

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik

Band 1

Sammlung aktueller Beiträge aus der
physikdidaktischen Forschung

ISBN 3 - 7896 - 0090 - 3

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1989

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Gerd Koppelman

Lichtoptische v. Laue - Interferenzen Modellversuche zur Kristallgitterbeugung mit sichtbarem Licht an Raumgittern aus übermolekularen Kugeln¹

I. Opale als optische Kristalle

Edel-Opale sind vor allem als Schmuck-Edelsteine bekannt. In weißem Licht reflektieren sie in bestimmten Richtungen schillernd intensiv in fast reinen Spektralfarben. Der Farbreflex ist nur in kleinen Bereichen (einige mm) einheitlich und ändert sich von Ort zu Ort sowie mit der Beleuchtung. Bei den funkelnden Farben handelt es sich offensichtlich nicht um Absorptionsfarben (wie beim Rubin oder Smaragd) und auch nicht um Farbspektren, wie sie durch Lichtbrechung an den Facetten eines geschliffenen Diamanten durch Dispersion entstehen. Schon früher vermutete man als Ursache der Farberscheinungen der Opale irgendwelche Licht-Interferenzen /1/. Wie jedoch erst neuere, eingehende Untersuchungen gezeigt haben /2-4/, können die Effekte als lichtoptische v.Laue-Interferenzen an makroskopischen Raumgitterstrukturen aus übermolekularen Bausteinen (Kugeln) quantitativ gedeutet werden.

Vor allem elektronenmikroskopische Untersuchungen zeigten, daß Edelopale einen regelmäßigen Aufbau aus kleinen, amorphen SiO_2 -Kugeln gleichen Durchmessers besitzen (Abb.1a,b). Bei der Entstehung der Edelopale ordneten sich offensichtlich die SiO_2 -Kugeln regelmäßig in dichtester Packung, ähnlich wie in einen Kasten geschüttete Kugellagerkugeln gleichen Durchmessers. Auf die unterste Schicht quadratisch oder hexagonal angeordneter Kugeln A liegt eine zweite Schicht von

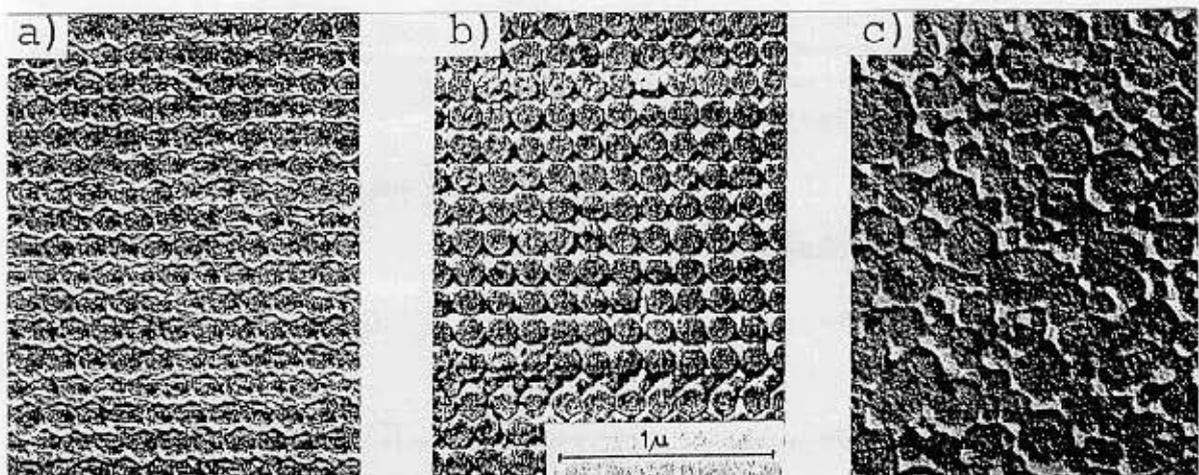


Abb.1 Elektronen-mikroskopische Aufnahmen (im Abdruck-Verfahren):
a,b) Bruchflächen von Edel-Opalen mit hexagonal und
kubisch dichtester Kugelpackung /3/; c) Bruchfläche eines
gewöhnlichen Opals /4/.

