

Eine außergewöhnliche Einschlussparagenese im Quarz von Steinigtwolmsdorf/Oberlausitz

Von RAINER THOMAS, PAUL DAVIDSON, ADOLF RERICHA und OLAF TIETZ

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Aspekte der Genese einiger Quarzgänge im Lausitzer Block diskutiert. Anhand von Flüssigkeits- und Schmelzeinschlüssen im Quarz von Steinigtwolmsdorf wird gezeigt, dass die Bildung dieses Ganges in den magmatisch-hochhydrothermalen Bereich zu legen ist. Der Beginn der Quarz-Kristallisation ist durch den superkritischen Zustand gekennzeichnet. Mit der Abkühlung öffnet sich ein Solvus mit dem kritischen Punkt bei etwa 740 °C und einem Wassergehalt von 27 % (g/g)¹ hin zu tieferen Temperaturen (etwa 650 °C). Dabei werden zwei Silikatschmelzen mit unterschiedlichen Wassergehalten generiert. Diese Prozesse verlaufen offensichtlich in einem geschlossenen System ab. Danach öffnet sich das System und hydrothermale Prozesse dominieren. Bei tiefen Temperaturen erfolgen im Wesentlichen nur noch Umlagerungs-Prozesse.

Abstract

An unusual inclusion paragenesis in quartz from Steinigtwolmsdorf/Oberlausitz

The present paper discusses genetic aspects of the genesis of quartz veins in the Lausitz Block. Based on fluid and melt inclusions in the quartz of Steinigtwolmsdorf, the formation of this vein is attributed to the magmatic-high-hydrothermal range. The supercritical condition indicates the beginning of the quartz crystallization. During the cooling process, a solvus opens with the critical point at about 740 °C and water content of 27 % (g/g) to lower temperatures (approximately 650 °C). During this process, two silicate melts with different water content are formed. These processes likely proceed in a closed system. Upon cooling the system opens and hydrothermal and redeposition processes dominate.

Keywords: Melt inclusions, supercritical state, solvus, high salt concentration, genesis of quartz veins.

¹ Wir richten uns hier nach den Empfehlungen der IUPAC 1988 (EBEL et al. 2004).

1 Einleitung

Im Lausitzer Massiv treten als jüngste Gänge zahlreich Quarzgänge auf, die vorwiegend NW–SE streichen. Nach BARTNIK (1969) sind etwa 200 Quarzgänge mit einer Mächtigkeit von über 1 m bekannt. Die Mächtigkeit schwankt von wenigen Metern bis zu 100 m. 60 % der Quarzgänge besitzen eine Mächtigkeit von kleiner als 10 m. Einen Überblick über die Quarzgänge im Lausitzer Massiv, nebst der chemischen Zusammensetzung des Quarzes, sowie einigen Bemerkungen zur Genese wird durch BARTNIK (1969) gegeben. Er schreibt, dass die Bildung der Quarzmassen auf hydrothermale Lösungen zurückzuführen ist. Dabei ist nach ihm die Frage zu beantworten, „ob die Quarzgänge durch hydrothermale Zufuhr oder durch Lateralsekretion gebildet wurden ...“.

In den folgenden Ausführungen beschränken wir uns auf die Untersuchung von Flüssigkeits- und Schmelzeinschlüssen im Quarz des kleinen Quarzgangvorkommens an den Goldbergwiesen bei Steinigtwolmsdorf, das sich unweit der Gaststätte „Waldhaus“ an der Fernverkehrsstraße 98, ca. 15 km westlich von Oppach, befindet. Dieser Quarzgang im Granodiorit besitzt nach BARTNIK (1969) eine Mächtigkeit von 25 m und eine streichende Länge von 1 km. Im Gegensatz zu den Quarzgängen im nördlichen Teil des Lausitzer Massivs verlaufen die Quarzgänge im mittleren Teil des Lausitzer Massivs bevorzugt in E–W-Richtung.

An Mineralen wurden im Quarzgang von Steinigtwolmsdorf nach LANGE et al. (2004) Albit, Anatas, Chalkopyrit, Epidot, Gold, Mikroklin, Pyrit und Rutil gefunden. Hinzu kommt noch Goethit, der in einigen Proben als brauner Glaskopf in kleintraubiger Ausbildung in kleinen Hohlräumen des Blockquarzes auftritt.

Mit der Beschreibung des Einschlussinventars im Quarz von Steinigtwolmsdorf und den abgeleiteten Temperatur- und Druckbedingungen soll ein Beitrag zur Genese dieser relativ wenig beachteten Mineralisation im Lausitzer Massiv vorgestellt werden.

