Z. Dt. Gemmol. Ges.	42	Nr. 2/3	S. 91–99	Stuttgart, September 1993

Das strahlende Blau der behandelten Topase

M. F. Hügi, Zürich

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über die Farbursache und Unterschiede der Behandlungsmethoden von blauem Topas. Blauer Topas verdankt seine Farbe Strukturfehlern, die durch den Einfluß von radioaktiver Strahlung zu sog. Farbzentren werden. Bei natürlich blau gefärbtem Topas bewirkte die Radioaktivität des Nebengesteins eine schwache bis mittlere Farbsättigung. Bei künstlich blau gefärbtem Topas kann zwischen zwei prinzipiell verschiedenen Prozessen unterschieden werden: a) Gamma- und Elektronenbestrahlung: Umwandlung von natürlich gebildeten Vorläufern zu Farbzentren; b) Neutronenbeschuß: Bildung von neuen, zusätzlichen Strukturfehlern, die als Farbzentren wirken. Die Problematik der Umwandlung von Spurenelementen zu radioaktiven Isotopen wird erläutert. Eine künstliche Behandlung läßt sich mit einfachen gemmologischen Geräten in der Regel nicht beweisen, doch kann mit Hilfe einiger aufgelisteter Indizien auf eine Behandlung geschlossen werden. Ein sicherer Nachweis einer Behandlung kann nur mit aufwendigen Labormethoden erbracht werden.

Abstract

This paper represents an overview of the causes of colour and the different treatment methods of blue topaz. Blue topaz owes its colour to structural defects, which can be turned to so-called colour centres by the influence of radioactive radiation. In case of natural blue topaz, the radioactivity of the host rock caused a weak to medium colour saturation. There are two principially different methods of artificial coloration: a) Irradiation by gamma-rays or electrons: Transformation of naturally formed precursors to colour centres; b) Bombardment with neutrons: Formation of new, additional structural defects, which act as colour centres. The risks of the transformation of trace elements into radioactive isotopes are explained. An artificial treatment usually cannot be proved by gemmological standard equipment, but with help of some hints mentioned, an artificial treatment can be supposed. A safe prove of a treatment is only possible by expensive laboratory methods.

1. Einleitung

Topas ($Al_2\{F,OH\}_2SiO_4$) ist ein typisches Mineral der Pegmatitlagerstätten, das oft in bis zu Kilogramm schweren, gut ausgebildeten Kristallen von Edelsteinqualität gefunden wird. Topas ist in fast allen Farben bekannt, am begehrtesten und bekann-

0343-7892/93/0042-0091 $ 2.25
© 1993 E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, D-70176 Stuttgart

testen sind die rosafarbenen oder goldgelben bis orangenen Steine. Man kann zwischen zwei prinzipiell verschiedenen Farbursachen beim Topas unterscheiden: a) Färbung durch Spurenelemente (z. B. Chrom im rosa Topas) und b) Färbung durch Farbzentren (z. B. gelbe und blaue Topase, vgl. Anhang I). In der letzten Zeit tauchten vermehrt leuchtend blaue Topase in großen Quantitäten auf dem Markt auf, über deren Farbursachen und Natürlichkeit der Färbung oft Unklarheit und Mißverständnisse herrschen. Es soll im folgenden versucht werden, anhand veröffentlichter Arbeiten in der gemmologischen und mineralogischen Literatur die Unterschiede zwischen natürlich blauen und künstlich bestrahlten Topasen darzulegen. Mit diesem Thema haben sich u.a. folgende Arbeiten befaßt: PETROV (1977, 1978) gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Farbursachen der Topase. Das Thema der künstlichen Farbveränderung bei Topas wird in PETROV & BEREDINSKI (1975), PETROV et al. (1977), NASSAU (1984, 1985) und in SCHMETZER (1986, 1987) beschrieben. Die Arbeiten von ASHBAUGH (1992) und CROWNINGSHIELD (1981) befassen sich mit der induzierten Radioaktivität von behandelten Topasen, HENN & BANK (1990) beschreiben den Bestrahlungsnachweis mittels Thermolumineszenz.