¹ Vorgestellt als Poster mit Experimenten auf der TMP-Conference, München 1988

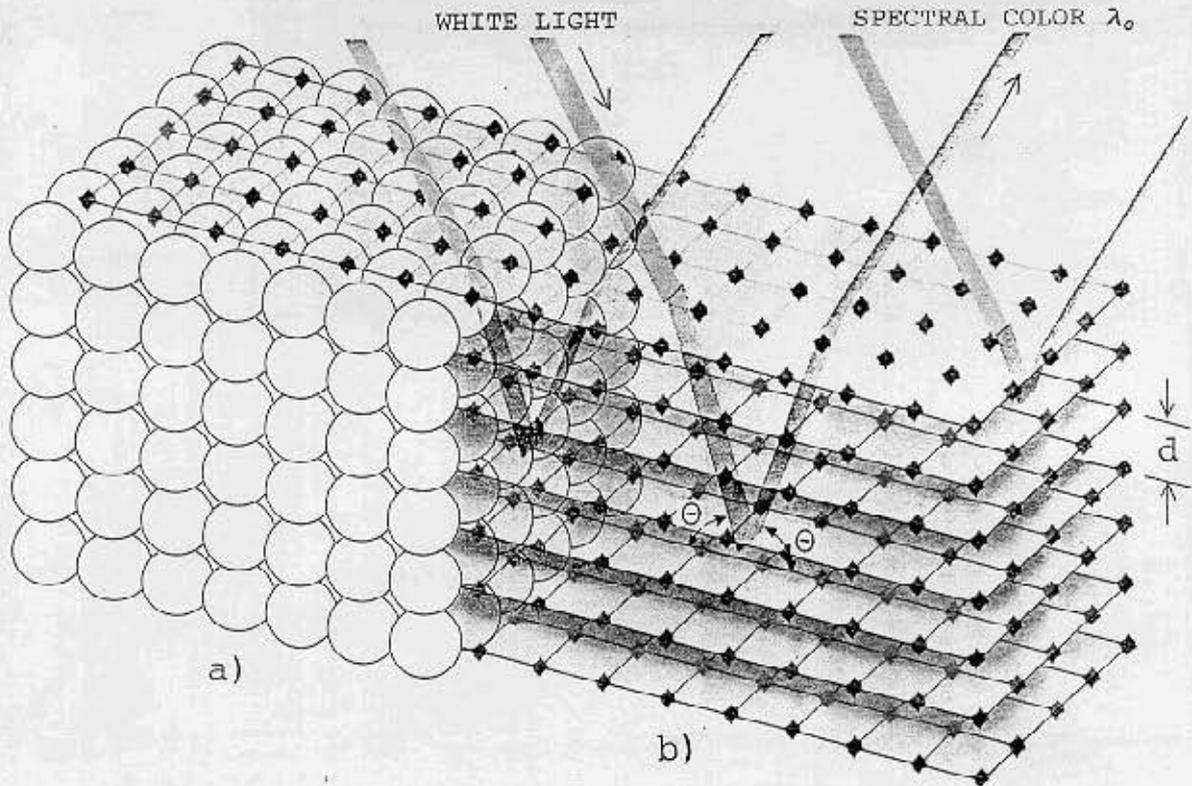


Abb.2 a) Raumgitter in kubisch dichtester Kugelpackung;
 b) Netzebenen der Hohlräume zwischen den Kugeln (Streuzentren);
 Entstehung einfarbiger v.Laue-Reflexe nach /4/.

Kugeln B, die jeweils in den Vertiefungen zwischen drei Kugeln A ruhen. Darauf folgen weitere regelmäßig angeordnete Schichten von Kugeln, so daß sich eine Raumgitter-Anordnung ergibt (Abb.2a). Die wichtigste Voraussetzung, daß nämlich alle Kugeln fast genau gleiche Durchmesser besitzen, ist offenbar im Edleopal gut erfüllt. Gewöhnliche Opale (Abb.1c) zeigen dagegen einen ungeordneten Aufbau aus etwa kugelförmigen Teilchen mit sehr unerschiedlichen Durchmessern; entsprechend ergibt sich eine diffuse weiße Lichtstreuung mit nur schwachen Farbeffekten (Opalstreuung, Abschn.6).

Zwischen den benachbarten und sich berührenden gleich großen Kugeln eines dicht gepackten Kugel-Raumgitters (Abb.2a) verbleiben entsprechende Zwischenräume (Abb.2b). An diesen raumgitterartig angeordneten kleinen Bereichen anderer Brechzahl wird das einfallende Licht ebenfalls gestreut. Die entstehenden Huygensschen Elementarwellen interferieren dann aber bekanntlich so, daß in den meisten Richtungen Auslöschung und nur in bestimmten Richtungen Verstärkung auftritt, nämlich wenn die Braggsche Interferenzbedingung erfüllt ist

$$h \cdot \lambda_0 = 2 n d \cdot \sin \Theta \quad (1)$$

Hierbei ist d der Netzebenen-Abstand, $h = 1,2,3,\dots$ die Ordnungszahl der Interferenz, Θ der Glanzwinkel und n die mittlere Brechzahl. - Für parallel einfallendes weißes Licht kann die Gl. (1) nur für bestimmte Wellenlängen λ_0 erfüllt sein, d.h. es erscheinen in ganz bestimmten Richtungen Θ einfarbige Reflexe; λ_0 hängt außer vom Glanzwinkel im wesentlichen vom Gitterabstand d , d.h. von der Kugelgröße ab. Diese ist in verschiedenen Opalen, aber oft auch in ver-

