

# Cäsiumreiche Morganite aus Afghanistan und Madagaskar

Caesium-rich morganite from Afghanistan and Madagascar

H. A. HÄNNI und M. S. KRZEMNICKI, Basel

## Zusammenfassung

Berylle von einem stark gesättigten Rosa aus Afghanistan und Madagaskar werden beschrieben. Sie zeigen physikalische und optische Daten, welche weit über die bekannten Literaturwerte hinausgehen. Es wurden Dichtewerte zwischen 2.91 und 3.10 g/cm<sup>3</sup> und Lichtbrechungswerte bis zu 1.608 ( $n_e$ ) und 1.615 ( $n_o$ ) gemessen. Chemische Analysen lieferten sehr hohe Cäsiumkonzentrationen (bis 15.18 Gew.-% Cs<sub>2</sub>O). Der Einbau von Cs in die Kanäle der Beryllstruktur ist gekoppelt an einen Ersatz auf der tetraedrisch koordinierten Beryllium-Position. UV-VIS-NIR Spektren zeigen Absorptionsmerkmale von Mangan und H<sub>2</sub>O wie sie typisch sind für Morganite. Erste aus Röntgendaten ermittelten Gitterkonstanten belegen deutlich erhöhte Zellparameter (vor allem  $c_0$ ) im Vergleich zu Normalberyll. Auch die Raman Peakpositionen sind charakteristisch versetzt. Die Probe aus Afghanistan ist halbdurchsichtig, beim Material aus Madagaskar finden sich auch durchsichtige Steine. Die Einschlüsse bestehen mehrheitlich aus feinen Wachstumsröhren parallel zur  $c$ -Achse, welche bei manchen Steinen ein Katzenauge ermöglichen. Weitere Einschlüsse sind basal ausgerichtete fluide Einschlüsse, kurze Turmalinkristalle und geschwungene Spannungsrisse. Nach der Art der chemischen Komponenten, den Absorptionsspektren und Art der Färbung können die Steine als Morganite bezeichnet werden.

*Inwieweit der extreme Caesiumgehalt eine neue Mineralart innerhalb der Beryllgruppe rechtfertigt, wird innerhalb der IMA zu entscheiden sein.*

## Abstract

Beryl of a quite saturated pink colour is described, which originate from Madagascar and Afghanistan. They display physical and optical data, which exceed the values reported so far in literature. Densities between 2.91 and 3.10 g/cm<sup>3</sup> and RI values up to 1.608 ( $n_e$ ) and 1.615 ( $n_o$ ) have been found. Chemical analyses reveal very high caesium concentrations (up to 15.18 wt% Cs<sub>2</sub>O). The incorporation of Cs in the structural channels of beryl is mainly coupled with a substitution on the tetrahedrally coordinated beryllium site. UV-VIS-NIR spectra show manganese and water absorption features typical for morganite. XRD data and Raman spectra reveal a distinct increase in cell parameters (mainly  $c_0$ ) compared to pure beryl, thus underlining the outstanding character of the studied material. While the sample of Afghanistan is semi-transparent, transparent stones are found among the samples from Madagascar. Inclusions consist mainly of fine tubes parallel to the  $c$ -axis, flat fluid inclusions parallel to the basal pinacoid, and tension fractures. Based on chemical composition, spectral data and colour saturation we suggest the stones to be named morganite. In how much the extremely high content of

Cs requests the introduction of a new mineral name within the beryl group will be a matter discussed in the IMA.

## Einleitung

Mitten im Jahr 2002 wurde in Madagaskar eine kleine Menge rosa bis himbeerroter Berylle gefunden. Mindestens ein Jahr vorher erhielt einer der Autoren (HAH) ähnliches Material aus Afghanistan. Rosa bis pinkfarbene und rote Berylle werden in der gemmologischen Literatur mit unterschiedlichen Namen belegt. Mit dieser Publikation beabsichtigen wir, die neuen Steine zu beschreiben und sie mit ähnlich gefärbten Beryllen (Morganit, roter Beryll) zu vergleichen. Eine überraschende Beobachtung am neuen Material sind die ausserordentlich hohen Lichtbrechungs- und Dichtewerte. Sie liegen höher als alle entsprechenden Werte in gemmologischen Bestimmungstabellen, was eine eingehende Untersuchung des neuen Materials verlangt. Um den außerordentlichen Charakter der neuen Berylle darzustellen, legen wir nicht nur die üblichen gemmologisch relevanten Daten vor, sondern liefern auch erste Gitterdaten, chemische Zusammensetzung und spektrale Eigenschaften im UV-VIS-NIR.

Wenn sich die Zusammensetzung des Minerals Beryll  $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$  nahe seiner idealen Formel befindet, wird es als n-Beryll bezeichnet. Die Kristallstruktur von Beryll ist charakterisiert durch  $\text{Be-O}_4$  Tetraeder und verzerrte  $\text{Al-O}_6$  Oktaeder, welche durch Ringe aus jeweils 6  $\text{SiO}_4$  Tetraedern verbunden sind. Die Stapelung solcher  $\text{Si}_6\text{O}_{18}$  Ringe bildet Strukturkanäle parallel zur c-Achse welche große Ionen und Moleküle aufnehmen können.

Die Beryllstruktur ermöglicht eine Anzahl von Ersatzmöglichkeiten auf verschiedenen Gitterplätzen (DEER et al., 1992). Wenn die vorherrschende Substitution den oktaedri-

schen Gitterplatz ( $\text{Al}^{3+}$ ) betrifft, spricht man von o-Beryll (oktaedrisch substituierter Beryll). Teilweiser Ersatz von  $\text{Al}^{3+}$  durch  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{V}^{3+}$ , oder  $\text{Mn}^{3+}$  ist häufig für diese Art. Falls zweiwertige Ionen wie  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  an diese Stelle treten, wird ein gekoppelter Ersatz nötig. Um die fehlende Ladung zu kompensieren, wird normalerweise ein einwertiges Alkali-Ion (z.B.  $\text{Na}^+$ ) in die Kanalstruktur aufgenommen. Die meisten Smaragde und Aquamarine gehören zum Typus der o-Berylle.

Wenn  $\text{Be}^{2+}$  auf der tetraedrischen Gitterposition teilweise ersetzt ist, spricht man von t-Beryll (tetraedrisch substituierter Beryll). Bei unseren Untersuchungen am neuen Material erwies sich dieser als t-Beryll. Ersatz von  $\text{Be}^{2+}$  durch einwertige Ionen, z.B. Lithium  $\text{Li}^+$  verlangen eine Ladungskompensation durch ein weiteres einwertiges Ion. Dieser Ausgleich kann beispielsweise erfolgen durch den Einbau von  $\text{Na}^+$  oder  $\text{Cs}^+$  in den Kanälen. Dort befinden sich außer großen, einwertigen Ionen auch fast immer  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{CO}_2$  Moleküle (BAKAKIN et al., 1970).

Beide Substitutionsarten, oktaedrische und tetraedrische, sowie das Besetzen von Kanalpositionen haben eine erhöhende Wirkung auf Dichte und Lichtbrechung von Beryll (CERNY & HAWTHORNE, 1976; HÄNNI, 1980; SINKANKAS, 1981). Wir können daher annehmen, dass Beryll mit hohen Werten zu einem beträchtlichen Maß substituierte Positionen aufweist. Literaturdaten belegen besonders Alkaligehalte Cs und Rb als erhöhende Faktoren bei t-Beryllen (EVANS et al. 1966).

