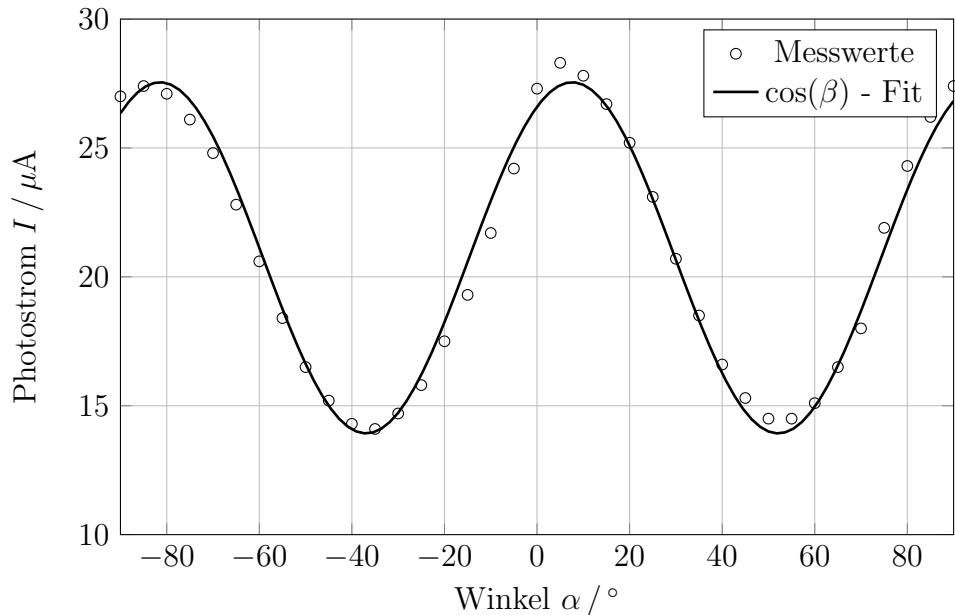


Abb. 3: Vom durch den Polarisator transmittierten Licht hervorgerufener Photostrom I in Abhängigkeit des Winkels β des $\lambda/4$ -Plättchens.

Auch hier zeigt sich im Fit eine Verschiebung des zu erwartenden \cos -Verlaufes von $7,9^\circ$. Unter Berücksichtigung der Verschiebung des Polarisators um $5,9^\circ$ ergibt sich hier eine zusätzliche Verschiebung um 2° , die ebenfalls eine Verschiebung des Plättchens in der Halterung nahe legt. Die Minima liegen somit bei $(45 + 7,9)^\circ$. Mit diesen wird im folgenden weitergearbeitet.

3.2 Interferenzmuster

In Abb 4 ist das Interferenzmuster dargestellt, das entsteht, wenn ein Aufbau des Mach-Zehner-Interferometers ohne Polarisatoren gewählt wird. Es sind

deutliche Intensitätsmaxima zu erkennen. Eine höhere Symmetrie konnte durch das Einstellen der Spiegel und Stahlteiler nach längerem Zeitaufwand nicht erreicht werden. Daher zeigt auch der neben dem Bild abgebildete Plot der Intensitätsverteilung in der horizontalen Ebene keine gute Symmetrie. Jedoch werden hier die Maxima und Minima deutlich, sie sind gut zu erkennen.

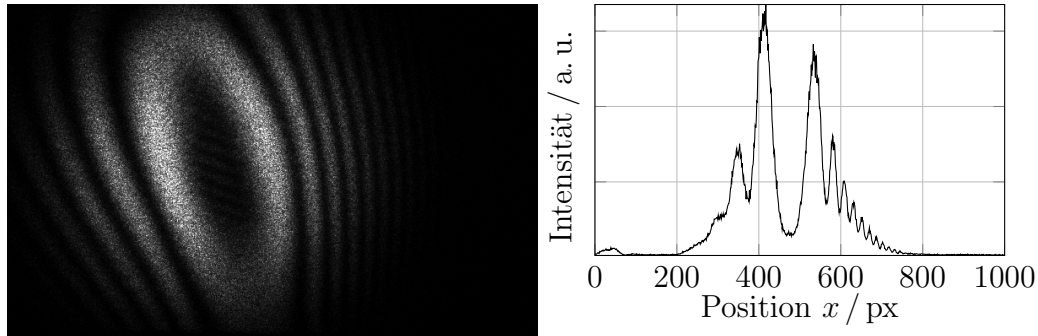


Abb. 4: Interferenzmuster ohne Polarisatoren.

