Zeitschrift: Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie

Band: 23 (1943)

Heft: 2

Artikel: Über den Schweizer Brookit und seine optischen Anomalien

Autor: Rudolph, Joseph

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-20062

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Über den Schweizer Brookit und seine optischen Anomalien

Von *Joseph Rudolph*

INHALTSÜBERSICHT

Seite
1. Fragestellung 437
2. Kristallographie des Untersuchungsmaterials 438
3. Farbe und Zeichnungen 442
4. Erscheinungen im Orthoskop bei gekreuzten Nicols 445
5. Erscheinungen im Konoskop 451
6. Mikroskopischer Feinbau der Brookittafeln als Grund der optischen Anomalien 458
7. Ergebnisse 465
Literaturverzeichnis 466

1. FRAGESTELLUNG

Auf der Jahresversammlung 1937 der Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft berichtete L. WEBER (9) über „Optische Beobachtungen an Schweizer Brookiten" und fasste seine Ausführung in folgenden Worten zusammen: „Im parallel-polarisierten Licht zeigen gewisse Schweizer Brookite höchst interessante Erscheinungen. Schief zum seitlichen Rand, etwa unter 17° Neigung gegenüber der c-Achse, erkennt man einen buntfarbigen Streifen, der innen gezahnt oder aus schmalen Bändern zusammengesetzt ist. Grünlichgelb in der sogenannten Dunkelstellung, wird er leuchtend grün bezw. prachtvoll rot, je nachdem er beim Drehen des Mikroskoptisches im Sinne gegen den Rand zu oder davon weg bewegt wird." Soweit sich aus den mir zugänglichen Fachzeitschriften ersehen lässt, scheint diese Tatsache früher kaum beobachtet worden zu sein. Nur E. BUGMANN weist in ihrer Doktordissertation (3) kurz darauf hin. Auch könnte man versucht sein, die merkwürdigen Umwandlungserscheinungen und Zwillingsbildungen des Brookits von Rio Cipó, die HUSSAK beschreibt (6), mit den Beobachtungen WEBERS irgendwie in Beziehung zu bringen; die Farbenerscheinungen sind allerdings nicht bunt und schillernd, sondern „immer ein Weiss höherer Ordnung", trotzdem „der Schliff sehr dünn ist". Andere Forscher wie WISER (11), VOM RATH (8), ARNOLD (1), BRUGNATELLI (2) usw., die dem Brookit ihre besondere Aufmerksamkeit schenkten, erwähnen zwar dunkle Figuren in den Brookittafeln, sagen aber

nichts von buntfarbigen Streifen, wie sie hier in Frage stehen. So war es angezeigt, dem merkwürdigen Verhalten der Schweizer Brookite auf möglichst breiter Grundlage nachzugehen.

2. KRISTALLOGRAPHIE DES UNTERSUCHUNGSMATERIALS

Mehr als 70 lose Kristalle des Maderanertales und seiner Seitenschluchten standen mir zur Verfügung. Die grössten messen etwa 15 mm in der Länge, 8 mm in der Breite und haben eine Dicke von $\pm$ 0,5 mm (seitlicher Rand oft sehr dünn). Alle sind tafelig nach {100} und zeigen auf diesen Pinakoidflächen die bekannte Streifung parallel zur c-Achse ganz ohne jegliche Störung. Die meisten Täfelchen sind am einen Ende abgebrochen. Nur wenige sind ringsum vollständig entwickelt. Doch können selbst an abgebrochenen Kristallen oft noch obere und untere Endflächen festgestellt werden. Die beiden Enden sind indessen — wenn entwickelt — niemals symmetrisch.

Die mikroskopische Messung des Achsenverhältnisses führte auf den Wert b : c = 1 : 0,9406 (nach KOKSCHAROW 1 : 0,9444); die mittlere Abweichung der Einzelbeobachtungen beträgt $\pm$ 0,0068.

Bei der goniometrischen Durchmessung eines interessanten Kristalles wurde (110) : ($\bar{1}$10) = 99° 56′, d. h. (100) : (110) = 40° 2′ = w_1 gefunden. Ausserdem ergab sich (122) : ($\bar{1}$22) = 44° 21′ oder (100) : (122) = 67° 49½′ = w_2. Wird (011) : (001) = x gesetzt, so gilt für das rechtwinklige sphärische Dreieck 001 : 011 : 122 die leicht zu beweisende Formel $\sin x = 2 \operatorname{tg} w_1 \cdot \operatorname{cotg} w_2$. Daraus berechnet sich $\log \sin x = \bar{1}.83558$ oder $\log \operatorname{tg} x = \bar{1}.97305$. Für das Achsenverhältnis bekommt man demnach $a:b:c = \operatorname{tg} w_1 : 1 : \operatorname{tg} x = 0{,}8401 : 1 : 0{,}9389$. Der hier gefundene c-Wert bestätigt die mikroskopisch erhaltene Abweichung von der KOKSCHAROW'schen Zahl.

Als randliche Begrenzung wurden an 55 mikroskopisch durchgemusterten Kristallen acht Kantenrichtungen festgestellt. [010] 55, [021] 21, [043] 38, [011] 48, [012] 44, [0.3.10] 1, [027] 3, [015] 1, [001] 55. Die beigeschriebenen Zahlen besagen, an wie vielen Individuen die einzelnen Kanten gefunden wurden. [0.3.10] gehört zu {4.10.3}.

An diesen Kristallen konnten auch die Flächen mikroskopisch (z. T. unter Zuhilfenahme goniometrischer Messungen) gedeutet werden. Nach ihrer Häufigkeit geordnet, sind es folgende:

{100} 55, {110} 55, {122} 48, {001} 47, {021} 44, {134} 38, {104} 34, {112} 21, {010} 7, {210} 6, {121} 4, {5.14.4} 2, {4.10.3} 1, {9.10.2} 1, {102} 1.

Gegenüber der Zusammenstellung von ARNOLD (1) ergeben sich einige auffallende Unterschiede, die ich hier hervorheben möchte. {043} konnte ich nie feststellen. Dagegen ist die Kante [043], herrührend von {134}, leicht und oft wahrnehmbar. {322} habe ich ebensowenig wie {111} beobachtet. Sie sind zwar keine häufigen Formen. Ob sie bei zufälligem Auftreten für {122} gehalten wurden? Vermutlich wurde auch {102} zuweilen als {104} gedeutet. {121}, das nach ARNOLD am alpinen Brookittypus fehlen soll, habe ich viermal bestimmt. An einem Kristall konnte ich sogar Messungen ausführen. Wegen der schmalen Flächen sind die Spaltbilder allerdings schwach und undeutlich. Ich zog darum vor, bei vorgeschlagener Lupe auf die gleichmässig hell beleuchtete Fläche einzustellen.

$\bar{1}21$	$219^0 41'$	$\pm 18'$	$27^0 50'$	Mittel $27^0 41\frac{1}{2}'$ (ber. $27^0 42'$)
021	$247^0 31'$	$\pm 12'$		
121	$275^0\ 4'$	$\pm 16'$	$27^0 33'$	

Die Form {4.10.3} ist neu. Sie tritt an einem Kristall mit zwei langen, schmalen Flächen auf. Die Lage in der Zone [(110):(021)] ist durch goniometrische und mikroskopische Messungen sichergestellt.

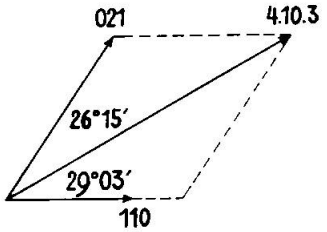

Fig. 1. Indizesbestimmung von {4.10.3} mittels der Flächenvektoren {110} und {021}.

Der Winkel (021):(4.10.3) konnte bei scharfen Reflexen zu $26^0 15'$ bestimmt werden, während sich (021):(110) = $55^0 18'$ fand. Nun kommen den Flächenvektoren (021) und (110) die Längen $a\sqrt{b^2+4c^2}$ und $c\sqrt{a^2+b^2}$ zu. Mit ihrer Hilfe lässt sich der zu (4.10.3) gehörige Vektor ermitteln. Da es bloss auf die Richtung ankommt, darf der (021)-Vektor einfach genommen werden; der (110)-Vektor ist dann μ-mal abzutragen. Nach Fig. 1 kommt so die Beziehung:

$$\frac{\mu\, c\sqrt{a^2+b^2}}{a\sqrt{b^2+4c^2}} = \frac{\sin 26^0 15'}{\sin 29^0 03'}$$

Je nachdem, ob für a, b, c die KOKSCHAROW'schen oder aber die S. 438 neu errechneten Werte eingesetzt werden, ergibt sich μ zu 1,3777 bezw. 1,3737. Die einfachsten Näherungswerte sind $^4/_3$, $^7/_5$ und $^{11}/_8$. Der erste — ungenaueste! — führt auf das Symbol {4.10.3}.

Die beiden andern liefern kompliziertere Symbole: {7.17.5} bezw. {11.27.8}.

Die Fläche (4.10.3) liegt unweit (5.14.4). Ob sie damit identisch ist? Leider fällt letztere nicht in die Zone [(021):(110)], wenn auch nicht weit davon. Zudem ist der Winkel (021):(5.14.4) merklich kleiner als 26°15′, nämlich nur 24°38′.

{4.10.3} ist intensiv gestreift, anscheinend — auch nach Messungen mit Drehapparat und Mikroskop — senkrecht zur Kombinationkante (021):(4.10.3). Demzufolge zeigt das Spaltbild von (4.10.3) bei der Messung (021):(4.10.3):(110) einen vertikal verlaufenden Schein. Auf dieses Lichtband, worin das Spaltbild scharf sichtbar war, wurde eingestellt. In einer besonderen Messung wurde die Streifungsrichtung parallel zur Drehachse des Goniometers gebracht. Die zahllosen Spaltbilder umfassen einen Bereich von 7°8′. Das ist fast genau der Bogenabstand der Flächen (4.10.3) und

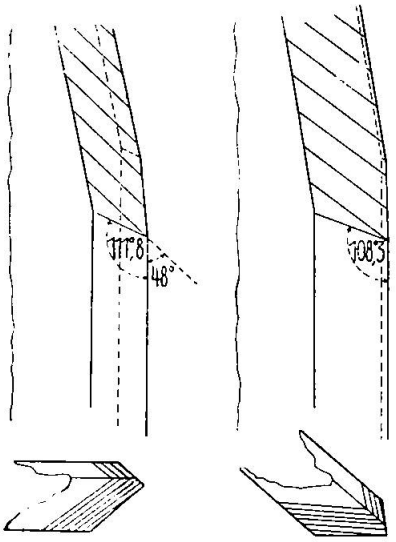

Fig. 2. Deutung der gestreiften Fläche (9.10.2) mit Hilfe mikroskopischer Winkelmessungen. Die Streifung ist wahrscheinlich durch {011} oder {143} hervorgerufen.

(3.10.2). Trotzdem dürfte die Streifung eher durch (121) erzeugt sein. Der Abstand passt gleich gut. Überdies steht die Zone [(021):(110)] wie erfordert auf der Zone [(121):(4.10.3)] nahezu senkrecht, wogegen sie mit [(4.10.3):(3.10.2)] nicht einmal 70° einschliesst.