## Probenbeschreibung und Herkunft

Die vorliegende Arbeit entstand durch die Bearbeitung einer relativ kleinen Anzahl von Proben, welche im März 2002





Abb. 1 / Fig. 1

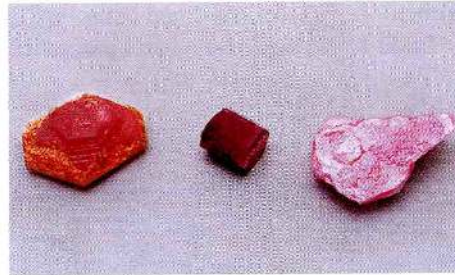


Abb. 2 / Fig. 2

Abb. 1 Morganite aus Madagaskar (Rohsteine, von links: M2, M1, M3; A1 aus Afghanistan) facettiert, von links: M5, M4, M6). Der größte facettierte Stein wiegt 3.025 ct.

Fig. 1 Morganites from Madagascar (rough, from left: M2, M1, M3; A1 from Afghanistan) faceted, from left: M5, M4, M6). The largest faceted stone is 3.025 ct.

Abb. 2 Von links nach rechts: Morganit aus Madagaskar (M2), roter Beryll aus Utah (R1) und Morganit aus Afghanistan (A1).

Fig. 2 From left to right: Morganite from Madagascar (M2), red beryl from Utah (R1), and morganite from Afghanistan (A1).

(Afghanistan) und seit Januar 2003 (Madagaskar) zu den Autoren gelangten (Abb. 1 und 2). Die erste Probe (A1) zeigt ein überraschend starkes Rosa und wurde den Autoren von Haleem Khan, einem pakistanischen Rohsteinhändler (Hindukush Mala Gems & Minerals, Peshawar) überlassen. Der Kristall ist von tafeligem Habitus, mit flachen hexagonalen Erhebungen auf der intakten Basisfläche (Abb. 2). Solche Erscheinungen sind auch beschrieben für roten Beryll von Utah (FLAMINI et al., 1983). Die Herkunft dieser Probe wurde mit „Deva Mine, Paroon Tal, Konar“ angegeben (HALEEM KHAN, 2002, persönliche Mitteilung). Die weiteren Proben zeigen eine ähnlich starke Farbe, stammen jedoch aus Madagaskar. Probe M2 ist ein tafeliger hexagonaler Kristall, allseitig von Kristallflächen begrenzt und von orangearoter Farbe. Der Rohsteinhändler Alexander Leuenberger (Schweiz) hat dieses Stück im Dezember 2002 vorgelegt. Kurze Zeit später erhielt einer der Autoren (MSK) an der Mineralien- und Edelstein-

messe 2003 in Tucson (USA) fünf weitere Proben von Denis Gravier (Le Minéral Brut, St. Jean-Le-Vieux, Frankreich) zur Untersuchung. Zwei der Proben (M1, M3) bestehen aus durchscheinenden Bruchstücken, während die Proben M4 - M6 facettiert und halbdurchsichtig bis durchsichtig sind. Die Herkunft wurde von einem Mitarbeiter von D. Gravier angegeben als „Mandrosonoro, ungefähr 150 km südwestlich von Antsirabe (Zentral-Madagaskar)“ (F. DANET, persönliche Mitteilung, 2003). Einige Händler geben auch Ambatovita als Lokalitätsbezeichnung der madegassischen Proben an. Die geologische Fundortsituation wird von DANET beschrieben als typisch pegmatitisch. An der gleichen Stelle werden auch Kunzit, Turmalin und Danburit gefördert. Die beschriebenen Berylle sind verwachsen mit Lepidolith, Amazonit und Turmalin gefunden worden, was ihre pegmatitische Genese unterstreicht.

Als Vergleichsproben zu den neu beschriebenen Beryllen wurden zwei rote Berylle

**Tabelle 1.** Physikalische und optische Eigenschaften.**Table 1.** Physical and optical properties.

Probe		Dichte g/cm <sup>3</sup>	Lichtbrechung		DR	Cs2O wt%
			n <sub>e</sub>	n <sub>o</sub>		
rosa Morganit (Madagaskar)	M4	3,103	1,608	1,615	- 0,007	14,27
	M5	3,101	1,608	1,615	- 0,007	14,63
	M6	3,089	1,604	1,611	- 0,007	14,31
rosa Morganit (Afghanistan)	A1	2,906	1,598	1,606	- 0,008	9,70
Morganit (Madagaskar)	R3	2,760	1,592	1,600	- 0,008	1,09
roter Beryll (Wah Wah, Utah) (Thomas Range, Utah)	R1	2,670	1,570	1,564	- 0,006	0,13
	R2	2,670	1,568	1,575	- 0,007	

von den Wah Wah Mountains, Utah, USA (Proben R1 und R2) beigezogen. Die Muster erhielt der eine Autor (HAH) 1983 auf der Mine von T. und R. Harris. Als weiteres Vergleichsmuster diente ein klassischer Morganit aus Madagaskar (R3), welcher von W. Spaltenstein, Chantaburi, geliefert wurde.

Roter Beryll ist in der Literatur ausführlich beschrieben (NASSAU & WOOD, 1968; HÄNNI, 1980; FLAMINI et al, 1983; SHIGLEY & FOORD, 1984). Eine seiner markanten Eigenschaften ist sein sektorisierter Aufbau mit „Sanduhr-Struktur“. Dabei ist der prismatische Sektor stark gefärbt und hat mehr chromophore Elemente (Fe, Mn) eingebaut als der basale Sektor, der nur blassrot gefärbt ist.

Die Farben der facettierten Muster aus Madagaskar wurden zur Farbbestimmung mit den DIN-Farbkarten (Biesalski Pflanzenfarben-Atlas DIN 6164) verglichen. Da die Steine einen deutlichen Dichroismus zeigen (orangerosa und violettrosa), hängt die jeweilige Farbe stark von der Schliﬀanlage ab. In der Richtung der c-Achse erscheint die orangerosa Farbe (DIN 7,5:3:1) wie bei den Proben M4 und M5. Senkrecht zur c-Achse sind die Steine violettrosa (DIN 10,5:2:1.5) wie bei der Probe M6.

### Physikalische und optische Daten

Dichte, Lichtbrechung und Doppelbrechung wurden mit den klassischen gemmologischen Methoden bestimmt. Sowohl die Dichten wie auch die Lichtbrechungen der hier neu beschriebenen Berylle von Afghanistan und Madagaskar übertreffen die bisher bekannten und in Bestimmungstabellen angegebenen Werte beträchtlich (Tabelle 1). Im Gegensatz dazu sind die Werte für die Doppelbrechung gleich wie die für Morganit und roten Beryll angegebenen Werte. Die physikalischen und optischen Daten der Vergleichsproben (roter Beryll R1 und hellrosa Morganit R3) stimmen mit den Literaturwerten überein (SINKANKAS, 1981). Wie von verschiedenen Autoren beschrieben, nehmen die Dichte- und Lichtbrechungswerte mit dem Grad der Substitutionen zu (CERNY & HAWTHORNE, 1976; HÄNNI 1980; SINKANKAS, 1981). Die schweren Alkali-Ionen (Rb, Cs) spielen die bedeutendste Rolle bei der Zunahme der Werte. Dieser Zusammenhang wird durch die Resultate der hier beschriebenen Berylle exemplarisch unterstrichen.

