

# O-07 – Polarisation von Licht und optische Aktivität

Version 4 – 14. Oktober 2019

Unter *optischer Aktivität* versteht man die Eigenschaft eines Materials, die Polarisationsrichtung des Lichtes zu verändern. Mithilfe eines *Polarimeters* wird die optische Aktivität unterschiedlicher Materialien untersucht, die in kristalliner oder gelöster Form vorliegen.



Die meisten Kinos können heutzutage Filme in 3D zeigen. Die Technologie dahinter basiert auf der Verwendung von *polarisiertem* Licht und mit Polarisationsfiltern ausgerüsteten 3D-Brillen. Auch viele Flachbildschirme, die auf LCD-Technologie basieren, nutzen die Eigenschaften der Polarisation des Lichts und die optische Aktivität von Flüssigkristallen aus. Sogenannte *Saccharimeter* werden u. a. im Weinbau verwendet, um den Reifegrad der Trauben über den Zuckergehalt zu bestimmen. Ihre Funktionsweise beruht auf der optischen Aktivität des Zuckers.

## Polarisiertes Licht

Licht besteht bekanntlich aus elektromagnetischen Transversalwellen. Das bedeutet, dass die Richtung von elektrischem und magnetischem Feld gemeinsam mit der Ausbreitungsrichtung der Welle ein rechtwinkliges Dreieck bilden, wie in Abbildung 1 dargestellt ist.

*Natürliches* Licht, wie es z. B. Glühlampen oder auch LEDs abgeben, ist unpolarisiert. Das bedeutet, das Licht besteht aus einer Überlagerung von Wellen jeglicher Polarisationsrichtung, wobei der Betrag des elektrischen Feldes in jeder Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Wellen *im Mittel* gleich ist. Bei *linear* polarisiertem Licht hingegen schwingt der elektrische Feldvektor ausschließlich in einer bestimmten Ebene. Die Richtung des elektrischen Feldes

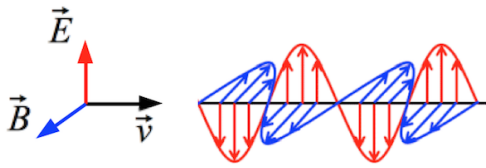


Abbildung 1: Elektromagnetische Welle; elektrisches Feld  $\vec{E}$  (rot), Magnetfeld  $\vec{B}$  (blau) und Ausbreitungsrichtung  $\vec{v}$  (schwarz).

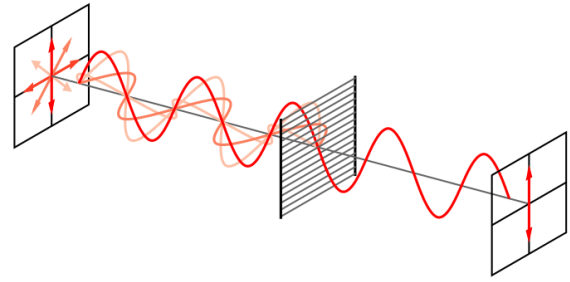


Abbildung 2: Funktionsweise von Polarisationsfolien zur Erzeugung von linear polarisiertem Licht.

wird dann als Polarisationsrichtung der Welle bezeichnet. Durch Überlagerung zweier senkrecht zu einander linear polarisierter Wellen lässt sich darüber hinaus auch elliptisch oder zirkular polarisiertes Licht erzeugen, bei dem der Feldvektor um die Ausbreitungsrichtung rotiert.

Vorbereitung: Wie kann man zirkular polarisiertes Licht herstellen?

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, linear polarisiertes Licht zu erzeugen. Üblicherweise wird dabei aus natürlichem Licht eine bestimmte Polarisationsrichtung ausgefiltert, indem die dazu senkrechte Polarisationskomponente entweder durch Absorption oder durch Reflexion in eine andere Richtung aus dem Strahlengang entfernt wird. Die hier verwendeten Polarisationsfilter bestehen aus Polymerfolien. Die langkettigen Moleküle in der Folie besitzen eine Vorzugsrichtung, entlang welcher sie ausgerichtet sind. Wenn das elektrische Feld *parallel* zu der Ausdehnung der Moleküle schwingt, werden die Valenzelektronen der Moleküle in Kettenrichtung zum schwingen angeregt. Die Energie, die zur Anregung der Schwingung erforderlich ist, wird der elektromagnetischen Welle entnommen, d. h. das Licht wird *absorbiert* und kann den Filter nicht (bzw. sehr stark abgedämpft) passieren. Eine elektromagnetische Welle, deren Feld dagegen *senkrecht* zu der Ausdehnung der Moleküle steht, kann keine solchen Längsschwingungen anregen und wird nur schwach absorbiert. Diese Polarisationsrichtung passiert daher den Filter nahezu ungehindert. Für alle sonstigen Polarisationsrichtungen der Welle wird von dem Filter nur der Anteil senkrecht zur Kettenrichtung hindurch gelassen. (s. Abb. 2)

