Z. Dt. Gemmol. Ges.	38	Nr. 2/3	S. 51–62	Stuttgart, August 1989

Irisierendes natürliches Glas aus Mexiko

H. A. HÄNNI, Basel und Zürich

Zusammenfassung

Die Untersuchung von transparentem bräunlichem sogenanntem Iris-Opal von San Luis Potosi (Mexiko) ergab natürliches Glas mit dünnlagigem Aufbau. Dieser Aufbau, der mit dem REM untersucht wurde, bewirkt die Irideszenz durch Interferenz an gekrümmten Lagen von ca. 2 µm Dicke. Röntgen-Pulverdiagramme belegen den amorphen Charakter des Materials. Mit Infrarot-Spektroskopie konnte das Vorliegen von SiOH-Gruppen gezeigt werden, für H_2O ergaben sich keine Hinweise. Die Hauptkomponenten wurden mit der Mikrosonde bestimmt und umfassen neben Si die Elemente Al, Cs, K und Na. In Spurenkonzentrationen sind Rb und Fe vorhanden. Eine DTA-Analyse bis 1200 °C ergab einen Glühverlust von 0,9 % nach 900 °C.

Abstract

A re-examination of a transparent brownish so called iris-opal from San Luis Potosi (Mexico) turned out to be rather a natural glass with botryoidal texture. The layered build up studied by SEM gives rise to iridescence effect, occurring by interference on layers of approximately 2 µm. An X-ray diffraction diagram proves the material to be amorphous. Infrared spectroscopy showed the presence of SiOH-groups, but no evidence for H_2O. Microprobe analyses give a composition which includes Al, Cs, K and Na as main constituents beside silica. Rb and Fe are at trace level. A thermogravimetry run to 1200 °C resulted in an igneous loss of weight of 0.9 % after 900 °C.

Einleitung

Schon im Jahre 1964 wurden durchsichtige hellbraune Steine, welche Gegenstand der vorliegenden Studie sind (Abb. 1), in einer gemmologischen Publikation (BARBOUR, 1966) erwähnt. In einer späteren Veröffentlichung (SINKANKAS, 1966) wurden sie als Iris-Opale bezeichnet. LEIPER (1965) beschrieb in seiner Arbeit bereits sphärolitische Einschlüsse. Elektronenmikroskopische (TEM) Aufnahmen zeigten einen dünnlagigen Aufbau, der für den irisierenden Effekt verantwortlich gemacht wurde. Tatsächlich sind an diesen Steinen flächenförmige Farbeffekte zu erkennen, wenn das Material bei starker Beleuchtung in geeigneten Richtungen bewegt wird (Abb. 2).

Heute ist bekannt, daß das Opalisieren der Edelopale einen Farbeffekt darstellt, der auf der Beugung von Licht an geordneten Domänen von winzigen Kügelchen beruht (SANDERS, 1964). Dieser durch ein dreidimensionales Beugungsgitter verursachte Farbeffekt verlangte nach einem Vergleich mit dem anders erscheinenden Mechanismus

0343-7892/89/0038-0051 $ 3.00
© 1989 E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, D-7000 Stuttgart 1

Abb. 1. Einige Stücke des natürlichen irisierenden Glases aus Mexiko. Links hinten ein Rohstück, rechts hinten ein aufgeschäumtes Stück nach Erhitzung auf 1200 °C. Der größte der abgebildeten facettierten Steine wiegt 3,2 ct.

am „Irisopal". Auch die in Handelskreisen verwendeten Bezeichnungen Hyalith, Hyalin, Opal etc. schienen fragwürdig und weckten das Interesse zur Durchführung der vorliegenden Studie.

Der Effekt des Irisierens als Interferenzerscheinung an dünnen Lagen ist den Gemmologen schon lange bekannt, allerdings nicht bei Opal! Der bei WEBSTER (1983) erwähnte Iris-Achat zeigt Irideszenzfarben durch Interferenz an dünnen Lagen. Die Ursachen der sogenannten physikalischen Farben, nämlich Interferenz an dünnen Schichten („zweidimensional"), und Beugung an räumlichen Gitterstrukturen („dreidimensional"), als Ursache von Farbe in Edelsteinen wollen wir getrennt sehen. Das erstere (Irisieren) kann als spezieller Fall des letzteren (Opalisieren) betrachtet werden.

Sowohl das Irisieren wie auch das Opalisieren kann bei SiO_2-Mineralien auftreten, insbesondere bei Irisquarz, den verschiedenen Opalen und der Varietät Hyalith, sowie bei den Chalcedonen, einschließlich Achat. Es stellte sich nun auch die Frage nach der Zugehörigkeit des Untersuchungsmaterials zu einer dieser Arten.