### UV-VIS spektroskopische Resultate

Spektroskopische Daten von Morganit und



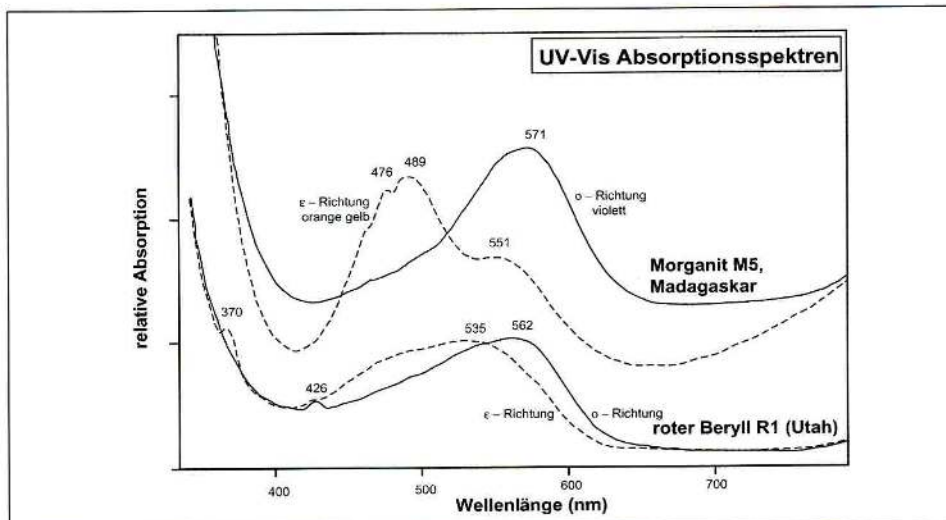


Abb. 3 UV-VIS Spektren von Morganit M5 aus Madagaskar und rotem Beryll R1 aus Utah (USA). Die Spektren zeigen eine deutliche Differenz zwischen diesen beiden Beryll Varietäten mit Mangan als Chromophor ( $Mn^{2+}$  in Morganit,  $Mn^{3+}$  in rotem Beryll).

Fig. 3 UV-VIS spectra of morganite M5 from Madagascar and red beryl R1 from Utah (USA). The spectra reveal a distinct difference between these two beryl varieties with manganese as chromophore ( $Mn^{2+}$  in morganite and  $Mn^{3+}$  in red beryl).

rotem Beryll sind in der gemmologischen Literatur publiziert (WOOD & NASSAU, 1968; NASSAU & WOOD, 1968; SHIGLEY & FOORD, 1984). Sowohl die Farbe rosa wie auch rot wurden dem chromophoren Spurenelement Mangan auf Aluminium-Gitterpositionen in der Beryllstruktur zugeschrieben. Es wird auch darauf hingewiesen, dass der Valenzzustand von Mangan ( $Mn^{2+}$  bzw.  $Mn^{3+}$ ) zu unterschiedlichen Färbungen führen. Bei Morganit (rosa) wird zweiwertiges Mangan in einem kombinierten Ersatz für Aluminium eingebaut:  $Mn^{2+} + Alkali^+ = Al^{3+}$ , wobei die Alkali-Ionen (z.B.  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Cs^+$ ) in der Strukturkanälen Aufnahme finden. Ladungsausgleich und Bindungslängen bestimmen die möglichen Substitutionen, bei welchen auch  $Mn^{2+}$  betroffen ist.

Beim roten Beryll von Utah wirkt  $Mn^{3+}$  als Chromophor und direkter Ersatz von  $Al^{3+}$ . PLATONOV et al. (1989) haben die unter-

schiedlichen spektralen Eigenschaften der beiden Typen von Mn-bedingten Farben bei Beryll beschrieben. Sie weisen auf die verschiedenen Spektren von  $Mn^{2+}$  und  $Mn^{3+}$  hin, die sich besonders auch im unterschiedlichen Dichroismus zeigen. Morganit besitzt einen starken Pleochroismus, roter Beryll einen schwächeren, obwohl seine Farbe viel stärker ist.

UV-Vis Spektren wurden aufgenommen von den Proben A1 (Afghanistan), M5 (Madagaskar) und R1 (Utah) unter Verwendung eines Varian Cary Scan 500 Spektrometers. Mit Polarisationsfiltern wurden die Spektren der ordentlichen und außerordentlichen Schwingung aufgenommen (Abb. 3). Die Spektren der rosa gefärbten Proben A1 und M5 zeigten eine Übereinstimmung mit denjenigen von PLATONOV et al. (1989) für Morganit. In den o-Spektren liegt ein starkes Maximum bei 570 nm, die Absorptionskante im kurzwelligen

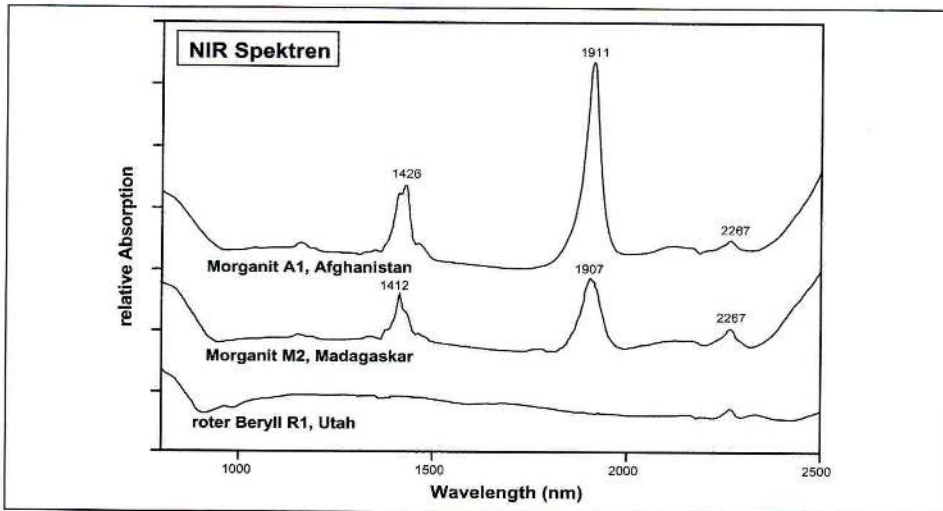


Abb. 4 Unpolarisierte NIR Spektren der Morganite A1 (Afghanistan), M2 (Madagaskar) und vom roten Beryll R1 (Utah). Der Unterschied zwischen den Spektren dieser zwei Beryllvarietäten beruht auf der Anwesenheit (in Morganit) oder Abwesenheit (in rotem Beryll) von Wasser.

Fig. 4 Unpolarized NIR spectra of morganites A1 (Afghanistan), M2 (Madagascar), and red beryl R1 (Utah). The difference between these two beryl varieties is due to the presence (in morganites) or absence (in red beryl) of water.