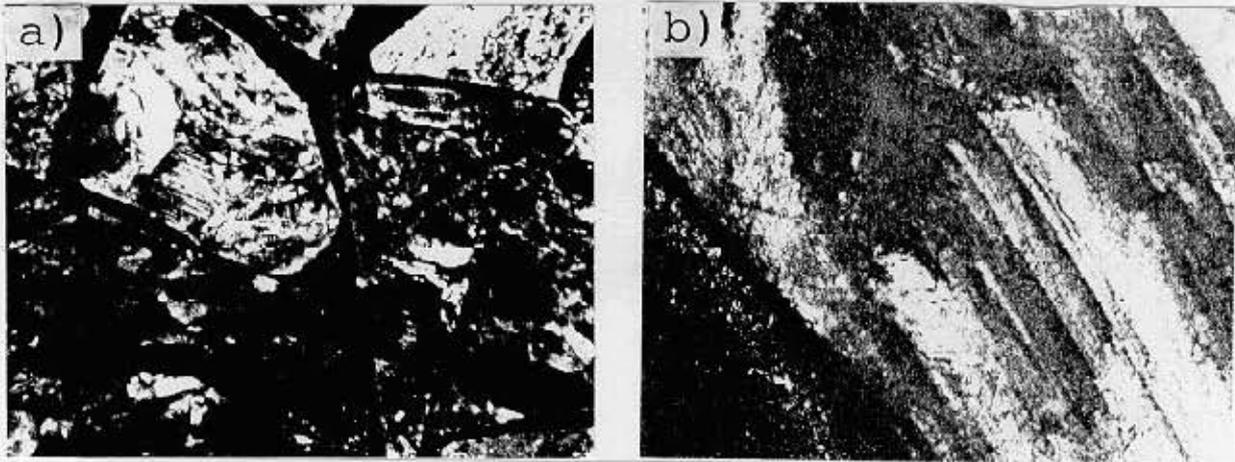


Abb.3 Opal-Oberflächen mit einfarbigen Reflexen, a) Makrophoto (ca.10 x);
b) Feinstrukturen (im Reflexions-Mikroskop, ca.40 x).

schiedenen Bereichen des gleichen Opals unterschiedlich. Die einige mm großen "Einkristall-Bereiche" erscheinen dem Betrachter nur unter geeigneten Beleuchtungs- und Beobachtungswinkeln (wie metallisch reflektierend) in einheitlicher Spektralfarbe leuchtend, während andere (größere) Bereiche dunkel sind (Abb.3a). In diesen leuchten dann anders orientierte "Einkristalle" unter anderen Beleuchtungswinkeln und unter anderen Farben auf. Beim Auftreten der Farbreflexe ist meistens Einfallswinkel nicht gleich Ausfallswinkel, denn die Netzebenen, die die Bragg-Reflexe liefern, liegen oft nicht parrallel zur Opal-Oberfläche. - Werden Beleuchtungswinkel und Beobachtungswinkel von etwa senkrechter Betrachtung ausgehend vergrößert, so ergeben sich in den reflektierenden Einkristall-Bereichen Farbverschiebungen zum kurzwelligigen Spektrum; Entsprechend Abb.2 und Gl. (1) wird dabei der Glanzwinkel (von 90° ausgehend) verkleinert und λ_0 nimmt ab.

Praktisch sind die Opal-Pseudokristalle allerdings auch innerhalb einer Domäne einheitlicher Interferenzfarbe nicht ideal aufgebaut. Es gibt Stapelfehler und Zwillingskristallbildung sowie Wechsel zwischen hexagonalen und kubischen Kristallbereichen u.a. Unter einem schwach vergrößernden Mikroskop oder auch schon mit einer einfachen Lupe sieht man oft eine streifige Struktur (Abb.3b). - Quantitative Untersuchungen sind schwierig /3/, aber es ist einfach, einige Demonstrationsexperimente zu zeigen (s.u.).

2. Optische Kristalle aus hochpolymeren Kunststoff-Kugeln

Die Polymerisation /5, 6/ bestimmter organischer Substanzen (Styrol, Akrylester) zu Makromolekülen mit vielen Tausenden von Monomeren-Molekülen läßt sich so führen, daß wäßrige Latex-Emulsionen mit kleinen kugelförmigen Teilchen entstehen, die weitgehend gleiche Durchmesser besitzen (Abweichungen nur wenige %). Bei einer hinreichend hohen Teilchen-Konzentration lagern sich die gleich großen Latex-Kugeln zu dichtesten Kugelpackungen zusammen /7/ (Kondensation). Elektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen mehr oder weniger große Einkristallbereiche (Abb.4a), in denen jedoch die erwähnten Kristallbaufehler direkt

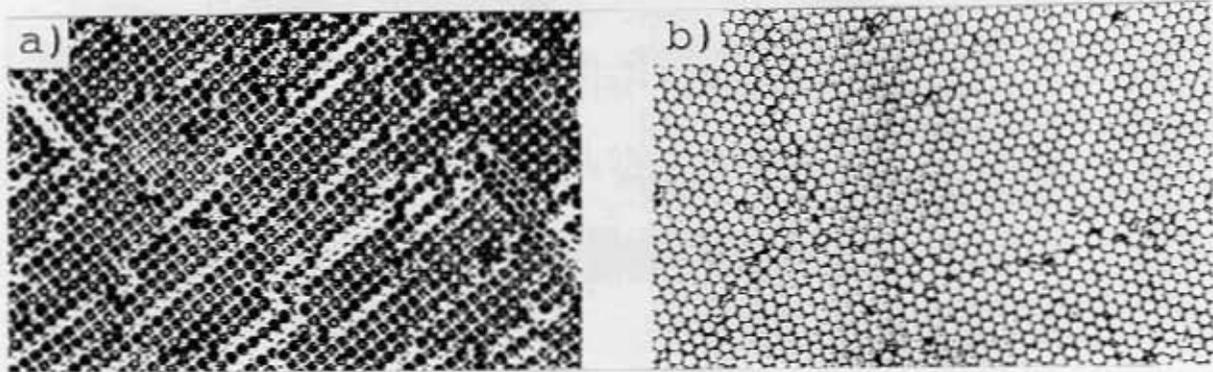


Abb.4 Elektronen-mikroskopische Replika-Bilder; a) Bruchfläche einer eingetrockneten monodispersen Polystyrol-Emulsion /10/ b) einer eingetrockneten Schicht (Kugeln ca. $0,2 \mu\text{m}$ Durchmesser; /9/)

erkennbar sind. In Abb.4 b sieht man ferner Kristallite mit verschiedenen Orientierungen und typische Korngrenzen.

