

8. *Über die Polarisation des Lichtes bei der Glasreflexion;* von *L. Zehnder.*

1. In der vorhergehenden Arbeit¹⁾ suchte ich die Brauchbarkeit meines neuen Halbschattenpolarimeters für die Untersuchung elliptisch polarisierten Lichtes nachzuweisen. Ich habe mit derselben Meßmethode und mit denselben Apparaten des Kaiserl. Telegraphen-Versuchsamtes die gewöhnliche Reflexion geradlinig polarisierten Lichtes an Glasoberflächen weiter untersucht, namentlich um die Abhängigkeit der Phasendifferenz der senkrecht und parallel zur Einfallsebene polarisierten Komponenten eines reflektierten Lichtbündels vom Einfallswinkel genauer kennen zu lernen und um mich davon zu überzeugen, ob wirklich genau bei dem aus dem Brewsterschen Gesetz sich ergebenden Polarisationswinkel die Phasendifferenz dieser beiden Komponenten $\pi/2$ sei, d. h. ihr Gangunterschied einer Viertelwellenlänge entspreche, wie Jamin aus seinen Versuchen geschlossen hat.²⁾

Mit Hilfe einer auf dem Prismentischchen des Goniometers befestigten reflektierenden Glasfläche wird zuerst der Analysator, dann werden das polarisierende Nicol und der Kompensator so orientiert, wie es in der vorhergehenden Arbeit angegeben ist. Nachdem die Trommelteilung des Kompensators ausgewertet ist, befestigt man den zu untersuchenden Spiegel so auf dem Prismentischchen, daß die Drehachse des Goniometers durch die reflektierende Fläche geht und diese möglichst in zwei Hälften teilt. Nachdem also eine horizontale Kante der reflektierenden Fläche mit der Mitte des Prismentischchens zum Zusammenfallen gebracht worden ist, schiebt man entweder ins Fernrohr oder ins Spaltrohr ein Autokollimationsokular und läßt die horizontalen Fäden des gespiegelten und

1) L. Zehnder, Ann. d. Phys. **26**, p. 985, 1908.

2) J. Jamin, Pogg. Ann. Erg.-Bd. III, p. 250 ff. 1853.

des wirklichen Fadenkreuzes zusammenfallen. Im ersteren Fall sind der Analysator und der Kompensator, im zweiten Fall ist der Polarisator hierbei abzunehmen, weil ihre optischen Teile das Bild des Fadenkreuzes etwas verschieben könnten. Ich habe mich durch mehrfaches Abnehmen und Wiederaufsetzen des Kompensators und des Analysators überzeugt, daß hernach ihre Ablesungen bei derselben Einstellung des reflektierenden Körpers nur wenig anders ausfallen. Immerhin sind die Abweichungen so groß, daß sie nicht unbedingt in den Bereich der Ablesungsfehler fallen, weshalb ich die Unveränderlichkeit der Orientierung des reflektierenden Körpers während der Versuche in folgender Weise prüfte bzw. eine Korrektur vornahm, wenn es nötig war: Ich stellte zuerst ohne Analysator und Kompensator die reflektierende Fläche mit dem Autokollimationsokular richtig ein, so daß die horizontalen Fäden des wirklichen und des gespiegelten Fadenkreuzes sich genau deckten. Dann setzte ich den Analysator und den Kompensator möglichst sorgfältig auf das Fernrohr, ohne sonst etwas zu ändern, drehte nun aber die Kompensatorschraube und den Analysator so weit, bis ich durch Kompensator und Analysator hindurch wieder ein brauchbares Spiegelbild des Fadenkreuzes erhielt, dessen Horizontalfaden mit dem Horizontalfaden des wirklichen Fadenkreuzes zusammenfiel. Diese Bedingung ließ sich leicht erfüllen.¹⁾ Ob ich nun ohne Analysator und Kompensator oder mit diesen die reflektierende Fläche orientierte, stets erhielt ich für den gespiegelten Horizontalfaden dieselbe Einstellung. Daher konnte für alle Beobachtungsreihen die Prüfung und die Korrektur dieser Fadenkreuzeinstellung vorgenommen werden, ohne daß dabei der Analysator und der Kompensator zu entfernen waren, wenn nur diese beiden Apparate zuvor auf ihre oben erwähnten bestimmten Einstellungen gebracht worden waren.

2. Nach der notwendigen Orientierung der reflektierenden Glasfläche wird der Winkel zwischen Spaltrohr und Fernrohr so eingestellt, daß er gleich dem Doppelten des Einfallswinkels

1) Wäre dies nicht der Fall, so wären entweder der Kompensator oder der Analysator vom Optiker zu korrigieren, je nachdem der eine oder der andere den größeren Fehler hätte, oder die analoge Orientierung wäre vom Spaltrohr aus vorzunehmen.

ist, bei dem man untersuchen will. Dann entfernt man das Fernrohrökular und dreht das Prismentischchen so weit, daß man das aus dem Spaltrohr kommende, an der Fläche reflektierte Lichtbündel durch den Analysator möglichst hell und zentral gespiegelt sieht. Nach dem Einschieben des Okularspaltes ist die Einstellung des Prismentischchens noch zu korrigieren. Hierauf verstellt man den Kompensator und den Analysator abwechselungsweise so lange, bis das Analysatornicol möglichst dunkel erscheint. Damit sind dann die vorläufigen Werte der Phasenverschiebung beider Komponenten und des Azimuts des aus ihnen zusammengesetzten geradlinig polarisierten Lichtes gefunden. Genauer stellt man mit Hilfe des Halbschattenprinzips ein, so wie es schon in der vorhergehenden Arbeit gezeigt worden ist. Man stellt nämlich den Analysator auf den soeben vorläufig ermittelten Dunkelwert seines Nicols ein und verschiebt nun den beweglichen Kompensatorkeil zuerst in der einen Richtung bis zur Halbschattengleichheit des Analysators, dann in der anderen Richtung wieder bis zur Halbschattengleichheit, und stellt den Kompensator auf das Mittel aus diesen beiden Einstellungen bleibend ein, das uns die Phasendifferenz beider Komponenten ergibt. Dann wird der Analysator im einen Sinne und im anderen Sinne um seine Achse jeweils bis zur Halbschattengleichheit gedreht; das Mittel aus beiderlei Einstellungen ergibt das gesuchte Azimut. Jede von diesen Einstellungen wurde bei allen meinen Messungen dreimal gemacht. Die Mittel aus je 2×3 Einstellungen stehen in der nachfolgenden Tab. 1 und es stellen dar: Die Zahlen der 1. horizontalen Reihen die Einfallswinkel ϵ , die Zahlen der 2. Reihen die Mittel der Kompensatorablesungen κ , die Zahlen der 3. und der folgenden Reihen die Mittel der Analysatorablesungen α , wobei bemerkt werden muß, daß bei der Analysatornicolstellung, bei der vertikal polarisiertes Licht am besten hindurchgelassen wurde, sein Teilkreis $91^\circ 48,75'$ zeigte. Um also die Angaben des Analysators auf Azimute zu bringen, wären sämtliche Zahlen der dritten und der folgenden horizontalen Reihen um $1^\circ 48,75'$ zu verkleinern. Wenn es uns aber nur auf den Verlauf der Änderungen ankommt, ist diese Verkleinerung der Werte nicht erforderlich.