Nach Entstehung und Aufbau sind bei den Opalen mit Farbenspiel verschiedene mineralogisch unterscheidbare Arten bekannt (FLÖRKE et al., 1985b). Vereinfachend läßt sich sagen, daß bei niedrigen Temperaturen Opal aus wässerigem Gel entstehen kann. Diese Bildungsform führt zu röntgenamorphem Opal wie er z. B. aus gewissen

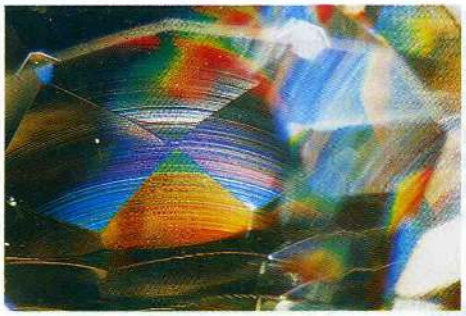

Abb. 2

Abb. 3

Abb. 4

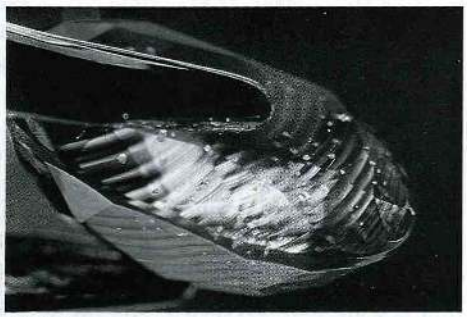

Abb. 5

Abb. 2. Irisierendes Glas mit botryoidalem Aufbau, durch Interferenz an dünnen Schichten Spektralfarben zeigend. Vergrößerung ca. ×20.

Abb. 3. Natürliche Oberfläche des irisierenden Glases, mit konzentrischen Lagenstrukturen. Vergrößerung ×10.

Abb. 4. Kugelige Einschlüsse (amorph) mit Kränzen feiner Rißchen, und feinlagige botryoidale Strukturen. Vergrößerung ca. ×20.

Abb. 5. Doppelbrechung aufgrund innerer Spannungen bei einem irisierenden Glas zwischen gekreuzten Polarisationsfiltern.

Sedimentgesteinen Australiens bekannt ist. Bei hoher Temperatur können Opale entstehen, welche neben ihrer amorphen Hauptmasse kristalline Anteile in Form von Cristobalit und/oder Tridymit enthalten. Sie treten in Hohlräumen vulkanischer Gesteine auf. Solche Opale verhalten sich nicht röntgenamorph, sondern zeigen die Beugungsmerkmale der vorhandenen kristallinen SiO_2-Mineralien.

Zu einer neueren Publikation (GÜBELIN, 1987, siehe Abb. 21 und 22), die sich mit den Schwarzopalen von Lightning Ridge auseinandersetzt, fallen die beiden rasterlektronenmikroskopischen Aufnahmen auf. Jene Abb. 21 zeigt die bekannte räumlich-geordnete Kugelpackung, welche das Opalisieren bewirken kann. Abb. 22 läßt demge-

genüber eine Lagenstruktur erkennen. Die dazugehörende Legende bezeichnet das betreffende Material als „gläsern aussehenden Hyalin-Opal". Die im Text erwähnten „sporadischen und wenigen Cristobalit- und Tridymitkügelchen" sind im Bild nicht auszumachen und könnten, da sie keine dichte, geordnete Muster darstellen, das Farbenspiel am Stein nicht verursachen. Umso wichtiger scheinen die schmalen Lagenstrukturen zur Erklärung des opalartigen Verhaltens des „Hyalin-Opals". Nach Rücksprache mit dem Autor (GÜBELIN, 1988) wurde klar, daß es sich beim letzteren Material mit größter Wahrscheinlichkeit um das hier beschriebene Glas aus Mexiko handelt.

Zur Herkunft und Art des Rohmaterials

Es darf als gesichert gelten, daß unser Untersuchungsmaterial aus der Gegend von Tepetate und Lourdes im State San Luis Potosi in Mexiko stammt (KOIVULA, 1988). SINKANKAS (1966) erwähnt außerdem noch eine Stelle nahe Durango. Als Muttergestein wird ein vulkanisches Gestein, vermutlich Rhyolith, angegeben, in dessen Hohlräumen Topase und tropfenförmige bis krustenartige Gebilde des untersuchten Glases vorkommen. Für nierig-traubige Massen verwendet man auch oft den Ausdruck „botryoidale" Gebilde. Das irisierende Glas besteht gelegentlich aus Kappen auf Topaskristallen und zeigt so einen gewissen genetischen Zusammenhang zu Topas. Die Oberflächen der bis cm-großen Glaskörperchen und -krusten zeigen schon bei Lupenvergrößerungen sehr feine stufige Lagen wie sie ähnlich auf Perlen angetroffen werden. Allerdings erkennt man beim Glas gelegentlich auch Spickel im Muster (Abb. 3). Es sind auf älteren natürlichen Oberflächen auch Löcher zu finden. Sie könnten durch Korrosion entstanden sein, oder stellen große offene Poren dar.