{9.10.2} ist ebenfalls neu, aber weniger sicher bestimmt. Der Kristall, an dem die Form mit zwei Flächen erscheint, ist sehr dünn und liefert keine guten Reflexe. Die zur Lagebestimmung verlangten Messungen wurden darum am Mikroskop (z. T. mit Hilfe des Drehapparates) ausgeführt. Die Schnittkante [(110):($\bar{1}$10)] bildet mit der Kante [(110):(9.10.2)] einen Winkel von 108,3° (die Ebene (110) wurde mit dem Drehapparat möglichst horizontal gestellt;

vergl. Fig. 2). Liegt der Kristall auf ($\bar{1}00$), so findet sich für den entsprechenden Scheinwinkel, d. h. den Winkel zwischen der Kante [(110):($\bar{1}10$)] und der Projektion der Kante [(110):(9.10.2)] auf (100), die Grösse 111,8°. Mit Hilfe des WULFF'schen Netzes erkennt man, dass die Kante [(110):(9.10.2)] mit der Zonenrichtung [(110):(122)] nahezu übereinstimmt (diese liegt übrigens schön in der Mitte zwischen den durch die beiden Winkelmessungen bestimmten Zonenkreisen). [$2\bar{2}1$] dürfte dem Sachverhalt voll entsprechen. Von den rückberechneten Winkeln 113,5° und 108,7° weicht der erste allerdings nicht unbeträchtlich vom gemessenen ab. Es konnte auch die Neigung der Kante [(9.10.2):($\bar{9}$.10.2)] gegenüber der Zone [001] mikroskopisch scharf bestimmt werden: 12,5°. Die stereographische Projektionsskizze zeigt, dass der hierdurch bestimmte Grosskreis die VOM RATH'sche Ebene (3.10.2) enthält. Die entsprechende Zone hat also das Symbol [$0\bar{1}5$]. (9.10.2) ergibt sich somit eindeutig als Schnittpunkt von [$2\bar{2}1$] und [$0\bar{1}5$]. Weder {551} noch {992} passen zu den Beobachtungswerten so zwanglos wie {9.10.2}.

{9.10.2} ist gestreift (Fig. 2), aber nicht parallel zur Kombinationskante mit {110}. Bei Horizontalstellung der Fläche (9.10.2) auf dem Mikroskop (mit Drehapparat) misst der (wahre) Winkel der Kante [$0\bar{1}5$] mit unserer Streifung 44,3°. Wird der Kristall auf ($\bar{1}00$) gelegt, so schliesst die Streifung mit der c-Achse 48° ein. Hierdurch ist keine einfache Zone bestimmt; wahrscheinlich enthält sie ausser (9.10.2) noch (011). Aber auch (143) läge ihr nahe; dagegen fällt (121) ziemlich abseits. Statt 44,3° sind die berechneten Winkel der Reihe nach 43° 45′, 42° 32′ und 39° 34′.

Die untersuchten Kristalle haben vielfach ein hemimorphes Aussehen — eine Feststellung, die schon von anderen Autoren (1, 4) gemacht wurde. An meinen Kristallen, von denen allerdings nur fünf ringsum ausgebildet sind, prägt sich diese Scheinhemimorphie öfters so aus, dass die Basisfläche auf der einen Seite in Richtung der b-Achse kürzer dimensioniert ist als auf der andern. Weil aber die Kristalle mehrheitlich am einen Ende abgebrochen oder doch unvollkommen entwickelt sind, ist die Basis für sich ein zu unbestimmtes Merkmal. Es schien nötig, die Kristalle — soweit sie an beiden Enden Flächen aufweisen — auf das Verhalten sämtlicher Formen zu prüfen. Hier das Ergebnis der Zählung:

	{001}	{021}	{104}	{112}	{122}	{134}
einseitig	13 (0)	1 (1)	10 (2)	9 (1)	15 (3)	15 (1)
beidseitig	6 (4)	21 (4)	5 (1)	3 (0)	9 (2)	3 (2)
fehlt	6 (1)	3 (0)	10 (2)	13 (4)	1 (0)	7 (2)

Nach dieser Tabelle tritt {021}, wenn überhaupt vorhanden, fast immer beidseitig auf. Das liegt darin begründet, dass schiefe Endflächen — vor allem die steilen — auch dann noch erkennbar sind, wenn das zugehörige Kristallende ziemlich beschädigt ist. Doch bleibt die Tendenz zu ungleicher Grössenentwicklung der beiden Basisflächen unverkennbar. Das zeigt sich auffallend darin, dass {104}, {112} und {122} öfters oben und unten auftreten, obgleich {001} nur mit einer Fläche vorhanden ist. Obige Zusammenstellung darf überhaupt nicht den Eindruck erwecken, als sei das beidseitige Auftreten der einzelnen Formen wesentlich an die fünf ringsum entwickelten Kristalle geknüpft. Im Gegenteil! {112} erscheint bei diesen überhaupt nicht, {104} nur einmal. Um jeglichem Missverständnis vorzubeugen, ist in der Tabelle durch die eingeklammerte Zahl angegeben, wie oft die einzelnen Formen an den ringsum ausgebildeten Kristallen einseitig oder beidseitig vorkommen bezw. fehlen.

3. FARBE UND ZEICHNUNGEN

Bei Prüfung mit unbewaffnetem Auge erweisen sich die Kristalle allgemein durchsichtig und stark diamantglänzend. Farbe honiggelb, bei grösserer Dicke entschieden rötlich. Ohne jede Ausnahme zeigen diese Brookite zwei charakteristische Zeichnungen. Die eine läuft perlschnurartig der c-Achse entlang, ist dunkel bis schwarz gefärbt, nach der b-Achse oft fein gestreift (besonders gut im hellen Quecksilberlicht sichtbar), mehr oder weniger scharf, aber immer kristallonomisch begrenzt. Die andere zieht sich in Gestalt zweier diagonaler Seitenlinien in wechselnder Breite schräg durch den Kristall hindurch, ist lichter gefärbt, weniger regelmässig begrenzt und parallel zur Richtung [012] stets fein gestreift (Fig. 3).

Bedient man sich eines schwach vergrössernden Mikroskopes, so zeigt sich sofort, dass das Untersuchungsmaterial zwei verschiedenen Typen zugehört. Beim Typus I ist die Farbe der Kriställchen im Grossen und Ganzen einheitlich; die schwarze, bei dünneren Individuen auch dunkelgrüne Mittellinie ist zackig (infolge Aneinanderreihung kleiner, nach der b-Achse gestreifter Dreiecke); die helleren, gezahnten Seitenlinien — nach [012] gestreift — zeigen ein schmutziges Graugrün; das Kristallende ist durch Vorherrschen der Kanten [011] und Zurücktreten der Basis in der Regel auffallend zugespitzt (Fig. 5). Dem gegenüber zeigt Typus II deutlich die oft beschriebene Sanduhrstruktur; die perlschnurartige Zeichnung hat gerundete Umrisse; die Diagonalen sind fast farblos; nur dort,

wo sie sich dem seitlichen Rand des Kristalles nähern, erscheinen zuweilen die grünliche Färbung sowie die schwache Streifung nach [012]. Dem ungeübten Auge können diese Diagonalen leicht entgehen. Das hat schon L. WEBER in seinem Genfer Referat angedeutet. Diese Diagonalen trennen einen helleren zentralen Sektor des Kristalls von den stärker gefärbten Seitenzwickeln ab. In diesen sind, den diagonalen Seitenlinien entlang, oft deutlich gelbe Flecken bemerkbar. Hier ist auch der Pleochroismus viel ausgeprägter als an den Kristallen des Typus I. Überdies haben die obern und untern Endkanten zumeist eine recht gleichmässige Längenentwicklung: der gebrochene Linienzug [010], [011], [043] täuscht sogar eine gewisse Rundung vor (Fig. 6, 8).

Die Seitenlinien verlaufen nicht schnurgerade, da die zu [012] parallelen Streifen, aus denen sie zusammengesetzt sind, recht verschiedene Länge haben. So hält es schwer, die Richtung dieser Linien eindeutig festzulegen. Man merkt aber sofort, dass sie gegenüber der c-Achse eine von Kristall zu Kristall stark wechselnde mittlere Lage haben. Schon E. BUGMANN (3) hat auf gewisse Unterschiede zwischen ihren Figuren und denen von ARNOLD aufmerksam gemacht. Es gelang mir, zahlreiche Messungen auszuführen, die zeigen, dass diesen Seitenlinien immerhin bestimmte kristallonomische Richtungen zum mindesten nahekommen. Nachstehend sind die gefundenen Winkelwerte (bezogen auf die c-Achse) in Graden und Zehntelsgraden mitgeteilt und mit den Neigungswinkeln einfacher Zonenrichtungen (c = 0,9406) in Beziehung gebracht.

11,0									
	$12^0 0'$ = [015]								
13,5	14,3								
	$14^0 52'$ = [014]								
15,3	15,5	16,5	16,7						
	$16^0 54'$ = [027]								
17,2	17,5	17,7	17,8	18,0	18,0	19,5	19,5		
	$19^0 31'$ = [013]								
20,0	20,0	22,0	22,3	22,5	22,5	22,7	22,8	23,0	23,0
	$23^0 2'$ = [025]								
23,8	23,8	24,0	24,2	24,8	25,0	25,5	25,7	26,0	27,5
27,6	27,6	27,8							
	$28^0 0'$ = [012]								
28,2	29,2	29,3	29,5	29,5	29,7	30,0	31,7		
	$35^0 20'$ = [023]								

38,0 38,0
$38^0 34' = [034]$
42,8 44,0 44,0 44,5
$46^0 45' = [011]$

Die diagonalen Seitenlinien sind rechts und links nicht immer gleich orientiert. Gewisse Verschiedenheiten der Winkel sind durch die bandartige Breite der Zeichnung ohne weiteres gegeben. Auf 24 Paare traf es zwölf Abweichungen kleiner als 3^0 (im Mittel $1\frac{1}{4}{}^0$), fünf zwischen 3^0 und 5^0, zwei zwischen 5^0 und 7^0. Doch wurden auch grosse Abweichungen gefunden, nämlich 8^0, $11\frac{1}{2}{}^0$, $13\frac{1}{2}{}^0$, 15^0, ja selbst 22^0. An fünf Kristallen konnten infolge Bruch, Bedeckung, schlechter oder undeutlicher Ausbildung die Linien nur einseitig gemessen werden.

Beachtenswert ist ein gewisser Zusammenhang zwischen den Richtungen dieser diagonalen Seitenlinien und dem Typus der Brookitkristalle. Dem Typus I sind 15 Messungen zuzuordnen. Als Neigung gegenüber der c-Achse ergeben sie ein Mittel von $18{,}4^0$. Die Grenzwerte sind $11{,}0^0$ und $30{,}0^0$. Nur drei Winkel liegen über 20^0. An den Kristallen des Typus II wurden 38 Winkelablesungen gemacht. Die Abweichung von der c-Achsenrichtung beträgt im Mittel $27{,}6^0$ und schwankt von $13{,}5^0$ bis $44{,}5^0$. Winkel unter 20^0 wurden drei gefunden.

Die bisher besprochenen Seitenlinien bilden durchwegs halbe Diagonalen, d. h. Züge, die von einem Punkt der Perlschnur weg seitwärts nach dem einen Kristallende ausstrahlen. Doch sind ab und zu noch andere, kürzere Liniensysteme bemerkbar, die vom genannten Verzweigungspunkt weg ungefähr gegen die Mitte oder den unteren Teil der Seitenkanten gerichtet sind. Einige Winkel, immer auf die + c-Achse bezogen, konnten gemessen werden.