Bereich liegt bei 370 nm. Die Kurven der e-Schwingungen haben ihre Hauptabsorption bei 489 nm, mit einem Seitenpeak bei 476 nm, daneben ein Maximum bei 550 nm. Die Absorptionskante beginnt ebenfalls bei 370 nm.

Der rote Beryll von Utah (R1) lieferte ein o-Spektrum mit einem Maximum bei 562 nm und einem Peak bei 426 nm. Die Absorptionskante beginnt bei 350 nm. Das e-Spektrum zeigt sein Hauptmaximum bei 535 nm und eine Absorption bei 370 nm. Die Absorptionskante liegt ebenfalls bei etwa 350 nm. Analoge Absorptionskurven von rotem Beryll werden auch von SHIGLEY & FOORD (1984) beschrieben.

### Spektroskopische Daten im Nahen Infrarot NIR

Der nahe Infrarot-Spektralbereich unserer Proben wurde ebenfalls mit dem Varian Cary Scan 500 Spektrometer untersucht.

Da im NIR (800 - 2500 nm) keine Polarisationsvorrichtung zur Verfügung stand, wurden die Spektren vorerst unpolarisiert aufgezeichnet. Für die Morganite (Afghanistan A1 und Madagascar M2) traten drei Absorptionsbanden charakteristisch hervor: 1412 nm ( $7082 \text{ cm}^{-1}$ ), 1907 nm ( $5244 \text{ cm}^{-1}$ ), 2267 nm ( $4411 \text{ cm}^{-1}$ ), wie in Abb. 4 dargestellt. Bei unpolarisierten Spektren ist eine Erkennung der Wasserbanden nur allgemein möglich. Die Zuordnung zu Typ I und Typ II  $\text{H}_2\text{O}$ , welche einer senkrechten oder parallelen Orientierung der molekularen Achse des Wassermoleküls relativ zu den Strukturkanälen entspricht (WOOD & NASSAU, 1968; CHAROY, 1998), erfordert polarisierte Kristallspektren oder KBr-Pulverpresslinge. Im Vergleich mit anderen Alkaliberyllen erwarten wir allerdings eine praktisch vollständige Rotation aller  $\text{H}_2\text{O}$ -Moleküle, d.h. als Typ II  $\text{H}_2\text{O}$  vorliegend. Die Vergleichsprobe von rotem Beryll (R1)



zeigte erwartungsgemäß keine Wasser-schwingungen im NIR (NASSAU & WOOD, 1968; HÄNNI, 1980).

### Chemische Analysen

Mit Hilfe der Röntgenfluoreszenz (ED-XRF) wurden erste chemische Informationen über die Zusammensetzung des neuen Materials gewonnen. Neben den Hauptkomponenten Si und Al wurde in allen Proben zusätzlich Fe, Mn, Cs und Rb nachgewiesen.

Für quantitative chemische Daten wurden vier rosa Morganite (A1, M4, M5, M6), ein hellrosa Morganit (R3) und ein roter Beryll (R1) auf der Elektronenmikrosonde des Geochemischen Labors der Universität Basel gemessen (siehe Tabelle 2). Die rosafarbenen Proben aus Madagaskar (M4, M5, M6) zeigen Cäsiumkonzentrationen (bis zu 15.18 Gew.-% Cs<sub>2</sub>O), welche deutlich höher liegen als alle bisherigen Angaben in der Literatur (11.3 Gew.-% Cs<sub>2</sub>O, in EVANS & MOORE, 1966). Der Stein aus Afghanistan (A1) enthält etwas weniger Cäsium (bis zu 10.05 Gew.-% Cs<sub>2</sub>O), während sich die Werte für den hellrosa Morganit (R3) mit 1.25 Gew.-% Cs<sub>2</sub>O und dem roten Beryll (R1) mit 0.19 Gew.-% Cs<sub>2</sub>O im üblichen Rahmen bewegen (DEER et al., 1992, NASSAU & WOOD, 1968). Zusätzlich enthalten die rosa Berylle Natrium, Rubidium, und Calcium, während Magnesium und Kalium nicht immer nachgewiesen werden konnte. Basierend auf diesen Daten müssen die rosa Berylle zu den Alkaliberyllen gezählt werden, nach DEER et al. (1992) weiter klassifiziert als Lithium-Cäsium Berylle. Da der wichtigste Elementaustausch auf dem tetraedrisch koordinierten Be-Gitterplatz stattfindet, werden solche Berylle auch als tetraedrisch substituierte Berylle bezeichnet (CHAROY, 1998).

Als Farburgsache für rosa bis rote Berylle wird der Einbau von Mangan angesehen (NASSAU & WOOD, 1968, DEER et al., 1992). In den untersuchten Proben konnte Mn nur im roten Beryll aus Utah quantitativ nachgewiesen werden. Die UV-VIS Absorptionsspektren zeigen jedoch auch bei den rosa Beryllen, bei denen sich Mn unterhalb der Nachweisgrenze der Elektronenmikrosonde befand, typische Mangan-Absorptionsbanden.

Die gemessenen Oxidprozentage wurden auf 6 Siliziumkationen normiert (siehe Tabelle 2), ausgehend von vollständigen besetzten Si-Gitterplätzen. Beryllium und Lithium, welche mit den angewandten Untersuchungsmethoden nicht nachgewiesen werden können, wurden berechnet unter der Annahme einer Beryllstöchiometrie von insgesamt 11 Kationen und unter der Berücksichtigung möglicher Elementsubstitutionen. Die angegebenen Werte müssen unter dem Gesichtspunkt dieser Annahme betrachtet werden. Endgültigen Aufschluss über die realen Be und Li Konzentrationen können erst weitere Untersuchungen geben (z.B. Laser Ablation ICP Massenspektrometrie), welche die Autoren in nächster Zeit vornehmen werden (HÄNNI & PETTKE, 2002).

Basierend auf unseren Daten und Überlegungen zur Ladungsbilanz und Bindungslänge vermuten wir, dass in den rosafarbenen Proben A1, M4, M5 und M6 der wichtigste Austausch formuliert werden kann als  $Be^{2+} = Li^{-} + Cs^{+}$ , wobei Lithium auf dem Berylliumplatz eingebaut wird (HAWTHORNE & CERNY, 1977), gekoppelt mit dem Einbau von Cäsium im Kanal der Beryllstruktur um die Ladungsbilanz auszugleichen. Die weiteren Alkali-elemente (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Rb<sup>+</sup>) verhalten sich wie Cäsium und werden mit einer vergleichbaren Substitution in die Beryll-