2. Natürlich blauer Topas

Einige Pegmatitlagerstätten (z. B. Brasilien, Burma, Tasmanien, Rußland) liefern z. T. große, natürlich blau gefärbte Topaskristalle (vgl. Abb. 1). Nach den farblosen Kristallen sind die bläulichen Farbtönungen die am meisten verbreiteten natürliche Farben von Topas (WEBSTER, 1983). Die Farbsättigung ist im Gegensatz zu den künstlich bestrahlten blauen Topasen meist schwach, deutlich hellblau gefärbte Topase sind relativ selten.

Die blaue Farbe von Topas entsteht wie folgt (NASSAU, 1984): Die für die Entstehung von Farbzentren (vgl. Anhang I) erforderlichen Gitterdefekte werden durch natürliche Prozesse während des Kristallwachstums gebildet. Die Art und Häufigkeit dieser Gitterstörungen sind von den chemischen und physikalischen Wachstumsbedingungen abhängig und somit von Fundort zu Fundort verschieden. Die natürliche radioaktive Strahlung des Nebengesteins, bedingt durch den Zerfall radioaktiver Spurenelemente wie Uran, Thorium und eines natürlichen radioaktiven Isotops von Kalium (^{40}K), bewirkt im Topas die Umwandlung von Gitterdefekten (Vorläufer) zu Farbzentren. Dabei entstehen hauptsächlich zwei Typen von Farbzentren:

a) ein blaues, stabiles Farbzentrum,
b) ein braunes, instabiles Farbzentrum.

Das instabile braune Farbzentrum wird wegen der hohen Temperaturen, die während und nach der Bildung des Topaskristalls im Erdinnern herrschen, gar nicht gebildet oder unmittelbar zerstört. Das „überlebende" blaue Farbzentrum ist somit für die blaue Farbe verantwortlich.

Die Farbsättigung hängt von zwei Faktoren ab:

a) Von der Anzahl der Gitterdefekte,
b) Von der Intensität und Dauer der Strahlung (= Dosis).

Bei den meisten, natürlich blauen Topasen ist nur ein Teil der Gitterdefekte (Vorläufer des Farbzentrums) zu Farbzentren umgewandelt (Abb. 2). Jede zusätzliche Be-

strahlung ist deshalb in der Lage, die Farbsättigung zu erhöhen, bis alle Vorläufer zu Farbzentren umgewandelt sind. Dies bildet somit die Voraussetzung für die künstliche Bestrahlungsverfärbung, die im folgenden genauer erläutert wird.

3. Blaue Topase durch künstliche Behandlung

Die künstliche Blaufärbung von Topas durch Bestrahlung ist schon seit den fünfziger Jahren bekannt (POUGH, 1957). Im folgenden werden zwei verschiedene Typen von künstlichen Bestrahlungen unterschieden:

– **Bestrahlungen**, die auf der Umwandlung von natürlichen Gitterdefekten basieren. Für die Bestrahlung werden zwei Energiequellen verwendet: Gammastrahlung und Bestrahlung mit Elektronen. Obwohl „Elektronenbestrahlung" ein Beschuß mit Atomteilchen (vgl. Anhang II) ist, wird diese Methode mit der Gammabestrahlung zusammengefaßt, da sie wie diese auf die Elektronenkonfiguration des Atoms wirkt und im Gegensatz zum Neutronenbeschuß den Atomkern unverändert läßt.

– **Bombardieren mit Neutronen** zur Bildung von zusätzlichen, künstlichen Gitterdefekten.

3.1 Gamma- und Elektronenbestrahlung

Gammastrahlung ist eine sehr kurzwellige und energiereiche elektromagnetische Strahlung, die u. a. durch den Zerfall von radioaktiven Elementen freigesetzt wird. Die gebräuchlichsten Quellen, die für die Bestrahlung von Topasen verwendet werden, sind die radioaktiven Isotope des Cobalts ^{60}Co und des Caesiums ^{137}Cs. Gammastrahlen durchdringen die Topase gleichmäßig und bewirken eine homogene Färbung. Das Material wird durch die Bestrahlung nicht erhitzt. Dadurch weisen die Steine oft einen deutlichen Braunton auf, da neben dem stabilen blauen auch das instabile braune Farbzentrum gebildet wurde. Eine folgende Erhitzung auf 200–300 °C bildet dieses braune Farbzentrum zum Vorläufer zurück, so daß die durch das blaue Farbzentrum verursachte Farbe zurückbleibt. Die maximale Farbsättigung ist dann erreicht, wenn alle im Topas latenten Farbzentren zu effektiven Farbzentren umgewandelt worden sind; jede zusätzliche Strahlendosis bewirkt keine Farbvertiefung mehr (Abb. 3).