## Optische Aktivität

Einige Kristalle, wie z. B. Quarz, sowie Lösungen bestimmter Substanzen, u. a. Glucose, besitzen die Eigenschaft, bei Bestrahlung mit polarisiertem Licht die Polarisationsrichtung in spezifischer Weise zu drehen. Solche als *optische aktiv* bezeichnete Materialien besitzen eine Chiralität, d. h. die räumliche Struktur der Kristalle bzw. Moleküle besitzt mindestens eine Ebene, bezüglich welcher sie nicht spiegelsymmetrisch ist. Eine Spirale oder Schraube hat beispielsweise eine ausgezeichnete Windungsrichtung, und ist nicht identisch mit ihrem Spiegelbild - man unterscheidet daher Rechts- und Linksgewinde.

In optisch aktiven Materialien führt dies dazu, dass *zirkular* polarisiertes Licht je nach Umlaufsinn unterschiedliche Phasengeschwindigkeiten besitzt, also z. B. rechtsdrehendes Licht schneller ist als linksdrehendes\*. Strahlt man nun linear polarisiertes Licht ein, so lässt sich dies in zwei gegenläufige zirkularpolarisierte Teilwellen mit jeweils halber Amplitude aufteilen, s. Abb. 3a. Ursprünglich sind diese Teilwellen perfekt in Phase, aufgrund der unterschiedlichen Phasengeschwindigkeiten eilt jedoch die schnellere der beiden der anderen voraus. Dadurch baut sich eine

\*Man beachte, dass die Phase von  $\vec{E}$  schneller dreht für die Welle mit der *kleineren* Phasengeschwindigkeit.

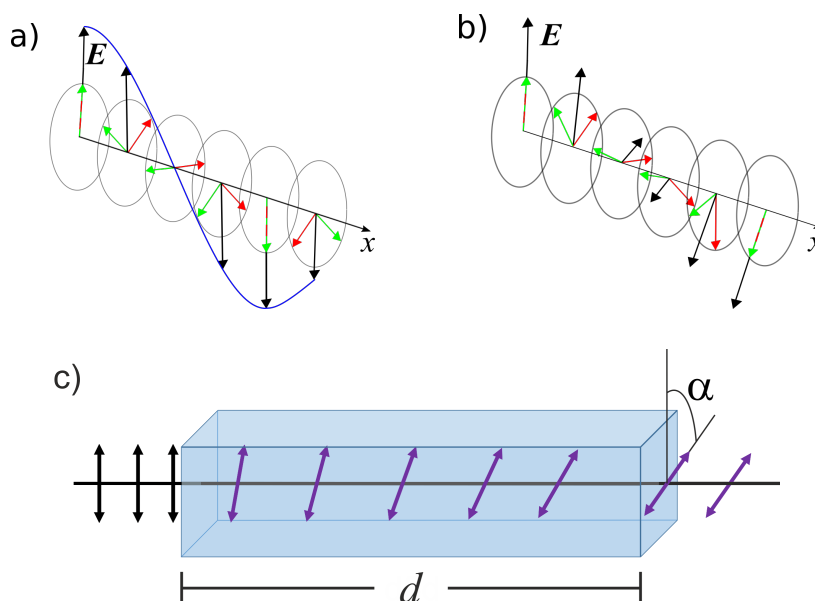


Abbildung 3: Optische Aktivität. (a) Zerlegung einer linear polarisierten Welle in zwei gegenläufig zirkular polarisierte mit der gleichen Phasengeschwindigkeit und halber Amplitude; (b) Zwei gegenläufig zirkular polarisierte Wellen mit der gleichen Amplitude und verschiedenen Phasengeschwindigkeiten; (c) kontinuierliche Drehung der resultierenden Polarisationsrichtung beim Durchgang durch ein optisch aktives Medium.