**Tabelle 2.** Chemische Analysen der untersuchten Berylle.

**Table 2.** Chemical analyses of the investigated beryls.

Oxide	rosa Morganite			Al	Morganit	roter Beryll	
	M4	M5	M6		R3	R1	
	Madagaskar	Madagaskar	Madagaskar	Madagaskar	Madagaskar	Utah, USA	
BeO*	6,36	6,21	6,28	8,13	11,20	13,78	} Be-Platz
Li2O*	1,84	1,86	1,83	1,35	0,68	0,09	
Cs2O	14,27	14,63	14,31	9,70	1,09	0,13	} Strukturkanal
Na2O	0,56	0,50	0,52	1,15	1,35	0,07	
K2O	0,14	0,16	0,15	0,03	0,07	0,20	
Rb2O	0,38	0,39	0,39	0,14	0,09	0,14	
MgO	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0,11	
CaO	0,17	0,17	0,19	0,98	0,01	b.d.	
Al2O3	15,84	15,70	15,62	15,72	17,52	16,59	} Al-Platz
Cr2O3	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	
V2O3	0,05	0,09	0,09	0,06	b.d.	0,04	
Fe2O3	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	2,10	
TiO2	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0,27	
MnO	b.d.	b.d.	b.d.	0,02	b.d.	0,29	
Sc2O3	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	} Si-Platz
SiO2	59,01	58,60	58,42	61,32	64,82	66,91	
total	98,65	98,33	97,82	98,60	96,85	100,69	
Kationen Normierung							
Be2+	1,552	1,528	1,549	1,910	2,490	2,968	} Be-Platz
Li+	0,753	0,765	0,755	0,532	0,298	0,032	
Cs+	0,619	0,639	0,626	0,405	0,043	0,005	} Strukturkanal
Na+	0,110	0,099	0,103	0,218	0,242	0,012	
K+	0,018	0,020	0,020	0,004	0,009	0,023	
Rb+	0,025	0,026	0,026	0,009	0,005	0,008	
Mg2+	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,015	
Ca2+	0,019	0,018	0,021	0,103	0,001	0,000	
Al3+	1,899	1,895	1,890	1,813	1,911	1,753	} Al-Platz
Cr3+	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
V3+	0,004	0,007	0,008	0,004	0,000	0,003	
Fe3+	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,142	
Ti4+	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,018	
Mn2+	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,022	
Sc3+	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Si4+	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	
H2O*	0,460	0,570	0,749	0,456	0,973	0,000	
cations	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000	

\* BeO, Li2O, und H2O wurden berechnet b.d. = unter der Nachweisgrenze

struktur eingebaut, eventuell zum Teil auch gekoppelt mit einem Austausch auf dem Al-Platz durch zweiwertige Ionen (z.B. Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>).

Die Spektren im nahen Infrarot (NIR) zeigen, dass die Proben aus Madagaskar und Afghanistan Wasser enthalten, während der rote Beryll aus Utah wasserfrei ist.



**Tabelle 3. Zellparameter**  
**Table 3. Zellparameter**

Beryll Varietät	Beryll Probe	a <sub>0</sub>	c <sub>0</sub>	c/a	Substitutions- typ	Oxid wt%	
						Cs <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Morganit**	Madagaskar M2				tetraedrisch	14,4	diese Studie
Morganit**	Afghanistan A1				tetraedrisch	9,7	diese Studie
Morganit	Russland, Sosendko 3*	9,200	9,227	1,003	tetraedrisch	4,13	Sosendko 1957
Morganit	Russland, Sosendko 2*	9,202	9,209	1,001	tetraedrisch	0,67	Sosendko 1957
Morganit	Russland, Sosendko 1*	9,202	9,183	0,998	tetraedrisch	0,27	Sosendko 1957
roter Beryll	Utah R1 heller Kern	9,214	9,206	0,999	oktaedrisch	17,42	diese Studie
roter Beryll	Utah R1 roter Rand	9,227	9,205	0,998	oktaedrisch	15,74	diese Studie
farbloser Beryll	Schweiz, Hänni 44	9,211	9,196	0,998	oktaedrisch	18,1	Hänni 1980
Aquamarin	Schweiz, Hänni 16	9,233	9,208	0,997	oktaedrisch	15,5	Hänni 1980
Aquamarin	Schweiz, Hänni 32	9,257	9,197	0,994	oktaedrisch	14,6	Hänni 1980
Aquamarin	Schweiz, Hänni 37	9,288	9,189	0,989	oktaedrisch	10,6	Hänni 1980

\* nach Deer et al. 1992. \*\* Zellparameter noch nicht eindeutig bestimmt.

Basierend auf den chemischen Analysen wurde der Wassergehalt der Proben M4, M5, M6 und A1 auf 1/2 H<sub>2</sub>O Molckül pro Formeleinheit berechnet. Dies ist in guter Übereinstimmung mit der Literatur, welche für Alkaliberylle einen Wassergehalt von 0.3 bis 0.8 H<sub>2</sub>O Moleküle angibt (CHARROY, 1998). Der hellrosa Morganit (R3) ergab 1.0 H<sub>2</sub>O, währenddem der berechnete Wassergehalt im roten Beryll (R1) gleich null ist, was ebenfalls gut mit der Literatur übereinstimmt (NASSAU & WOOD, 1968; HÄNNI, 1980).

### Kristallstrukturelle Daten

Nach BAKAKIN et al. (1967) besteht eine Korrelation zwischen chemischer Zusammensetzung und den Zellparametern von Beryll. Dies wurde auch bestätigt durch HÄNNI (1980), welcher in o-Beryllen (teilweise oktaedrisch substituiert) einen Anstieg des Parameters a<sub>0</sub> beobachtete, korreliert mit einer Zunahme der Elementsubstitution auf dem oktaedrisch koordinierten Al-Gitterplatz, während c<sub>0</sub>

praktisch unbeeinflusst blieb. Das c<sub>0</sub>/a<sub>0</sub> Verhältnis in solchen Beryllen liegt üblicherweise etwas unter 1. Für Alkali-reiche Berylle (teilweise tetraedrisch substituierte Berylle) zeigte SOSEDKO (1957), dass c<sub>0</sub> ansteigt bei zunehmendem Einbau von Cäsium, während umgekehrt a<sub>0</sub> eher stabil bleibt. Sie zeigen c/a Werte etwas über 1, wie dies schon SOSEDKO (1957) und CHARROY (1998) für Cäsium-reiche Berylle erwähnen (siehe Tabelle 3).

Erste kristallstrukturelle Untersuchungen an minimalen Pulverproben von M2 und A1 mit Hilfe der Röntgendiffraktion mit einer Bradley Kamera scheinen diese Korrelation zu bestätigen. Allerdings sind weitere strukturelle Untersuchungen in Bearbeitung, um abzuklären ob und in welchem Ausmass der Einbau von solch hohen Cäsiumgehalten die Kristallstruktur beeinflusst (aufweitet). Wie die Röntgenpulveraufnahmen zeigen, fehlen bei den Cs-reichen Proben M2 und A1 zwei der wichtigsten Röntgenreflexe, welche typisch sind für Beryll.

**Tabelle 3.** Zellparameter  
**Table 3.** Zellparameter

Beryll Varietät	Beryll Probe	a <sub>0</sub>	c <sub>0</sub>	c/a	Substitutions- typ	Oxid wt%		
						Cs <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Morganit**	Madagaskar M2				tetraedrisch	14,4		diese Studie
Morganit**	Afghanistan A1				tetraedrisch	9,7		diese Studie
Morganit	Russland, Sosendko 3*	9,200	9,227	1,003	tetraedrisch	4,13		Sosendko 1957
Morganit	Russland, Sosendko 2*	9,202	9,209	1,001	tetraedrisch	0,67		Sosendko 1957
Morganit	Russland, Sosendko 1*	9,202	9,183	0,998	tetraedrisch	0,27		Sosendko 1957
roter Beryll	Utah R1 heller Kern	9,214	9,206	0,999	oktaedrisch		17,42	diese Studie
roter Beryll	Utah R1 roter Rand	9,227	9,205	0,998	oktaedrisch		15,74	diese Studie
farbloser Beryll	Schweiz, Hänni 44	9,211	9,196	0,998	oktaedrisch		18,1	Hänni 1980
Aquamarin	Schweiz, Hänni 16	9,233	9,208	0,997	oktaedrisch		15,5	Hänni 1980
Aquamarin	Schweiz, Hänni 32	9,257	9,197	0,994	oktaedrisch		14,6	Hänni 1980
Aquamarin	Schweiz, Hänni 37	9,288	9,189	0,989	oktaedrisch		10,6	Hänni 1980

\* nach Deer et al. 1992. \*\* Zellparameter noch nicht eindeutig bestimmt.