85,7 89,5
$90^0 = [010]$
$113^0 2' = [05\bar{2}]$
115,0 117,5
$118^0 0' = [02\bar{1}]$

119,1 119,1 ····· 128,5
$128^0 35' = [04\bar{3}]$
131,5 134,5
$136^0 45' = [01\bar{1}]$
139,2

Diese Nebenlinien sind genau wie die diagonalen Seitenlinien nach den Kanten [012] gestreift, doch so, dass das rechts liegende System gleichsinnig gestreift ist wie die Diagonalen der linken Kristallhälfte und umgekehrt. Demnach erscheinen die Nebenlinien der einen Tafelhälfte als Weiterführung der Diagonalen der anderen Hälfte. Wo beide Linienteile die zentrale Perlschnur treffen, sind

sie gewissermassen gebrochen. Das erhellt trefflich aus den mitgeteilten Zahlen. Die Richtung der diagonalen Seitenlinien schliessen mit der c-Achse Winkel von 11° bis 45° ein, wogegen die rückwärtigen Verlängerungen der Nebenlinien das Gebiet von 45° bis 90° besetzen.

4. ERSCHEINUNGEN IM ORTHOSKOP BEI GEKREUZTEN NICOLS

Seine eigentümliche Pracht und Schönheit zeigt der Brookit erst im polarisierten Licht. In der Auslöschungsstellung zwischen gekreuzten Nicols leuchten die diagonalen Seitenlinien und die untergeordneten Nebenlinien mit herrlicher Farbe aus der dunklen Tafel des Kristalls heraus (Fig. 4, 7, 8). Freilich, die Auslöschung der Platte selber ist — sogar in den normalsten Fällen — recht unvollkommen. Schon bei gewöhnlicher Tagesbeleuchtung sticht der Kristall in seiner Dunkelstellung mit merklicher Helligkeit vom völlig schwarzen Hintergrund ab. Wird eine intensive Zeiss'sche Quecksilbermikroskopierlampe benutzt, so geht in der „Dunkelstellung" eine beträchtliche Lichtfülle durch (Fig. 7, 10). Einige Kristalle erzeugen beim Studium im Tageslicht sogar den Eindruck, als ob die Aufhellung von der Dunkelstellung aus nicht nach beiden Seiten in gleicher Weise erfolge. Im einen Drehsinn erhält man sofort die charakteristische rötliche Interferenzfarbe, im andern geht es zunächst durch einen bläulichen Farbton. Eine eindeutige Regel zu finden, war unmöglich; es scheint auch, dass gewisse Kontrastwirkungen und die späterhin zu erwähnenden Anomalien an der Erscheinung mitbeteiligt sind (S. 449).

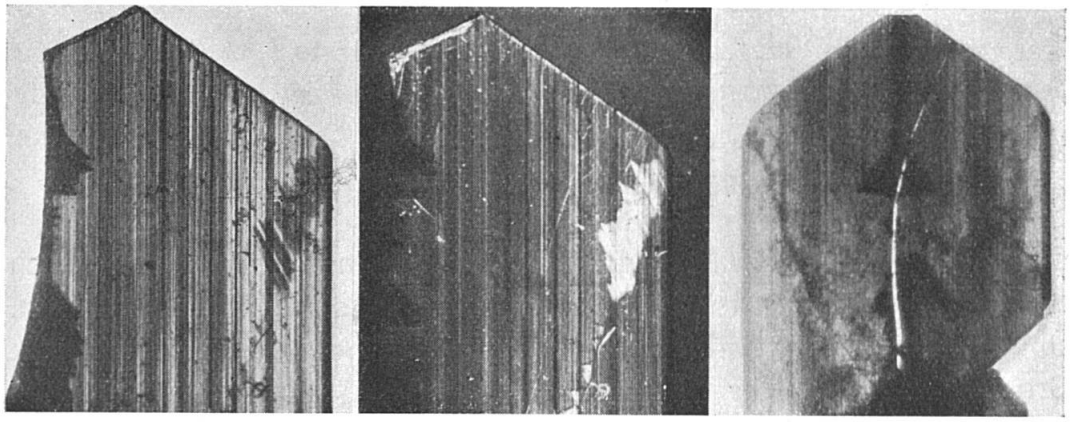

Fig. 3 (Vergr. 11fach) Fig. 4 (Vergr. 10fach) Fig. 5 (Vergr. 6 fach)
Brookitkristalle des Typus I, gekennzeichnet durch die zackige Mittellinie und die von [011] beherrschte Endbegrenzung. Die schmutziggrünen diagonalen Seitenlinien sind leicht erkennbar und stechen bei gekreuzten Nicols (Fig. 4) durch ihre gelbe Farbe vom dunklen Kristall leuchtend ab.

Hinsichtlich der Interferenzfarben bei gekreuzten Nicols sei erwähnt, dass der dünnere Rand der Kriställchen gewöhnlich blau, die dickere Mitte rosafarben ist. Ein gelblicher Übergang fehlt. Die Farbenfolge ist also anomal. Anomal sind auch die Farben selber,

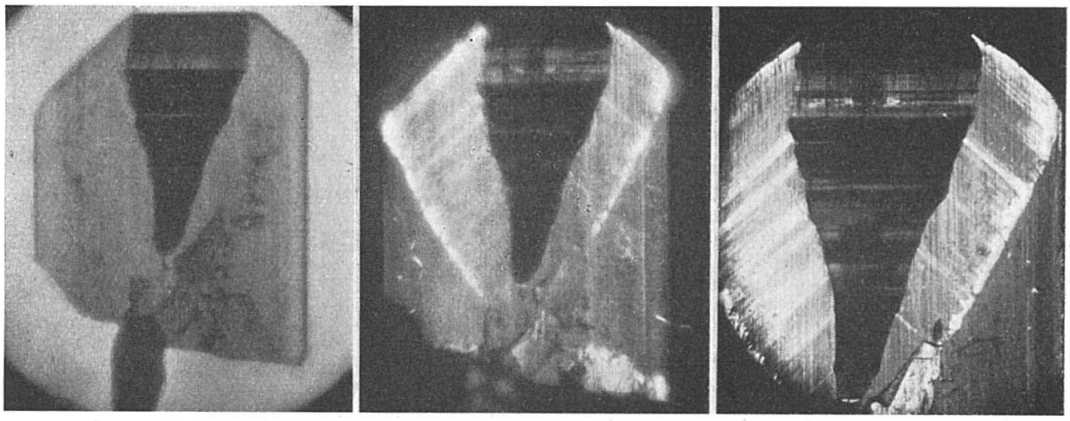

Fig. 6 (Vergr. 4,5fach) Fig. 7 (Vergr. 4,5fach) Fig. 8 (Vergr. 7 fach)
Brookitkristall des Typus II. Umriss der dunklen Mittellinie rundlich. Die diagonalen Seitenlinien fast farblos (oft Sanduhrstruktur, wobei der Kristall innerhalb der Seitenlinien heller ist als ausserhalb). In der Auslöschungsstellung (Fig. 7, 8) leuchtet nebst den Diagonalen noch ein Streifensystem auf, dessen Linien zu [011] parallel sind (zuweilen werden auch anomale [001]-Streifen sichtbar). An Fig. 7 tritt rechts unten eine Nebenlinie hervor.

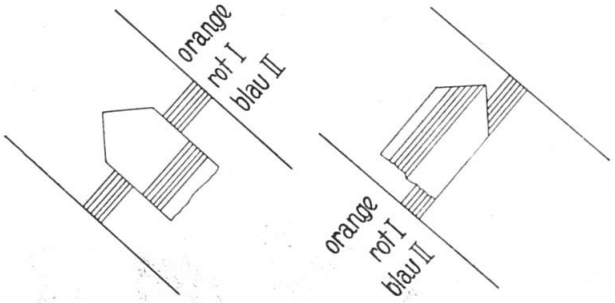

Fig. 9. Kompensation der Brookitdoppelbrechung mit Hilfe eines Quarzkeiles (durch die beiden parallelen Linien angedeutet) im gelben Quecksilberlicht.

die trotz des Blaus ganz niedriger Ordnung sind. Selbstverständlich ist Kompensation mittelst Quarzkeil bei weissem Licht unmöglich. Überraschend wirkt folgender Versuch. Über eine hellgestellte Brookittafel rosaroter Inferenzfarbe wird ein Quarzkeil derart geschoben, dass n_α des Keils mit der c-Achse des Kristalls parallel ist (Fig. 9). Die erste Dunkelstelle, die beim Einschieben des Keils im gelben Quecksilberlicht erhalten wird, entspricht dem Blau II. Wird der Kristall um 90° gedreht, sodass jetzt seine c-Achse quer steht zur Längsrichtung des Keils, so muss der Keil etwas zurück-

gezogen werden. Das dunkle Band liegt im Orange I. Für sich selber wird der Keil dunkel im Rotviolett I. — Diese Erscheinung lässt sich ohne weiteres deuten, wenn man bedenkt, dass im ersten Fall Keil und Kristall in Subtraktionsstellung sich befinden. Um den dunklen Streifen zu erhalten, muss also der Keil weiter eingeschoben werden, als wenn er für sich studiert würde. Umgekehrt handelt es sich im zweiten Fall um die Additionsstellung; es ist mithin so, als ob der Keil dicker geworden wäre; er muss also zurückgezogen werden. Der Gangunterschied Blau II — Orange I von ungefähr 250 mμ entspricht dem doppelten Gangunterschied der Brookitplatte für Quecksilber-gelb. Mit dem Berekkompensator wurde er zu 126 mμ gefunden.

Im weissen Licht ändern die diagonalen Seitenlinien beim Drehen zwischen gekreuzten Nicols fortwährend ihre Farbe und werden niemals dunkel. Fallen die Schwingungsrichtungen der Platte mit den Nicolshauptschnitten zusammen, so leuchten beide Seitenlinien grünlichgelb aus dem dunklen Untergrund hervor. Wird die Platte in irgend einem Sinne gedreht, so färben sich die beiden Linien unterschiedlich (vergl. Fig. 22, 23); die Farbtöne stehen aber in gesetzmässiger Beziehung zu einander. Um diese darzulegen, mögen die Diagonallinien mit D_1 und D_2 bezeichnet werden. Es bleibt sich gleichgültig, welche von beiden die erste Nummer bekommt. Wir drehen nun den Kristall in dem Sinne, dass seine c-Achse auf kürzestem Wege sich jener Lage im Gesichtsfeld nähert, die vorher von D_1 eingenommen war, und sich gleichzeitig von der alten Richtung D_2 entfernt. L. Weber gebrauchte hierfür den kurzen Ausdruck „gegen den seitlichen Rand hin- bezw. davon wegdrehen".

Wird dieser Vereinbarung gemäss der Kristall gedreht, so ergeben sich in den verschiedenen Stellungen für D_1 und D_2 folgende Farben.

	D_1	D_2
0°	gelblich grün	gelblich grün
7°	gelb	grün mit gelbem Stich
19°	rot	satt grün
34°	violett	grünlich blau
45°	blassviolett (Typus II) bis schmutziggrün (Typus I), je nach Deutlichkeit der etwas grünlichen Zeichnung. U. U. ziemlich identisch mit der Interferenzfarbe der Platte, sodass die Diagonallinien scheinbar verschwinden.	
56°	grünlich blau	violett
71°	satt grün	rot
83°	grün mit gelbem Stich	gelb
90°	gelblich grün	gelblich grün

Die Farben sind in den einzelnen Stellungen der Platte nicht unter allen Umständen ganz einheitlich. Die grünlich schwarze Eigenfärbung der Diagonalzeichnung, die an gewissen Stellen deutlich sichtbar wird, überlagert sich mit der Interferenzerscheinung. Auch lässt sich oft beobachten, dass beim Übergang von Gelb zu Rot die diagonalen Zeichnungen zuerst rot umsäumt sind, bevor sie in der ganzen Ausdehnung rot werden.

Diese Farbenfolge, worin der leuchtende Gegensatz von Rot und Grün besonders eindrucksvoll und schön ist, scheint im Wesentlichen für beide Typen gültig zu sein. Höchstens dass beim Typus I der Übergang von rot zu satt grün (19°—71°) die bläulichen Farbtöne weniger stark erkennen lässt. Die einzelnen Nuancen hängen wohl auch von der Helligkeit des Tageslichts ab; sie sind etwas anders bei blauem als bei wolkigem Himmel.