Gemmologische Charakteristika

Die folgenden Werte und Beobachtungen wurden an acht Steinen ermittelt, von denen einige als Rohsteine untersucht wurden, die anderen sind facettiert oder angeschliffen. Die Farben variieren zwischen einem hellen Gelblichbraun und einem grünlichen Braun. Alle lassen einen botryoidalen Aufbau erkennen, der von dem des Hyaliths kaum zu unterscheiden ist.

In diesem Zusammenhang ist die oberflächliche Ähnlichkeit der untersuchten Steine mit künstlichem Glas zu erwähnen. Die feinen botryoidalen Lagen sind leicht mit Schlieren in künstlichen Gläsern zu verwechseln. Die Spannungsdoppelbrechung unter gekreuzten Polarisationsfiltern und niedrige Dichte- und Lichtbrechungswerte lassen bei der Untersuchung mindestens den Gedanken an Glas aufkommen. Auch kugelige Einschlüsse (Abb. 4) erinnern an Gasbläschen, wie sie in vielen Gläsern vorkommen. Bei genauerer optischer Prüfung fallen jedoch die konischen, gegeneinander leicht verkippten Segmente aus feinen gekrümmten Lagenstapel auf, welche die einzelnen Krusten und Klümpchen aufbauen. Dies ist ein für künstliche Gläser unbekanntes Bild. Die Beschreibung des Hyalithgefüges (FLÖRKE et al., 1985) als Folge einer „lagenweisen Abscheidung aus Tröpfchen, die konusförmige Begegnungsgefüge aufgebaut haben" paßt trefflich auch für das irisierende Glas.

Als Einschlüsse findet man oft kleine, kugelige Gebilde (Sphärolithe), von denen kurze Rißchen ausgehen oder die von schaligen Rißchen umgeben sind. Die Sphärolithe sind amorph (Abb. 4).

Im polarisierten Licht zeigen die Steine isotropes Verhalten, bei dickeren Schichten ist Spannungsdoppelbrechung zu erkennen (Abb. 5). Mit einer Faserlichtquelle lassen sich Spektralfarben erzeugen, die bei Bewegung des Steins den gebogenen Schichten des feinlagigen Aufbaus folgen (Abb. 2). Die Dichte- und Lichtbrechungswerte sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1. Physikalische Werte des irisierenden Glases von San Luis Potosi, Mexiko

Dichte	2,241 bis 2,270 g/cm³	(SINKANKAS, 1966: 2,257)
Lichtbrechung n	1,462 bis 1,467 g/cm³	(SINKANKAS, 1966: 1,4625)

Das Absorptionsspektrum ist ohne erkennbare Linien. Es wird charakterisiert durch einen leichten Anstieg der Absorption von 900 bis 450 nm. Dort beginnt eine steilere Absorptionskante, die bei 430 nm das Maximum erreicht. Diese Angaben bestätigen die Befunde von LIDDICOAT (1985), der zusätzlich noch schwache Banden bei 495 und 460 nm erkannte, und das Spektrum mit demjenigen eines Uranglases in WEBSTER (1983) vergleicht. Im langwelligen ultravioletten Licht (LUV) zeigen die irisierenden Gläser eine schwache bis mittelstarke grünliche Fluoreszenz.

Ein Vergleich mit den Dichte- und Lichtbrechungswerten künstlicher Gläser im Bannister-Diagramm (WEBSTER, 1983) zeigt, daß das irisierende natürliche Glas aus Mexiko in den Bereich der sogenannten Opalgläser fällt, ohne die Opaleszenz dieser künstlichen Produkte, d.h. deren milchige Trübung, zu zeigen.

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Oberflächen von Bruchstücken des irisierenden Glases wurde mit einem Raster-Elektronenmikroskop Philips SEM 515 mit angeschlossenem energiedispersivem System (EDS Tracor) untersucht. Dabei wurden einerseits Bilder erzeugt, andererseits wurden auch energiedispersive Röntgenspektren (EDS) aufgenommen. Da zur Bilderzeugung leitende Oberflächen notwendig sind, wurden die Proben mit Gold besputtert.

Die REM-Bilder zeigen deutlich den feinlagigen Aufbau des Materials, wobei die gekrümmte Art der einzelnen Lagen gut sichtbar ist (Abb. 6). Auch die Spickel beim Zusammentreffen der einzelnen Teilsphären sind im Detail zu sehen. Bei hoher Vergrößerung einer Bruchfläche erkennt man Lagenstrukturen, die nur etwa 2,5 µm breit sind (Abb. 7). Diese Beobachtung stimmt sehr gut überein mit den Abbildungen und den Angaben in SINKANKAS (1966), der eine mittlere Breite der Bänder von 2,24 µm angibt. Mit diesen Dimensionen sind die Lagenstapel mit Licht interferenzfähig (JONES, 1952) und können die auftretende Irideszenz ausreichend erklären.

Die in Abb. 7 sichtbaren zahlreichen winzigen Risse könnten Hinweise auf ein partikuläres Gefüge darstellen oder auch als Schrumpfrißchen verstanden werden.

