

# EDELSTEINE DER BERYLL-GRUPPE

Dr. H. A. Hänni, FGA

Schweizerische Stiftung für Edelstein-Forschung SSEF, Zürich

*La traduction française de cet article paraîtra dans le prochain numéro.*

**Von der Mineralart Beryll gelten die Varietäten Smaragd und Aquamarin als die bekanntesten. Aber auch gelbe, rote und farblose Varietäten können als Edelsteine angetroffen werden (Abb. 1). Dieser Artikel soll einen Überblick geben über Gemeinsamkeiten und Unterschiede innerhalb der Beryll-Gruppe.**

## Aufbau und Zusammensetzung

Das Kristallgitter von Beryll ist aufgebaut aus den Elementen Beryllium (Be), Aluminium (Al), Silizium (Si) und Sauerstoff (O). Die Ionen dieser Elemente sind in der Weise räumlich angeordnet, dass ein Kristall mit hexagonaler Symmetrie entsteht. Dabei sind  $\text{Si}_6\text{O}_{18}$ -Ringe die wichtigsten Bauelemente. In der horizontalen Ebene werden solche Ringe durch Be- und Al-Ionen miteinander verbunden. Die Ringstrukturen aus 6  $\text{SiO}_4$ -Tetraedern begründen die hexagonale Symmetrie der Mineralart Beryll. Mit der theoretischen Formel  $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$  kann man eine annähernde Angabe über die chemische Zusammensetzung von Beryll machen. Natürliche Berylle enthalten jedoch noch weitere, unterschiedliche Elemente in kleinen Mengen. Die Arten und Mengen solcher Fremdelemente können auf die Entstehungsart bzw. das jeweilige Muttergestein der Berylle hinweisen.

Betrachtet man das Kristallgitter (Abb. 2) so erkennt man, dass die  $\text{Si}_6\text{O}_{18}$ -Ringe übereinander zu liegen kommen und sich durch diese Stapelung Kanäle bilden. Diese sind parallel zur kristallographischen c-Achse, der Längsachse der Kristalle. Die Breite der Kanäle ist gross genug, dass in ihnen auch grössere Ionen und Moleküle wie  $\text{H}_2\text{O}$  oder  $\text{CO}_2$  untergebracht werden können.

Solche Kanäle sind nicht die einzigen Stellen in der Beryll-Struktur, wo fremde, nicht zur theoretischen Formel gehörende Ionen auftreten können. Das Prinzip der Ersetzbarkeit (Substitution) kann bei natürlichen Beryllen alle Gitterpositionen zu einem gewissen Ausmass betreffen. Für die Gemnologie sind diejenigen Substitutionen von Bedeutung, die einen Einfluss auf die Farbe oder auf die Bestimmungsgrössen haben. Allgemein kann beobachtet werden, dass der Einbau fremder Elemente eine erhöhende Wirkung auf die Dichte und die Lichtbrechung von Beryll ausübt. Dabei bestimmen die Bildungsumstände, welche und wieviel an Idealformel-fremden Ionen ins Kristallgitter eingebaut werden.

## Physikalische Daten von Beryll

Als physikalische Daten können diejenigen Messgrössen bezeichnet werden, die mit physikalischen Methoden ermittelt werden. Sie ergeben sich direkt aus der chemischen Zusammensetzung und der Kristallstruktur. Alle Berylle kristallisieren hexagonal, Unterschiede zwischen den verschiedenen Varietäten sind nur in der chemischen Variabilität begründet. Die Messgrössen variieren daher stark mit dem Gehalt an Wasser, Alkalien und anderen Idealformel-fremden chemischen Elementen. Von ihnen werden besonders die Dichte, die Lichtbrechungen und die Doppelbrechung beeinflusst. Diese physikalischen Daten sind die wichtigsten gemmologischen Bestimmungsgrössen. Bedingt durch das Auftreten chemischer Verunreinigungen haben daher nicht alle Berylle die gleichen gemmologischen Bestimmungsgrössen.