Elektronen sind negativ geladene Elementarteilchen, welche die Hülle um den positiv geladenen Kern eines Atoms bilden. In einem sogenannten Linearbeschleuniger werden Elektronen beschleunigt und als energiereicher Strahl auf ein Ziel gerichtet. Der einzige Vorteil der Elektronenstrahlen gegenüber Gammastrahlen besteht darin, daß mehr Gitterdefekte zu Farbzentren umgewandelt werden können und somit eine tiefere Farbsättigung entsteht. Dem gegenüber stehen einige Nachteile:

a) Die Elektronenbestrahlung bewirkt eine starke Erhitzung, deshalb müssen die Topase während der Behandlung mit Wasser gekühlt werden, um Hitzeschäden vorzubeugen. Durch Temperaturunterschiede zwischen der gekühlten Oberfläche und dem erhitzten Inneren des Kristalls kann Rißbildung entstehen, die den Stein wertlos machen kann (SCHMETZER, 1986).

b) Die Elektronen besitzen nur eine geringe Eindringtiefe, deshalb entsteht eine Farbkonzentration an der Oberfläche des Topas.

c) Werden energiereichere Elektronenstrahlen verwendet, um eine größere Eindringtiefe zu erreichen, so kann der Topas radioaktiv werden. Diese Radioaktivität klingt jedoch nach wenigen Tagen vollständig ab.

d) Da die Elektronen geladene Teilchen sind, können im Topas Strukturstörungen durch elektrische Entladung hervorgerufen werden. Es können gezackte oder ver-

Abb. 1

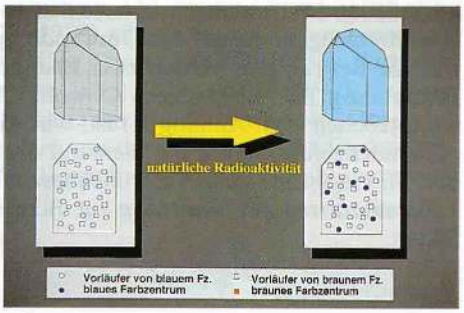

Abb. 2

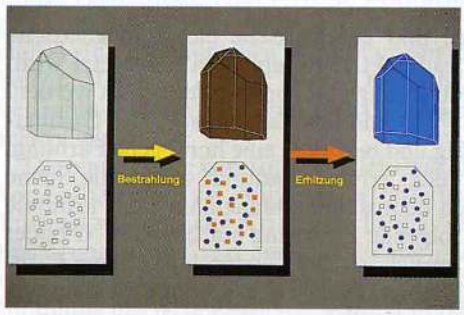

Abb. 3

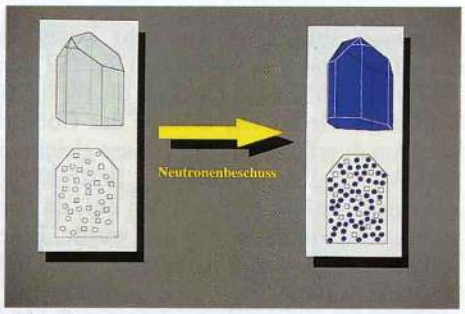

Abb. 4

Abb. 5

Abb. 6

zweigte Linienmuster entstehen, die von NASSAU (1985) als „internal lightning" bezeichnet werden und das Aussehen des Steins deutlich beeinträchtigen können.
e) Die Bestrahlung in Linearbeschleunigern ist wesentlich teurer als die Gammabestrahlung oder Neutronenbombardierung. Aus diesem Grund sind elektronenbestrahlte Topase wesentlich seltener anzutreffen als die neutronenbehandelten.