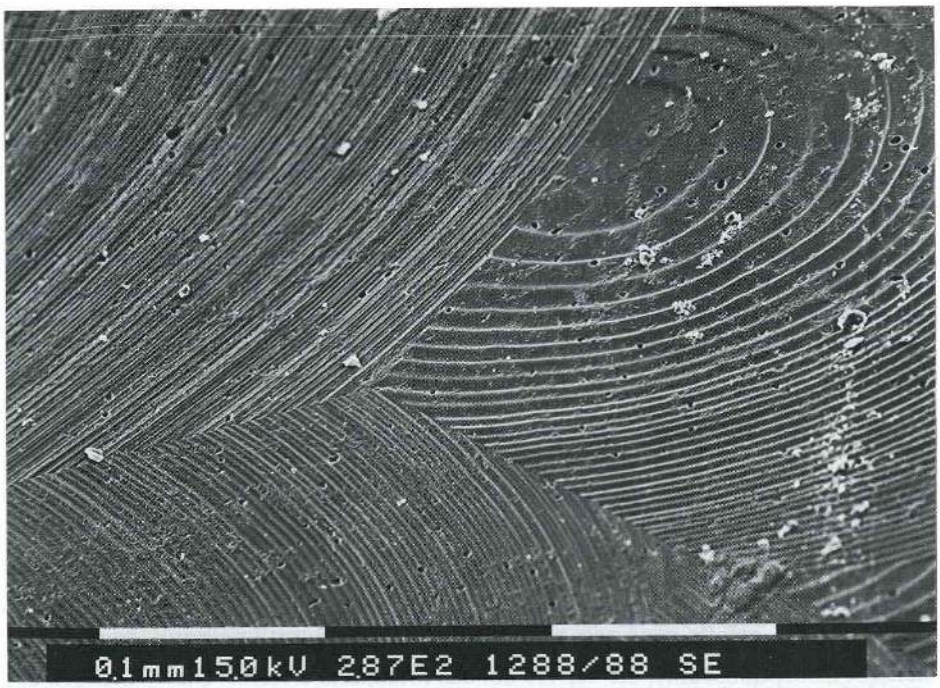

Abb. 6. REM-Aufnahme der Oberfläche eines Rohstückes von irisierendem Glas. Dünne gebogene Schichten und einzelne Löcher sind sichtbar. Die Länge des weißen Balkens beträgt 0,1 mm.

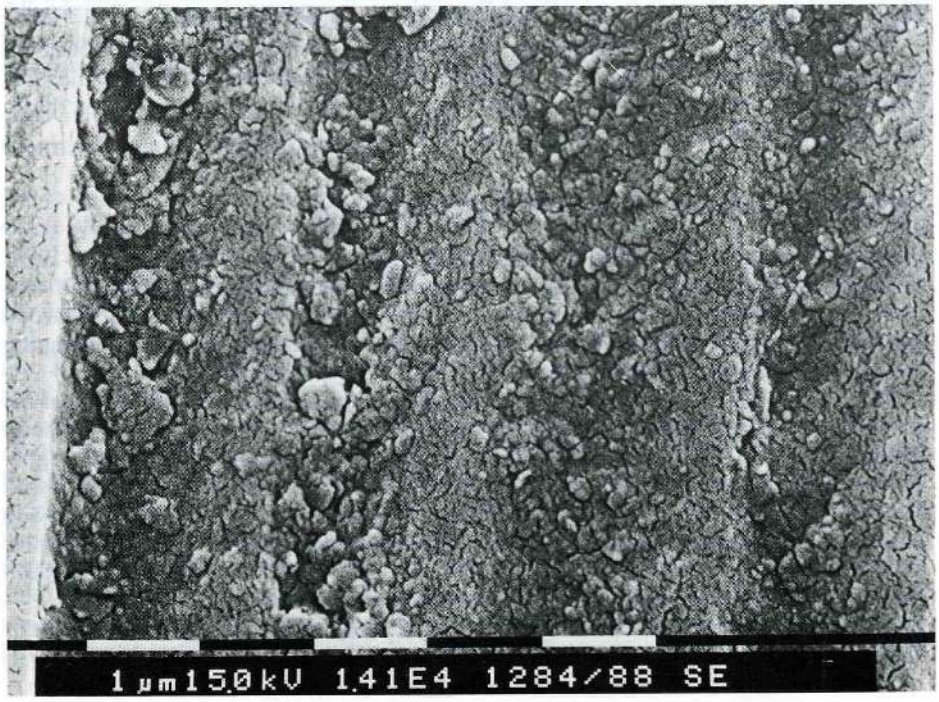

Abb. 7. REM-Aufnahme der Oberfläche beim Austritt der feinsten Lagen. Ihre Dicke beträgt etwa 2 µm. Bei den gekrümmten kleinen Öffnungen könnte es sich um „Schrumpfrißchen" handeln. Länge der weißen Balken 1 µm.