Werden nun die Polarisatoren mit eingebaut, so ergibt sich für eine Winkelstellung von 0° die in Abb. 5 dargestellten Intensitätsverläufe. Auch hier sind die Maxima und Minima deutlich zu erkennen, jedoch treten mer Inhomogenitäten im Bild auf, die durch die zusätzlichen optischen Instrumente im Strahlengang hervorgerufen werden. Auch die Intensitätsverteilung weist eine noch geringere Symmetrie auf, Maxima und Minima können allerdings deutlich von einander getrennt werden.

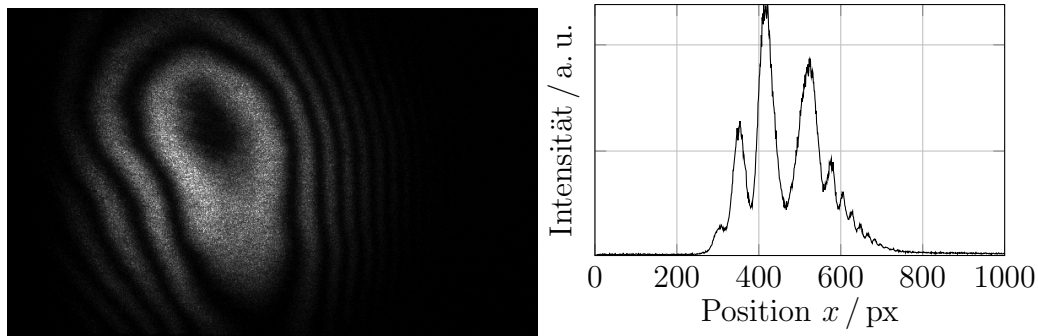


Abb. 5: Interferenzmuster bei einem Winkel von 0° .

Für den Fall, dass der Winkel nun auf 90° gestellt wird wird keine Interferenz mehr beobachtet (Abb. 6). Hier treten keine Minima mehr auf, lediglich ein Maximum in der Mitte des Schirmes.

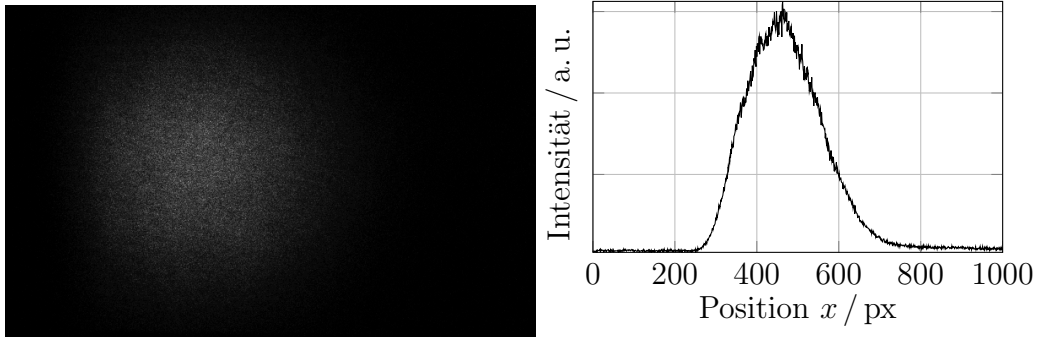


Abb. 6: Interferenzmuster bei einem Winkel von 90° .

In Abb. 7 sind nun Intensitätsprofile für unterschiedliche Winkel zwischen 0 und 90° dargestellt. Mit größer werdendem Winkel nehmen hier die Intensitätsdifferenzen zwischen Maximum und Minimum ab. In der Abbildung wird aufgrund der Übersichtlichkeit auf weitere Winkel verzichtet. Für alle Winkel zwischen 0 und 90° sei an dieser Stelle auf Anhang und Abb. 9 verwiesen. Die zugehörigen Daten sind in Tab. 1 im Anhang B zu finden