Typus II ist fernerhin charakterisiert durch die bereits genannte Streifung parallel den Zonen [011] (Fig. 8). Auch sie ändert beim Drehen die Farbe. In der Nullstellung (= „Auslöschungsstellung") sind die Streifen gelblich grün, genau wie die diagonalen Seitenlinien und werden dann je nach Drehsinn entsprechend der Farbe der anstossenden Diagonale leuchtend rot oder grün. Einzig in den Mittellagen der Drehung werden die Farben gleich derjenigen des Untergrundes, sodass die Zeichnung verschwindet. Wird die D_i anliegende Streifung S_i genannt, so erhält man unter gleichen Voraussetzungen wie oben:

	S_1	S_2
0°	gelblich grün	gelblich grün
7°	gelb	grün mit gelblichem Stich
19°	rot	satt grün
	gleichgefärbt wie der Untergrund	
71°	satt grün	rot
83°	grün mit gelblichem Stich	gelb
90°	gelblich grün	gelblich grün

Am auffallendsten zeigt sich der Farbenumschlag längs der Endbegrenzung. Bei symmetrischer Lage des Kristalles zu den Nicolshauptschnitten gelblich grün, wird der Rand beim Drehen auf der einen Seite leuchtend rot, auf der andern satt grün. Weiterhin hebt er sich nicht mehr deutlich ab, strahlt dann aber plötzlich wieder, allerdings mit Vertauschung der Seiten, rot und grün auf und geht schliesslich nach einer Viertelsdrehung ins anfängliche Gelblichgrün über.

Die Streifung nach den Kanten [011] wird einerseits von der perlschnurartigen Mittellinie, anderseits je von einer diagonalen

Seitenlinie begrenzt (Fig. 7, 8, 10). Unter Umständen zieht sie sich in die schwarze Zeichnung der Kristallmitte hinein, nimmt dabei aber die Richtung [010] an (Fig. 8). Die Brookittafel zerfällt so in vier Sektoren von z. T. gegensätzlichem Verhalten.

Wenngleich die Streifung nach [011] und die diagonalen Seitenlinien, von den mittleren Drehstellungen abgesehen, die gleiche Farbe zeigen, so ist doch zu betonen, dass die Diagonallinien — namentlich gegen das Kristallende zu — viel leuchtender sind als die [011]-Streifung. An Fig. 7, 10 ist dies deutlich zu sehen. An vielen Kristallen lässt sich eine Streifung parallel zum seitlichen Rand wahrnehmen. Sie zeigt ähnliches Verhalten der Interferenzerscheinung, wie es für das [011]-System beschrieben wurde. Doch ist der Farbumschlag zuweilen ganz inhomogen, indem das anfängliche Gelbgrün oben z. B. zu Rot, unten aber zu Grün wird. Auch sind diese anomalen [001]-Streifen (Fig. 4, 7, 8) nicht auf den Typus II beschränkt, sondern erscheinen ebenso schön an Platten des Typus I. Möglicherweise täuschen sie die oben erwähnte Verschiedenheit der Aufhellung vor, wenn die Kristallplatte von der Dunkelstellung aus im einen oder andern Sinne gedreht wird (S. 445).

Noch sind die Nebenlinien zu erwähnen (Fig. 7). Sie seien N_1 und N_2 geheissen, je nachdem sie auf der Seite von D_1 oder D_2 gelegen sind. Entsprechend dem Verlauf ihrer Streifung ist zu erwarten — und die Beobachtung bestätigt das vollauf! —, dass N_1 in jeder Stellung der Platte die gleiche Färbung zeigt wie D_2, also N_2 wie D_1.

Die Platten wurden auch monochromatisch untersucht und zwar unter Benutzung der Zeiss'schen Quecksilbermikroskopierlampe mit eingesetzten Monochromatfiltern A (gelb, $\lambda = 579$ und 577 mμ) und B (grün, $\lambda = 546$ mμ). Mit dem Blaufilter C ($\lambda = 435{,}8$ mμ) waren die Erscheinungen zu wenig hell und scharf, um deutlich beurteilt werden zu können. Der Grünfilter wurde zur Absorption durchgelassenen roten Lichtes mit einem Gefäss kombiniert, das Kupfervitriollösung enthielt. Fig. 10 zeigt die Erscheinungen für gelbes Licht bei gekreuzten Nicols in „Auslöschungsstellung". Die äusseren Teile des Kristalles zeigen ganz normale Dunkelheit. Die hellen Punkte etc. entsprechen Unvollkommenheiten der Kristalloberfläche, wodurch das Licht entpolarisiert wurde. Die Seitenlinien, die [011]-Streifen und Teile von Nebenlinien (links) leuchten mit gelber Farbe auf. Im grünen Licht ist die Erscheinung gleich, mit dem Unterschied allerdings, dass die Farbe weniger rein, fast etwas schmutzig erscheint. Dreht man die Platte so, wie das oben festgelegt wurde,

so hat man für Kristalle des Typus II im gelben Licht nachstehende Intensitätsfolge. Bei gewissen Stellungen ist die Zeichnung genau gleich gefärbt wie der normale Untergrund, sodass sie „verschwindet". In andern Stellungen ist sie noch „schwach erkennbar".

	D_1	D_2	S_1	S_2
0°	hell		hell	
8°	hell		hell	dunkel
24°	hell	dunkel	schwach erkennbar	
34°,2	verschwindet	dunkel	verschwindet	schw. erk.
45°	schwach erkennbar		schwach erkennbar	
55°,8	dunkel	verschwindet	schw. erk.	verschwindet
66°	dunkel	hell	schwach erkennbar	
82°	hell		dunkel	hell
90°	hell		hell	

Im grünen Licht ist diese Reihenfolge auch gültig, nur sind die Überschriften paarweise zu ändern, also D_1 mit D_2, S_1 mit S_2 zu vertauschen.

Für die Nebenlinien gilt die frühere Bemerkung. Sie verhalten sich wie die Diagonallinien der anderen Plattenhälfte. Die horizontal gestreiften Anomalien der dunklen Zeichnung in der Kristallmitte ordnen sich, wie schon einmal erkannt, der Variation von S_1 und S_2 ein.

An den Kristallen des ersten Typus sind die Erscheinungen etwas einfacher. Für gelbes Licht gilt

	0°	15°	34°,2	45°	55°,8	75°	90°
D_1	hell	hell	schwach erkennbar		dunkel	dunkel	hell
D_2	hell	dunkel	dunkel	schwach erkennbar		hell	hell

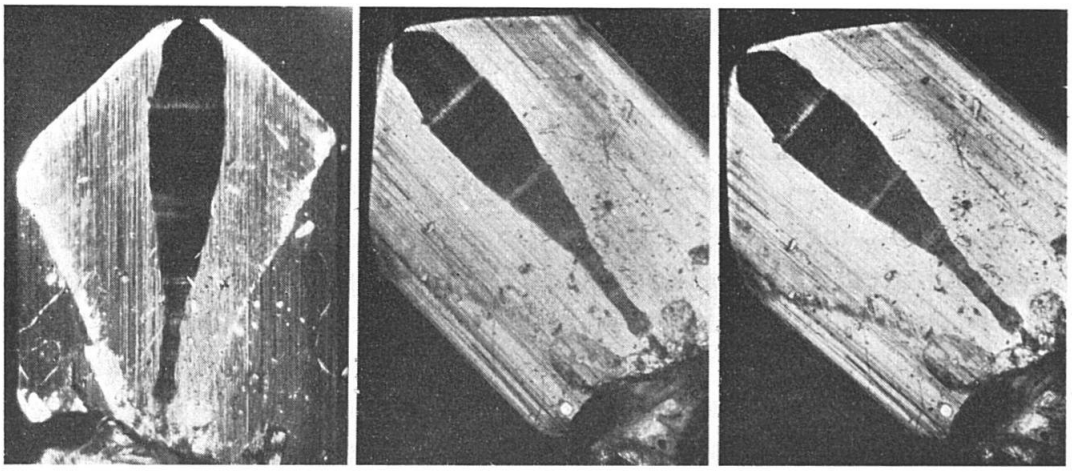

Fig. 10 Fig. 11 Fig. 12

Drehung einer Brookittafel des Typus II (Vergr. 8fach), zwischen gekreuzten Nicols, im gelben Hg-Licht. Je nach der Stellung verschwinden die Diagonallinien abwechselnd oder gleichzeitig. In Fig. 10 ist links unten eine leuchtende Nebenlinie erkennbar.

Diese Erscheinungen können an den Figuren 10—12 (Typus II) z. T. nachgeprüft werden. An ihnen wird auch ersichtlich, dass gewisse Stellen, unabhängig von der Lage, dunkel bleiben. Dass es sich dabei zufällig um Dicken handelt, die einen Gangunterschied erzeugen, der gleich ist einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge (hier eine Wellenlänge), liegt auf der Hand. Interessant sind solche Stellen bei Verwendung des grünen Lichtes. Sie leuchten in einem kräftigen Blutrot auf. Die Erklärung ist einfach. Der B-Filter lässt rotes Licht durch. Im Hg-Spektrum ist es viel weniger intensiv als das grüne Licht. Es kommt so gar nicht zur Geltung. Wenn aber das grüne Licht durch Interferenz vernichtet wird, so kann dieses Rot mit merklicher Intensität sichtbar werden. Übrigens muss die Lampe mehrere Minuten in Betrieb sein, bevor das Rot wahrnehmbar wird. Natürlich ist es ein Leichtes, Quarzkeile so zu kombinieren, dass bei gewisser Dicke das grüne und rote Licht zugleich verschwinden.

5. ERSCHEINUNGEN IM KONOSKOP

Die Beobachtungen im Orthoskop beweisen, dass den untersuchten Brookittafeln ein komplizierter Aufbau zukommt. Um Näheres über die Orientierung etc. der Bauelemente zu erfahren, wurden viele Kriställchen konoskopisch untersucht. Hier empfahl sich zum vorneherein die Beobachtung im monochromatischen Licht. Dabei leistete die Zeiss'sche Mikroskopierlampe mit den Filtern A und B ausgezeichnete Dienste.