Tabelle 1.

ε	28° 18,5'	33° 18,5'	38° 18,5'	43° 18,5'	48° 18,5'	53° 18,5'
κ_1	5586,0	5584,7	5590,1	5589,1	5561,6	5512,8
α_1	129° 41,5'	125° 27,8'	120° 22,2'	114° 40,3'	107° 42,0'	100° 12,3'

ε	55° 53'	56° 53'	57° 29'	57° 58'	58° 14'	58° 34'
κ_1	5418,9	5389,2	(5206,0)	5073,4	(4922,0)	(4780,0)
α_1	96° 9,3'	94° 34,8'	93° 54,5'	{ 93° 35,2' 93 20,8 { [92 41,5] [93 38,7]	93° 34,7'	93° 48,7'

ε	58° 53'	59° 14'	59° 29'	59° 44'	59° 53'	
κ_1	4686,9	(4600,0)	(4550,0)	(4520,0)	4490,9	
α_1	93° 44,5'	94° 15,0'	94° 36,5'	94° 50,3'	95° 13,0'	
			[94 26,7]	[94 56,5]		

ε	55° 53'	56° 23'	56° 53'	57° 23'	57° 53'	58° 23'
κ_2	(4077,0)	(4050,0)	(4000,0)	(3910,0)	(3730,0)	(3530,0)
α_2	87° 37,8'	88° 19,7'	89° 8,5'	89° 42,3'	{ 90° 6,0' 90 13,0 [90 12,7] [90 23,7]	90° 4,5'
	[87 56,7]	[88 48,7]	[89 48,2]	[89 58,8]		[90 6,5]

ε	58° 53'	59° 23'	59° 53'	60° 53'	61° 53'	62° 53'
κ_2	(3950,0)	(3221,8)	3136,5	3103,5	3052,4	3009,6
α_2	89° 52,0'	89° 5,7'	{ 88° 18,5' 88 27,2 88 21,7	86° 49,0'	85° 14,3'	83° 27,5'
	[90 2,5]	[89 29,5]				

ε	63° 53'	66° 12'	71° 12'	76° 12'	81° 12'	
κ_2	3001,5	2977,3	2956,8	2951,8	2950,3	
α_2	81° 58,3'	77° 32,3'	69° 31,0'	61° 35,2'	54° 22,3'	

Die Werte der Einfallswinkel dieser Tabelle sind so gewählt, daß die Stufen aufeinander folgender Winkel im allgemeinen um so kleiner sind, je näher die Winkel dem Haupteinfallswinkel liegen. Die Werte der oberen Hälfte der Tabelle

Analysatorablesungen andererseits die Ordinaten. Wir betrachten zuerst die beiden oberen Kurven für kleinere Einfallswinkel, die strichpunktierte Kompensatorkurve¹⁾ und die ausgezogene Analysatorkurve. (Alle vier Kurven sind zum Zwecke besserer Vergleichung einander möglichst nahe in das Koordinatensystem eingezeichnet.) Den Polarisationswinkel suchen wir da, wo die vertikal polarisierte Komponente nahezu verschwindet, also nach unserer Figur bei einem Einfallswinkel von etwa $58^{\circ} 0'$. Den Haupteinfallswinkel suchen wir da, wo die beiden Komponenten des reflektierten Lichtbündels einen Gangunterschied von einer Viertelwellenlänge besitzen, hier bei der Kompensatoreinstellung 3590,0, wie sich aus den Kompensatorkurven als bester Wert ergibt.²⁾ Da der Gangunterschied beider Komponenten beim Einfallswinkel Null verschwindet, beim Einfallswinkel 90° aber einer Halbwelle gleich kommt, so können wir aus der Kurve und aus den Kompensatorverschiebungen, die einer Wellenlänge entsprechen (vgl. p. 991), leicht den Kurvenpunkt bestimmen, der einer Viertelwellenlänge Gangunterschied zukommt: Wir finden ihn beim Einfallswinkel $58^{\circ} 15'$. Der Unterschied beider der Figur entnommenen Winkel $58^{\circ} 0'$ und $58^{\circ} 15'$ ist nicht groß, er beträgt $15'$, und man kann daher die Vermutung Jamins, der Polarisationswinkel einer Substanz sei ihrem Haupteinfallswinkel gleich, im Hinblick auf die vorliegenden Kurven nicht von der Hand weisen und zwar um so weniger, als doch die Analysatorkurve ein ziemlich breites Minimum besitzt, das auch den Einfallswinkel $58^{\circ} 15'$ noch in sich aufnimmt. Ganz dasselbe Ergebnis liefern die beiden unteren Kurven der Figur, die den großen Einfallswinkeln entsprechen. Diese durch die

1) Soweit die Kompensatorkurven nicht beobachtet sind, habe ich sie in einfacher Strichelung fortgesetzt, indem ich die dort wirklich beobachtete Kompensatorkurve um den der Phasendifferenz π entsprechenden Wert im Koordinatensystem hinauf- oder hinunterschob.

2) Dieser Wert zeigt von dem der vorhergehenden Arbeit eine ziemlich Abweichung (3566,8 aus 4237,4 – 670,6, vgl. p. 991, 992), die davon herrührt, daß ich bei den Orientierungen der ersten Versuche noch nicht denselben Grad der Präzision erreicht hatte, wie bei den letzten Versuchen; in der vorhergehenden Arbeit habe ich aber die Orientierungsart beschrieben, die sich als die beste bewährt hat.