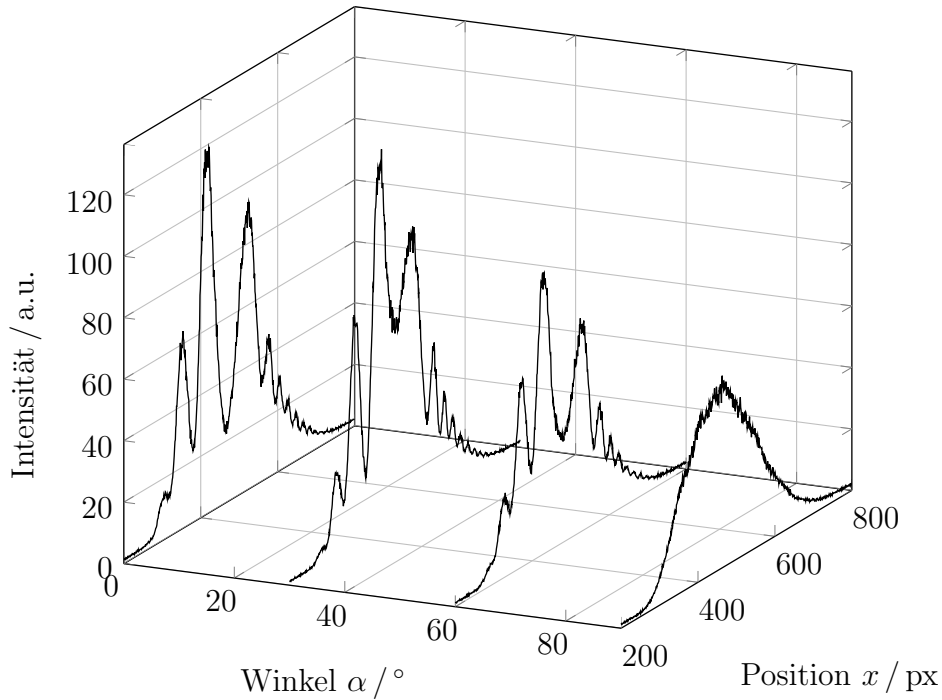


Abb. 7: Gegenüberstellung der Kontrastverläufe von 0 bis 90° .

Nach (1) ergibt sich der Kontrast der einzelnen Interferenzringe. Für alle Winkel ist der Verlauf des Kontrastes in Abb. 8 abgebildet. Hier ist deutlich zu sehen, dass sich für Winkel zwischen $\pm 60^\circ$ kaum etwas am hohen Kontrast ändert, jedoch für kleinere/größere Winkel der Kontrast schnell nahezu verschwindet. Bei den Winkeln $\pm 90^\circ$ ergibt sich gar der Kontrast 0 , da gar keine

Intensitätsminima mehr aufgenommen werden können.

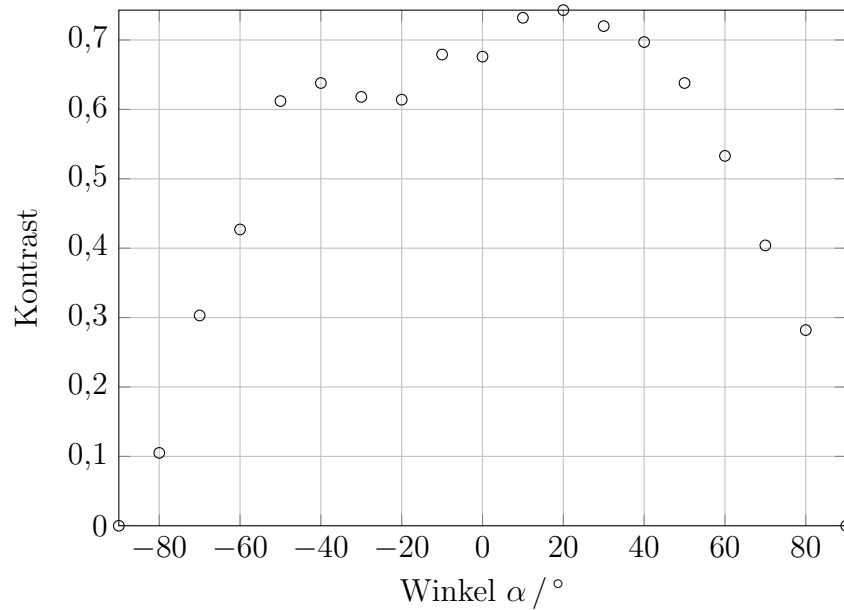


Abb. 8: Kontrastabhängigkeit vom Winkel.

3.3 Diskussion

Die Tatsache, dass die Justage große Schwierigkeiten bereitete und schließlich leicht verzerrte Interferenzmuster hervorbrachte hat die Genauigkeit der Messergebnisse stark beeinflusst. Auch die eingeschränkte Polarisation des Lasers sei an dieser Stelle den weiteren Fehlerquellen zuzuordnen. Die Ergebnisse des Versuchs sind insgesamt unter den vorliegenden Bedingungen jedoch als zufriedenstellend. einzuordnen.