Chemische Untersuchungen

In der bisher erwähnten Literatur über den Untersuchungsgegenstand waren keine chemischen Analysen zu finden. Unsere chemische Untersuchung des irisierenden Glases vollzog sich in mehreren Stufen.

Die energiedispersive Röntgenfluoreszenz-Analyse (EDS-XFA) wird in der Gemmologie seit einiger Zeit erfolgreich angewendet (STERN & HÄNNI, 1982), Eine pauschale qualitative Übersicht über die vorhandenen Elemente erhielten wir durch die energiedispersiven Röntgenfluoreszenz-Spektren (Abb. 9). Darin treten Elemente auf, die für den erwarteten Opal zumindest ungewöhnlich wären. Neben Si, K und Cs in höheren Konzentrationen sind Fe, As und U als Spurenelemente vertreten.

Die quantitative Bestimmung der Hauptkomponenten wurde mit einer Elektronen-Mikrosonde (JXA-8600) nach dem Verfahren mit kombinierten EDS/WDS-Systemen durchgeführt (SCHWANDER & GLOOR, 1980). In Tabelle 2 sind die Elektronen-Mikrosonden(EMS)-Ergebnisse zusammengestellt und durch eine semiquantitative Angabe des Caesiumgehaltes ergänzt, die aus dem REM-EDS-Spektrum berechnet wurde. In dieser Aufstellung fehlen allfällig vorhandene leichte Elemente wie Lithium, Bor oder Beryllium. Flüchtige Bestandteile wie H_2O oder CO_2 sind ebenfalls nicht erfaßbar. Der mikroskopisch erkennbare feine Lagenaufbau konnte mit der EMS nicht als chemische Zonierung nachgewiesen werden. Vermutlich sind die Konzentrationsschwankungen beträchtlich, aber in einer Dimension, die unter der Auflösung der EMS liegt.

Eine EMS-Teilanalyse aus dem Jahre 1977 (GÜBELIN, private Mitteilung 1988) bezog sich höchstwahrscheinlich auf das gleiche Material („gelber Hyalin", Mexiko), die Gehalte von Si, Al, K, Na und Fe bewegen sich in der gleichen Größenordnung wie in Tabelle 2. Angaben über Cs und Rb fehlen jedoch. Leider konnte Gübelin die Folgerung aus seiner Analyse damals nicht ziehen.

Nachdem Opale (und Hyalith) neben einem gewissen Wassergehalt zu über 99 % aus Siliziumdioxid bestehen (FLÖRKE et al., 1985a) kann das Untersuchungsmaterial aus Mexiko mit seinem Gehalt von ungefähr 12 Gew.-% fremder Elemente nach den geltenden Definitionen nicht als Opal angesprochen werden.

Tabelle 2. Chemische Zusammensetzung des irisierenden Glases von San Luis Potosi, Mexiko

	Gew.-%
SiO_2	87,90
Al_2O_3	3,64
Cs_2O*	2,0
K_2O	1,93
Na_2O	0,55
Fe_2O_3	< 0,02
Summe	96,02

* über REM-EDS semiquantitativ bestimmt.
Leichte Elemente mit Z < 11 (z. B. Li, Be, B) können mit der verwendeten EMS nicht erfaßt werden.

Röntgenographische Untersuchungen

Eine Pulverdiffraktionsaufnahme auf Film zeigte sich als linienfrei und verwies das Material in die Gruppe der amorphen Substanzen. Eine Röntgen-Diffraktometeraufnahme (Siemens Kristalloflex Diffraktometer, Cu Kα Strahlung) ließ ein schwaches, breites Intensitätsmaximum bei 22° 2 θ erkennen und ein zweites, noch schwächeres bei etwa 15° 2 θ (Abb. 8). Solche schwache Aufwölbungen des Untergrundes bei Diffraktionsaufnahmen können durch das Vorliegen eines ungeordneten Netzwerkes von SiO_4-Tetraeder erklärt werden. Mit dem Nachweis des amorphen Charakters konnte das Vorhandensein von Opal C/T (mit Cristobalit- und Tridymit-Anteilen), wie er in etlichen vulkanischen Gegenden vorkommt, ausgeschlossen werden. Durch eine röntgenographische Untersuchung eines der sphärolitischen Einschlüsse (Pulvermethode, Bradley-Kamera) konnte weiter gezeigt werden, daß dieser ebenfalls amorphen Charakter aufweist.

Infrarotspektroskopie

Die Infrarotspektroskopie wird in der Gemmologie immer dort angewendet, wo Bedarf für den Nachweis bestimmter Moleküle besteht und z. B. organische Gruppen oder H_2O gesucht werden. Da nun alle Opale H_2O in Mengen zwischen etwa 1 und 10 Gew.-% enthalten, das zum größten Teil als molekulares Wasser vorliegt, war die Prüfung dieses Merkmals besonders wichtig. Die IR-Spektren zeigen jedoch weder im nahen noch im fernen IR spektrale Merkmale, die auf die Anwesenheit von molekularem Wasser hinweisen würden.