Jaminschen und durch meine Versuche wahrscheinlich gemachte Gleichheit des Polarisations- und des Haupteinfallswinkels für Glas (und vielleicht für alle durchsichtigen Substanzen) ist jedenfalls von Bedeutung. Sie sagt aus: Bei jedem Einfallswinkel erhält man eine bestimmte Phasendifferenz beider reflektierten Komponenten, der parallel und der senkrecht zur Einfallsebene polarisierten; wenn aber diese Phasendifferenz $\pi/2$ beträgt, wird die letztere Komponente am wenigsten reflektiert, dringt am stärksten in die Substanz ein. Es scheint genauerer Prüfung wert, ob dieses Zusammenfallen für alle durchsichtigen Substanzen gilt und wie es sich in dieser Beziehung mit den metallisch reflektierenden Substanzen verhält. Mit meinem Halbschattenanalysator lassen sich diese Verhältnisse gewiß viel genauer untersuchen, als es bis dahin möglich war.

3. Zu den Zahlen der Tab. 1 ist im einzelnen noch folgendes zu bemerken: Die unterstrichenen Kompensatormittelwerte sind nicht wie die übrigen nur aus sechs, sondern aus 12 Einzelablesungen gewonnen. Wurde nämlich hier nach dem oben angegebenen Verfahren das Analysatornicol auf Dunkel gestellt, so änderte sich seine (geringe) Helligkeit bei den Verschiebungen des Kompensatorkeiles so wenig, daß keine Halbschattengleichheit mehr zustande kam. Daher drehte ich hier den Analysator zuerst im *einen* Sinne gegen die Nähe der Halbschattengleichheit und suchte die dazu gehörigen Kompensatoreinstellungen für Halbschattengleichheit, aus denen ich das Mittel bildete; dann drehte ich den Analysator im *anderen* Sinne über seine Dunkelstellung hinaus in die analoge symmetrische Stellung und suchte in dieser das entsprechende Kompensatormittel. Das Gesamtmittel aus diesen beiden fast übereinstimmenden Einzelmitteln ergab mir dann die wirkliche Phasendifferenz der beiden Komponenten. Hier 12 Einzelablesungen zur Mittelbildung heranzuziehen hatte um so mehr Berechtigung, weil eben bei diesen Einstellungen die Nicolhelligkeit durch die Kompensatorverschiebungen nur wenig geändert wurde, so daß die Einstellungen entsprechend schwieriger und weniger genau wurden. Um hierbei wenigstens die größtmögliche Genauigkeit zu erzielen, drehte ich den Analysator jeweils gerade so weit gegen seine Halbschatten-

stellung hin, daß die für Halbschattengleichheit nötigen beiderseitigen Kompensatoreinstellungen um die Phasendifferenz π auseinander lagen. Denn in diesen Stellungen ändert eine kleine Verschiebung des Kompensators die Helligkeit des Analysatornicols am stärksten, bei den doppelt so weit auseinander liegenden Kompensatorstellungen wären die Änderungen am geringsten. Bei einigen Kompensatorwerten (in unmittelbarer Nähe des Haupteinfallswinkels) wurde freilich nicht in der soeben beschriebenen Weise von zwei Analysatorstellungen ausgegangen, die symmetrisch zur Analysatordunkelstellung lagen, sondern von zweien, die beide durch Drehen des Analysators aus seiner Dunkelstellung nach *derselben* Seite hin erhalten wurden. Die in solcher Weise beobachteten Kompensatorwerte passen aber nicht weniger gut als die anderen in die Tabelle und in die Kurven hinein. Diese Prüfung unternahm ich nämlich, weil man in der Nähe des Haupteinfallswinkels durch Drehung des Analysators um mehrere Grade im einen Sinne in das Gebiet der oberen, im anderen Sinne in das Gebiet der unteren Kompensatorkurve der Zeichnung gelangt. Dementsprechend geht das Analysatornicol bei der Verschiebung des Kompensators um dieselben Beträge im einen Falle von Halbschattengleichheit zu Halbschattengleichheit durch Dunkel, im anderen Falle aber durch Hell hindurch. Es entspricht dies dem Sprung um den Gangunterschied $\lambda/2$ beider Strahlen, wenn man für denselben Einfallswinkel den Analysator auf einen Punkt der oberen oder auf einen Punkt der unteren Analysatorkurve einstellt, wie auch aus der Figur ersichtlich ist.

Die in runde Klammern () eingeschlossenen Kompensatorwerte sind nicht in der beschriebenen Weise bestimmt, sondern einfach den vorliegenden Kurven der Figur entnommen, gegebenenfalls unter Subtraktion oder Addition des dem Gangunterschied $\lambda/2$ entsprechenden Wertes der Kompensatorverschiebung zur experimentell für den betreffenden Winkel ermittelten anderen Kompensatorkurve. Die in eckige Klammern [] eingeschlossenen Analysatorwerte sind nicht durch die beschriebenen Halbschatteneinstellungen, sondern durch Analysatornicol-Dunkeleinstellungen nach Art der gewöhnlichen Nicol-dunkeleinstellungen (vgl. p. 987) gewonnen worden. Sie sollen

zeigen, daß beiderlei Einstellungsarten zu denselben Mittelwerten führen, soweit es die Fehlergrenze voraussehen läßt, daß also meiner Halbschattenmethode kein wesentlicher systematischer Fehler anhaftet. Allerdings sind die Dunkelwerte im allgemeinen um ein geringes größer als die Halbschattenwerte; jene Werte sind aber selbstverständlich ungenauer als diese, und außerdem ist es leicht möglich und sogar wahrscheinlich, daß ich beim Rechtsherumdrehen auf größte Dunkelheit leichter den Teilkreis etwas über das Ziel hinausschob, als bei dem unbequemerem Linksherumdrehen.

Wo mehrere Analysatorablesungen ohne oder mit eckigen Klammern bei demselben Einfallswinkel stehen, sind sie an verschiedenen Tagen, nach dem Verstellen und Abreiben des reflektierenden Glaskörpers, nach dem Herabnehmen des Kompensators oder des Analysators und des Kompensators erhalten worden, als Kontrollwerte. Man sieht, daß diese in verschiedener Weise erhaltenen Werte ziemlich gut miteinander übereinstimmen.