Basierend auf den chemischen Analysen wurde der Wassergehalt der Proben M4, M5, M6 und A1 auf 1/2 H<sub>2</sub>O Molekül pro Formeleinheit berechnet. Dies ist in guter Übereinstimmung mit der Literatur, welche für Alkaliberylle einen Wassergehalt von 0.3 bis 0.8 H<sub>2</sub>O Moleküle angibt (CHAROY, 1998). Der hellrosa Morganit (R3) ergab 1.0 H<sub>2</sub>O, währenddem der berechnete Wassergehalt im roten Beryll (R1) gleich null ist, was ebenfalls gut mit der Literatur übereinstimmt (NASSAU & WOOD, 1968; HÄNNI, 1980).

### Kristallstrukturelle Daten

Nach BAKAKIN et al. (1967) besteht eine Korrelation zwischen chemischer Zusammensetzung und den Zellparametern von Beryll. Dies wurde auch bestätigt durch HÄNNI (1980), welcher in o-Beryllen (teilweise oktaedrisch substituiert) einen Anstieg des Parameters a<sub>0</sub> beobachtete, korreliert mit einer Zunahme der Elementsubstitution auf dem oktaedrisch koordinierten Al-Gitterplatz, während c<sub>0</sub>

praktisch unbeeinflusst blieb. Das c<sub>0</sub>/a<sub>0</sub> Verhältnis in solchen Beryllen liegt üblicherweise etwas unter 1. Für Alkali-reiche Berylle (teilweise tetraedrisch substituierte Berylle) zeigte SOSEDKO (1957), dass c<sub>0</sub> ansteigt bei zunehmendem Einbau von Cäsium, während umgekehrt a<sub>0</sub> eher stabil bleibt. Sie zeigen c/a Werte etwas über 1, wie dies schon SOSEDKO (1957) und CHAROY (1998) für Cäsium-reiche Berylle erwähnen (siehe Tabelle 3).

Erste kristallstrukturelle Untersuchungen an minimalen Pulverproben von M2 und A1 mit Hilfe der Röntgendiffraktion mit einer Bradley Kamera scheinen diese Korrelation zu bestätigen. Allerdings sind weitere strukturelle Untersuchungen in Bearbeitung, um abzuklären ob und in welchem Ausmass der Einbau von solch hohen Cäsiumgehalten die Kristallstruktur beeinflusst (aufweitet). Wie die Röntgenpulveraufnahmen zeigen, fehlen bei den Cs-reichen Proben M2 und A1 zwei der wichtigsten Röntgenreflexe, welche typisch sind für Beryll.



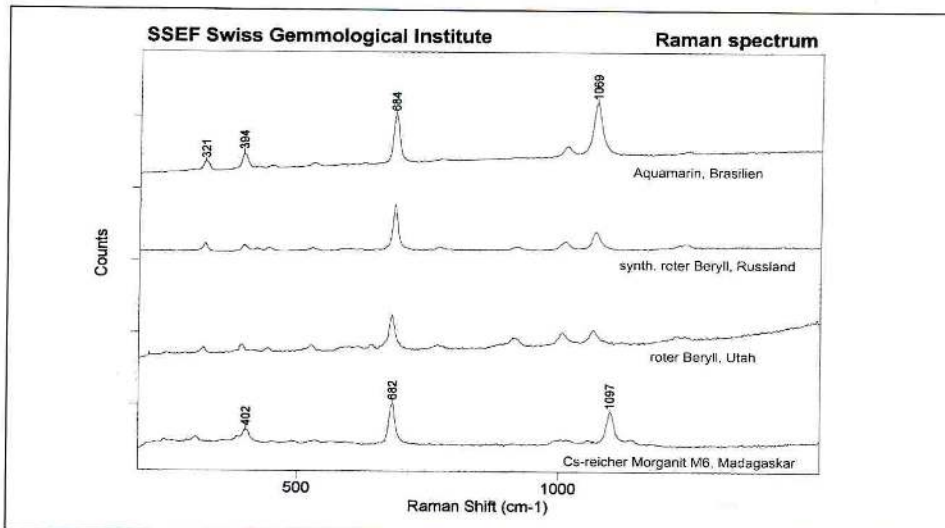


Abb. 5 Raman Spektren von Morganit M6 verglichen mit rotem Beryll R1, synthetischem rotem Beryll (Russland), und Aquamarin (Brasilien). Cs-reiche Morganite aus Madagaskar zeigen eine deutliche „Peak“-Verschiebung im Vergleich zu allen anderen Beryllen.

Fig. 5 Raman spectra of morganite M6 compared with the ones of red beryl R1, synthetic red beryl (Russia), and aquamarine (Brazil). Cs-rich morganite from Madagascar shows a distinct peak shift compared to all other beryls.

### Raman-spektroskopische Untersuchungen

Raman Spektren der rosafarbenen Proben M4, M5, M6 und A1 wurden verglichen mit Referenzspektren von Beryllen mit geringen Substitutionsgraden (roter Beryll aus Utah, synthetischer roter Beryll, und Aquamarin). Die Lage der Ramanpeaks ist abhängig von der Struktur eines Materials und zeigt in isomorphen Mischreihen oft eine Verschiebung gekoppelt mit der Zunahme der Substitution. In Abb. 5 lässt sich erkennen, dass die Peakpositionen bei rosafarbenen, Cäsium-reichen Beryllen teilweise deutlich zu höheren Wellenzahlen verschoben sind im Vergleich zu den obengenannten o-Beryllen. Die Probe M6 zeigt einen deutlichen Ramanpeak bei  $1098\text{ cm}^{-1}$ , während alle Referenzproben einen Peak bei  $1069\text{ cm}^{-1}$  aufweisen. Eine zweite, aber weniger deutliche Verschie-

bung betrifft den Peak bei  $404\text{ cm}^{-1}$ , verglichen zu  $394\text{ cm}^{-1}$  bei den Referenzen. Alle weiteren Ramanpeaks zeigen keine oder nur geringe Verschiebung. Diese partielle Verschiebung einzelner Ramanpeaks mag seine Erklärung darin haben, dass die Hauptsubstitution nur auf dem Be-Platz stattfindet (gekoppelt mit dem Einbau großer Alkalien in den Strukturkanälen), welche so lokal die Struktur (in Richtung c-Achse erweitert), während die Aluminium- und Siliziumplätze kaum von dieser Substitution erfasst werden.