Die nachgewiesenen Banden bei 3600 und 4450 cm^{-1} lassen sich OH-Streckschwingungen und der Kombination von Streck- und Biegeschwingungen zuordnen und gelten Zeichen für das Vorliegen von Si-OH-Gruppen (Langer & Flörke, 1974). Die Konzentration ist kleiner als 0,1 Gew.-%. Ein ähnliches „OH-Spektrum" zeigen gewisse Kieselgläser, von denen als natürlicher Vertreter das Libysche Wüstenglas bekannt ist. Ein meßbarer Gehalt von Wasserstoff in Form von Silanolgruppen (Si-OH) und die Abwesenheit von molekularem Wasser (H_2O) ist damit offenbar für das irisierende Glas von Mexiko charakteristisch und gilt als weiteres Unterscheidungsmerkmal zu den Opalen.

Thermogravimetrie

Ein Thermogravimetrie-Versuch mit einer Mettler Thermowaage TA 3000 sollte Aufschluß geben über die Gewichtsänderung des Materials bei einer Erhitzung auf 1200 °C. Allfällig vorhandenes Wasser wird so ausgetrieben und der Verlauf des Gewichtsverlustes in Abhängigkeit der Temperatur kann studiert werden. Die Aufheizung der Probe mit 10°/Min zeigte vorerst keine Gewichtsänderung. Erst ab 900 °C begann das Gewicht der Probe leicht zu schwinden und erreichte bei 1200 °C einen Gewichtsverlust von 0,92 Gew.-%. Nach der Erhitzung hatte die Probe ihr Aussehen stark verändert. Sie lag nun als grobblasiger Schaum vor. Mit diesem Verhalten unterscheidet sich das Glas wiederum deutlich von den Opalen, sowohl in der geringen Größe des Glühverlustes wie auch mit seiner Veränderung zu Schaum. Eine nachträgli-

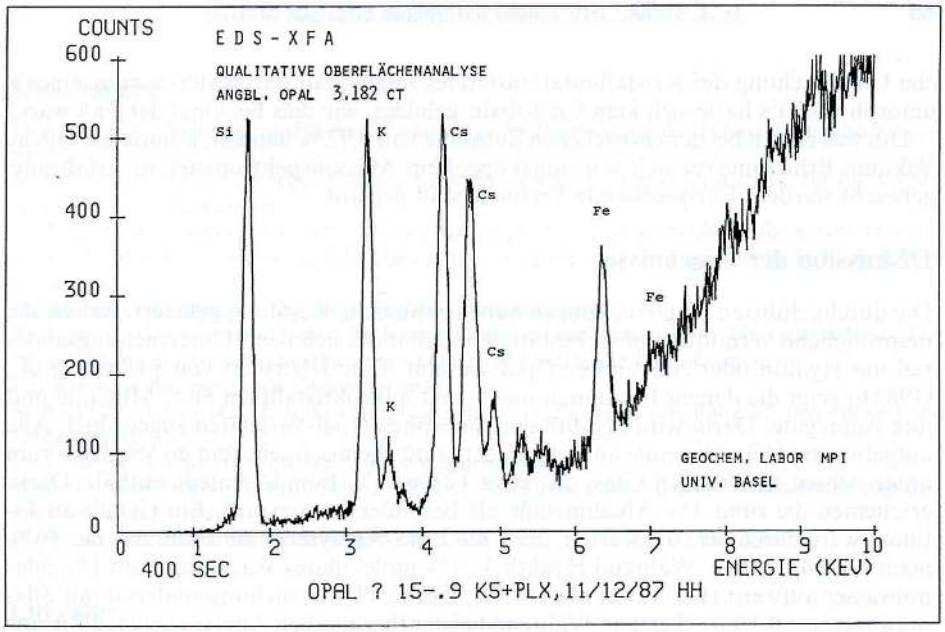

Abb. 8. Übersichtsspektrum der EDS-XRF vom irisierenden Glas. Bei den gewählten Gerätebedingungen treten nur die mittelschweren Elemente auf.