4. Die Genauigkeit der Einstellungen war begreiflicherweise für verschiedene Einfallswinkel verschieden. Die Kompensatorkurven fallen in der Nähe des Haupteinfallswinkels sehr rasch ab, weshalb hier die Kompensatoreinstellungen ungenauer sind als bei anderen Winkeln. Bei den Analysatorkurven ist wegen ihres horizontalen Verlaufes in der Nähe des Haupteinfallswinkels die Einstellungsgenauigkeit hier umgekehrt größer. Es schien mir nun nicht wichtig genug, alle abgelesenen Zahlen oder auch nur einen größeren Teil derselben zu veröffentlichen, weil diese Zahlen doch nur einen speziellen, für den bestimmten untersuchten Glaskörper gültigen Wert haben. Über die Einzelablesungen gibt ja auch die vorhergehende Arbeit Aufschluß. Dagegen mag erwähnt werden, daß bei sorgfältigsten (aber zeitraubenderen) Einstellungen des Analysators nach jedesmaligem Ausruhen seine Einstellungen beispielsweise nur um 1' voneinander, also nur etwa um 0,12 Promille des zu suchenden Mittelwertes von diesem abwichen; die schlechtesten Analysatoreinstellungen derselben Reihe wichen dagegen um 26' voneinander, also um etwa 3,2 Promille des zu suchenden Mittelwertes von diesem ab. Solche schlechteren Werte (von insgesamt 228 Einstellungen)

ergaben sich namentlich nach zu langem andauernden Einstellen und daraus folgender Ermüdung, oder wenn der Natriumvorrat schon zu sehr aufgezehrt und die Lichtintensität zu klein geworden war. Die besten Kompensatoreinstellungen wichen um 0,34 Promille, die schlechtesten (von insgesamt 150 Einstellungen) um nahezu 0,85 Proz. des für den Gangunterschied λ zu suchenden Mittelwertes von diesem ab, letzteres namentlich beim steilen Kurvenabfall. Auch die Kompensatoreinstellungen lassen sich aber weit genauer ausführen, wenn man mehr Zeit auf die Beobachtungen verwendet, oder wenn man sich an Halbschatteneinstellungen mehr und mehr gewöhnt hat. Die bei weitem Okularspalt ins Auge gelangende Lichtmenge ist groß genug, um ebenso bequem wie bei anderen Halbschattenapparaten einstellen zu können.

5. Schon früher (p. 987) habe ich erwähnt, daß man den Analysator auch auf stärkste Verdunkelung seines Nicols statt auf Halbschattengleichheit einstellen und daß man dabei gleichfalls eine größere Genauigkeit erwarten könne, als beim einfachen als Analysator verwendeten Nicol. Beim Einfallswinkel $59^{\circ} 53'$ habe ich drei verschiedene Einstellungsarten 1 bis 3 ausprobiert und die nebenstehenden Mittel α aus je 6 Ablesungen, sowie die größten Differenzen δ der Einzelleistellungen vom Mittelwert gefunden, nämlich:

1. Einstellung auf das letzte Verschwinden des Nicolhalbkreises beim Übergang von Hell zu Dunkel, abwechselnd von beiden Seiten her:

	87° 34'	88° 37'	
	38	33	
	18	89 14	
Mittel	87° 30'	88° 48'	$\alpha = 88^{\circ} 9,0'; \delta = 4,8 \text{ Promille.}$

2. Einstellung auf das erste Erscheinen des Nicolhalbkreises beim Übergang von Dunkel zu Hell, abwechselnd nach beiden Seiten hin:

	85° 47'	90° 59'	
	56	39	
	47	91 13	
Mittel	85° 50'	90° 57'	$\alpha = 88^{\circ} 23,5'; \delta = 3,3 \text{ Promille.}$

3. Einstellung auf Halbschattengleichheit zu beiden Seiten der Dunkelstellung:

	80° 50'	96° 4'	
	47	95 59	
	52	96 11	
Mittel	80° 49,7'	96° 4,7'	$\alpha = 88° 27,2'$; $\delta = 1,2$ Promille.

Man sieht, daß auch die beiden durch Nicoldunkleinstellung erhaltenen Werte des Azimuts α genügend mit den anderen in der Tabelle für den genannten Winkel angegebenen Werten übereinstimmen, und daß also nicht etwa zu befürchten ist, die Halbschatteneinstellungen geben ganz andere Mittelwerte als die Nicoldunkleinstellungen selber.

6. Ein Fehler in der Einstellung des Kompensatorkeiles kann in der Nähe des Haupteinfallswinkels auf die Analysatoreinstellung, also auf das beobachtete Azimut, nur von geringem Einfluß sein, wie aus den Kurven der Fig. 1 ersichtlich ist: Bei großen Änderungen der Kompensatorwerte κ ändern sich die Analysatorwerte α nur wenig, weil hier die Analysatorkurven ihre Maximal- bzw. ihre Minimalwerte haben. In der Tat fand ich beim Einfallswinkel 57° 53' die beiden Azimutwerte:

$$93° 20,8' \quad \text{und} \quad 90° 13,0',$$

wenn ich den Kompensatorkurven die Werte:

$$5078,4 \quad \text{und} \quad 8730,0$$

entnahm und den Kompensator auf diese einstellte. Änderte ich dagegen die Kompensatoreinstellungen um 30—50 Trommelteile, also z. B. auf die Werte:

$$5040,5 \quad \text{und} \quad 3782,9,$$

so erhielt ich die etwas anderen Azimutwerte:

$$93° 21,7' \quad \text{und} \quad 90° 9,0'.$$

7. Um zu prüfen, ob Drehungen des Kompensators um die Fernrohrachse einen größeren Einfluß haben, drehte ich den Kompensator um etwa einen Grad im einen Sinne, dann um etwa einen Grad im anderen Sinne über seine zur Goniometerachse senkrechte Stellung hinaus und erhielt mit dem Analysator die abweichenden Azimute:

$$94° 32,5' \quad \text{und} \quad 90° 44,8'$$

bei der einen, aber

$$92° 35,8' \quad \text{und} \quad 89° 42,2'$$

bei der anderen Drehrichtung. Diese Orientierung des Kompensators hat daher, wie sich erwarten ließ, einen großen Einfluß auf das Resultat; die Azimutänderung würde z. B. bei zirkularpolarisiertem reflektierten Licht der genannten Kompensatordrehung unmittelbar gleich sein. Ursprünglich hatte ich mit einer Kompensatororientierung gearbeitet, die nach der mechanischen Bearbeitung der Metallteile des Kompensators und des Goniometers möglichst gut gewählt worden war. Ich stellte dann die Goniometerachse mit der Libelle vertikal und das Kompensatorgehäuse mit derselben Libelle horizontal. Zuletzt orientierte ich aber den Kompensator immer in der Weise, daß ich nach der Bestimmung der gekreuzten Stellung von Polarisator und Analysator (der eine vertikal, der andere horizontal) den Kompensator zwischen sie hineinbrachte und um die Fernrohrachse so lange drehte, bis der Analysator wieder dieselben Halbschattenstellungen aufwies, wie ohne den Kompensator.