### Einschlussbeschreibungen der neuen Berylle

Aufgrund der wenigen untersuchten Proben können wir momentan nur ein unvollständiges Bild über die Einschlüsse abgeben. Die Probe von Afghanistan zeigt eine deutliche schmale basale Wachstumszo-

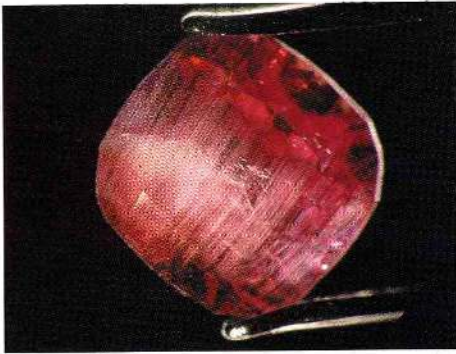


Abb. 6a / Fig. 6a

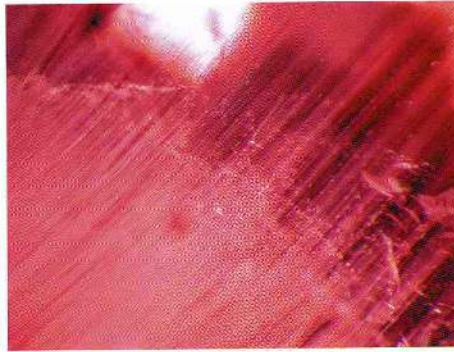


Abb. 6b / Fig. 6b



Abb. 7 / Fig. 7



Abb. 8 / Fig. 8

Abb. 6a Morganit aus Madagaskar (M5) mit Hohlkanälen parallel zur c-Achse (x10).

Fig. 6a Morganite from Madagascar (M5) with hollow tubes parallel to the c-axis (magnified 10).

Abb. 6b Ausschnitt bei 20x Vergrößerung von Probe M5 zeigt neben den Hohlkanälen flache Flüssigkeitseinschlüsse parallel zur Basis und Spannungsrisse.

Fig. 6b Detail of M5 showing hollow tubes and further flat fluid inclusions parallel to the basal pinacoid, and tension fractures (magnified 20x).

Abb. 7 Morganit-Cabochons aus Madagaskar mit Katzenaugeneffekt.

Fig. 7 Morganite-cabochons from Madagascar showing chatoyancy.

Abb. 8 Kleine grünlich-bräunliche Turmalinkristalle von kurzprismatischen bis beinahe isometrischem Habitus in Morganit aus Madagaskar (x30).

Fig. 8 Small greenish-brownish tourmaline crystals of short prismatic to nearly isometric habit in Morganite from Madagascar (magnified 30x).

nierung, dazu Spannungsrisse in gewölbter Form.

Die Proben von Madagaskar zeigen gelegentlich basale Zonierung, aber fast immer feine Kanäle parallel zur c-Achse (Abb. 6). Oft sind diese so zahlreich, dass sie den Stein trüben und einen Katzenaugen-Effekt ermöglichen (Abb. 7). Zusätzlich wurden

basal ausgerichtete fluide Einschlüsse beobachtet. Graugrüne Mineraleinschlüsse von wenig definierter Form haben sich nach einer Raman-Analyse als Turmalin erwiesen (Abb. 8). Die meisten geschliffenen wie auch die Rohsteine aus Madagaskar weisen mehr oder weniger Spannungsrisse von geschwungener Form auf.





Abb. 9 Hydrothermalsynthetische Berylle aus Nowosibirsk, Russland (links) und von Biron, Australien (rechts).

Fig. 9 Hydrothermally grown synthetic beryls from Novosibirsk, Russia (left), and Biron, Australia (right).

### Vergleiche mit synthetischen rosa oder roten Beryllen

Seit einigen Jahren sind rosafarbene und rote hydrothermal erzeugte synthetische Berylle auf dem Markt. Die Kristalle erscheinen in unterschiedlichen Färbungen und besitzen verschiedene chromophore Elemente. Einige der Produkte sind in der gemmologischen Literatur beschrieben worden (HENN & MILISENDA, 1999; JOHNSON & KOIVULA, 1997). In keinen der synthetischen Kristalle wurde Rb oder Cs gefunden, aber charakteristische Gehalte an Ti, Mn oder Ni.

Das älteste kommerziell erhältliche synthetische Material von rosa Beryll scheint das Material von Biron (Australien) zu sein, welches Ti als chromophores Element enthält (BROWN, 1993). Später traten dunkler gefärbte Steine mit Mn, Fe und Ni auf, welche in Russland produziert wurden (Abb. 9). HENN & MILISENDA (1999) berichteten über rote synthetische Berylle aus Russland, welche  $\text{Co}^{2+}$  als Farbbursache enthalten. Alle diese Hydrothermalsynthesen weisen Dichte- und Lichtbrechungswerte

auf, welche bedeutend tiefer sind als die Werte der hier beschriebenen Morganite. Die synthetischen Kristalle lassen sich in den meisten Fällen auch durch charakteristische winklige Wachstumsstrukturen von natürlichen Beryllen unterscheiden (JOHNSON & KOIVULA, 1997).

### Betrachtungen zur Benennung

Es existieren einige Namen, welche für rosa, pinkfarbene oder rote Berylle verwendet werden. Nicht alle dieser Namen sind noch in der gemmologischen Literatur im Gebrauch. Vorobyevit wurde 1908 als farbloser bis rosafarbener Caesiumberyll beschrieben, sein Vorkommen wurde mit Lipovka im Ural angegeben (SINKANKAS, 1981). Rosterit ist ein weiterer Name, welcher einst für farblosen bis rosaroten Caesiumberyll aus Elba (Italien) verwendet wurde. Beide Namen sind heute kaum noch bekannt. Viel besser hat sich der Name „Morganit“ gehalten, der von G.F. Kunz um 1910 für rosa Beryll vorgeschlagen wurde. Damit wollte er J.P. Morgan ehren (SINKANKAS, 1981). Die meisten Autoren sehen Morganit im Zusammenhang mit einer mehr oder weniger starken Rosafärbung und einem Chemismus, welcher Mangan- und Caesiumspuren enthält. Letzteres hat allerdings keine farbgebende Wirkung. Roter Beryll von Utah (FLAMINI et al., 1983; SHIGLEY & FOORD, 1984) bezieht seinen Namen aus seiner starken Rotfärbung, welche sehr viel intensiver ist als die der Morganite. Eine weitere Eigenschaft, welche die roten Berylle klar von den Morganiten trennt, ist ihr unterschiedlicher Dichroismus. Roter Beryll zeigt kaum Dichroismus, während er bei Morganit deutlich ausgeprägt ist.

Die Eigenschaften der Proben aus Afghanistan und Madagaskar stimmen weitgehend mit denjenigen der Morganite über-

ein. Dennoch wurden die neuen Steine im Handel schon als „Raspberyll“ oder „pink Beryll“ bezeichnet, aber kaum als Morganit. Es scheint, dass aufgrund der überwiegend hellen Farbe von Morganit diese Bezeichnung für die neuen Steine im Handel nicht genug Anerkennung ausdrückt. Aber in Anbetracht der festgestellten Eigenschaften beschreibt der Name Morganit das Material vorerst richtig. Sein Gehalt an Mn, Cs, Wasser sowie die himbeerrote Färbung sind in Übereinstimmung mit Literaturangaben über Morganite. Nach den CIBJO Nomenklaturvorschriften ist Morganit ein Varietätsname von Beryll. Rosaberyll und roter Beryll werden als Handelsbezeichnungen angegeben. Ob die außergewöhnliche chemische Zusammensetzung (extrem hoher Cs-Gehalt) eine neue Varietät von Beryll darstellt, muss von der IMA (International Mineralogical Association) geprüft werden.