Phasendifferenz zwischen ihnen auf, die proportional zur Laufstrecke  $d$  anwächst, s. Abb. 3b. Überlagert man die beiden Teilwellen wieder, so bekommt man stets eine linear polarisierte Welle mit der ursprünglichen Amplitude zurück. Infolge des Phasenversatzes hat die resultierende Welle jedoch eine andere Polarisationsrichtung als die ursprüngliche, s. Abb. 3c.

In kristallinen Materialien kann man Brechungsindizes  $n_l$  und  $n_r$  für die links- bzw. rechtsdrehende Welle definieren, und erhält für den Drehwinkel  $\alpha$  bei Licht der Wellenlänge  $\lambda$  den Ausdruck

$$\alpha = \frac{\pi d}{\lambda} (n_l - n_r). \quad (1)$$

Dieser Ausdruck wird positiv für  $n_l > n_r$ , und man nennt solche Materialien *rechtsdrehend*, da sich die Polarisationsrichtung für einen Betrachter, der dem Licht entgegen blickt, im Uhrzeigersinn (bzw. *nach rechts*) gedreht hat.

Da in Lösung befindliche Moleküle keine definierte Orientierung besitzen, führt man hier die *spezifische Drehung* einer Substanz  $[\alpha]$  ein, so dass der Drehwinkel der Polarisationsrichtung aus der Laufstrecke  $d$  sowie der Konzentration des gelösten Stoffes  $c$  bestimmt werden kann,

$$\alpha = [\alpha] \cdot c \cdot d. \quad (2)$$

Die spezifische Drehung ist abhängig von der Substanz, der Temperatur sowie der Wellenlänge des Lichts, und wird üblicherweise für 20°C und die Natrium-D-Linie (Wellenlänge  $\lambda = 589$  nm) angegeben. Sie kann sowohl positives Vorzeichen haben für rechtsdrehende, als auch negatives für linksdrehende Materialien.

Vorbereitung: Wie hängt der Brechungsindex mit der Phasengeschwindigkeit zusammen?

für Physikstudenten: anhand von Abb. 3 soll der Ausdruck (1) hergeleitet werden.

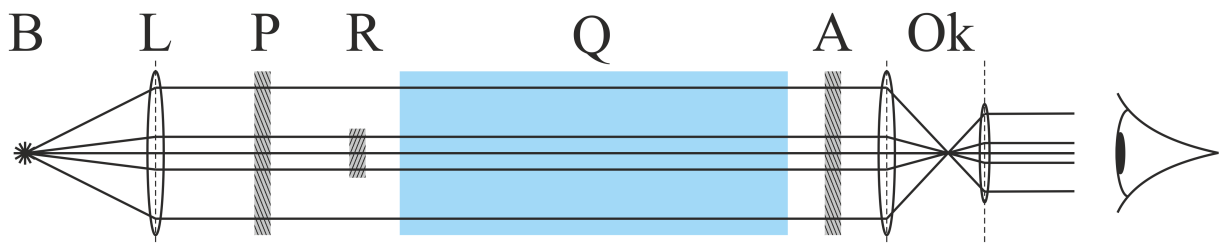


Abbildung 4: Schematischer Aufbau des Polarimeters; B – Lichtquelle, L – Linse; P – Polarisator, R –  $\lambda/2$ -Platte, Q – Probe; A – Analysator, Ok – Okular.

## Versuchsaufbau

Der einfachste Aufbau eines Polarimeters besteht aus zwei Polarisationsfiltern. Der erste wird als *Polarisator* bezeichnet, und dient dazu, das natürliche Licht *linear* zu polarisieren.

Vorbereitung: Warum hat das Licht nach durchlaufen des Polarisators nur noch die Hälfte der Intensität?

Zum Nachweis von polarisiertem Licht verwendet man den zweiten Polarisationsfilter, den man als *Analysator* bezeichnet. Ist der Analysator so eingestellt, dass seine Polarisationsrichtung mit der des Polarisators zusammen fällt, so lässt dieser theoretisch das polarisierte Licht vollständig hindurch, und das Bild ist maximal hell. Steht er dagegen senkrecht zum Polarisator, so wird gar kein Licht hindurch gelassen, und es ist vollkommen dunkel. In der Praxis sind diese beiden Einstellungen jedoch nur mit sehr geringer Präzision zu erkennen, da die Helligkeit sich hier nur langsam mit dem Winkel ändert.