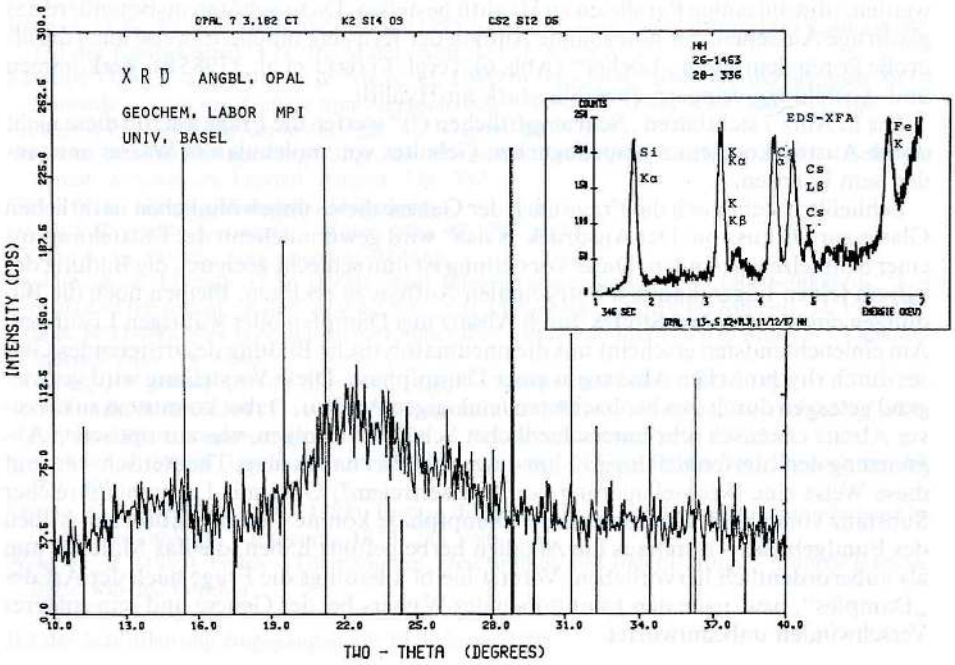

Abb. 9. Röntgen-Diffraktometer-Diagramm des irisierenden Glases von Mexiko. Das Diffraktogramm zeigt keine Beugungsmaxima kristalliner Substanzen, d.h. es belegt den amorphen Charakter der Probe. Der Kasten oben rechts ist das eingeblendete EDS-XFA-Übersichtsspektrum von Abb. 8.

che Untersuchung des Kristallinitätszustandes zeigte, daß das Material immer noch amorph war. Es hatte sich kein Cristobalit gebildet, wie dies bei Opal der Fall wäre.

Um was es sich bei der entwichenen Substanz von 0,92 % handelt, könnte mit einem Vakuum-Erhitzungsversuch mit angekoppeltem Massenspektrometer in Erfahrung gebracht werden. Entsprechende Versuche sind geplant.

Diskussion der Ergebnisse

Die durchgeführten Untersuchungen haben zahlreiche Resultate geliefert, welche die ursprüngliche Vermutung nicht bestätigten, es handle sich beim Untersuchungsmaterial um Hyalith oder eine andere Opal-Varietät. Eine Übersicht von FLÖRKE et al., (1985 b) zeigt die derzeit bekannten nicht- und mikrokristallinen SiO_2 Minerale und ihre Aggregate. Darin wird Hyalith den amorphen Opal-Varietäten zugeordnet. Alle aufgeführten SiO_2-Minerale und -Aggregate sind chemisch sehr rein im Vergleich zum untersuchten irisierenden Glas, das etwa 12 Gew.-% fremde Anteile enthält. Darin erscheinen die rund 3 % Alkalimetalle als besonders interessant. Ein Gehalt an Lithium wäre durchaus zu erwarten, denn die EMS-Analysensumme läßt mit nur 96 % noch rund 4 % offen. Während Hyalith 3–5 % molekulares Wasser und um 1 % Silanolwasser aufweist (FLÖRKE et al., 1985 a), läßt das Untersuchungsmaterial nur Silanolwasser ($< 0{,}1$ %) erkennen. Während bei der thermischen Analyse bei Hyalith eine maximale Reaktion im Gewichtsverlust typischerweise bei 275 °C ablaufen kann, reagiert das irisierende Glas erst ab 920 °C. Auch aufgrund dieser wesentlichen Unterschiede muß das irisierende Glas als außerhalb der SiO_2-Minerale stehend angesehen werden, obwohl einige Parallelen zu Hyalith bestehen. Dazu gehören insbesondere das glasartige Aussehen, der botryoidale Aufbau der Krusten, möglicherweise auch die als große Poren deutbaren „Löcher" (Abb. 6), vergl. FLÖRKE et al., (1985 b). Vorkommen und Ausbildung erinnern ebenfalls stark an Hyalith.

Die in Abb. 7 sichtbaren „Schrumpfrißchen (?)" werfen die Frage auf, ob diese nicht durch Austrocknen eines ursprünglichen Gehaltes von molekularem Wasser entstanden sein könnten.

Schließlich steht noch die Frage nach der Genese dieses ungewöhnlichen natürlichen Glases zur Diskussion. Der Ausdruck „Glas" wird gewöhnlich mit der Entstehung aus einer Schmelze verbunden. Diese Vorstellung ist nun schlecht geeignet, die Bildung der extrem feinen Lagen und den botryoidalen Aufbau zu erklären. Bleiben noch die Bildungen eines amorphen Stoffes durch Absatz aus Dämpfen oder wäßrigen Lösungen. Am einleuchtendsten erscheint uns die pneumatolytische Bildung des irisierendes Glases durch rhythmischen Absatz aus einer Dampfphase. Diese Vorstellung wird vorwiegend getragen durch den beobachteten feinlagigen Aufbau. Dabei konnte ein sukzessiver Absatz chemisch sehr unterschiedlicher Schichten erfolgen, was zur optischen Abgrenzung der interferenzfähigen 2 µm-Lagen geführt haben mag. Theoretisch wäre auf diese Weise eine Wechsellagerung von (wasserfreiem?) Opal mit Lagen alkalireicher Substanz vorstellbar. Eine postulierte Dampfphase könnte – im rhyolithischen Milieu des Fundgebietes – durchaus die Alkalien herbeigeführt haben, die das Material nun als außerordentlich hervorheben. Vorerst bleibt allerdings die Frage nach der Art des „Dampfes", bzw. nach den Funktionen des Wassers bei der Genese und sein späteres Verschwinden unbeantwortet.