Auch die übermolekularen Latexkugel-Kristalle können im weißen Licht funkelnde einfarbige v.Laue- bzw. Bragg-Reflexe erzeugen. Die quantitativen Zusammenhänge wurden vor allem von W.Luck und Mitarbeitern /8-10/ untersucht. Er schlug auch bereits vor, Latex-Kristalle als lehrreiche Modelle für die Veranschaulichung von typischen Erscheinungen in der Kristallphysik zu verwenden.

Anmerkung: In Dispersionen mit größeren Latex-Kugeln ($d \approx 0,8 \mu\text{m}$) konnte W. Luck /10/ die Gitterstrukturen auch im Lichtmikroskop hoher Auflösung direkt beobachten. Es zeigten sich Einkristall-Bereiche mit vorzugsweise 60° -Kristall-Korngrenzen. Selbst Effekte der Kristalldynamik ließen sich im Lichtmikroskop beobachten. So wuchsen in der Emulsions-Schicht mit der Zeit die größeren Einkristalle auf Kosten der kleineren. In einer monodispersen Latex-Dispersion erfolgt eine Kondensation von Pseudokristallen nur dann, wenn die Teilchen-Konzentration einen Grenzwert überschreitet (Sättigungs-Konzentration). - Übrigens ließ sich sogar die Kondensation einzelner Kugelteilchen im Mikroskop beobachten. In der Lösung zeigt ein solches Teilchen starke Brownsche Wanderungs-Bewegungen. Auch auf der Kristall-Oberfläche wandert die Kugel, bis sie an einer energetisch günstigen Stelle in das Gitter eingebaut wird, z.B. in einer leeren Fehlstelle der obersten Netzebene oder einer Netzebenen-Treppstufe usw. Im Augenblick des Einbaus verliert das Einzelteilchen den größten Teil der kinetischen Energie und nimmt dann an der geringeren thermischen Bewegung des Gesamtkristalls teil (wie es die Kristall-Theorie verlangt) /10/. - In Gemischen von zwei Latices mit verschiedenen Kugeldurchmessern bilden sich übrigens nur dann regelmäßige Gitterstrukturen (Mischkristalle), wenn der Größenunterschied kleiner als 10 % ist.

Insbesondere in der Nähe der Gefäßwände bilden sich in monodispersen Latex-Dispersionen mit Kugelgrößen von $d = 0,2 - 0,5 \mu\text{m}$ Kristalle, an denen bei Beleuchtung mit weißem Licht einfarbige v.Laue-Reflexe beobachtet werden können. Parallel zu den Glaswänden bilden sich Netzebenen mit besonders hoher Packungsdichte (kleine Miller-Indizes), die besonders intensive Reflexe liefern.

Praktisch verwendeten Luck und Mitarbeiter Mikroküvetten mit $20 \mu\text{m}$ Glasfenster-Abstand. Mit einem Spektralphotometer wurden je nach Winkellage Haupt- und Nebenmaxima gemessen, denen unterschiedliche v.Laue-Reflexe (100, 111, 110, 200,.....) zugeordnet werden konnten. Wie sehr eingehende Untersuchungen der

Wellenlängen- und Winkelabhängigkeiten gezeigt haben /8/, bilden die Latex-Kugeln in der wäßrigen Dispersion kubisch (und nicht hexagonal) dichteste Raumgitter, obwohl beide Strukturen kristallphysikalisch möglich und gleich wahrscheinlich sind. W. Luck vermutete eine leichte Bevorzugung der kubischen Phase aufgrund etwas günstigerer Oberflächenspannungs-Energien. - Aus der Winkelbreite der Reflexe konnte nach Formeln der Röntgenstruktur-Analyse die Ausdehnung der Kristallite (ungestörte Einkristall-Bereiche) ermittelt werden; weitere Aufschlüsse geben die spektrale Halbwertsbreiten der Reflexe. Die Dicke der auf der Glaswand aufgewachsenen Latex-Kristalle beträgt nur 10-30 Gitterebenen. Es konnte sogar das Wachsen der Kristalldicken (etwa über 1 Stunde) verfolgt werden.

Die intensiven, einfarbigen v. Laue-Reflexe können ähnlich wie an Opalen gezeigt werden. Unglücklicherweise sind hochkonzentrierte Latex-Emulsionen mit homogener Teilchengröße m.W. nicht kommerziell erhältlich, und Latex-Kristalle in wäßriger Suspension sind meistens nicht über längere Zeit stabil. Wir konnten jedoch einige Experimente mit Latex-Kristallproben zeigen.²

Anmerkung: Schon bevor Latex-Kristalle eingehend untersucht wurden, waren kristall-ähnliche Strukturen bei elektronen-mikroskopischen Untersuchungen bestimmter Arten von Viren bei geeigneter Trocknung gefunden worden (Lit.s./9,10/). Da auch hier z. T. die Durchmesser der Einzelteilchen in der Größenordnung der Wellenlänge λ des sichtbaren Lichts liegen, konnten auch an einigen Viren-Kristallen z.T. farbige v.Laue-Reflexe beobachtet werden. - Nach Wiederauflösung derartiger Kristalle ergeben sich übrigens wäßrige Suspensionen mit unverändert weiterlebenden Viren. - Aus verschiedenen Gründen sind natürlich optische Kristalle aus Viren für Unterrichtsversuche nicht geeignet.