Vorbereitung: für Physikstudenten Wie ändert sich die Helligkeit am Analysator als Funktion des Drehwinkels in der Nähe der Maxima und Minima?

Das hier verwendete Polarimeter ist vorne abgebildet. Als Lichtquelle dient eine Leuchtdiode oder LED (light-emitting diode), welche eigentlich aus drei separaten LEDs aufgebaut ist, die gemeinsam quasi weißes Licht erzeugen. Über einen Drehknopf an der unteren Stirnseite des Polarimeters kann man die einzelnen LEDs auch separat eingeschalten, so dass schmalbandiges rotes ( $\lambda = 626 \text{ nm}$ ), grünes ( $\lambda = 525 \text{ nm}$ ) und blaues ( $\lambda = 470 \text{ nm}$ ) Licht verwendet werden kann. Das Licht der LEDs ist aber in jedem Falle unpolarisiert. Daher befindet sich in dem Beleuchtungstubus ein Polarisationsfilter sowie, aus experimentellen Gründen, eine sogenannte *Verzögerungs-* oder genauer  *$\lambda/2$ -Platte* (s. u.). In der Mitte des Polarimeters befindet sich die Probenkammer, in welche die untersuchenden Substanzen eingelegt werden. Als Analysator befindet sich ein weiterer Polarisationsfilter im Okular des Polarimeters, welches über eine Stellschraube mit Winkelmesser präzise um die Strahlachse gedreht werden kann. Damit lässt sich die Drehung der Polarisationsrichtung durch die Probe nachweisen und quantifizieren. Am Okular kann die Schärfe nachjustiert werden, so dass Brillenträger auch ohne Brille arbeiten können.

Vorbereitung: Welche Funktion haben die Linsen im Polarimeter? In welchem Abstand vor der Linse L befindet sich die LED?

für Physikstudenten Wie funktioniert eine  $\lambda/2$ -Platte, und warum wird sie so genannt? Welches Problem ergibt sich für weißes Licht (Stichwort: Dispersion)?

Das bereits erwähnte Problem der geringen Variation der Helligkeit bei paralleler oder gekreuzter Stellung von Analysator und Polarisator wird bei dem hier verwendeten Polarimeter durch die

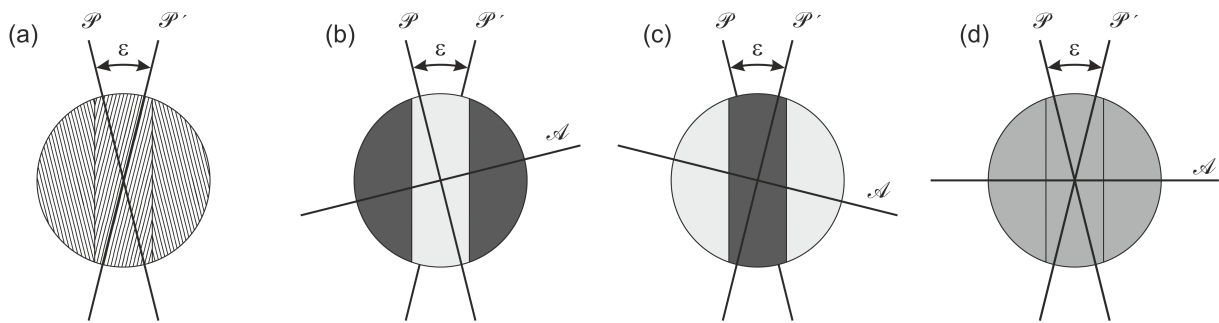


Abbildung 5: Funktionsweise des Halbschattenpolarimeters; (a) Anordnung von Polarisator und  $\lambda/2$ -Platte, (b) Analysator gekreuzt mit Polarisator, (c) Analysator gekreuzt mit  $\lambda/2$ -Platte, (d) Halbschattenstellung.