3.2 Neutronenbombardierung: Künstliche Umwandlung von Hauptelementen zu Farbzentren

Neutronen sind elektrisch ungeladene Teilchen des Atomkerns, die im Vergleich zu den leichten Elektronen sehr massenreich sind. Neutronen werden durch Kernspaltung im Atomreaktor freigesetzt; diese Neutronen verändern den Kern eines getroffenen Atoms und können so zur Farbveränderung von Topas verwendet werden. Da es sich bei den Neutronen um massenreiche, beschleunigte Teilchen und nicht um eine elektromagnetische Strahlung handelt, ist es korrekt, die Bezeichnung „Neutronenbombardierung" oder „Neutronenbeschuß" und nicht „Neutronenbestrahlung" zu verwenden.

Im Gegensatz zu den Gamma- und Elektronenbestrahlungen, die aus den natürlich vorhandenen Vorläufern Farbzentren bilden, produziert der Neutronenbeschuß im Topas **neue Gitterdefekte**, die durch die ebenfalls im Reaktor vorhandene Gammastrahlung zu Farbzentren werden (Abb. 4). Es wird angenommen, daß das im Topas vorhandene Hauptelement Silizium teilweise zu Phosphor umgewandelt wird (SCHMETZER, 1987). Die künstliche Umwandlung von Hauptelementen stellt im Gegensatz zur Gammabestrahlung einen in der Natur unbekannten Prozeß dar. Die Farbsättigung ist von der Dosis des Neutronenbeschußes abhängig und kann beliebig hoch sein (Abb. 5). Der Neutronenbeschuß von Topas bewirkt nicht nur die gewünschte Bildung von Farbzentren, sondern bewirkt u. a. auch die unerwünschte Umwand-

◄ Abb. 1. Natürlich blauer Topaskristall mit Rauchquarz und Orthoklas. Ural (verm. Mursinka), Russland. Coll. Naturhistorisches Museum Bern. Länge des Kristalls ca. 8 cm.
Abb. 2. Schematische Darstellung einer natürlichen Strahlungsverfärbung: durch die natürliche Radioaktivität werden Vorläufer teilweise zu blauen Farbzentren umgewandelt.
Abb. 3. Schematische Darstellung der Blaufärbung durch Gamma- bzw. Elektronenbestrahlung: die maximale Farbsättigung ist dann erreicht, wenn alle Vorläufer von blauen und braunen Farbzentren zu effektiven Farbzentren umgewandelt worden sind. Die anschließende Erhitzung zerstört die braunen Farbzentren; der Stein wird blau. Legende s. Abb. 2.
Abb. 4. Vereinfachte Darstellung der Blaufärbung durch Bombardierung mit Neutronen: durch die Umwandlung von Silizium zu Phosphor werden neue blaue Farbzentren gebildet. Legende s. Abb. 2.
Abb. 5. Vier geschliffene Topase, mit unterschiedlich starker Dosis von Neutronenbombardierung. Der farblose Stein links wurde nicht bestrahlt; die höchste Dosis erhielt der dunkelblaue Stein rechts. Mit Neutronenbeschuß können beliebig hohe Farbsättigungen erreicht werden. Totalgewicht 4,20 ct.
Abb. 6. Zwei Rohkristalle, links unbehandelt, rechts durch Kombination von verschiedenen Bestrahlungsarten und Erhitzung behandelt. Derartige kommerziell erwünschte Blautöne kommen in der Natur nicht vor. Höhe des unbehandelten Kristalls ca. 2 cm.

lung von natürlichen Spurenelementen zu radioaktiven Isotopen. Derartige neu gebildete Radioisotope, besonders die von Scandium (^{46}Sc) und Tantal (^{182}Ta), haben Halbwertszeiten von 84 bzw. 115 Tagen; demzufolge kann ein bestrahlter Topas je nach Konzentration dieser Isotope noch nach Jahren eine meßbare Radioaktivität aufweisen (ASHBAUGH, 1992).

Die Konzentration der Spurenelemente, die beim Neutronenbeschuß zu Radionukliden umgewandelt werden, ist abhängig von den chemischen Bildungsbedingungen während des Kristallwachstums und somit von Fundort zu Fundort verschieden. So weisen z. B. bestrahlte Topase aus Nigeria eine wesentlich langlebigere Residualradioaktivität auf als Topase z. B. aus Sri Lanka und müssen deshalb ca. 4 Jahre unter Verschluß gehalten werden, bis sie für den Handel freigegeben werden können (HÄNNI, pers. Mitt.).