3. Beobachtung lichtoptischer v.Laue-Interferenzen an Opalen und Latex-Proben

Die verwendeten Proben haben ebene Oberflächen. Die farbigen Reflexe können mit jeder weißen Beleuchtung (Deckenlicht, Tischlampe) direkt beobachtet werden. Durch Neigen und Drehen der Probe (z.B. eines Opals) lassen sich Einfallswinkel und Beobachtungswinkel freihand ändern. Man sieht die kleinen, nur wenige mm² großen einheitlichen Bereiche ("Einkristalle") einfarbig intensiv aufleuchten, wenn die Bragg-Bedingung erfüllt ist. Eine definierte Aufstellung und gute Winkel-Variationen ermöglicht ein normales Dreibein-Photostativ mit Kugelgelenk (Abb.5) Die Betrachtung der Opal-Bereiche gleicher Reflexfarbe mit einer Lupe (5x) zeigt bereits oft eine streifige Unterstruktur, die auf "Kristallbaufehler" schließen läßt.

Auch eine Projektion der Opal-Oberfläche im Licht der v.Laue-Reflexe ist möglich (Abb.6). Bei mäßiger Vergrößerung (3 - 5 x) genügt die Beleuchtung mit einer üblichen Experimentierleuchte mit Aufsteck-Kondensator (6 V, 30 W; evtl. mit 8 V überlastet, um deutlich größere Helligkeit zu erhalten); die Abbildung erfolgt mit einer einfachen Linse $f = 100$ mm auf einen 0,3 - 0,5 m entfernten weißen Schirm. - Wird der Opal in einer Drehfassung gehalten, so

² Herrn Prof. W. Luck (Marburg) danke ich für die Überlassung von geeigneten Latex-Emulsionsproben.

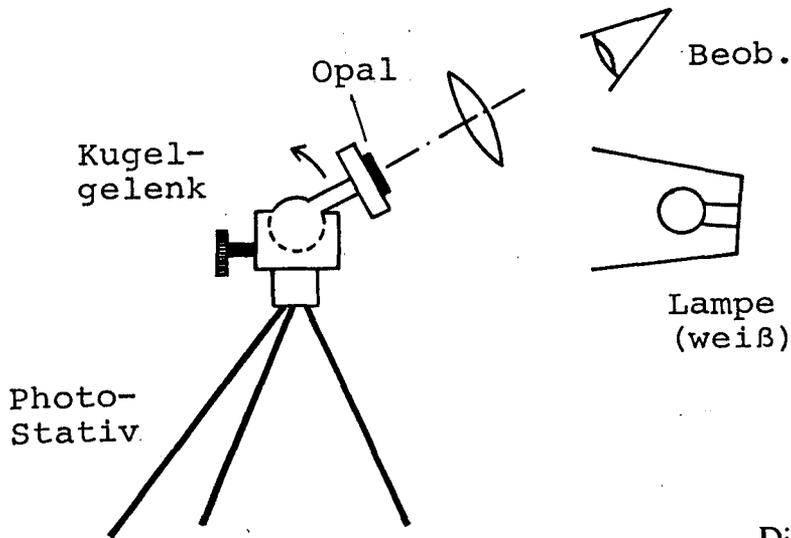


Abb.5
Direkte Beobachtung der
Opal-Reflexe; Winkelän-
derungen mit einem Kugel-
gelenk

kann man auch hier den Azimut-Winkel leicht ändern und die sich ändernden v.Laue-Reflexe beobachten. - Bei starker Vergrößerung für die Projektion in einem Hörsaal braucht man eine Glühlampe hoher Leuchtdichte (z.B. eine Jod-Quarz-Glühlampe, 24 V, 250 W); hierbei ist aber unbedingt ein Wärmeschutzfilter (Fa. Schott KG, ca 5 mm) einzuschalten, damit der Opal nicht unzulässig erwärmt wird.