## Physikalische Daten der Beryll-Gruppe

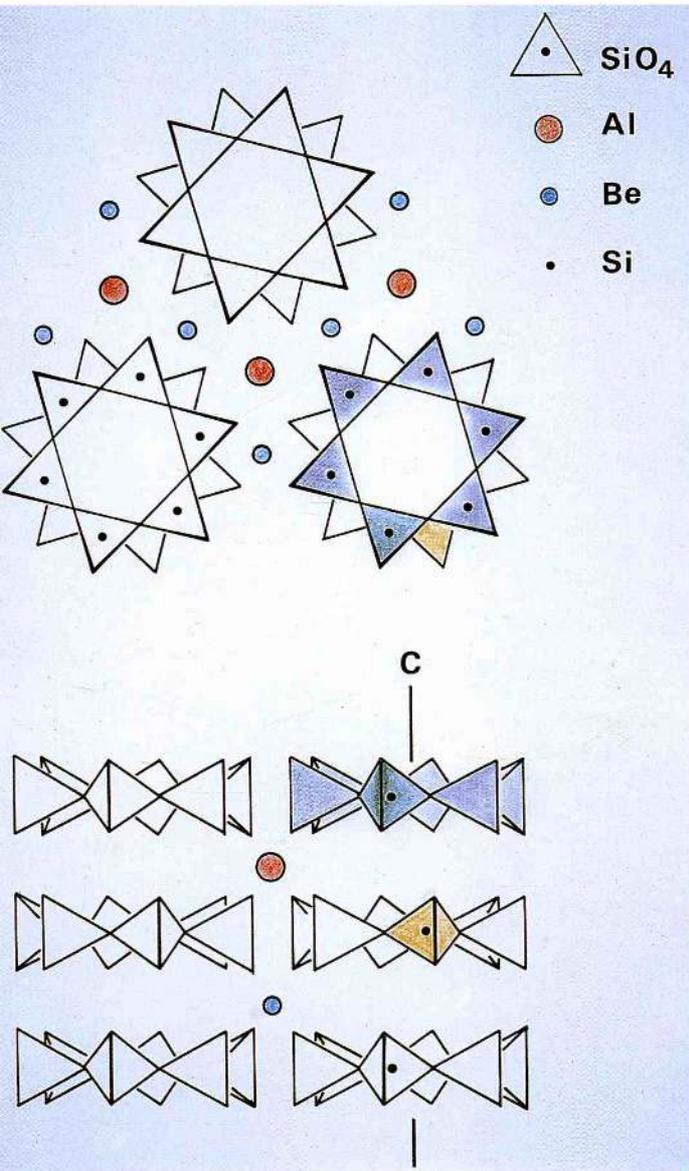
Beryll ist optisch einachsig mit negativem Vorzeichen  
Lichtbrechungen:  $n_o$  1.566–1.602  $n_e$  1.562–1.594  
Doppelbrechung:  $n_e - n_o$  –0.004 – –0.008  
Dichte:  $d$  2.68–2.90  $\text{g/cm}^3$   
Härte: H 7 $\frac{1}{2}$ –8 (Mohs)  
Spaltbarkeit: # schwach, parallel zur Basis

## Farbursachen bei Beryll

Einzelne Gitterplätze von Aluminium-Ionen können bei der Kristallisation leicht durch fremde Metall-Ionen besetzt werden. Diese teilweise Substitution des Al durch Cr, V oder Mn hat eine färbende Wirkung auf den im reinen Zustand farblosen Beryll. Wir treffen hier dieselben farbgebenden Elemente wie bei vielen anderen Silikatmineralien. Die verschiedenen farbigen Abarten bezeichnet man als Varietäten, und diese besitzen jeweils eigene Namen (Abb. 3).

## Varietätsnamen und Farbursachen (vereinfachte Darstellung)

$\text{Al}^{3+}$	farblos	→	Goshenit
$\text{Fe}^{2+}$	blau	→	Aquamarin
$\text{Fe}^{3+}$	gelb	→	Goldberyll
$\text{Cr}^{3+}$	grün	→	Smaragd Typ I
$\text{V}^{3+}$	grün	→	Smaragd Typ II
$\text{Mn}^{2+}$	rosa	→	Morganit
$\text{Mn}^{3+}$	rot	→	Bixbit



1

Abb. 1 Beryllkristalle der verschiedenen Farbvarietäten, vorwiegend von prismatischer Ausbildung, jedoch auch pyramidal oder als polykristalline Verwachsungen.

Abb. 2 Schematische Darstellung der Kristallstruktur von Beryll.  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder bilden Sechser-Ringe, die übereinander gestapelt sind und Kanäle aufbauen. Be- und Al-Ionen liegen zwischen den Ringen. Die Kristall-Hauptachse (c) verläuft in Richtung der Kanäle.

Abb. 3 Facettierte Berylle der Varietäten Smaragd, Aquamarin, Goldberyll, Heliodor, Morganit, roter Beryll, Goshenit.