Ob und wie gefährlich die in einigen Fällen noch vorhandene Radioaktivität ist, hängt von der Intensität des Neutronenbeschusses und der Dauer der Abklingzeit ab. Allgemein kann gesagt werden, daß jede unnötige Strahlenbelastung zu vermeiden ist und daß neutronenbestrahlte Topase, die noch radioaktiv sind, für Schmuckzwecke gänzlich ungeeignet sind. Ebenfalls muß bedacht werden, daß der Handel mit radioaktiven Substanzen gesetzlich geregelt ist und daß beim Auftreten von radioaktiven Steinen mit einer starken Verunsicherung der Käuferschaft zu rechnen ist, die sich auf den ganzen Edelsteinhandel negativ auswirken kann.

4. Erkennungs- und Unterscheidungsmöglichkeiten der blauen Topase

Die oben aufgeführten künstlichen Bestrahlungsarten werden oft kombiniert, um den gewünschten Farbton zu erhalten. Um die zu bestrahlende Menge möglichst klein zu halten, werden die Rohtopase ebauchiert (vorgeschliffen), bevor sie strahlenbehandelt werden. Die so gefärbten Steine werden unter verschiedenen Handels- und Fantasiebezeichnungen für die Farbe auf den Markt gebracht (z. B. Electric Blue, Maxi Blue, Swiss Blue etc., Abb. 6). Es wäre falsch zu glauben, daß bestrahlte Topase nur vereinzelt auf den Markt gelangen: Pro Jahr werden mehrere Tonnen Rohmaterial bestrahlt und verarbeitet. Dank dem spektakulären Aussehen, der guten Verfügbarkeit und dem geringen Preis (oft nur wenig über dem Schleifwert) finden bestrahlte Topase vor allem in der Massenfabrikation von Schmuck Verwendung. Für den Händler von solchen Steinen ist es wichtig zu wissen,

a) ob die Steine noch radioaktiv sind (läßt sich mit einem Geigerzähler nachweisen),
b) daß die künstliche Behandlung gemäß CIBJO-Nomenklatur (Art. 5 a) ausdrücklich erwähnt werden muß, also „bestrahler Topas" und nicht nur „Topas" oder „blauer Topas".

4.1 Erkennungsmöglichkeiten mit einfachen Mitteln

Die Unterscheidung zwischen natürlich blauen und bestrahlten Topasen ist deshalb schwierig, weil, wie oben erwähnt, die Farbe in beiden Fällen durch Bestrahlung zustande gekommen ist. Ein schlüssiger Beweis ist mit den üblichen Instrumenten

des Juweliers **nicht** zu erbringen, doch gibt es einige deutliche Hinweise, die eine Beurteilung der Farbechtheit begünstigen:

a) Natürlich blaue Topase weisen in der Regel nur eine geringe bis mittlere Farbsättigung auf. Der Farbton ist meistens ein reines Hellblau, tintenblaue oder türkisfarbene Steine kommen in der Natur nicht vor.

b) Bei künstlich bestrahlten Topasen wird in der Regel versucht, eine starke Farbsättigung und auffallende Farbtöne zu erreichen. Hellblaue Farben, wie sie in der Natur vorkommen, sind auch künstlich herzustellen; sie werden gelegentlich als Aquamarinimitation verwendet.

c) Obwohl die meisten neutronenbestrahlen Topase keine Radioaktivität mehr aufweisen, wenn sie auf den Markt gelangen, gibt es Einzelfälle, die eine meßbare Strahlung aussenden. Der Nachweis dafür ist mit einem Geigerzähler zu erbringen; einfache Modelle sind für einige hundert Mark im Fachhandel erhältlich.

d) Bei elektronenbestrahlten Topasen können sich aufgrund großer Wärmedifferenzen und elektrischen Entladungen (NASSAU, 1985; SCHMETZER, 1986) innere Strukturen in Form von milchigen Trübungen oder Zick-Zack-Linien bilden, die im Mikroskop sichtbar sind. Vielfach sind bestrahlte Topase jedoch frei von Einschlüssen.

e) Die Lichtbrechungs- und Dichtewerte werden durch die Bestrahlung nicht verändert, da sie vom Fluor- bzw. Hydroxylgehalt im Kristall abhängen. Eine Behandlung läßt sich daher weder mit dem Refraktometer noch durch hydrostatisches Wägen nachweisen.