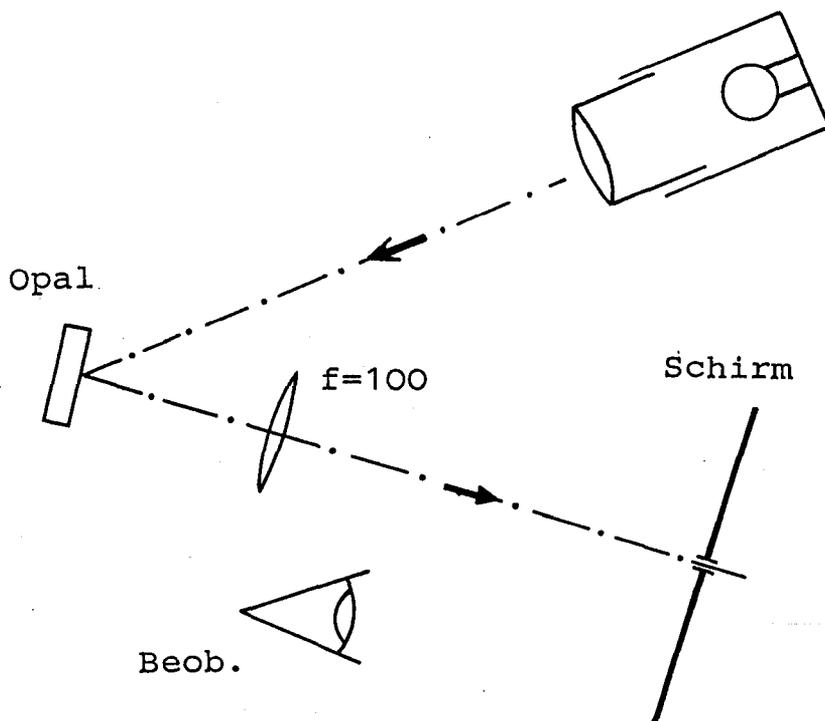


Abb.6
Abbildung einer Opal-Ober-
fläche in weißem Licht

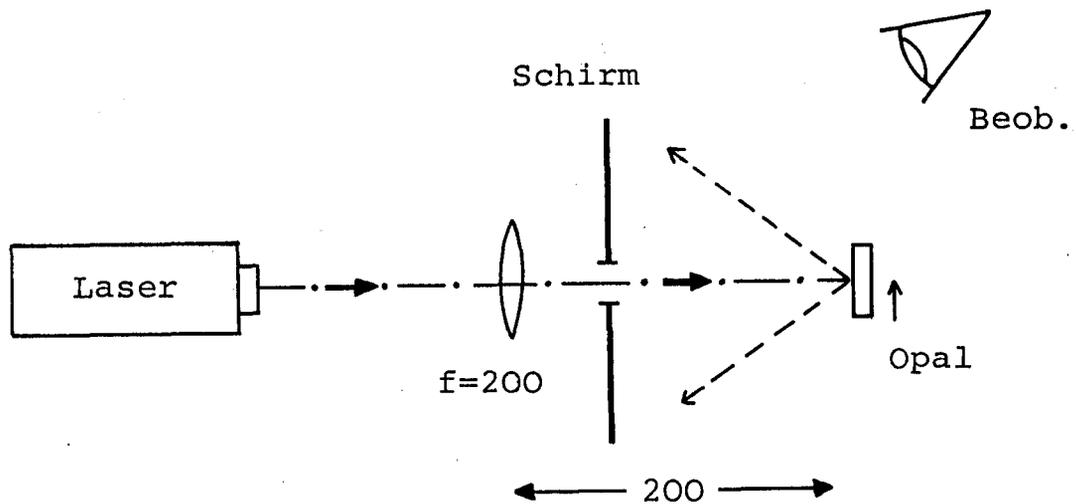


Abb.7 Demonstration der Winkelabhängigkeit roter v.Laue-Reflexe eines Opals mit einem HeNe-Laser

Mit einem kleinen HeNe-Laser läßt sich ferner die Winkelabhängigkeit der Reflexe in monochromatischem Licht an geeignet ausgewählten sehr kleinen Opal-Regionen zeigen (Abb.7). Das parallele Laserbündel (1-2 mm Durchmesser) wird durch eine Linse ($f = 200$ mm) auf einen kleinen Brennpunkt-Bereich ($< 0,1$ mm Durchmesser, beugungsbedingt) gesammelt. Das an einem roten Opal-Bereich durch Raumgitter-Interferenz unter bestimmten Winkeln reflektierte Licht wird auf einem Pappschirm beobachtet, der in der Mitte durchbohrt das Beleuchtungsbündel durchtreten läßt. - Nur genügend große Einkristalle würden monochromatische Bragg- oder v.Laue-Reflexe und genau definierte Glanzwinkel liefern. Die meisten an den Opalen beobachteten Reflexe erstrecken sich jedoch über größere Winkelbereiche (bis $\pm 10^\circ$) und besitzen z.T. auch Streifenform, was auf die genannten Kristallbaufehler zurückzuführen ist. /2/.

Die Latex-Emulsion befindet sich zwischen zwei zusammengeklebten Mikroskop-Objektträgern (Abb.8a), von denen der eine einen flachen kugelförmigen Hohl-schliff aufweist. In den dünnen Randbereichen wird die Latex-Schicht etwas transparent. Mit einem dicht dahinter aufgestellten Handspektroskop beobachtet man eine scharfe dunkle Bande im kontinuierlichen Weißlicht-Spektrum (Abb.8c). Dieses Licht fehlt im Transmissions-Spektrum, weil es nach vorne als Bragg-Reflex reflektiert wird.

Die Beobachtung des Spektrums im reflektierten Licht (Abb.8b) ist experimentell etwas aufwendiger. Man analysiert mit dem Handspektroskop das Licht, das in der Anordnung Abb.6 durch das Schirmloch tritt, und sieht z.B. eine scharf begrenzte schmale helle grüne Bande im Spektrum auf dunklem Grund. Aus der Breite der Interferenzbande läßt sich übrigens die Zahl der im Kristall reflektierenden Netzebenen abschätzen (ca. 10 - 20). - Zur Beobachtung des Spektrums einzelner Opal-Reflexe muß man die Abbildung der Opal-Oberfläche so einstellen, daß ein besonders heller Reflex einheitlicher Farbe auf das Schirmloch in Abb.6 fällt. Die Opal-Spektren sind denen der Latex-Kristalle sehr ähnlich.