Zunächst galt es darzutun, dass die studierten Brookite nicht nur anomales Verhalten zeigen, sondern auch ganz normale Achsenbilder ergeben. In diesem Sinne wurden an dem in Fig. 3 dargestellten Kristall sechs Aufnahmen gemacht und zwar an ein und derselben Stelle, die oben zwischen der perlschnurartigen Zeichnung (links) und der diagonalen Seitenlinie (rechts) gelegen ist. Die gewonnenen Bilder (Fig. 13/18) haben das gewohnte Aussehen der Achsenbilder in Normal- und Diagonalstellung. Im Falle der Normalstellung (Fig. 13/15) ist die c-Achse durchwegs im Sinne von oben nach unten orientiert, in den andern Fällen (Fig. 16/18) läuft sie ausnahmslos von links unten nach rechts oben. Es wird so anschaulich, dass bei Brookit die Ebene der optischen Achsen für langwelliges Licht (bis $\lambda = 555{,}5$ mμ) mit der Basis, für kürzerwelliges Licht mit dem seitlichen Pinakoid zusammenfällt. Weiter wird aus der Zahl der Kurven gleichen Gangunterschiedes ersichtlich, dass die Doppelbrechung für gelbes (Fig. 13, 16) und grünes

(Fig. 14, 17) Licht ungefähr gleich ist, für das blaue Licht (Fig. 15, 18) aber einen etwa 12mal grösseren Wert annimmt. In der Tat erhält man durch Interpolation der ARNOLD'schen Werte (1):

λ	579	546	435,8
$n_\beta - n_\alpha$	0,0012	0,0012	0,0148

Endlich zeigt der Vergleich der um 45° gedrehten Achsenbilder, dass der scheinbare Achsenwinkel 2E für gelbes und grünes Licht

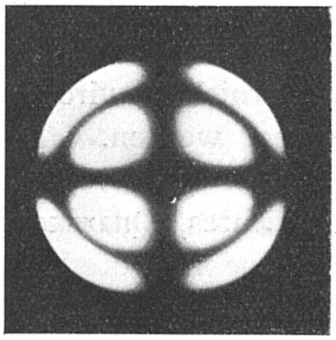

Fig. 13

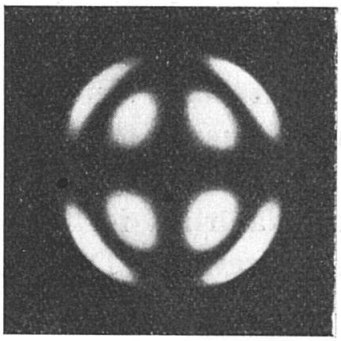

Fig. 14

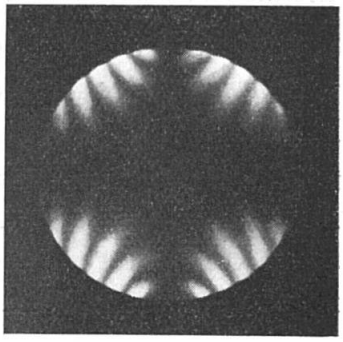

Fig. 15

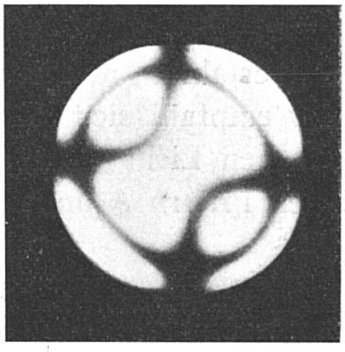

Fig. 16

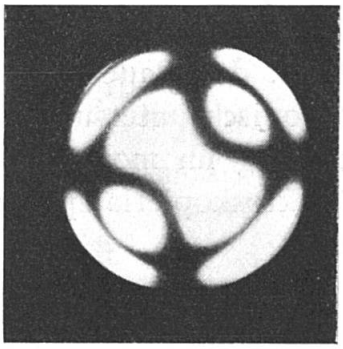

Fig. 17

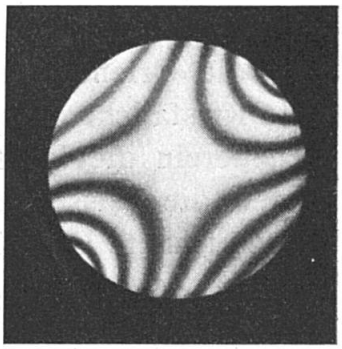

Fig. 18

Am Kristall der Fig. 3 aufgenommene normale Achsenbilder. In der obern Reihe steht die c-Achse vertikal, in der untern Bilderfolge verläuft sie von links unten nach rechts oben. Die eigenartige Dispersion der Indikatrixhauptachsen und optischen Achsen sowie die beträchtliche Doppelbrechung für blaues Licht zeigen sich sehr deutlich.

angenähert gleiche Werte hat, für blaues Licht aber wesentlich grösser wird. Er dürfte im letzten Fall nahezu 125° erreichen, im ersten und zweiten Fall dagegen nur etwa 27° bezw. 24° messen. Die Aufnahmen wurden übrigens mit einem Leitz'schen Objektiv 5 gemacht. Die Ausstichpunkte der optischen Achsen für blaues Licht fallen wegen der geringen Apertur aus dem Gesichtsfeld heraus.

Am gleichen Kristall wurde durch Parallelverschiebung der Platte, mit Hilfe eines Kreuzschlittens, ein Punkt der diagonalen

Seitenlinie eingestellt und dieser der Reihe nach im gelben, grünen und blauen Licht ebenfalls konoskopisch aufgenommen. Die Stellung des Mikroskoptisches war derart, dass Bilder der Normallage hätten entstehen sollen. Doch sind die erhaltenen Bilder (Fig. 19/21) durch eine gewisse Drehung gegenüber der Normallage charakterisiert.

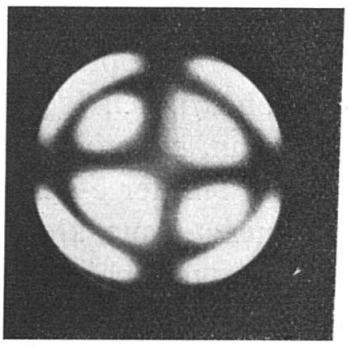

Fig. 19

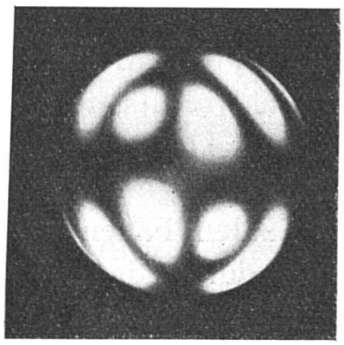

Fig. 20

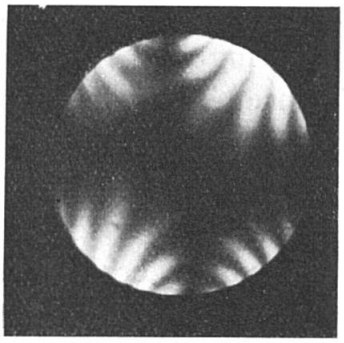

Fig. 21

Wird durch Parallelverschiebung ein Punkt der diagonalen Seitenlinie des Kristalls von Fig. 3 eingestellt, so werden statt der Fig. 13—15 die Interferenzbilder 19—21 erhalten. Sie erscheinen gegenüber der Normallage um einen gewissen Winkel gedreht.

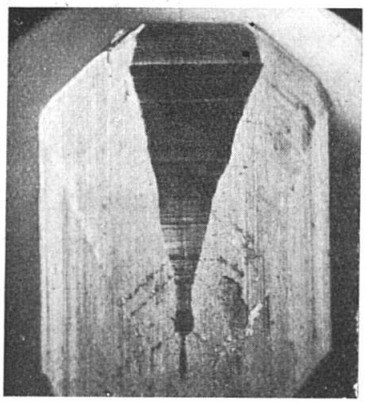

Fig. 22 (Vergr. 5 fach)

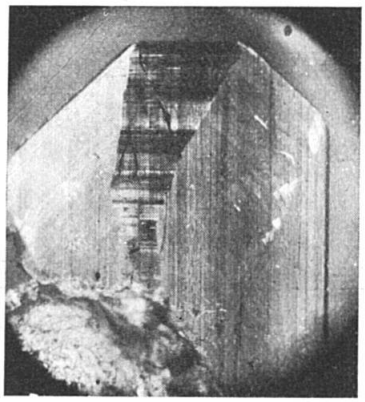

Fig. 23 (Vergr. 6,5 fach)

Brookitkristalle des Typus II, denen ebenso wie dem in Fig. 41 dargestellten Kristall (vergl. Fig. 3) eine grosse Mannigfaltigkeit der optischen Anomalien eigen ist.

Es ist, als ob die diagonalen Seitenlinien aus Kristallelementen bestehen, die um die a-Achse in einem gewissen Betrage gedreht sind. Man möchte also an Zwillingsbildung denken, wobei (0kl) Zwillingsebene wäre. Diese Deutung vereinfacht jedoch die Verhältnisse allzu sehr. Das zeigt sich schon daran, dass die zur c-Achse parallele Streifung der Brookittafeln an den Seitenlinien gar keinen Knick erfährt. Die Oberfläche ist unbedingt homogen.

Die weitere Untersuchung zeigte bald, dass die Drehung der von den Seitenlinien erzeugten Achsenbilder gar nicht konstant ist, und dass die Achsenbilder sogar recht verzerrt sein können. Zum Beleg teile ich die an drei Kristallen (Fig. 22, 23, 41) erhaltenen Messungsergebnisse mit. Die untersuchten Stellen sind in den Fig. 24/26 durch Zahlen gekennzeichnet. Die Winkel geben an, wie stark die Platte gedreht werden musste, um das Achsenbild in normale Lage zu bringen, d. h. so zu stellen, dass die Ausstichpunkte der optischen Achsen für gelbes Licht links/rechts, für grünes oben/unten lagen. Positives Vorzeichen bedeutet Drehung im Zeigersinn, negatives im Gegenzeigersinn. Als Ausgangslage ist Zusammenfallen der c-Achse (Streifung) mit dem vertikalen Faden angenommen. Ganz kleine Drehungen erklären sich dadurch, dass die Schwingungsrichtungen der Nicols zum Fadenkreuz nicht genau parallel sind. Eine gewisse Abweichung aus der strengen Normallage ist z. B. auch an der Fig. 13 zu sehen.

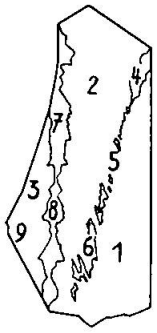

Fig. 24

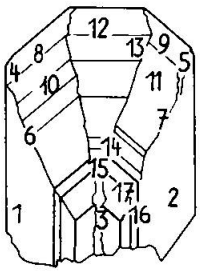

Fig. 25

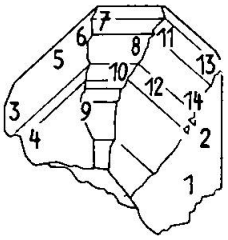

Fig. 26

Konoskopisch untersuchte Stellen von drei Brookittafeln (vergl. Fig. 41, 22 und 23).

Vollständige Beobachtungsreihen im blauen Lichte mussten unterbleiben, weil sie das Auge zu sehr ermüdet hätten.

Kristall Nr. 1 (Fig. 41, Typus I). Verteilung der konoskopisch geprüften Punkte: Fig. 24.

Punkt	gelb	grün	Beschaffenheit	Punkt	gelb	grün	Beschaffenheit
1	1,3	-1,3	normal	6	-16,5	9,5	verzerrt
2	1,6	-1,4	„	7	- 1,9	-1,2	normal
3	- 0,6	-0,5	„	8	- 0,5	0,0	normal
4	-20,1	8,7	„	9	8,0	-9,0	verzerrt
5	-15,0	6,5	„				

Kristall Nr. 39 (Fig. 22, Typus II). Verteilung der konoskopisch geprüften Punkte: Fig. 25.

Punkt	gelb	grün	Beschaffenheit
1	3,5	1,3	normal
2	6,1	1,4	normal

Punkt	gelb	grün	Beschaffenheit
3	1,0	1,2	3 Lemniskaten, fast geradlinig wie in Fig. 30
4	34,1	-17,8	Lemniskate nahezu kreisförmig
5	-30,3	21,3	normal
6	14,4	-10,6	normal
7	-26,7	17,7	Die linken dunklen Lemniskaten haben rechts als Fortsetzung helle Linien.
8	10,7	- 3,3	etwas verzerrt
9	- 3,6	5,0	
10	7,4	1,3	
11	1,3	2,3	
12	0,4	- 0,4	etwas geradlinig verzerrt
13	- 4,8	8,8	schwach verzerrt
14	- 9,3	6,4	deutlich verzerrt
15	9,4	- 3,4	schwach verzerrt
16	1,3	3,3	
17	1,2	5,2	nicht zentriert, auch etwas geradlinig verzerrt

Kristall Nr. 57 (Fig. 23, Typus II). Verteilung der konoskopisch geprüften Punkte: Fig. 26.