Abb. 4 Aquamarinkristall von Jos, Nigeria. Er zeigt im Innern eine durch Auflösung entstandene frühere Oberfläche von unebener Beschaffenheit. Der Kristall ist wieder zur vollen prismatischen Form ausgewachsen.

Abb. 5 Cabochons aus undurchsichtigen Beryllen: Katzenaugen von Aquamarin (Kenya), Goldberyll (Brasilien), Smaragd (Kolumbien) und ein Trapiche-Smaragd (Kolumbien), der eine regelmäßige Parallel-Verwachsung von 6 bzw. 7 Kristallen darstellt.

Abb. 6 Dreiphasen-Einschluss in einem kolumbischen Smaragd, bestehend aus wässriger Lösung, einer Gasblase und einem Salzkristall. Vergrößerung ca.  $100\times$ .

Abb. 7 Einschlussbild eines synthetischen Smaragds, nach einem Flussmittel-Verfahren hergestellt (Chatham). Das kristallisierte Flussmittel füllt feine Röhren und Parzellen aus und enthält gelegentlich Schrumpfbälchen. Vergrößerung ca.  $120\times$ .

Abb. 8 Synthetische Smaragde aus der UdSSR, nach dem Hydrothermal-Verfahren hergestellt. Der grösste Stein wiegt etwa 3 ct.