A Vollständige Intensitätsprofile

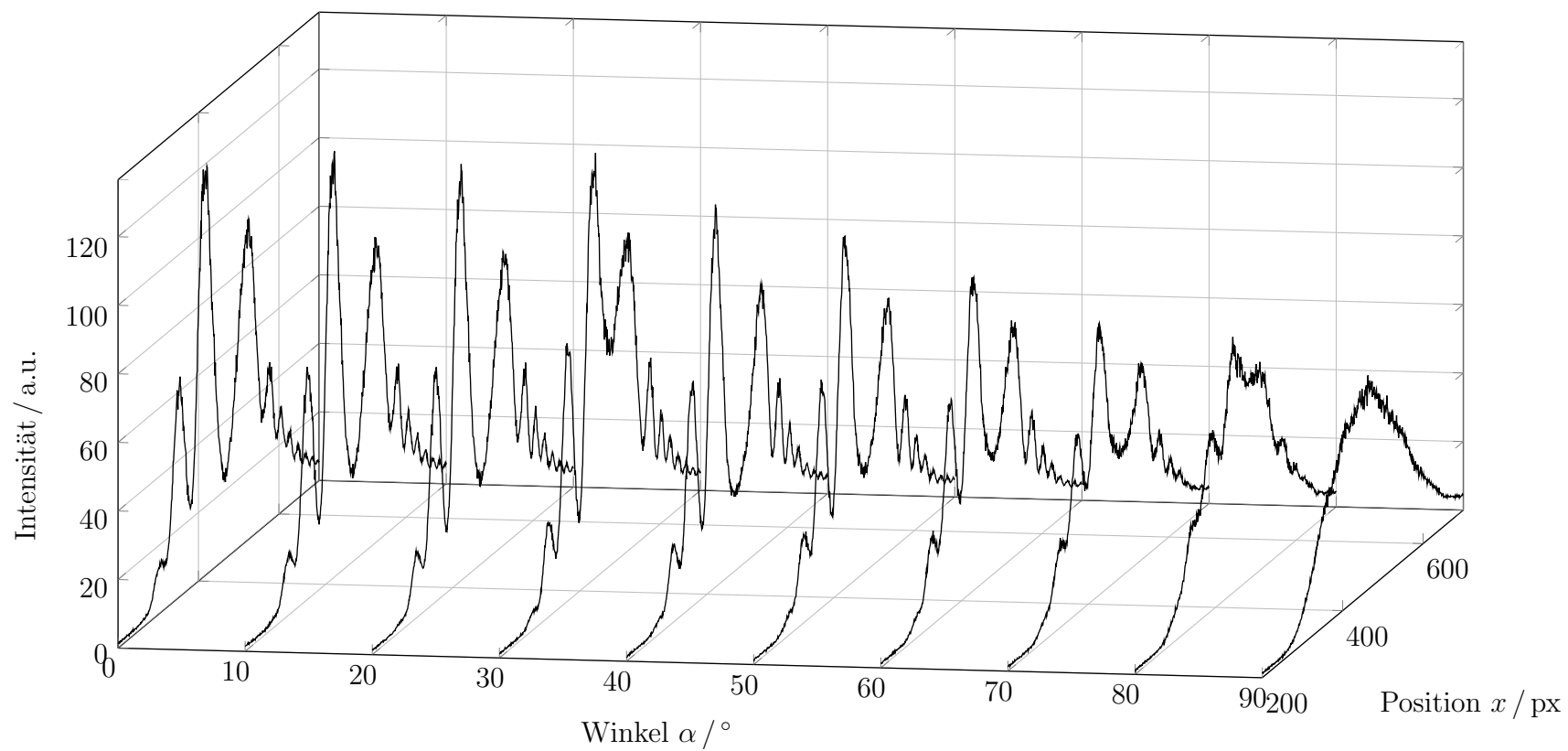


Abb. 9: Gegenüberstellung der Kontrastverläufe von 0 bis 90°.

B Intensitätsextrema und Kontraste

Tab. 1: Intensitätsextrema und Kontraste für Winkel zwischen -90 und 90°

Winkel $\alpha / ^\circ$	$I_{\max} / \text{a. u.}$	$I_{\min} / \text{a. u.}$	Kontrast K
90	-	-	0
80	75	42	0,28
70	80	34	0,4
60	92	28	0,53
50	113	25	0,64
40	112	20	0,7
30	123	20	0,72
20	122	18	0,74
10	123	19	0,73
0	119	23	0,68
-10	115	22	0,68
-20	117	28	0,61
-30	127	30	0,62
-40	122	27	0,64
-50	112	27	0,61
-60	112	45	0,43
-70	86	46	0,3
-80	63	51	0,11
-90	-	-	0

Literatur

- [1] Jakob Walowski. *Mach-Zehnder Interferometer, Versuchsanleitung*, 2014.
- [2] K. Zetie, S. Adams, R. Tocknell. How does a Mach-zehnder interferometer work? *Ohysics Education*, **35**:46–48, 2000.
- [3] PHYWE Systeme. *TESS Quantum Eraser Manual, Versuchsanleitung*, 2014.
- [4] W. Demtröder. *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. Springer-Lehrbuch, 2013.