8. Von der vorläufigen Voraussetzung¹⁾ ausgehend, daß das von durchsichtigen Substanzen unter ihrem Polarisationswinkel zurückgeworfene Licht vollständig geradlinig polarisiert sei, unter dem Einfallswinkel also, für den nach dem Brewsterschen Gesetz der in die Substanz eindringende und der zurückgeworfene Strahl aufeinander senkrecht stehen, hatte ich zuerst mit einer der Goniometerachse parallelen Glasfläche, in die ich aus dem Spaltrohr Licht etwa unter dem Polarisationswinkel einfallen ließ, den Analysator nur in die *Nähe* seiner Dunkeleinstellung gebracht; dann schob ich das polarisierende Nicol ein und orientierte durch seine Hin- und Herdrehungen bis zur Halbschattengleichheit des den reflektierten Strahl aufnehmenden Analysators vorerst dieses. Nachher suchte ich erst die zum Polarisator senkrechte Analysatorstellung nach dem Halbschattenprinzip auf, ohne die reflektierende Glasfläche. Als ich später sah und auch in der Literatur namentlich durch Jamins Arbeiten bestätigt fand, daß das vom Glas unter seinem Polarisationswinkel reflektierte Licht niemals vollständig polarisiert sei, wie auch aus meinen Kurven Fig. 1 zu ersehen ist, so stellte ich nun zuerst den

1) F. Kohlrausch, *Lehrb. der prakt. Physik*, 10. Aufl. p. 305. 1905.

Analysator mit Hilfe der Glasreflexion nach dem Halbschattenprinzip genau auf Dunkel ein, dann erst den Polarisator. Dabei erhielt ich eine um $2^{\circ}42'$ von der früheren verschiedene Einstellung des Polarisators. Nun mußte ich durch Drehungen des Polarisators um die Spaltrohrachse untersuchen, ob nicht etwa die ins Glas eindringende Komponente doch beim Polarisationswinkel für die Reflexion vollständig verloren gehe. Die Einstellungen wurden beim Einfallswinkel $58^{\circ}9'$ gemacht, der nach den damaligen Messungen dem Polarisationswinkel am besten zu entsprechen schien. Ich fand für die Nicolstellungen ν des Polarisators und für die der Fig. 1 entnommenen zu $58^{\circ}9'$ gehörenden Kompensatorstellungen $\kappa_1 = 3620,0$ und $\kappa_2 = 4962,3$ die entsprechenden Azimute α_1 und α_2 , wie sie in nebenstehender Tab. 2 angegeben sind:

Tabelle 2.

ν	$122^{\circ}48'$	$142^{\circ}24'$	$143^{\circ}54'$	$145^{\circ}24'$	$160^{\circ}0'$
α_1	91 45,3'	90 36,2'	90 21,0'	90 20,7'	88 37,2'
α_2	92 15,3	93 26,2	93 32,3	93 42,3	95 43,3
δ	80,0	2 50,0	3 11,3	3 21,6	7 6,1

Dabei entspricht der Winkel $143^{\circ}54'$ der Polarisatorstellung, die zuerst als die richtige erschien, und bei der deshalb alle Beobachtungen, wie sie in der Tab. 1 enthalten sind, ausgeführt wurden. Wenn dagegen das einwandfreiere in der vorhergehenden Arbeit (p. 988) angegebene Einstellungsverfahren für Analysator und Polarisator durchgeführt wurde, so erhielt man $141^{\circ}12'$ als Winkel, auf den der Polarisator einzustellen war, sofern das in die spiegelnde Fläche einfallende Licht genau unter 45° zur Einfallsebene geradlinig polarisiert sein sollte. Aus den Differenzen δ der beiden Azimute für die beiden um $\lambda/2$ verschiedenen Kompensatoreinstellungen κ_1 und κ_2 (auf annähernd $\lambda/4$ und auf $3\lambda/4$ Gangunterschied beider Strahlen) ersieht man, daß diese Differenz in dem weiten Bereich obiger Messungen doch nie Null wird; für den richtigen Einfallswinkel $141^{\circ}12'$ interpolieren wir für $\delta 2^{\circ}37,4'$, so daß also die unter dem Polarisationswinkel nahezu verschwindende (senkrecht zur Einfallsebene polarisierte) reflektierte Komponente das Azimut des reflektierten Lichtes doch immer

noch um $1^{\circ} 18,7'$ zu drehen vermag. Von einem völligen Verschwinden dieser Komponente kann also niemals die Rede sein. Man sieht aber, daß das Azimut des einfallenden Strahles bei den in die Tab. 1 aufgenommenen Versuchen um $2^{\circ} 37,4'$ in der Richtung gedreht war, die dem senkrecht zur Einfallsebene polarisierten Licht eine etwas größere Intensität sicherte, als dem parallel zur Einfallsebene polarisierten Licht.

9. Das zu diesen Messungen benutzte Glasprisma diente auch in der vorhergehenden Arbeit (p. 995) zum Zwecke der Bestimmung des Haupteinfallswinkels und des Hauptazimuts. Dort erhielten wir als Haupteinfallswinkel $57^{\circ} 56,65'$. Nun wurde nochmals eine Reihe von Beobachtungen in der Weise angestellt, daß für einige zu beiden Seiten des Haupteinfallswinkels etwa gleich verteilte Einfallswinkel bei einer geeigneten Analysatoreinstellung ($84^{\circ} 15'$) nach dem Halbschattenprinzip diejenige Kompensatorstellung gesucht wurde, der die stärkste Verdunkelung des Analysatornicols entsprach, und zwar mit Reflexion einmal nach links, einmal nach rechts vom Spaltrohr aus. Der Kompensatoreinstellung 3590,0 mußte nach unseren Kompensatorkurven der Gangunterschied $\lambda/4$ beider reflektierten Komponenten, also auch der Haupteinfallswinkel entsprechen. Ich fand aus je sechs Kompensatorablesungen zu Einfallswinkeln ε , statt derer hier die am Goniometerteilkreis abgelesenen Winkel γ angegeben werden, die Kompensatormittel κ , wie sie im folgenden angegeben sind:

γ	$6^{\circ} 40'$	$7^{\circ} 40'$	$8^{\circ} 40'$	$133^{\circ} 20'$	$134^{\circ} 20'$	$135^{\circ} 20'$
κ	3767,9	3564,7	3340,8	3363,6	3573,4	3752,3

Durch Interpolation findet man der Kompensatorstellung 3590,0 entsprechend für die Reflexion nach rechts und nach links die beiden Winkel $\gamma_1 = 7^{\circ} 29,9'$ und $\gamma_2 = 134^{\circ} 29,9'$; ihre Differenz ist $\delta = 127^{\circ} 0'$, also der Haupteinfallswinkel

$$90^{\circ} - \frac{\delta}{4} = 58^{\circ} 15'.$$

Dieser Wert des Haupteinfallswinkels ist der Reduktion der für die Versuchsreihe Tab. 1 abgelesenen Teilkreiswinkel auf Einfallswinkel zugrunde gelegt worden. Er weicht vom Polarisationswinkel derselben Versuchsreihe um $15'$ ab; von dem

zwei Monate früher gefundenen, in der vorhergehenden Arbeit angegebenen Haupteinfallswinkel weicht er um etwa $18'$ ab, welche Differenz zum Teil auf Beobachtungsfehler, namentlich aber auf die nicht einwandfreie Orientierung vor der Erkenntnis der wahren Verhältnisse bei der Reflexion an durchsichtigen Substanzen (vgl. p. 1009) geschoben werden muß. Um diesen Überlegungen Rechnung zu tragen, nahm ich zum Schluß nochmals eine ganz neue, möglichst einwandfreie Orientierung des ganzen Polarimeters vor, wie sie in der vorhergehenden Arbeit als normale Orientierung vorgeschrieben ist. Bei dieser Einstellung fand ich 3601,1 als die Kompensatorstellung, die den Gangunterschied $\lambda/4$ beider reflektierten Komponenten entsprach; ferner ergaben sich zu den Teilkreiswinkeln γ die Kompensatorablesungen κ und die Analysatorstellungen α_1 und α_2 (für die um $\lambda/2$ Gangunterschied voneinander verschiedenen zugehörigen Kompensatorstellungen, wie die Fig. 1 zeigt), sowie ihre Differenzen δ :

γ	$45^\circ 40'$	$46^\circ 40'$	$172^\circ 40'$	$173^\circ 40'$
κ	3653,6	3450,3	3626,2	3873,4
α_1	—	—	$90^\circ 33,2'$	$90^\circ 12,3'$
α_2	—	—	93 17,5	98 32,2
δ	—	—	2 44,3	3 19,8

Aus diesen Zahlen berechnen sich zu den beiderseitigen Kompensatoreinstellungen 3601,1 die Teilkreiswinkel $45^\circ 55,5'$ und $172^\circ 34'$, aus deren Differenz sich der Haupteinfallswinkel $58^\circ 20,4'$ ergibt, $5,4'$ größer als der wohl ungenauere aus den vorhergehenden Versuchen gefolgerte Wert. Man sieht ferner, daß bei dem Teilkreiswinkel $172^\circ 40'$, der nahezu dem Haupteinfallswinkel entspricht, die Differenz $\delta = 2^\circ 44,3'$ beider Analysatorwerte α_1 und α_2 (welche Werte als kleine Kreise in die Fig. 1 eingetragen sind) nahezu der weiter oben (p. 1010) auf anderem Wege gefundenen Differenz $\delta = 2^\circ 37,4'$ entspricht. Es kann also hierdurch die Folgerung, die senkrecht zur Einfallsebene polarisierte reflektierte Komponente verschwinde nie vollständig, bei keinem Einfallswinkel, nur bestätigt werden. Bei dem um 1° größeren Teilkreiswinkel, der einer Änderung des Einfallswinkels um nur $\frac{1}{2}^\circ$ entspricht, ist die genannte Differenz δ schon wieder $3^\circ 19,8'$ geworden, das Minimum

von δ ist also wie in allen anderen Versuchen beim Haupteinfallswinkel selber zu suchen.

10. Um den Haupteinfallswinkel mit dem Polarisationswinkel vergleichen zu können, wie sich dieser nach dem Brewsterschen Gesetz aus dem Brechungsverhältnis ergibt, bestimmte ich das Brechungsverhältnis des Prismas nach der Methode der Minimalablenkung und fand den Prismenwinkel $\varphi = 60^\circ 0,0'$, die Minimalablenkung $\delta = 51^\circ 0,9'$, also daraus das Brechungsverhältnis:

$$n = 1,6484 = \operatorname{tg} \omega$$

und den Polarisationswinkel

$$\omega = 58^\circ 45,4'.$$

Dieser Wert ist noch um $25'$ größer als der genaueste für den Haupteinfallswinkel gefundene Wert $58^\circ 20,4'$. Ich glaube nicht, daß diese Differenz nur auf Beobachtungs- und Einstellungsfehler zurückgeführt werden könne. Das Prisma selber ist gut plan geschliffen und vor wenigen Jahren von Schmidt & Haensch bezogen worden.

11. Nun untersuchte ich ein zweites älteres Prisma unbekannter Herkunft, das schon vor etwa 13 Jahren für die Kaiserl. Post- und Telegraphenschule bezogen worden war (das Flintglasprisma einer Prismencombination), weil dies Prisma nach Vorversuchen einen besonders geringen Haupteinfallswinkel zeigte. Hier untersuchte ich aber nur die dem Haupteinfallswinkel unmittelbar benachbarten Einfallswinkel, um zu sehen, ob der Charakter der Kompensator- und der Analysatorkurven sich gleich bleibe, wie beim ersten Prisma, ob namentlich die Phasendifferenz $\pi/2$ der beiden reflektierten Komponenten ($\lambda/4$ Gangunterschied) wiederum mit der stärksten Einschnürung der Analysatorkurven zusammenfalle. Man sieht aus der nachstehenden Tab. 3 und aus der mit

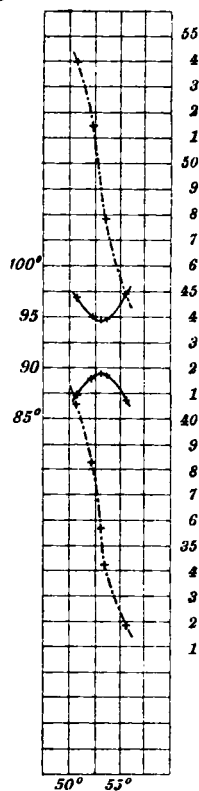


Fig. 2.