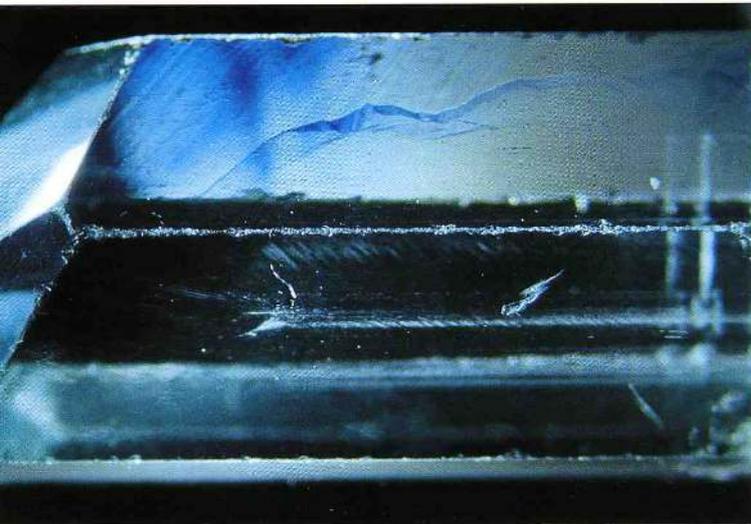
2



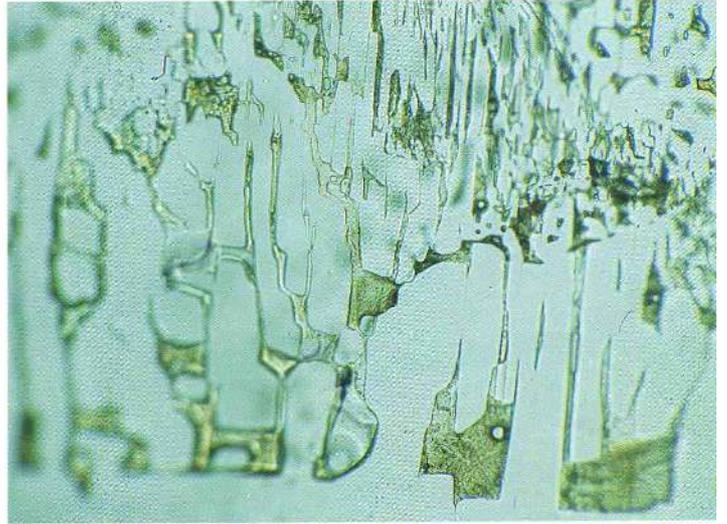
3



6



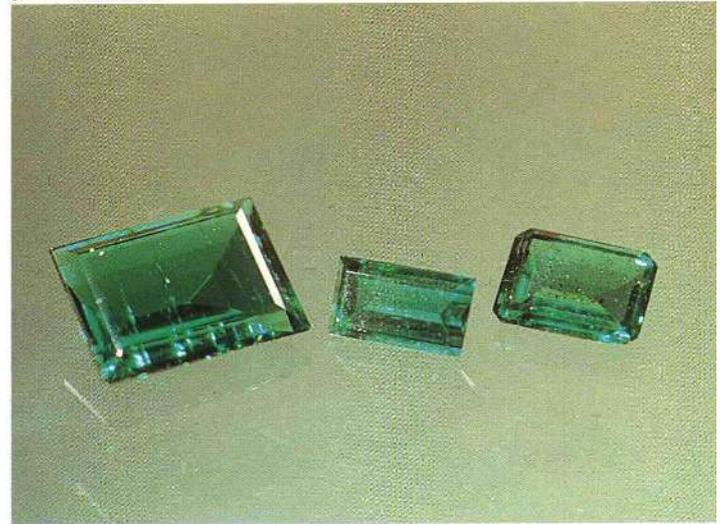
4



7



5



8

Mischungen zwischen den einzelnen Möglichkeiten sind häufig und führen zu Mischfarben. Als Beispiele sind grünlichgelber Heliodor ( $\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+}$ ) und bläulicher Smaragd ( $\text{Cr}^{3+} + \text{Fe}^{2+}$ ) verbreitet anzutreffen. Die meisten kolumbianischen Smaragde sind Mischtypen, denn sie enthalten Chrom und Vanadium, die beide eine grüne Farbwirkung erzielen. Smaragde aus Zambia sind oft blaugrün, eine chemische Untersuchung zeigt denn auch Fe und Cr als farbgebende Spurenelemente. Diese Smaragde stellen daher Mischungen zwischen Aquamarin und Smaragd dar.

Eine weitere Farbursache stellen Elektronen-Übergänge zwischen einzelnen Ionen dar (engl. charge transfer). Bei Beryll sind solche Übergänge zwischen  $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$  (gelb) und  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$  (blau) beschrieben worden. Durch Bestrahlung gewisser Berylle können auch Farbzentren erzeugt werden, die blaue (Maxixe-Typ) oder gelbe Färbung bewirken (Fritsch & Rossman, 1988).

### Die natürliche Bildung von Beryll

In der Natur können Berylle entweder durch Kristallisation aus einer Schmelze, aus einer wässrigen Lösung oder durch Diffusion im kompakten Gestein entstehen. In jedem Fall müssen die Bausteine (Ionen) frei und verschiebbar sein, was sowohl in der Schmelze wie auch in den anderen beiden Fällen durch die Anwesenheit von Wasser erleichtert bzw. ermöglicht wird. Oft werden bereits gebildete Kristalle teilweise oberflächlich angelöst, das heisst, es findet ein momentaner Abbau statt. Später kann eine neuerliche Materialzufuhr die Kristalle wieder weiterwachsen lassen (Abb. 4).

Die meisten Beryllvorkommen liegen in hellen, grobkörnigen Ganggesteinen, den sog. **Pegmatiten**. Diese magmatischen Gesteine sind als Schmelzen in Spalten eingedrungen, die sich in älterem Gestein gebildet haben. Man nimmt an, dass dabei Temperaturen um  $550^\circ\text{C}$  herrschten. Bei der langsamen und ruhigen Abkühlung der Pegmatite konnten sich grosse Kristalle mit wenig Störungen bilden. Von den verschiedenen Beryllvarietäten sind es Aquamarin, Goldberyll, Heliodor, Morganit und Goshenit, die meistens in Pegmatiten kristallisierten. Die wichtigsten Fundstellen **pegmatitischer** Berylle liegen in Brasilien, Madagaskar, Russland, Nigeria, Zimbabwe und Mozambique.

Eine Besonderheit stellen die beiden Vorkommen im Staate Utah (USA) dar, wo roter Beryll gefunden wird. Diese rubinroten Berylle werden auch als Bixbite bezeichnet. Die Fundstellen liegen in einem hellen Ergussgestein (Rhyolith) und die Bildung der roten Berylle kann man als pneumatolytisch bezeichnen. Bei einer **metamorphen** Gesteinsumwandlung können ebenfalls Beryllvarietäten gebildet werden, wenn die dazu notwendigen stofflichen und physikalischen Voraussetzungen erfüllt sind. Während einer Metamorphose können unter Einwirkung von Druck und Temperatur Mineralien teilweise oder ganz aufgelöst werden. Dabei diffundieren «befreite» Ionen in gelöster Form zum Teil über weite Strecken durch kompaktes Gestein und tragen schliesslich an geeigneter Stelle zur Bildung von neuen Kristallen bei.