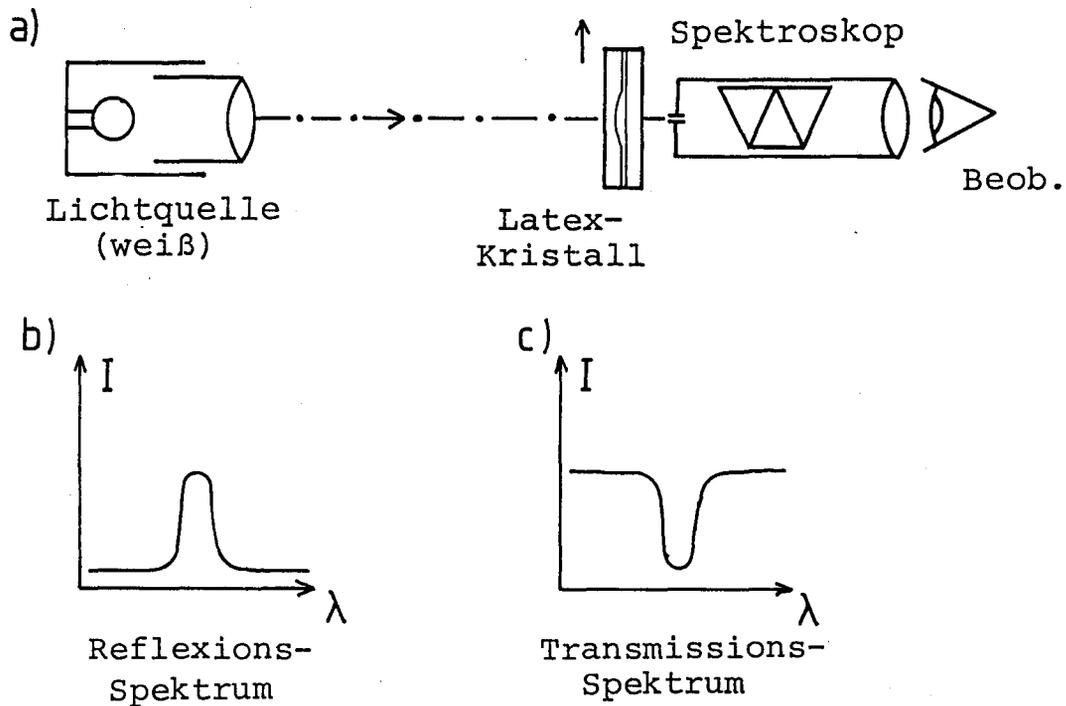


Abb.8 a) Beobachtung der Spektralverteilung in v.Laue-Reflexen an optischen Latex-Kugel-Kristallen in Transmission mit einem Handspektroskop; b, c) Spektrum in Reflexion und Transmission

4. Verwendete Opal- und Latexproben

Aus Kostengründen verwenden wir für die Versuche sogen. Opal-Dubletten. Auf kleinen 1 - 2 mm dicken Platten (ca. 6 x 8 oder 10 x 12 mm) aus schwarzem Grundmaterial (Onyx) sind sehr dünne Scheiben (ca. 0,3 mm dick) von kleinen australischen Edelopalstücken (von 2 - 3 mm Größe) nebeneinander aufgeklebt und an der Oberfläche wahrscheinlich mit einem Kunststofflack überzogen und auf diese Weise kratzfest und eben versiegelt. Solche Opal-Dubletten sind in Edelstein-Handlungen nicht allzu teuer erhältlich. Diese Dubletten sind für die beschriebenen Handversuche viel besser geeignet als sogen. Opal-Tripletten. Diese bestehen aus den geschilderten Dubletten mit einem aufgeklebten dritten durchsichtigen Stein (Bergkristall), der z.B. plankonvex linsenförmig oder anders bauchig-gekrümmt geschliffen ist. Dadurch werden zwar die farbigen Funkeffekte des Opals sehr auffällig; aber die einzelnen lokalen Bereiche des Opals sind nicht scharf zu sehen oder abzubilden. - Auf die Theorie zur Entstehung von Edel-Opalen können wir hier nicht eingehen; sie ist anderenorts in allgemein verständlicher Form beschrieben /4,11/.

Über viele Jahre haltbare Latex-Kristallproben konnten wir, wie erwähnt, mithilfe von Hohlschliff-Mikroskopobjektträgern herstellen (vgl. Abb.8a). Mit einem großen Tropfen Emulsion wurde die Höhlung voll gefüllt und eine normale Trägerplatte so aufgedrückt, daß der Überschub seitlich herausgepreßt wird. An den Rändern wurde das Glasplattenpaar mit Epoxid-Kleber versiegelt und durch Eintauchen in flüssiges Paraffin zusätzlich gedichtet. Die eingeschlossene Menge an Emulsion ist hier viel größer und die Dichtung über die ebenen Glasflächen besser als in den Eigenbau-Mikroküvetten.

Anmerkung: Dankenswerterweise hat uns Herr Prof. Dr. W. Luck (Univ. Marburg) vor 6-8 Jahren einige kleine Mengen geeigneter Latex-Proben zur Verfügung gestellt (Hersteller BASF - Ludwigshafen); die Latex-Emulsionen haben sich in kleinen Schliff-Flaschen bis heute monodispers gehalten. Unsere Versuche, Mikroküvetten durch Zusammenkleben von Mikroskop-Objektträgern mit zwischengelegten Metallfolien-Rändern selbst zu bauen, waren insofern erfolglos, als sie keine Dauerpräparate ergaben. Trotz Umklebung mit Araldit erwiesen sie sich nicht als genügend wasserdicht; die Emulsionsschichten trockneten ein und die zunächst eindrucksvollen optischen Kristall-Reflexe verschwanden restlos.