Tabelle 3.

$s^1)$	$50^\circ 44'$	$52^\circ 14'$	$53^\circ 14'$	$53^\circ 44'$	$55^\circ 44'$
α_1	5400,0	5150,1	4900,8	4779,6	4493,4
α_1	$96^\circ 53,0'$	$95^\circ 0,0'$	$94^\circ 30,3'$	$94^\circ 47,5'$	$97^\circ 16,0'$
α_2	4057,1	3825,2	3571,3	3423,6	3183,8
α_2	$87^\circ 15,0'$	$88^\circ 50,8'$	$89^\circ 24,7'$	$89^\circ 7,0'$	$86^\circ 44,0'$

diesen Werten konstruierten Fig. 2, daß dieses Zusammenfallen tatsächlich auch hier stattfindet. Der Haupteinfallswinkel, der durch den Gangunterschied $\lambda/4$ beider Komponenten gekennzeichnet ist, fällt, soweit die Zahlen und die Kurven es erkennen lassen, mit dem Winkel zusammen, unter dem nahezu nur noch die eine der beiden Komponenten reflektiert wird. Diesem Gangunterschied entspricht nämlich nach früherem²⁾ die Kompensatorstellung 3590,0, und wenn wir durch Interpolation aus obiger Tabelle zu dieser Kompensatorstellung den zugehörigen Einfallswinkel suchen, so finden wir $53^\circ 10'$. Nach der Methode der Minimalablenkung ergab sich für dieses Prisma als Prismenwinkel $\varphi = 21^\circ 46,0'$, als Minimalablenkung $\delta = 15^\circ 46,8'$ und also daraus das Brechungsverhältnis:

$$n = 1,7045 = \operatorname{tg} \omega.$$

Demnach wird aus dem Brewsterschen Gesetz

$$\omega = 59^\circ 36,0'$$

als Polarisationswinkel gefunden; er weicht vom Haupteinfallswinkel um $6^\circ 26'$ ab, welche Differenz durch keine Beobachtungsfehler mehr erklärt werden kann. Dem Polarisationswinkel $53^\circ 10'$ würde das Brechungsverhältnis 1,335 entsprechen. Man könnte also aus diesem Ergebnis den Schluß ziehen, daß für das zweite Prisma der Haupteinfallswinkel *nicht* gleich dem aus dem Brewsterschen Gesetz berechneten Polarisationswinkel sein könne und daß diese Beziehung auch für das erste hier untersuchte Prisma nicht genau stimme. Andererseits

1) Zur Reduktion von Teilkreiswinkeln auf wirkliche Einfallswinkel konnte hier auch der schon p. 1011 gefundene Wert des (doppelten) Haupteinfallswinkels benutzt werden, weil der Teilkreis selber inzwischen nicht verschoben worden war.

2) Die Orientierung des Polarimeters war bei diesen Versuchen dieselbe wie bei den in Tab. 1 dargestellten Versuchen.

ist es doch merkwürdig, daß der Haupteinfallswinkel bei beiden Prismen mit dem Minimalwert des reflektierten Lichtes zusammenfällt, durch den ja der Polarisationswinkel auch definiert ist.

12. Bei genauer Besichtigung dieses zweiten Prismas hatte ich bemerkt, daß seine Flächen namentlich in der Nähe der Kanten nicht gut eben geschliffen waren und daß überdies trotz gründlichen Abreibens mit weichem Leder diese Flächen im reflektierten Licht Farbenercheinungen zeigten, etwa wie Farben dünner Blättchen. Ich kam also auf die Vermutung, das Glas dieses Prismas könnte an der Oberfläche durch Aufnahme fremder Substanzen und entsprechende chemische Umwandlung seine Eigenschaften geändert und ein neues Brechungsverhältnis angenommen haben, das sich nur durch den geänderten Haupteinfallswinkel, nicht aber durch das nach der Methode der Minimalablenkung bestimmte Brechungsverhältnis des gesamten Prismas erkennen ließe. Das Brechungsverhältnis 1,335 legte auch den Gedanken nahe, das Prisma habe vermöge seiner Oberflächenbeschaffenheit eine Wasserhaut erhalten, da 1,3335 das Brechungsverhältnis des Wassers bei 18° für Natriumlicht ist. In der Tat weiß man ja schon lange, daß z. B. bei der Metallreflexion die Oberflächenbeschaffenheit der Spiegel eine von dem verwendeten Poliermittel wesentlich abhängige Rolle spielt. Auch ist durch Drudes Arbeiten¹⁾ bekannt, daß für frische Spaltflächen von Kristallen Haupteinfallswinkel und Hauptazimut andere Werte haben, als für ältere Spaltflächen, weil diese Flächen sich an der Luft mit der Zeit ändern.

Da längeres Reiben mit weichem Leder die farbig reflektierende Schicht des Prismas nicht beseitigte, wusch ich das Prisma mit konzentrierter Salpetersäure und dann mit Wasser, ohne daß sich nach dem Trocknen ein Verschwinden oder auch nur eine Abnahme der farbigen Schicht zeigte. Nun entfernte ich eine geringe Schichtdicke der zu untersuchenden Fläche durch längeres Reiben mit Pariserrotpapier, beseitigte etwa auf der Fläche verbliebene Reste des Pariserrots mit dem weichen Leder, untersuchte wieder einige in der Nähe der

1) P. Drude, Wied. Ann. **34**, p. 489. 1888.

beiderseitigen Haupteinfallswinkel (links und rechts) liegende Einfallswinkel bei fester Analysatorstellung ($84^{\circ} 15'$ wie oben p. 1011), indem ich nach dem Halbschattenprinzip die Kompensatorstellung ermittelte, die die stärkste Verdunkelung des Analysatornicols ergab, und fand die Werte:

γ	$178^{\circ} 0'$	$179^{\circ} 0'$	$180^{\circ} 0'$	$321^{\circ} 40'$	$323^{\circ} 0'$	$323^{\circ} 40'$
κ	3746,2	3576,1	3431,9	3394,1	3634,0	3713,6