sogenannte *Halbschattenanordnung* umgangen, die schematisch in Abb. 4 dargestellt ist. Hinter dem Polarisator (P) ist dazu eine schmale  $\lambda/2$ -Platte (R) eingebaut, die das mittlere Drittel des Gesichtsfelds abdeckt und die Polarisation des Lichts in diesem Streifen um einen kleinen Winkel  $\varepsilon$  dreht, s. Abb. 5a. Steht beispielsweise beim leeren Polarimeter (d. h. ohne Quarz in der Probenkammer) die Polarisationsrichtung  $\mathcal{A}$  des Analysators senkrecht zu der des Polarisators  $\mathcal{P}$ , so sind die beiden äußeren Streifen vollkommen dunkel, während der mittlere Streifen noch ein wenig Licht hindurch lässt (Abb. 5b). Dreht man hingegen den Analysator um den Winkel  $\varepsilon$ , so steht seine Polarisationsrichtung  $\mathcal{A}$  nun senkrecht zu der des Lichts hinter der  $\lambda/2$ -Platte  $\mathcal{P}'$ . Daher ist jetzt der mittlere Streifen völlig dunkel, während die beiden äußeren wieder heller erscheinen (Abb. 5c). Alle drei Streifen erscheinen gleich hell, wenn man den Analysator um  $\varepsilon/2$  zurück dreht, da nun die Polarisationsrichtungen  $\mathcal{P}$  und  $\mathcal{P}'$  im gleichen Winkel  $90^\circ - \varepsilon/2$  mit der des Analysators stehen (Abb. 5d). Diese Einstellung lässt sich mit dem Auge präzise bestimmen, daher wird sie für die Messung verwendet. Da die Polarisationsrichtung nur bis auf  $180^\circ$  eindeutig bestimmt ist, kann man den Winkel in beiden Einstellungen bestimmen, um die Messgenauigkeit zu erhöhen. Außerdem tritt bei einer Viertelumdrehung des Okulars eine ähnliche Situation auf, bei der der Analysator annähernd parallel zum Polarisator steht. Da diese Einstellung aber wegen der großen Helligkeit im Polarimeter nicht so deutlich zu erkennen ist, wird sie für die Messung in der Regel nicht verwendet.

Die Winkelstellung kann auf beiden Seiten des Okulars jeweils mithilfe eines Nonius bestimmt werden, der auf  $1/20$  geteilt ist, d. h. der Winkel lässt sich auf  $0,05^\circ$  genau ablesen. Der Nonius kann durch zwei in der Okularfassung eingebaute Lupen vergrößert betrachtet werden, um die Ablesegenauigkeit zu verbessern. Theoretisch sollte man auf beiden Seiten denselben Winkel ablesen, jedoch können Ablese- und Eichfehler zu Messungenauigkeiten führen, die durch Mittelung der abgelesenen Winkel auf beiden Seiten verringert und quantifiziert werden können.

Vorbereitung: Wie funktioniert ein Nonius?

für Physikstudenten Bei der oben beschriebenen Halbschattenanordnung tritt ein systematischer Fehler auf. Woher kommt er, und weshalb kann man ihn ignorieren?

## Durchführung

### 1. Nullstellung

Zunächst muss der Polarisationswinkel  $\phi_0$  des nicht gedrehten Lichts am Polarimeter bestimmt werden. Dazu darf sich *keine Probe* im Polarimeter befinden. Diese Messung wird mit *weißem*

Licht durchgeführt, und stellt die Referenz dar, bezüglich welcher die Drehwinkel für alle folgenden Messungen ermittelt werden.

### Messung

Man stellt am Polarimeter den Winkel ein, bei welchem alle drei Teile des Gesichtsfeldes gleich hell erscheinen. Wie oben beschrieben, wählt man dabei eine der dunkleren Stellungen, und liest auf beiden Seiten des Okulars die Winkel  $\phi_l$  und  $\phi_r$  ab. Dreht man das Okular um  $180^\circ$ , so findet man erneut eine Stellung, bei der alle drei Bereiche gleich hell sind. Auf diese Weise werden für insgesamt zehn Einstellungen die beiden Werte auf den Messskalen sowie deren Ablesegenauigkeit aufgenommen.

### Auswertung

Aus den beiden Werten  $\phi_l$  und  $\phi_r$  für jede Einstellung wird zunächst der Mittelwert  $\phi_i$  und dessen Unsicherheit berechnet. Aus den so ermittelten zehn Einzelmessungen bestimmt man den *gewichteten* Mittelwert  $\phi_0$  und die dazugehörige Unsicherheit.

Vorbereitung: Wenn die beiden Werte  $\phi_l$  und  $\phi_r$  übereinstimmen, ergibt sich rechnerisch, dass die Unsicherheit 0 ist, was physikalisch unsinnig ist. Wie ermittelt man aus den Ablesegenauigkeiten der beiden Werte die Unsicherheit für den ermittelten Messwert?