5.) Optische Eigenschaften von gewöhnlichen Opalen

Edelopale sind recht selten; sie werden nur an wenigen Stellen auf der Welt gefunden und abgebaut (in Brasilien, Mittelamerika, Nevada/USA, vor allem aber in Australien und früher auch in der CSSR). - Dagegen ist der gewöhnliche Opal ein relativ weit verbreitetes (und praktisch wertloses) Mineral, das chemisch aus nicht kristallinem Siliziumdioxid (SiO_2 , meistens mit einem gewissen Wassergehalt, besteht. Der gemeine Opal ist milchig weiß und weitgehend undurchsichtig; in dünneren Schichten wird er allerdings diffus durchscheinend (ähnlich einer Mattscheibe).

Auch bei anderen Medien spricht man von "Opaleszenz"; hierbei handelt es sich um Streuung des Lichtes in trüben Mitteln, in denen Teilchen von der Größenordnung der Lichtwellenlänge suspendiert sind. Die langen Wellen des roten Lichtes werden weniger gestreut als die kürzeren des blauen Lichtes. Bei weißer Beleuchtung erscheint daher eine Opalscheibe im durchgelassenen Licht rötlich und im seitlich gestreuten Licht bläulich. - Man kann die Verhältnisse im Modellversuch³⁾ leicht demonstrieren, indem man einem Glas mit Wasser 1 - 2 Tropfen Milch zumischt und mit einer Experimentierleuchte (mit Kondensorlinse) beleuchtet; das durchtretende Licht wird auf einem weißen Schirm aufgefangen und das seitlich gestreute Licht gegen einen dunklen Hintergrund direkt beobachtet; in der Milch-Emulsion streuen etwa $1 \mu\text{m}$ große Eiweiß- oder Fett-Tröpfchen. - Wir dürfen vermuten, daß im gemeinen Opal ebenfalls kleine statistisch verteilte Streuteilchen enthalten sind, was die elektronenmikroskopischen Untersuchungen bestätigten (Abb.1c).

Zusammenfassung: Bestimmte Materialien bestehen aus 3-dimensional regelmäßig gepackten kleinen Kugeln ($D = 0,2 - 1 \mu\text{m}$). Wenn derartige Raumgitter-Strukturen mit weißem Licht beleuchtet werden, zeigen sich in gewissen Richtungen v.Laue-Interferenz-Reflexe in nahezu spektralreinen Farben. - Konzentrierte Emulsionen von Latex-Kugeln bilden in der Nähe der Küvettenwände "Optische Kristalle". Andererseits bestehen Edelopale aus regelmäßig gestapelten kleinen Kugeln aus amorphem Quarz. - Lichtoptische v.Laue- bzw. Bragg-Interferenzen lassen sich an derartigen Strukturen mit einfachen Mitteln mit weißem und mit Laser-Licht zeigen.

³ Bekanntlich beruht die Blaufärbung des Himmels und die Rotfärbung der untergehenden Sonne auf ähnlichen Lichtstreuungseffekten in der Atmosphäre

Literatur:

- /1/ E.Baier: Die Optik der Edelopale. In: Zeitschr. f. Kristallogr. 81 (1932) S.183-218
- /2/ J.V.Sanders: Colour of precious opals. In: Nature (London) 204 (1964) p.1151-53
- /3/ J.V.Sanders: Diffraction of light by opals. In: Acta crystallographica A24 (1968) p.427-434
- /4/ P.J.Darragh, A.J.Gaskin u.J.V.Sanders: Opals. In: Scient. American 234 (April 1976) p.84-95
- /5/ H. Franke (Herausg.): Lexikon der Physik. Franckh-Verlag, Stuttgart 3. Auflage 1969. Stichworte: Polymerisation, Hochpolymere, Kolloid, Mizelle
- /6/ B.Vollmert: Grundriß der Makromolekularen Chemie (Lehrb.) E.Vollmert-Verlag, Karlsruhe 1980; Teil 1 (S.181ff. Emulsionspolymerisation, S.203 Anionen-Polymerisation)
- /7/ T.Alfrey, E.B.Bradford, J.W.Vanderhoff, G.Oster: Optical properties of uniform particle-size latexes. In: J.Opt.Soc.Amer. 44 (1954) p.603-609
- /8/ W.Luck, M.Klier, H.Weßlau: Über Bragg-Reflexe mit sichtbarem Licht an monodispersen Kunststofflatices.I/II. - In: Berichte d.Bunsenges.67(1963) S.75-83, 84-85
- /9/ W.Luck, M.Klier, H.Weßlau: Kristallisation übermolekularer Bausteine. In: Naturwiss. 50 (1963) S.485-494
- /10/ W.Luck: Kristallstrukturen aus nichtmolekularen Bausteinen. In: Physik. Blätter 23 (1967) S.304-313
- /11/ P.J.Darragh, A.J.Gaskin, B.C.Terrel a.J.V.Sanders: Origin of precious opal. In: Nature (London) 209 (1966)p.13-16