4.2 Labormethoden

Es ist möglich, anhand der nachfolgend erwähnten Methoden einen Beweis für die Farbechtheit eines blauen Topas zu erbringen. In der Praxis wird dies jedoch selten verlangt, da der Aufwand für die Untersuchung in der Regel den Wert des Steins bei Weitem übersteigt.

a) Gammaspektroskopie: In Probenkammern, die von der Umgebungsstrahlung speziell abgeschirmt sind, können kleinste Intensitäten von radioaktiver Strahlung erfaßt werden. Spezielle Detektoren erfassen nicht nur die Intensität, sondern auch die Energie der Strahlung und identifizieren somit das strahlende Isotop (ASHBAUGH, 1992).

b) Spektralphotometrie: Nach SCHMETZER (1986) werden durch die verschiedenen Bestrahlungsarten auch verschiedene Farbzentren aktiviert, wodurch bestrahlte Steine einen unterschiedlichen Pleochroismus zeigen. Besonders wird die tief-violette pleochroitische Farbe bei neutronenbestrahlten Topasen erwähnt, die bei den anderen Bestrahlungsarten fehlt.

c) Thermolumineszenz: Farbzentren können durch Erhitzung wieder zu Vorläufern (latente Farbzentren) umgewandelt werden, was zu einer Entfärbung des Steins führt. Dieser Prozeß ist von Lichtemmission begleitet, der sog. Thermolumineszenz. Die Art, Stärke und Dauer der Thermolumineszenz geben Aufschluß über die Bestrahlungsart und Dosis. Diese Methode erlaubt eine sichere Bestimmung einer Behandlung (HENN & BANK, 1990), ist jedoch sehr aufwendig und bedingt eine Probenentnahme (Abrieb an der Rundiste) vom Stein.

5. Danksagung

Ich danke Herrn Dr. H. HÄNNI für die Anregung dieser Arbeit und für die Durchsicht des Manuskripts. Herrn M. OSTRO, Ostro Gems Int. Co. Ltd., danke ich für die Überlassung von behandelten Topasen. Dr. B. HOFMANN vom Naturhistorischen Museum Bern ermöglichte die Aufnahme des naturfarbenen Topas.

6. Literatur

ASHAUGH III, C. E. (1992): Gamma-Ray Spectroscopy to Measure Radioactivity in Gemstones. – Gems & Gemology **28**, 104–111.

CROWNINGSHIELD, R. (1981): Irradiated Topaz and Radioactivity. – Gems & Gemology **17**, 215–217.

HENN, U. & BANK, H. (1990): Ein Beitrag zur Unterscheidung natürlich blauer und durch künstliche Bestrahlung blau gefärbte Topase anhand von Thermolumineszens-Untersuchungen. – Z. Dt. Gemmol. Ges. **39**, 65–72.

NASSAU, K. (1984): Gemstone Enhancement. – London, Butterworths.

NASSAU, K. (1985): Altering the Color of Topaz. – Gems & Gemology **21**, 26–34.

PETROV, I. (1977): Farbuntersuchungen an Topasen. – N. Jb. Min. Abh. **130**, 288–302.

PETROV, I. (1978): Farbe, Farbursachen und Farbveränderungen bei Topasen. – Z. Dt. Gemmol. Ges. **27**, 3–11.

PETROV, I. & BEREDINSKI, W. (1975): Untersuchung künstlich farbveränderter blauer Topase. – Z. Dt. Gemmol. Ges. **24**, 73–80.

PETROV, I., BEREDINSKI, W. & BANK, H. (1977): Bestrahlte gelbe und rotbraune Topase und ihre Erkennung. – Z. Dt. Gemmol. Ges. **26**, 148–151.

POUGH, F. H. (1957): The Coloration of Gemstones by Electron Bombardment. – Z. Dt. Edelsteinkunde **20**, 71.

SCHMETZER, K. (1986): Färbung und Bestrahlungsschäden in elektronenbestrahlten blauen Topasen. – Z. Dt. Gemmol. Ges. **35**, 27–28.