Für die Bildung von Chrom-Beryll (Smaragd) müssen chemische Elemente zueinander finden, die normalerweise getrennte geochemische Wege nehmen: die leichten Elemente des Berylls sammeln sich in hellen Gesteinen (Pegmatit), das schwere Chrom findet sich in dunklen Gesteinen (Ultrabasite). Besonders glückliche Umstände sind daher notwendig, damit sich die Wege der beiden so verschiedenen Gesteinsarten kreuzen und miteinander Smaragd bilden können.

Als klassische Beispiele gelten diejenigen Smaragd-Lagerstätten, in denen die unterschiedlichen Gesteinsarten miteinander

reagieren: chromhaltige Ultrabasite und berylliumhaltige Pegmatite. Das Endprodukt sind smaragdführende Glimmerschiefer bzw. Amphibol-Schiefer (Tremolith oder Aktinolith). Die Umwandlung zu Smaragd-Muttergestein verlief mit der Energie der heissen Pegmatite oder durch die Metamorphose einer ganzen geologischen Region (z. B. bei  $450^\circ\text{C}$ ). Der Pegmatit lieferte die zur Beryllbildung notwendigen chemischen Elemente Be, Si und Al. Das für die Grünfärbung der Smaragde notwendige Chrom stammt (wie auch gelegentlich Eisen) aus Chromit ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ), der sich im Ultrabasit auflöste. Dadurch wurde es frei und für den Einbau im wachsenden Smaragdkristall verfügbar.

Metamorphe Smaragd-Lagerstätten, wie eben vorgestellt, finden sich in Glimmerschiefern und Amphibol-Schiefern und liegen in Brasilien, Zimbabwe, Zambia, Süd-Afrika, Tanzania und Madagaskar.

Die «kühlsten» Berylle entstanden aus **hydrothermalen** Lösungen bei Temperaturen unter  $270^\circ\text{C}$ . Solche Kristalle wuchsen weder in einer Schmelze, noch verdrängten sie durch ihr Wachstum im kompakten Gestein andere Mineralien. Hydrothermale Kristallbildungen setzen sich aus heissen wässrigen Lösungen in Hohlräumen ab. Bei Gebirgsbewegungen bildeten sich sehr oft Risse und Spalten auch in der Tiefe. Dort ist die Temperatur noch genügend hoch, um die wässrigen Lösungen zum Transport der chemischen Elemente aktiv zu halten. Es kann nur dann zum Absatz von Beryll kommen, wenn das umliegende Gestein von der Lösung teilweise ausgelaugt wird. Dabei können diejenigen Stoffe angereichert werden, welche zur Beryllkristallisation unerlässlich sind. Im Zustand der Übersättigung bilden sich dann Kristallkeime an den Klüftwänden, die im günstigen Fall nicht zu zahlreich sind. So können sich die herangetragenen Stoffe aus der Lösung zu wenigen grossen Kristallen verbinden. Die bedeutenden Smaragdlagerstätten von Kolumbien sind hydrothermal gebildet und liegen in Klüften von Sedimentgesteinen (Mergel, Kalk). Auch die Smaragde aus Pakistan und Afghanistan stammen aus hydrothermal gebildeten Lagerstätten.

Ausser Smaragd können sich noch weitere Mineralarten hydrothermal in Klüften bilden. Oft entsteht Calcit oder Quarz in Mengen, sodass die Zwischenräume um die Smaragde davon vollständig ausgefüllt sind.

### Einschlüsse in Beryll

Unter Einschlüssen versteht man feste, flüssige oder gasförmige Fremdstoffen in Edelsteinen. Der «Photoatlas von Einschlüssen in Edelsteinen» (Gübelin & Koivula, 1986) bietet die umfassendste Behandlung des Themas. Bei den verschiedenen Beryllvarietäten treffen wir auf unterschiedlich starke Durchsetzung mit Einschlüssen. Auch ihre Arten können sich je nach dem Typ der Entstehung stark unterscheiden.