Danksagung

Den folgenden Personen sei für ihre Mithilfe bei der Bearbeitung des behandelten Themas gedankt:
M. DÜGGELIN, Labor für Raster-Elektronenmikroskopie der Universität Basel, für die REM- und EDS-Untersuchungen;
Prof. Dr. O. W. FLÖRKE, Institut für Mineralogie, Ruhr-Universität, Bochum, für initiale Diskussionen und Dr. H. Graetsch für NIR-Absorptionsspektren und seine gründliche fachlichen Unterstützung;
Dr. E. GÜBELIN, Meggen, für Anregung durch seine Beiträge;
Prof. Dr. R. GUGGENHEIM, Labor für Raster-Elektronenmikroskopie der Universität Basel, für Bereitstellung der Infrastrukturen seines Labors und wertvolle Diskussionen;
J. I. KOIVULA für anregende Diskussionen;
R. RICHNER, Aarau und H. W. LORENZ, Idar-Oberstein, für die Beschaffung des benötigten Probenmaterials;
Prof. Dr. H. SCHWANDER für die Mikrosonden-Analyse;
Prof. Dr. W. B. STERN für zahlreiche EDS-XRF-Spektren, Diffraktometer-Aufnahmen und der Diskussion der Arbeit;
W. WEBER, Pfäffikon, für IR-Spektren und DTA-Kurven und deren Diskussion.

Literatur

BARBOUR, J. (1964): Mexican topaz and where it comes from. – Gems & Minerals, Jan., **316**, 22–23, 61–63.
CROWNINGSHIELD, R. (1985): Gem. Trade Lab. Notes, Yellow-green opal. – Gems & Gemology, **21**, 110–111.
FLÖRKE, O. W., FLUX, S. & SCHRÖDER, B. (1985a): Hyalith vom Steinwitzhügel bei Kulmain (W-Teil des Egergrabens). – N. Jb. Miner. Abh. **151**, 1, 87–97.
FLÖRKE, O. W., GRAETSCH, H. & NIEHE, G. (1985b): Die nicht- und mikrokristallinen SiO_2-Minerale – Struktur, Gefüge und Eigenschaften. – Oesterr. Miner. Ges. **130**, 103–108.
GÜBELIN, E. (1986): Inclusions in opal. – J. Gemm. **20**, 3, 143.
GÜBELIN, E. (1987): Lightning Ridge, die Wiege der Australischen Schwarzopale. – Schweiz. Uhren- & Schmuck-Journal, August, 375–382.
GÜBELIN, E. (1988): persönliche Mitteilung.
JONES, F. T. (1952): Iris agate. – Amer. Min. **37**, 578–587.
KOIVULA, J. I. (1988): persönliche Mitteilung.
LANGER, K. & FLÖRKE, O. W. (1974): Near infrared absorption spectra (4000–9000 cm^{-1}) of opals and the role of „water" in these $SiO_2 \cdot nH_2O$ minerals. – Fortschr. Mineral. 52, 197–199.
LEIPER, H. (1965): New type of opal with spherulitic inclusions discovered in Mexico. – Lapidary Journal, June, **19**, 3, 407.
SANDERS, J. V. (1964): Colour of precious opal. – Nature, **204**, 4964, 1151–1153.
SCHWANDER, H. & GLOOR, F. (1980): Zur quantitativen Mikrosonden-Analyse von geologischen Proben mittels kombiniertem EDS/WDS. – X-Ray Spectrometry, 9, 134–137.
SINKANKAS, J. (1966): Iris-Opal from Mexico. – Journal of Gemmology and Proceedings, **10**, 100–105.
STERN, W. B. & HÄNNI, H. A. (1982): Energy dispersive X-ray spectrometry: a non-destructive tool in gemmology. – J. Gemm. **18**, 4, 285–296.
WEBSTER, R. (1983): Gems – Their sources, Descriptions and Identification. – Fourth Edition, Butterworths, London.

Bei der Schriftleitung eingegangen am 14. Februar 1989.

Anschriften des Verfassers:

Dr. H. A. Hänni, Mineralogisches Institut der Universität Basel, Bernoullistr. 30, CH-4056 Basel und Schweizerische Stiftung für Edelsteinforschung (SSEF), Löwenstr. 17, CH-8001 Zürich.