## 2. Drehwinkel

Wenn man eine optisch aktive Substanz mit weißem Licht beleuchtet, erscheint diese aufgrund der Wellenlängenabhängigkeit seiner optischen Aktivität im Polarimeter farbig. Dreht man den Analysator, erkennt man eine charakteristische Farbreihenfolge, die Aufschluss über den *Drehsinn*, also das Vorzeichen der optischen Aktivität der Probe gibt.

Vorbereitung: Woran erkennt man, ob die Quarzprobe rechts- oder linksdrehend ist, warum ist das so?

### Messung

Man legt eine Quarzprobe in das Polarimeter ein und bestimmt zunächst mit weißem Licht den Drehsinn der Probe. Anschließend stellt man blaues Licht ein und ermittelt nach der gleichen Methode wie oben für *fünf* Stellungen den Drehwinkel der Probe bei dieser Wellenlänge.

### Auswertung

Wie oben wird zunächst der Mittelwert  $\phi_i$  für jede der fünf Stellungen berechnet, und anschließend daraus der gewichtete Mittelwert für den Drehwinkel  $\phi$  der Probe und dessen Unsicherheit gebildet. Mit Hilfe des Nullwinkels  $\phi_0$  bestimmt man daraus den Drehwinkel der Polarisation  $\alpha$  und dessen Unsicherheit. Daraus erhält man mit der Dicke der Probe  $d = (4 \pm 0,05)$  mm den *spezifischen* Drehwinkel  $\gamma = \frac{\pi}{\lambda}(n_l - n_r)$  (vgl. Gleichung (1)), ebenfalls mit Unsicherheit.

## 3. Dispersion

An Gleichung (1) erkennt man, dass der Drehwinkel von der Wellenlänge des Lichts abhängt. Durch die Wahl der Farbe des Lichts können wir die Dispersion der optischen Aktivität bestimmen.

### Messung

Wie oben bestimmt man den Drehwinkel *derselben* Probe für grünes und rotes Licht.

#### **Auswertung**

Erneut werden die Drehwinkel der Probe für alle gemessenen Wellenlängen ermittelt. Der *spezifische* Drehwinkel der Polarisation soll als Funktion der Wellenlänge grafisch dargestellt werden.

#### **4. Materialabhängigkeit**

Um zu demonstrieren, dass unterschiedliche Kristalle ganz verschiedene optische Aktivität zeigen, werden zwei weitere Proben bei einer festen Wellenlänge untersucht und mit der ersten verglichen.

#### **Messung**

Man wiederholt für zwei weitere Proben die Messung des Drehsinns und Drehwinkels mit der *grünen* LED wie oben beschrieben.

#### **Auswertung**

Der Drehwinkel der Polarisation wird wie in den vorherigen Messungen für beide Proben berechnet. Die Ergebnisse aller drei Proben für grünes Licht werden mit einander verglichen.

### **Zusammenfassung, Bewertung und Fazit**

Der Bericht soll mit einer Zusammenfassung der Messergebnisse und ihrer Beurteilung abgeschlossen werden. Dazu müssen die Ergebnisse der einzelnen Messungen in eine übersichtliche Tabelle übertragen werden, um somit eine gute Grundlage für die Bewertung der einzelnen Messwerte und deren Vergleich mit den weiteren Messwerten zu schaffen. Welche Erkenntnisse hat dieses Experiment geliefert? Nebenfachstudenten sollen einen Bezug herstellen zu ihrem Hauptfach, Lehramtsstudenten zur Erfahrungswelt eines Schülers.

# Leermessung

$\phi_l$	$\phi_r$
109,15	113,3
113	109,35
125,10	108,1
98,0	102,2
110,35	113,5
113,6	115,7
108,45	110,55
115,25	120,5
116,6	119,75
114,7	115,7

## Drehwinkel - rechtsdrehende (Probe Nr. 86651)

148,65	150,75
152,4	150,5
144,05	147,2
162,1 (-13)	146,15
140,2	142,3

blau

0,8	0,8
165,45	167,55
2,95	166,1
170,3	172,4
1,55	2,6

grün



4,1	8,3
27,8	28,85
24,6	25,65
19,1	20,15
25,75	30,1

} rot

Materialabhängigkeit:

(Probe Nr. 86682) → linksdrehend

45,35	48,5
55,65	58,8
40,3	43,45
41,2	43,3
45,45	48,6

(Probe Nr. 86681)

46,3	49,45
47,4	50,55
63,9	65,10
55,5	56,55
53,45	54,5

Gelb  
AA