**Pegmatitisch** gebildete Berylle sind oft sehr arm an Einschlüssen. Manchmal zeigen sie Wachstumsröhren, die mit einer Gas/Flüssigkeitsfüllung versehen sind. Die Röhren laufen parallel zur Längsachse der Beryllkristalle, d. h. in Richtung der kristallographischen c-Achse. Einige zeigen beim Kippen des Kristalls einen Wasserwaage-Effekt: die Gasblase (meist  $\text{CO}_2$  in Wasser) läuft in der Röhre auf und ab. Sind solche Röhren fein und dicht genug, so können aus derartigen Steinen Katzenaugen geschliffen werden. Die Röhren müssen parallel zur Basis des Cabochons orientiert sein. Die Lichtlinie läuft dann senkrecht zur Richtung der Röhren über den Cabochon (Abb. 5). **Metamorph** gebildete Berylle, vorwiegend Smaragde, sind meist reich an Einschlüssen. Diese können Mineraleinschlüsse darstellen, die älter als die Smaragde selbst sind. Sie geben uns

Aufschluss über die «Kinderstube» des wachsenden Kristalls, denn sie spiegeln meist das Muttergestein wieder. Aber auch kombinierte Gas/Flüssigkeits-Einschlüsse finden sich manchmal in metamorph gebildeten Smaragden. Sie sind vorwiegend in Hohlräumen eingeschlossen, die auf ehemaligen Rissebenen entstanden sind und bilden jetzt sog. Heilungsrisse.

Bei den **hydrothermal** gebildeten Beryllen treten als Edelsteine praktisch ebenfalls nur Smaragde auf. Wie bei den metamorph gebildeten Smaragden erlitten auch viele der hydrothermal gebildeten Smaragde Störungen durch Bewegung im Muttergestein. Ihre Einschlüsse bestehen daher hauptsächlich aus verheilten Rissen und aus Mineraleinschlüssen, die sich gleichzeitig mit dem Beryll gebildet haben. Die verheilten Risse bestehen aus kleinen Hohlräumen, die sich über die ehemalige Rissebene erstrecken. Die Hohlräume beherbergen Gas/Flüssigkeits-Füllungen und ihre Form drückt das Stadium der Rissheilung aus. Die Füllung der Hohlräume besteht aus der ursprünglichen hydrothermalen Lösung. Diese hat sich nun allerdings den gegenwärtig herrschenden Druck- und Temperaturbedingungen angepasst. Dabei sind oft gelöste Gase entmischt worden und bilden nun Blasen in den flüssigkeitsgefüllten Hohlräumen (Zweiphasen-Einschlüsse). Vielfach sind zudem noch winzige Kristalle ausgeschieden worden (Dreiphasen-Einschlüsse), siehe Abb. 6.

#### Synthesen von Beryll

Die erste künstliche Herstellung von Beryll im Laborversuch gelang schon im letzten Jahrhundert. Dabei wurde die Kristallisation aus der Schmelze eines Flussmittels (Flux) erreicht, in dem alle nötigen chemischen Bestandteile löslich sind. Seit den sechziger Jahren wurde nach dem Flussmittelverfahren zuerst

kommerziell Smaragd erzeugt. Die bekanntesten Hersteller sind Chatham und Gilson. In jüngster Zeit treten zahlreiche Flussmittel-Synthesen von Smaragd auf, die aus Japan, Russland usw. stammen. Da die Methoden fast nur bezüglich der Flux-Zusammensetzungen verschieden sind, gleichen sich die Produkte in manchem Aspekt sehr stark (Abb. 7). Die Herstellung von synthetischem Beryll nach dem Hydrothermalverfahren (im Autoklaven) unterscheidet sich in der Methode vollständig vom Flussmittel-Verfahren. Demzufolge zeigen auch die Produkte andere charakteristische Merkmale. Die Kristallisation von kommerziellen synthetischen Smaragden im Autoklaven gelang Linde und Lechleitner in den sechziger Jahren. An hydrothermalen Beryll-Synthesen sind heute, neben den bereits bekannten, neu australische (Biron, Pool) und russische Smaragde (Vasar) im Umlauf (Abb. 8). Aus Russland sind sogar blaue, gelbe und rote Berylle auf diesem Weg synthetisiert worden.

#### Weiterführende Literatur:

- Fritsch, E. & Rossman, G. (1988): An update on color in gems. Part 3: Colors caused by bands gaps and physical phenomena. – *Gems & Gemology*, XXIV, p. 94.
- Gibbs, G.V., Breck, D.W., Meagher, E.P. (1968): Structure refinement of hydrous and anhydrous synthetic beryl and emerald. – *Lithos*, 1, 275–285.
- Gübelin, E. J. & Koivula, J. I. (1986): Photoatlas der Einschlüsse in Edelsteinen. – ABC-Verlag, Zürich.
- Schwarz, D. (1987): Esmeraldas – Inclusiones em Gemas. – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Sinkankas, J. (1981): Emerald and other beryls. – Chilton Book Company, Radnor, Pennsylvania.