Punkt	gelb	grün	Beschaffenheit	Punkt	gelb	grün	Beschaffenheit
1	1,0	1,0	ganz normal	8	-22,5	15,6	norm.exzentr.
2	1,0	1,0	zieml. normal	9	16,4	-6,2	zieml. normal
3	36,2	-22,0	„	10	- 4,5	6,0	wie Kr. 39, 7
4	24,5	-14,5	„	11	- 9,0	10,7	zieml. normal
5	19,0	- 8,7	ganz normal	12	- 0,5	3,9	
6	9,9	- 4,7	ziemt. normal	13	-23,2	16,0	
7	6,4	- 1,0	„	14	-21,0	17,5	ganz normal

Aus diesen Zahlen ergeben sich folgende Regeln.

a) Die Erscheinungen links/rechts der zentralen Zeichnung sind nicht streng symmetrisch.

b) Die Drehung auf den Seitenlinien ist links gegensinnig wie rechts und um so stärker, je näher der untersuchte Punkt am Rande des Kristalles liegt.

c) Für gelbes und grünes Licht hat die Drehung im allgemeinen weder die gleiche Grösse noch den gleichen Sinn. Der Zusammenhang ist wohl sehr kompliziert. Gewöhnlich ist die Drehung für grün kleiner als für gelb. Ausnahmen sind nicht absolut überzeugend, da bei verzerrten Bildern Drehungsunterschiede von etwa 2^0 objektiv kaum zuverlässig messbar sind. Aus 24 Wertepaaren mit grösseren Abweichungen ergeben sich als Mittelwerte: gelb 16,5; grün 10,5 mit entgegengesetztem Vorzeichen. Das absolute Verhältnis ist also rund 3:2. Sicher ist, dass in den Seitenlinien und an den schlechthin anomalen Stellen die Ebenen der optischen Achsen für gelbes und grünes Licht nicht aufeinander senkrecht stehen.

Die Figuren 27/40 sollen eine Vorstellung davon vermitteln, wie stark und mannigfaltig die Anomalien in den Achsenbildern zur Geltung kommen. An gut auslöschenden Teilen des Kristalltypus I wurden die ersten 6 Aufnahmen gemacht. In Fig. 27 ist der horizontale Balken ziemlich normal, der vertikale aber in ein merkwür-

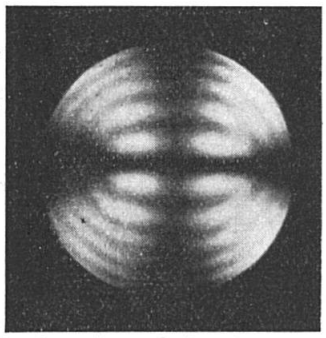

Fig. 27

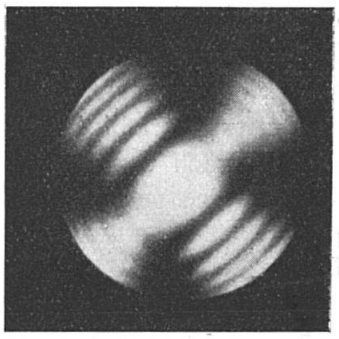

Fig. 28

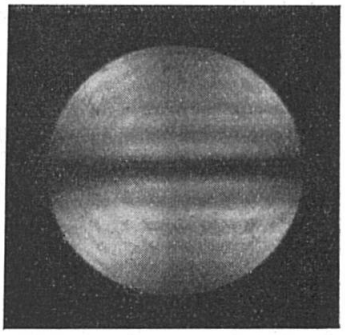

Fig. 29

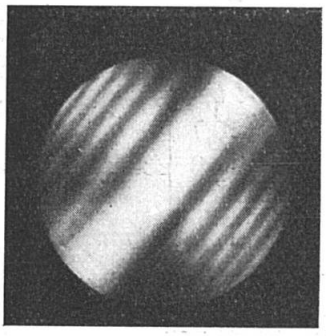

Fig. 30

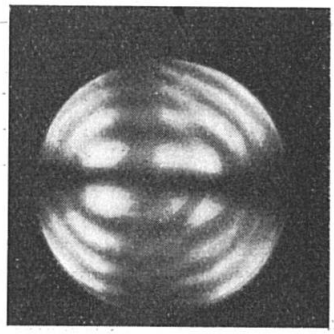

Fig. 31

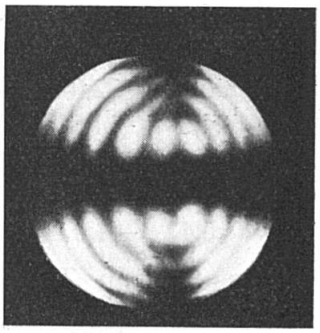

Fig. 32

Konoskopische Aufnahmen von Stellen des ersten Kristalltypus, die den „normalen" Teilen der Tafeln angehören, also nicht auf diagonalen Seitenlinien liegen. Fig. 27, 28 und Fig. 29, 30 sind einander zugeordnete Normal- und Diagonalstellungen; Fig. 31 und 32 wurden von einem bestimmten Punkt im gelben bzw. grünen Licht erhalten.

diges Streifensystem aufgelöst. Die Kurven gleichen Gangunterschiedes zeigen ihrem Verlauf entlang ganz verschiedene Intensität. Bei genauerem Zusehen ist's, wie wenn einige normale Achsenbilder längs der horizontalen Hauptisogyre etwas verschoben wären. Am gedrehten Achsenbild (Fig. 28) fällt die geringe Intensität jener Lemniskatenteile auf, die durch das Aussenfeld der Isogyren verlaufen. In den Ausstichpunkten der optischen Achsen sind auch die Hyperbeln hell geworden. Fig. 29 macht noch stärker den Eindruck, als handle es sich um eine Übereinanderlagerung zahlreicher horizontal verschobener Achsenbilder. Die Lemniskaten entarten zu Systemen

paralleler Geraden, vor allem in der Diagonalstellung (Fig. 30). Die Hyperbeln sind nur mehr an der grösseren Intensität der Gera-

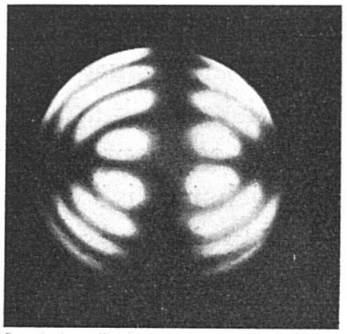

Fig. 33

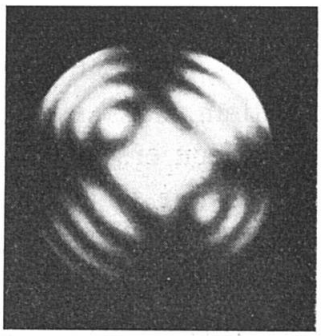

Fig. 34

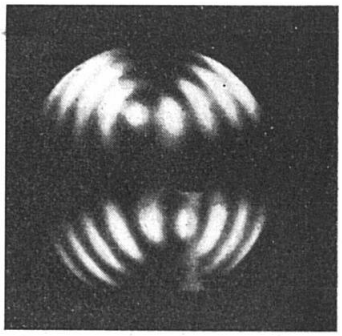

Fig. 35

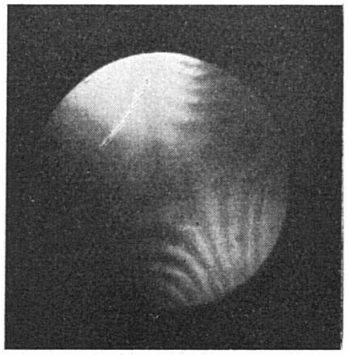

Fig. 36

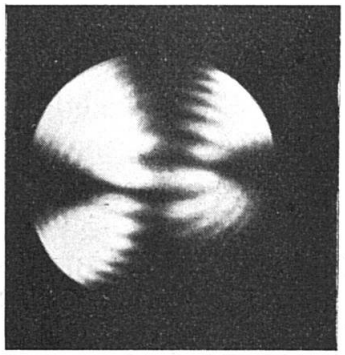

Fig. 37

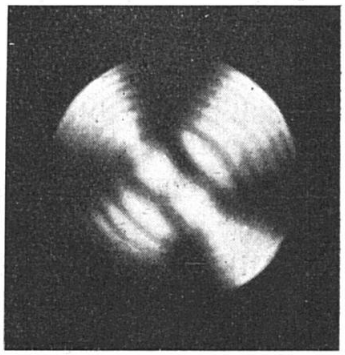

Fig. 38

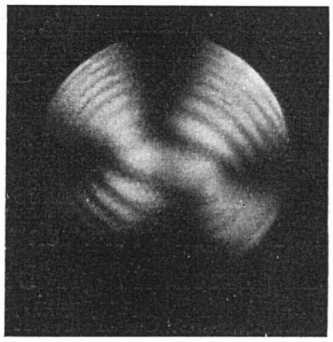

Fig. 39

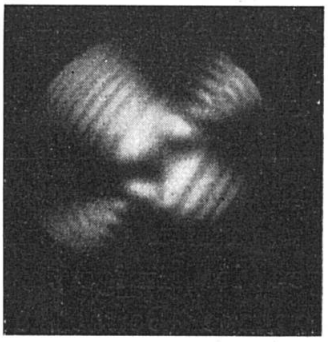

Fig. 40

Konoskopische Anomalien des zweiten Brookittypus. Die vier ersten Bilder rühren vom gleichen Punkte her und wurden im gelben (2 Stellungen), grünen und blauen Licht aufgenommen. Die vier weiteren Figuren entsprechen der konoskopischen Prüfung eines Punktes aus dem zu [011] parallelen Streifensystem bei verschiedener Drehung der Platte. Fig. 39 und 40 unterscheiden sich einzig durch die Wellenlänge des Lichtes (gelb bzw. grün).

den erkennbar. Ganz extrem kommt die horizontale „Scheinverschiebung“ an Fig. 31 zur Geltung. Die Disymmetrie geht gänz-

lich verloren. Im grünen Licht liefert die gleiche Stelle des Kristalls ein Interferenzbild, das merkwürdig dezentriert ist (Fig. 32).

Von einer anomalen Stelle des zweiten Kristalltypus rühren die in Fig. 33/36 dargestellten Interferenzerscheinungen her. Sie wurden in gelbem (2 Stellungen), grünem und blauem Licht aufgenommen. Auffallend ist vor allem, dass einige Lemniskaten längs der Hauptisogyren etwas verschoben erscheinen, so dass schwarze Linien mehrfach durch helle fortgesetzt sind. Am deutlichsten ist das in Fig. 34 (45° Stellung von Fig. 33), wo die Halbkreise ausserhalb der optischen Achsen zu den eine Lemniskate ersetzenden innersten parallelen Geraden gehören. Dass das optische Zentrum der Figur etwas nach rechts oben verschoben ist, ergibt sich aus der verschiedenen Zahl von Kurven links bezw. rechts unten und oben.

Auch das zu [011] parallele Streifensystem des Typus II wurde konoskopisch geprüft. Vier von ein und demselben Punkt gewonnene Aufnahmen sind in Fig. 37/40 dargestellt. Es handelt sich um interferenzbilder im gelben bezw. grünen Licht, die verschiedenen Drehungen entsprechen. Eine nähere Beschreibung erübrigt sich.

6. MIKROSKOPISCHER FEINBAU DER BROOKITTAFELN ALS GRUND DER OPTISCHEN ANOMALIEN

Schon L. Weber kam in seinem mehrfach angeführten Referat zum Schluss: „Der ganze Sachverhalt liegt so, wie wenn der Kristall parallel (100) schichtig gebaut wäre, wobei aber die Schichten mit ihren Schwingungsrichtungen nicht zusammenfallen". Am reichen Material, das für die vorliegenden Untersuchungen zur Verfügung stand, konnten bedeutungsvolle Feststellungen gemacht werden, über die hier in Kürze berichtet werden soll.