SCHMETZER, K. (1987): Irradiation-induced Blue Color in Topaz. – Naturwissenschaften **74**, 136–137.

WEBSTER, R. (1983): Gems, Their Sources, Descriptions and Identification. 4th ed. – London, Butterworths.

Bei der Schriftleitung eingegangen am 11. Februar 1993.

Anschrift des Verfassers:
Dipl.-Min. MICHAEL F. HÜGI, FGA, SSEF Schweizerisches Gemmologisches Institut, Löwenstr. 17, CH-8001 Zürich.

Anhang I
Was sind Farbzentren?

Farbzentren sind Fehlstellen im Kristallgitter (z. B. Strukturfehler oder Fremdionen), die durch Bestrahlung farbaktiv werden. Ein Farbzentrum entsteht somit in zwei Stufen:

Erstens: Entstehung von Gitterdefekten. Dieser Prozeß ist in der Regel natürlich und wird durch Bildungsbedingungen während des Kristallwachstums verursacht. Da Gitterdefekte allein noch keine Färbung verursachen, werden sie **Vorläufer** eines Farbzentrums genannt.

Zweitens: Energiereiche, d.h. radioaktive Strahlung ist in der Lage, den Vorläufer in ein **Farbzentrum** umzuwandeln. Ein möglicher Prozeß, vereinfacht dargestellt, besteht darin, daß ein Elektron aus der Elektronenhülle eines Ions im Kristallgitter durch die Strahlung herausgeschlagen und vom Gitterdefekt eingefangen wird. Das eingefangene Elektron ist in der Lage, gewisse Wellenlängen des sichtbaren Lichts, d.h. Farben zu absorbieren; aus dem Vorläufer ist ein Farbzentrum entstanden.

Einwirkung von Energie (Wärme- oder Lichtstrahlung) ist in der Lage, aus den Farbzentren wieder Vorläufer zu machen, d.h. den Stein zu entfärben. Sind dazu Temperaturen notwendig, die weit über denen liegen, denen ein Stein im Alltag ausgesetzt ist, so spricht man von stabilen Farbzentren. Instabile Farbzentren hingegen können schon durch normale Raumtemperatur oder gar durch Sonnenlicht zerstört werden.

Anhang II
Erläuterung einiger Elementarteilchen

Atom
Elektrisch neutrales Einzelteilchen eines chemischen Elements. Am Aufbau des Atoms sind drei Elementarteilchen beteiligt: Protonen, Neutronen und Elektronen.

Protonen
Protonen sind elektrisch positiv geladene, massenreiche Teilchen, die zusammen mit den Neutronen den Kern des Atoms bilden. Die Anzahl der Protonen bestimmt die Identität des Elements und ist deshalb pro Element immer gleich.

Neutronen
Neutronen sind elektrisch neutrale, massenreiche Teilchen im Kern des Atoms. Die Anzahl der Neutronen bildet zusammen mit der Anzahl der Protonen die Masse des Atoms. Die Anzahl der Neutronen kann innerhalb eines Elements variieren, deshalb kann ein Element aus Atomen von verschiedenen Massen bestehen (Isotope). Neutronenstrahlung entsteht bei der Kernspaltung im Atomreaktor, bei der Neutronen freigesetzt werden.

Elektronen
Elektronen sind elektrisch negativ geladene, sehr leichte Teilchen, die eine Hülle um den Atomkern bilden. Damit ein Atom elektrisch neutral ist, ist die Anzahl der Elektronen gleich der Anzahl der elektrisch positiven Protonen im Kern.

Isotope
Besteht ein Element aus Atomen, die eine unterschiedliche Anzahl von Neutronen aufweisen und somit ein unterschiedliches Atomgewicht (= Massenzahl) haben, so spricht man von Isotopen eines Elements. Die Massenzahl wird oben links vom Elementsymbol geschrieben. So hat z. B. Kohlenstoff drei natürliche Isotope: ^{12}C (6 Protonen + 6 Neutronen); ^{13}C (6 P. + 7 N.); ^{14}C (6 P. + 8 N.). Man unterscheidet zwischen stabilen Isotopen und instabilen Isotopen; letztere zerfallen unter Aussendung von radioaktiver Strahlung.