Durch Interpolation findet man wieder die der Kompensatorstellung 3590,0 entsprechenden Winkel $\gamma_1 = 179^{\circ} 4,9'$ und $\gamma_2 = 322^{\circ} 53,6'$; ihre Differenz ist $\delta = 143^{\circ} 48,7'$, also der Haupteinfallswinkel $90^{\circ} - \delta/4 = 54^{\circ} 2,83'$, und das zugehörige Brechungsverhältnis $n = 1,378$. Durch das Waschen mit Salpetersäure und das Abreiben mit Pariserrot änderte sich also der Haupteinfallswinkel dieses Prismas um nahezu 1° . Weil mir das Abreiben mit Pariserrot das wirksamere Mittel schien, rieb ich die Fläche nochmals längere Zeit (eine halbe Stunde) in dieser Weise ab und fand bei unverändert gebliebenem Goniometerteilkreis zu den Winkeln γ die Kompensatorstellungen κ :

γ	$321^{\circ} 20'$	$323^{\circ} 0'$
κ	3520,4	3747,6

Für $\kappa = 3590,0$ interpolieren wir $\gamma = 321^{\circ} 50,6'$, d. h. $1^{\circ} 3'$ weniger als oben; die Beobachtung des Haupteinfallswinkels bei der Reflexion nach der anderen Seite hin muß also am Goniometerteilkreis ebensoviel mehr ergeben. δ wird $2^{\circ} 6'$ kleiner, der Haupteinfallswinkel $31,5'$ größer, also $54^{\circ} 34,3'$, und das zugehörige $n = 1,406$. Durch das neue Abreiben der Glasfläche ist also der Haupteinfallswinkel wieder um mehr als einen halben Grad größer geworden. Er nähert sich dabei etwas dem nach dem Brewsterschen Gesetz bestimmten Polarisationswinkel. Die Annahme erscheint sonach berechtigt, daß das betreffende Glasprisma in seinem Inneren ein wesentlich größeres Brechungsverhältnis besitze als an seiner Oberfläche, und daß aus diesem Grunde sein Haupt-

einfallswinkel nicht mit seinem nach Brewster berechneten Polarisationswinkel übereinstimme. Wahrscheinlich hängt damit die Farbenbildung an der Oberfläche dieses Glases (und auch anderer alt gewordener Gläser) zusammen. Mit dem Abbeschen Totalreflektometer fand ich in der Tat für die Oberflächenschicht dieses Prismas ein Brechungsverhältnis, das nach vorläufiger Bestimmung nur etwas größer als 1,4 war.

13. Auch das zweite Prisma untersuchte ich später nochmals, wie das erste Prisma, nachdem inzwischen das Polariometer in allen seinen Teilen aufs beste orientiert worden war. Als Haupteinfallswinkel fand ich aus ähnlichen Ablesungen wie oben $54^{\circ} 17,3'$. Allerdings war hier eine andere Stelle der Prismenfläche zur Reflexion benutzt worden. Nun erwärmte ich das Prisma auf dem Prismentischchen um etwa $40\text{--}50^{\circ}$, um eine allenfalls vorhandene Wasserhaut zu entfernen, und fand im warmen Zustand als Haupteinfallswinkel $53^{\circ} 57,9'$, also einen *kleineren* Winkel und eine Verkleinerung, nicht eine Vergrößerung des Brechungsverhältnisses, wie sie der Beseitigung der Wasserhaut entsprechen müßte. Nach dem Erkalten stieg der Haupteinfallswinkel wieder auf $54^{\circ} 10,7'$, welcher Wert folgenden Tages gefunden wurde. Nun erwärmte ich das Prisma auf über 100° und erhielt als Haupteinfallswinkel des erhitzten Prismas wieder den kleineren Wert $53^{\circ} 30,4'$, nach dem Erkalten wieder $53^{\circ} 40,7'$. Man sieht also, daß für die beobachteten Erscheinungen keine Wasserhaut verantwortlich gemacht werden kann.

14. Um zu prüfen, ob das zweite Prisma eine ganz zufällige Ausnahme der allgemeinen Regel der Gleichheit von Haupteinfallswinkel und aus dem Brewsterschen Gesetz berechnetem Polarisationswinkel sei, bestimmte ich in derselben Weise nach der Minimalablenkungsmethode noch die Brechungsverhältnisse von vier anderen Prismen, berechnete ihre Polarisationswinkel nach Brewster und maß dann ihre Haupteinfallswinkel. Ich fand dabei die in der Tab. 4 angegebenen Werte, in der zum Vergleich unter 1 und 2 die ersten beiden untersuchten Prismen nochmals angeführt sind. Die Zahlen 1, 2 . . . bedeuten darin die Prismennummern, ϵ die Haupteinfallswinkel, ω die Polarisationswinkel:

Tabelle 4.

1			2		
ε	57° 57'; 58° 15'; 58° 20,4'		53° 10'; 54° 2,8'; 54° 34,3'; 54° 17,3'		
ω	58° 45,4		59° 36,0		

3		4		5		6	
ε	56° 11'	56° 14,5'		56° 47,5'		56° 35,5'	
ω	56 26,3'	56 57		56 51,5		57 36	

Bei allen diesen Prismen wird also der Polarisationswinkel ω mehr oder weniger größer als der Haupteinfallswinkel ε gefunden, bei Prisma 6 beträgt der Unterschied auch wieder 1°.

15. Als Schlüßergebnisse für die Reflexion an durchsichtigem Glas können folgende als sehr wahrscheinlich aufgestellt werden:

1. Gewöhnliches unpolarisiertes Licht wird durch die Reflexion an Glas niemals, auch nicht unter dem Polarisationswinkel, in geradlinig polarisiertes, sondern nur in elliptisch polarisiertes Licht verwandelt.

2. Die senkrecht zur Einfallsebene polarisierte Komponente verschwindet im reflektierten Licht nie; sie hat aber für den Haupteinfallswinkel einen kleinsten Wert.

3. Ist der Polarisationswinkel durch den Winkel definiert, für den die senkrecht zur Einfallsebene polarisierte Komponente am wenigsten reflektiert wird, so fallen für die Glasoberfläche Haupteinfallswinkel und Polarisationswinkel zusammen. Daraus folgt aber

4. Aus dem nach der Methode der Minimalablenkung oder nach einer anderen die Brechung benutzenden Methode bestimmten Brechungsverhältnis von Glas kann der Polarisationswinkel nicht mit Sicherheit nach dem Brewsterschen Gesetz berechnet werden.

Halensee-Berlin, Juni 1908.

(Eingegangen 1. Juli 1908.)