Jeder Kenner des Schweizer Brookits weiss, dass die Kristalle nicht selten subparallel verwachsen sind. In Wirklichkeit sind diese Verwachsungen viel häufiger, als man gemeinhin glaubt. Oft werden sie erst bei genauer Betrachtung mit Lupe oder Mikroskop (etwa 30fache Vergrösserung) sichtbar. Neun Kristalle wurden eingehend durchgemustert.

Kristall 27 mit 5 aufgewachsenen Kriställchen, davon
- 1 parallel dem Hauptkristall (I)
- 1 um die gemeinsame b-Achse etwas gedreht (II)
- 2 um die gemeinsame c-Achse schwach gedreht (III)
- 1 in allgemeiner Lage (IV), wenngleich die Abweichung von (100) des Hauptkristalls nicht allzu beträchtlich ist. Es kommen auch Verwachsungen vor, wo die bei-

den Kristalle unter einem Winkel von 40° und mehr zu einander geneigt sind.

Kristall 31 mit 2 aufgewachsenen Individuen in Stellung II (gross) bezw. III

Kristall 32: 4 aufgewachsene Kriställchen, wovon
1 in Stellung II
2 in Stellung III
1 einer Zone [u0w] zugehörig und so orientiert, dass die Streifung des grossen und kleinen Kristalls beim Blick durch das Mikroskop gleiche Richtung hat (V).

Kristall 33: 4 aufgewachsene Täfelchen in den Stellungen I, III (2) und V.

Kristall 35. Die beiden aufgewachsenen Brookite haben die Stellung V.

Kristall 36. Drei Kriställchen haben die Stellungen II, III, V. Das vierte Kriställchen hat scheinbar allgemeine Lage, doch läuft die Streifung parallel zur Geraden, in der es die Grundplatte schneidet (VI).

Kristall 37 trägt zahlreiche Kriställchen der allgemeinen Lage IV.

Kristall 38. Drei aufgewachsene Täfelchen der Stellungen I, III und IV.

Kristall 39 mit zwei Individuen der Stellungen III und V.

Diese Aufzählung könnte weiter geführt werden. Die wenigen Beispiele zeigen aber zur Genüge, dass der Brookit die in der Lösung herbeigebrachte Substanz nicht sehr vollkommen einzubauen vermag, sondern oft bloss in subparalleler Lage angliedert. Typisch für diese Deutung ist Fig. 42. Sie gibt ein winziges Kriställchen wieder, das mit einer grösseren Tafel verwachsen war. Überraschend schön zeigt sich die Aufspaltung in zahlreiche Blättchen nicht genau paralleler Lage. Nicht weniger beachtenswert ist Fig. 44. Sie stellt den linken obern Rand des in Fig. 6/8 vorgeführten Kristalls dar. Den Hauptteil des Bildes nimmt die von links unten nach rechts oben verlaufende [001]-Streifung der (100)-Fläche ein. Am Kristallrand, der schwach nach rechts unten gedreht ist, sieht man Dutzende kleinster Individuen, die, unter sich anscheinend parallel, offenbar um ein Weniges aus der Normallage herausgedreht sind. Hinter und über diesen Kriställchen ragen kulissenartig dünne Kristallmassen heraus, die nicht alle zugleich mit dem Rand scharf eingestellt werden konnten. Sie beweisen aber unwiderleglich den überaus komplizierten Aufbau des Brookits.

Fig. 42, 44, die im reflektierten Licht aufgenommen sind, erklären vollständig die merkwürdige Anomalie des zweiten Brookittypus mit dem zierlichen Streifensystem parallel [011], zumal wenn noch folgende Beobachtung herangezogen wird. Eine Brookittafel

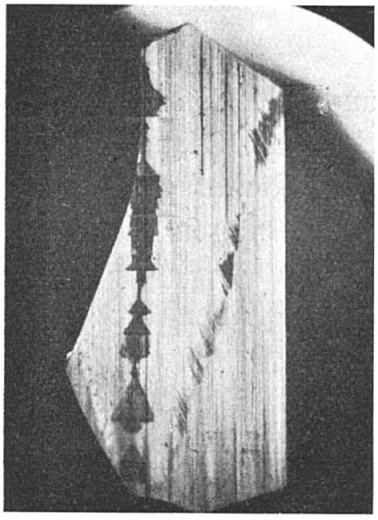

Fig. 41
(Vergr. 5 fach)

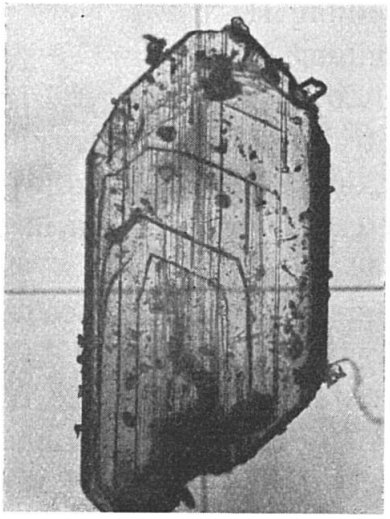

Fig. 42
(Vergr. 92 fach)

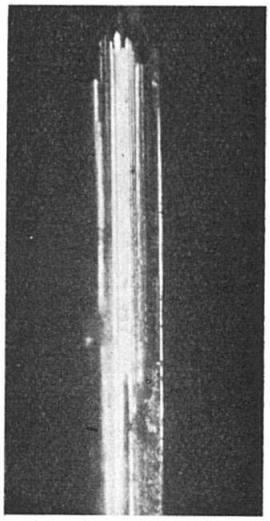

Fig. 43
(Vergr. 54 fach)

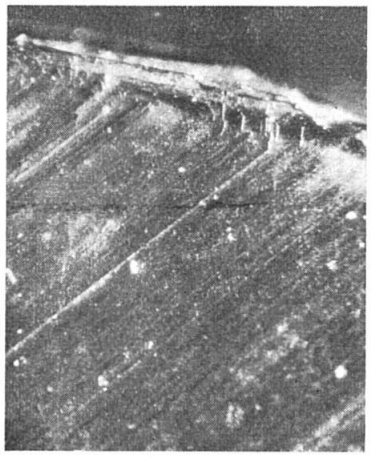

Fig. 44 (Vergr. 50 fach)

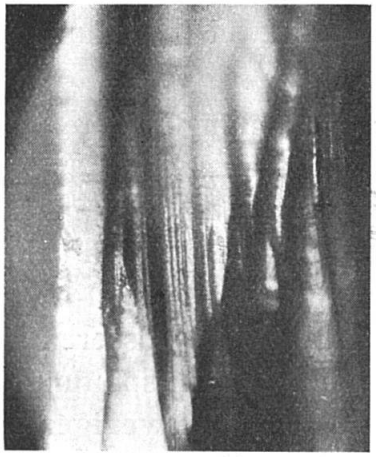

Fig. 45 (Vergr. 53 fach)

Zu Fig. 41 vergl. Fig. 22, 23 und Fig. 24—26. Die vier andern Figuren belegen den schichtigen Aufbau des Brookits.

werde irgendwie schief zur Ebene des Mikroskoptisches gestellt. Wird der Tisch gedreht, so nimmt man den Farbenwechsel von grün zu rot wahr, wie er oben beschrieben wurde. Den buntern Farbenwechsel der diagonalen Seitenlinien erhält man jedoch erst dann, wenn die Platte dem Mikroskoptisch gegenüber um mindestens 30° schief gestellt ist.

Zur weiteren Ergründung des „schichtigen Baues" der Brookittafeln dienen die Fig. 43, 45. Mit Hilfe des bereits früher erwähnten Drehapparates wurden die dünnen Randpartien zahlreicher Brookite horizontal gestellt und mikroskopisch genau untersucht. Fig. 45 gibt ein Stück der Basis jenes Kristalles wieder, von dem in Fig. 44 der [011]-Rand dargestellt wurde. Grell beleuchtet ist die zerstückelte (001)-Fläche. Dazwischen liegen die links und rechts abfallenden Ebenen eines Prismas zweiter Stellung, wahrscheinlich {104}. Im dunklen Schatten liegen einige Partien, die im Wachstum zurückgeblieben sind. Der kulissenartige Bau, wie er an Fig. 44 festgestellt werden konnte, zeigt sich also auch hier. Der schwarze Streifen unten in der Mitte der Figur entspricht dem perlschnurartigen Pigmentband der Kristallmitte.

An dieser Figur lässt sich natürlich nicht erkennen, ob und inwieweit die einzelnen Schichten etwas gegeneinander verdreht sind. Messungen liessen sich nicht durchführen. Sicher steht aber das eine, dass es sich nicht bloss um ein Alternieren mehrerer Flächen handelt, sondern dass der ganze Kristall in zahlreiche Subindividuen aufgelöst ist. An der Ecke, die oben am Bild noch gerade sichtbar wird, lässt sich das am Kristall durch Ändern der Stellung und Beleuchtung sehr bestimmt erkennen.

Noch mannigfaltiger ist der in Fig. 43 dargestellte Rand eines Kristalls vom Typus I. Die scharfen Linien sind Flächen der Form {122}. Oben und unten ist die Aufnahme unscharf, weil die anstossenden Flächen geneigt sind. Da und dort wird aber das Ineinandergreifen verschiedener Subindividuen gut sichtbar.

Das komplizierte Wachstum des Brookits macht es verständlich, dass sich unter Umständen auch Hohlräume vorfinden können. Solche wurden denn auch mehrmals festgestellt. Es scheint sogar, dass die zentrale Perlschnur mit solchen Hohlräumen in Beziehung stehe; an einem abgebrochenen Stück konnte ich völlig hindurchsehen. Auch an der Stelle, wo die Seitenlinie den Rand trifft, konnte ich einen Schlitz wahrnehmen; er schien mir von einer gelblichen Masse erfüllt zu sein. An einem Kriställchen, das bei der Untersuchung zerbrach, perlte zu meiner Überraschung ein Flüssigkeitströpfchen heraus.

Noch ein Wort zum Bau der Seitenlinien. Die Streifung nach [012] steht fest; schon WEBER erwähnte sie in seinem Referat. Wie aber diese schwarz-grünlichen Linien am Ende auslaufen oder begrenzt sind, lässt sich nicht mit voller Sicherheit erkennen. Es zeigen sich bei der mikroskopischen Messung die gleichen Schwierigkeiten, denen E. BUGMANN (3) bei der kristallonomischen Erklärung der perl-

schnurartigen Zeichnung begegnete. An ausgesuchten Stellen zahlreicher Kristalle habe ich indessen eine Reihe sorgfältiger Messungen gemacht. Darnach ist es nicht ausgeschlossen, dass die Diagonal- und Nebenlinien aus kleinsten Brookittäfelchen bestehen, die ihre a- und c-Achse der a-Achse bezw. [012]-Richtung des Hauptkristalles parallel stellen. Diese Vermutung gründet sich auf die

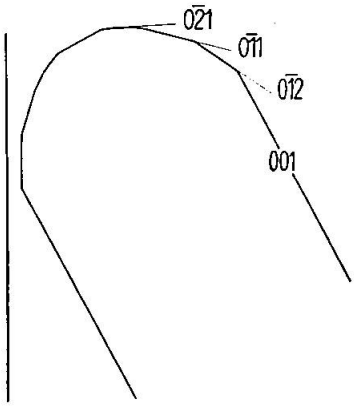

Fig. 46. Es ist möglich, dass die Diagonal- und Seitenlinien aus kleinsten Brookittäfelchen bestehen, die ihre a- und c-Achse der a-Achse bzw. [012]-Richtung des Hauptkristalls parallel stellen.

nachstehend aufgeführten Winkelwerte. Gestützt auf das Achsenverhältnis b : c = 1 : 0,9406 ist berechnet, welche Winkel die verschiedenen Kanten des gedrehten Kriställchens (Fig. 46) mit der nach unten gerichteten c-Achse des Hauptkristalls einschliessen. Um diese Soll-Werte sind die beobachteten Richtungen der oben erwähnten kurzen Endkanten der zu [012] parallelen Streifen gruppiert und so oft erwähnt, als sie gemessen wurden.