### Diskussion der Ergebnisse

Caesium und Lithium sind typische lithophile Elemente, welche bei Mineralbildungen in Rhyolithen und Pegmatiten auftreten. Während diese Elemente im roten Beryll von Utah nur untergeordnet auftreten, sind sie bei den neuen Proben aus Afghanistan und vor allem Madagaskar Haupt- bzw. Nebenkomponenten. Besonders die Proben aus Madagaskar übertreffen alle bisher bekannten Cs-Gehalte von Beryll. Eine Folge der hohen Cs-Werte sind deutlich erhöhte Werte von Dichte und Lichtbrechung. Diese liegen weit jenseits aller tabellierten Zahlen, welche den Gemmologen normalerweise zur Identifikation der Berylle dienen.

Verschiedene Substitutionsmechanismen wurden vorgestellt, welche den Einbau von Idealformel-fremden Elementen in die Beryllstruktur erklären. Dabei wurde klar,

dass das neue Material als t-Beryll angesprochen werden kann. Es wurde ferner bestätigt, dass analog zu Morganit  $Mn^{2+}$  das chromophore Spurenelement der untersuchten rosafarbenen Berylle ist (SHIGLEY & FOORD, 1984; PLATONOV et al., 1989). Beim roten Beryll von Utah wird im Gegensatz dazu die Farbursache mit  $Mn^{3+}$  erklärt (WOOD & NASSAU, 1968; LEHMANN, 1978).

Zusammenfassend möchten wir die ausserordentlichen Werte (Dichte, Lichtbrechung, Cs-Gehalt, Gitterkonstanten, Raman-Shift) nochmals herausstreichen, welche das neue Material von allen bisher beschriebenen Beryllen deutlich unterscheidet.

### Verdankungen

Die Autoren sind nachfolgenden Personen für das Überlassen von Probenmaterial sehr zu Dank verpflichtet: Mr. Haleem Khan (Hindu Kush Minerals, Peshawar, Pakistan), Alexander Leuenberger (Schweiz), und Denis Gravier (Le Mineral Brut, St. Jean-le-Vieux, Frankreich). Herr Fabrice Danet lieferte wertvolle Angaben über die Lage und das Vorkommen in Madagaskar. Hellrosa Morganit aus Madagaskar wurde uns von Herrn Werner Spaltenstein (Chantaburi, Thailand) zur Verfügung gestellt. Ted und Rex Harris (Delta, USA) ermöglichten 1983 den Besuch der Mine der roten Berylle und überließen Vergleichsmaterial. Herr Dr. K. Schmetzer (Petershausen, Deutschland) hat als wertvoller Diskussionspartner weitergeholfen. Herr Prof. S. Gracser (Mineralogisches Institut der Universität Basel, Schweiz) unterstützte uns mit der Röntgenmethode. Peter Giese (SSEF, Basel) nahm die UV-VIS und NIR Spektren auf. Für die kritische Durchsicht des Manuskripts danken wir Dr. Lore Kiefert (SSEF, Basel).



## Literatur

- BAKAKIN, V., RYLOV, G.M. & BELOV, N.V. (1967): Correlation between chemical composition and unit cell parameters of beryl.- Doklady Akademii Nauk SSSR. Earth Science section, (New York) **173**, 129-132.
- BIESALSKI, E. (1957): Pflanzenfarben Atlas DIN 6164.- Göttingen, Musterschmidt-Verlag.
- BROWN, G. (1993): Australian titaniferous synthetic beryl.- J.Gemmol.Assoc. Hong Kong, **16**, 5-6
- CHAROY, B. (1998): Cristallographie du béryl: l'état des connaissances.- in L'éméraude, Ed. Didier Giard, Association Française de Gemmologie, 47-54.
- CERNY, P. & HAWTHORNE, F.C. (1976): Refractive indices versus alkali contents in beryl: general limitations and applications to some pegmatitic types.- Canadian Mineralogist, **14**, 491-497.
- CIBJO (2002): Gemstones-Terminology and classification: Annex B1: Stones, gemstones and ornamental stones.- Coloured Stone Commission 2001-2, NYC.
- DANET, F. (2003): Persönliche Mitteilung.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. & ZUSSMAN, J. (1962): The rock forming minerals.- 1st edition, Longman, England.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. & ZUSSMAN, J. (1992): The rock forming minerals.- 2nd edition, Longman, England.
- EVANS, H.T. & MROSE, M.E. (1966) Crystal chemical studies of caesium beryl.- Abstracts: Geological Society of America Meeting, 1966, 63.
- FLAMINI, A., GASTALDI, I., GRUBESSI, O. & VITICOLI, S. (1983): Sulle caratteristiche particolari del berillo rosso dell' Utah.- La gemmologia, IX, 1/2, 12-20.
- HÄNNI, H.A. (1980) Mineralogische und mineralchemische Untersuchungen an Beryll aus alpinen Zerrklüften.- Dissertation. Universität Basel.
- HÄNNI, H.A. & PETTKE, T. (2002): Eine neue Diffusionsbehandlung liefert orangefarbene und gelbe Saphire.- Z. Dt. Gemmol. Ges. **51/4**, 137-152.
- HAWTHORNE, F.C. & CERNY, P. (1977): The alkali-metal positions in Cs-Li beryl.- Canadian Mineralogist, **15**, 414-421.
- HENN, U. & MILISENDA, C.C. (1999): Synthetische rote Beryll aus Russland.- Z. Dt. Gemmol. Ges. **48/2**, 97-104.
- JOHNSON, M.L. & KOIVULA, J.I. (1997): Red and purple hydrothermal synthetic beryl.- in Gem News, Gems & Gemology, **33**, 68-69
- KHAN, Haleem (2000): Persönliche Mitteilung.
- NASSAU, K. & WOOD, D.L. (1968): An examination of red beryl from Utah.- Am. Min. **53**, 801-806.
- PLATONOV, A.N., TARAN, M.N. & KLYAKIN, V.A. (1989): On the two colour types of Mn<sup>3+</sup> bearing beryls.- Z. Dt. Gemmol. Ges. **38/4**, 147-154.
- SHIGLEY, J.E. & FOORD, E.E. (1984): Gem quality red beryl from the Wah-Wah mountains, Utah.- Gems & Gemology, **20**, 208-221.
- SINKANKAS, J. (1981) Emerald and other beryls.- Chilton Book Company, Radnor, Pennsylvania, USA.
- SOSEDKO, T. A. (1957): The change of structure and properties of beryls with increasing amounts of alkalis.- Mem. All. Union Min. Soc., vol. **86**, 495
- WOOD, D.L. & NASSAU, K. (1968): The characterization of beryl by visible and infrared absorption spectroscopy.- Am. Mineral. **53**, 777-800.

Bei der Schriftleitung eingegangen am 28. April 2003.

### Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr. H.A. HÄNNI und Dr. M. S. KRZEMNICKI  
SSEF Schweizerisches Gemmologisches Institut, Basel, Schweiz, email: gemlab@ssf.ch.