0 0 0 0
[012] = 0°
2 2 3 4
16,9
27 27,5 27,6 27,7 27,8 28 28
[001] = 28°
30,1
43,5
[0$\bar{2}$7] = 44°54′
46,8 48
52,2 53,5 53,8
[0$\bar{1}$2] = 56°
59,2 61 64
70 71 71,6 72,2
[0$\bar{1}$1] = 74°45′
[0$\bar{4}$3] = 82°55′

87 90 90,8 92
[0$\bar{2}$1] = 92°49′
106,2
[0$\bar{4}$1] = 106°46′
107,5
114,4 115 117
[010] = 118°
127,5 128 128,5
[041] = 131°14′
134
[052] = 138°38′
[021] = 143°11′
147,2 149,3 151,3 151,6 152 152,5
[043] = 153°5′
178 178
[012] = 180°

Wie ersichtlich, lassen sich die beobachteten Winkel — es wurden fast nur die S. 438 erwähnten Hauptzonen berücksichtigt — zwanglos deuten. Die Streuungen sind aber recht gross, sodass ein überzeugender Beweis nicht vorliegt. Ja, die gemessenen Winkelwerte passen auch auf andere Orientierungen eingelagerter Brookittäfelchen. Selbst mit Rutil können sie in Übereinstimmung gebracht werden; die Nadeln würden dann ihre c-Achse parallel zu [012] orientieren. Aber gerade diese Vieldeutigkeit ist ein sprechender Beweis für die Unzulänglichkeit der Methode. Nicht mangelhafte Winkelanalogien, sondern zuverlässige Strukturuntersuchungen geben den Ausschlag.

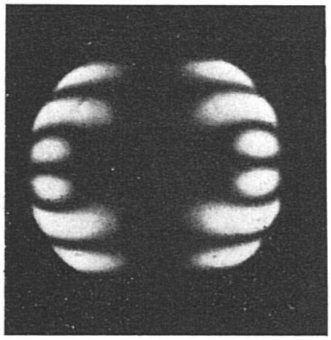

Fig. 47

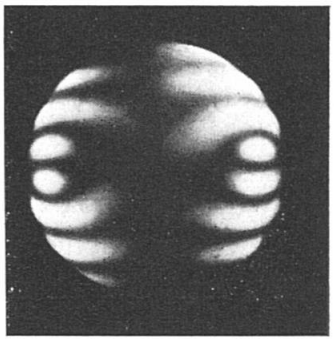

Fig. 48

Wird in ein Glimmerblättchen mit dem links dargestellten Achsenbild ein 6 mal dünneres Blättchen derart eingeschoben, dass die Ebenen der optischen Achsen 22° miteinander einschliessen, so liefert die Kreuzungsstelle ein gutes Achsenbild, das um 6° aus der Normallage herausgedreht ist.

Es ist altbekannte Tatsache, dass übereinandergelegte Platten verschiedener Orientierung im Orthoskop, zwischen gekreuzten Nicols, Anlass geben zu den mannigfaltigsten Interferenzerscheinungen. Hierauf näher einzugehen ist zwecklos; derartige Erscheinungen wurden zu oft beschrieben. Es sei nur erwähnt, dass ein Spaltblättchen von Gips, in das ein anders orientiertes Gipskriställchen eingewachsen war, beim Drehen zwischen gekreuzten Nicols einen prachtvollen Farbenwechsel von Gelb und Grün zeigte. Sogar das Verhalten der diagonalen Seitenlinien liess sich irgendwie nachahmen. In ein Glimmerblättchen von 0,1 mm Dicke, das im zentralen Teil etwas aufgespalten war, schob ich von links und rechts zwei weitere Blättchen gleicher Dicke ein, und zwar derart orientiert, dass ihre Ebenen der optischen Achsen gegenüber der Achsenebene des Hauptblättchens um 30° nach links bezw. rechts verdreht

erschienen. Wurde dieses Präparat im weissen Licht zwischen gekreuzten Nicols orthoskopisch studiert, so zeigten die linke und rechte Kombination beim Drehen einen gegenseitigen Farbenwechsel, der dem der diagonalen Seitenlinie des Brookits weitgehend ähnelte.

Interessanter ist die konoskopische Untersuchung solcher Systeme. In ein Glimmerblättchen von 257 mμ Gangunterschied (I) schob ich, drehbar, ein Blättchen von 41,2 mμ ein (II). Wo sich die beiden Blättchen überlagern (III) — der Gangunterschied ist natürlich von der gegenseitigen Drehung abhängig — entsteht ein schönes Achsenbild. Die Ebene der optischen Achsen ist jedoch anders orientiert als in I und II. Schliessen die Ebenen der optischen Achsen von I und II der Reihe nach Winkel von 54^0, 34^0 und 22^0 miteinander ein, so ist die Achsenebene von III gegenüber der von I um 12^0, 8^0 und 6^0 gedreht. Die Erscheinung ist also in mancher Hinsicht gleich wie beim Brookit, nur mit dem Unterschied, dass die Drehung beim Glimmersystem von der Wellenlänge praktisch unabhängig ist, wogegen sie beim Brookit wegen seiner bekannten Lageverschiedenheit der Ebene der optischen Achsen für gelb und grün völlig anders ist. Die Drehung selber ist von der Dicke der eingelagerten Platte abhängig. Überzeugend wirkt der Vergleich vorstehender Zahlen mit den Ergebnissen einer Plattenkombination, wo $\Gamma_I = 275$ mμ und $\Gamma_{II} = 16{,}1$ mμ ist. Den Winkeln von -54^0 bezw. $+60^0$ zwischen I und II entspricht eine Drehung I:III von nur -3^0 bezw. $+3^0$, also viel weniger als beim ersterwähnten Versuch. Das Aussehen solcher Achsenbilder zeigt Fig. 48. Fig. 47 ist das normale Achsenbild (Objektiv 5) des weiter oben genannten Glimmerblättchens I mit dem Gangunterschied 257 mμ. Durch Parallelverschiebung mittelst Kreuzschlitten wurde das Präparat an die Schnittstelle III der um 22^0 verdrehten Individuen I und II gebracht. Fig. 48 ist eine Widergabe des entstehenden Interferenzbildes. Dass es nicht mehr genau in der Normalstellung ist, wird auf den ersten Blick ersichtlich. Eine Drehung von 6^0 (wie obstehend angegeben) führt diese aber herbei. Geringe Anomalien, die bei genauem Zusehen vielleicht erkannt werden können, verschwinden in der 45^0-Stellung gänzlich.

Zwei nicht i n einander geschobene, sondern ü b e r einander gelegte Blättchen (I oben, II unten) mit verschiedenem Gangunterschied geben an der Kreuzungsstelle III abermals ein auffallend normales Achsenbild, jedoch wieder mit gedrehter Ebene der optischen Achsen. Folgende Zahlen mögen das beweisen.

Gangunterschied		Orientierung der Achsenebene		
I	II	I	II	III
172	178	0°	18,9°	10,7°
224	41	0°	9,1°	2,1°
178	23	0°	47,2°	1,5°

Selbst ein System mit drei Blättchen (I oben, III unten, IV Kreuzungsstelle) führte zum gleichen Ergebnis.

I	II	III	I	II	III	IV
41	38	350	0	−49,4	11,5	8,5

7. ERGEBNISSE

Zusammenfassend sollen folgende Punkte herausgestellt werden.

a) Bei der mikroskopischen Durchmusterung von 55 Brookitkristallen aus dem Maderanertal zeigten sich hinsichtlich Wichtigkeit und Häufigkeit der Formen auffallende Unterschiede gegenüber der von ARNOLD (1) aufgestellten Reihenfolge. Für zwei neue Formen konnten auf Grund von mehr oder weniger sichern Messungen die Symbole {4.10.3} und {9.10.2} berechnet werden.

b) Den durchsichtigen Schweizer Brookiten, die zur Untersuchung vorlagen, sind schräg zur Mittellinie verlaufende feine Zeichnungen eigentümlich, diagonale Seitenlinien geheissen, die von einem mittleren Punkt der schwarzen Schnur gegen die linke und rechte obere Ecke des Kristalls in verschiedener (angenähert kristallonomischer) Richtung verlaufen. In gewissen Fällen sind sie von blossem Auge nicht erkennbar; sie treten aber bei der Untersuchung im Orthoskop zwischen gekreuzten Nicols sofort hervor und leuchten, ebenso wie die Nebenlinien in der Mitte des seitlichen Randes, mit anomalen Interferenzfarben auf.

c) Ähnliche Anomalien zeigt auch das zu [011] parallele Geradensystem, das den Typus II charakterisiert.

d) Zur Erklärung der Anomalien, die orthoskopisch und konoskopisch sowie hinsichtlich ihrer Beziehungen zum normalen Verhalten des Brookits untersucht wurden, scheint eine doppelte Möglichkeit nahe zu liegen. Einerseits können sie die Folge sein eines komplizierten Aufbaues der Brookittafeln aus zahlreichen, nicht parallel gestellten Subindividuen; anderseits werden sie vielleicht bedingt durch eine zwillingsartige Verwachsung des Hauptkristalls mit bandartig aneinander gereihten Brookitblättchen, die nicht notwendiger Weise als individuelle Einlagerungen, sondern wohl eher als Umlagerungen im Gitterbau zu deuten sind.

LITERATURVERZEICHNIS

1. ARNOLD, W., Beiträge zur Kenntnis des Brookit in morphologischer und optischer Hinsicht. Zeitschr. f. Krist. 1929, 71, 344.
2. BRUGNATELLI, L., Über Anatas und Brookit von der Piattagrande bei Sondalo im Veltlin. Zeitschr. f. Krist. 1900, 32, 356.
3. BUGMANN, E., Die Mineraliensammlung des Institutes Theresianum in Ingenbohl. Berichte der Schwyz. Naturf. Gesellsch., III, 1938 40.
4. BUSZ, K., Mitteilungen über Manganosphärit, Schwefel, Brookit, Augit und Pyrit. N. Jahrb. f. Min. 1901, 2, 138.
5. DANA, E., The System of Mineralogy 1894, 342.
6. HUSSAK, E., Über eine merkwürdige Umwandlung und sekundäre Zwillingsbildung des Brookit vom Rio Cipó, Minas Geraes, Brasilien. N. Jahrb. f. Min. 1898, 2, 99.
7. MALLARD, E., Explication des phénomènes optiques anomaux. Ann. des mines X, 1876. Vergl. Zeitschr. f. Krist. 1877, 1, 309.
8. RATH, G. VOM, Geognostisch-mineralogische Beobachtungen im Quellgebiete des Rheins. Zeitschr. d. deut. geol. Gesellschaft. 1862, 416.
9. WEBER, L., Optische Beobachtungen an Schweizer Brookiten. Verhand. d. Schw. Nat. Ges. 1937, 138.
10. WISER, D. F., Bericht über Mineralien aus der Schweiz. N. Jahrb. f. Min. 1856, 15.
11. — Mitteilungen über Brookit. N. Jahrb. f. Min. 1867, 831.

Eingegangen: 1. Oktober 1943.