2 Probenmaterial

Vom Erstautor wurden Ende der 1950er Jahre aus dem Quarzabbau „Goldbergwiesen“ Einzelkristalle und Drusenbruchstücke entnommen. Anhand des vorhandenen Probenmaterials dürften die Drusen einen Durchmesser von vielleicht 20 cm besessen haben. Der Aufschluss ist schwer zu finden, da er sich in einem ziemlich verwahrlosten Zustand befindet. Zwei Fotos vom Aufschluss werden von GERTH (2012) gezeigt. Im 17. und 18. Jahrhundert wurde hier mit wenig Erfolg nach Gold gesucht (WITZKE & GIESLER 2011).

Einige Quarzkristalle besitzen eine Länge von 5 cm und einen Durchmesser bis zu 2 cm (Abb. 1a, 1b). Die freistehenden Quarzkristalle



Abb. 1: Quarzkristallgruppe (a) und Bergkristall (b) von Steinigtwolmsdorf. Alle Fotos: R. Thomas

talle sind nach der Reinigung meist wasserklar (Bergkristall). Einige Kristalle zeigen die für dieses Vorkommen typischen Trapezoederflächen (siehe auch VOLLSTÄDT 1979). Der Wurzelbereich der Kristalle ist meist trüb und geht allmählich in einen dichten, jedoch feindrüsigen, weiß-gelblichen Derbquarz über. In einigen Kristallen konnten in der äußersten Wachstumszone kleine Hingganit-(Y)-Kristalle (THOMAS & DAVIDSON 2017) nachgewiesen werden. Als Einschlüsse in wasserklaren Quarzkristallen aus Drusen dominieren, neben Mikrokristallen von Feldspat (meist Orthoklas) und Glimmer, vor allem Flüssigkeitseinschlüsse. Erst beim genauen Hinschauen findet man auch Schmelzeinschlüsse in diesen Bereichen. Im polarisierten Licht sieht man in einigen wasserklaren Quarzkristallen Wachstumszonen, die mit Mikrokristallen (Albit, Apatit, hochgeordneter Graphit, Orthoklas, Rubiclin $[\text{Rb}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]]$, Sugilit $[\text{KNa}_2(\text{Fe}^{3+}, \text{Mn}^{3+}, \text{Al})_2\text{Li}_3\text{Si}_{12}\text{O}_{30}]$ und Schmelzeinschlüssen dekoriert sind (Abb. 2). Die Identifizierung der seltenen Mineral-Spezies erfolgte mittels Raman-Spektroskopie und wird in einer separaten Publikation abgehandelt.

Jedoch gibt es Quarzkristalle, die im Kernbereich alte, meist trübe Wachstumszonen aufweisen, die neben Flüssigkeitseinschlüssen auch sehr viele Schmelzeinschlüsse enthalten. Bereits der mikroskopische Befund weist auf eine mehrphasige Entstehungsgeschichte hin. Die beobachteten Schmelzeinschlüsse repräsentieren eine außergewöhnliche Einschlussparagenese, die in dieser Form im Gangquarz bisher noch nicht beschrieben wurde.

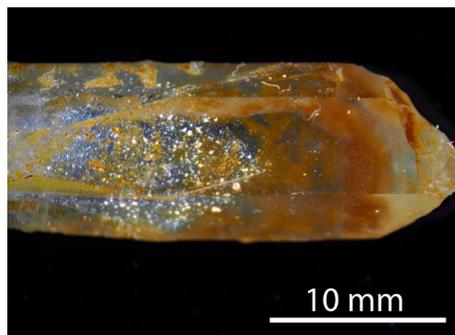


Abb. 2: Eine Wachstumszone, dekoriert mit Mineral- und Schmelzeinschlüssen in einem Bergkristall von Steingtwolmsdorf. Diese Zone ist nur unter polarisiertem Licht sichtbar.

Zum Vergleich wurden Quarzkristalle von Oppach (siehe THOMAS & DAVIDSON 2017) und Lauba (REINICKE 2017) mit herangezogen.

3 Untersuchungsmethoden

3.1 Präparate

Zur Untersuchung der Einschlüsse im Quarz kamen beidseitig polierte Dickschliffe, parallel zur c-Achse orientiert, mit einer Dicke von etwa 500 μm zur Anwendung.

3.2 Mikroskopie

Die Untersuchungen wurden mit dem Polarisationsmikroskop Jenalab Pol für Durch- und Auflicht durchgeführt. Die mikroskopischen Aufnahmen erfolgten mit der Mikroskopkamera ProgRes C10 und dem Stereomikroskop ZEISS „Stemi 305 trino“.

3.3 Microthermometrische Untersuchungen der Flüssigkeitseinschlüsse und der wässrigen Subphase in den Schmelzeinschlüssen

Die microthermometrischen Untersuchungen erfolgten mit einem geeichten LINKAM THMS 600 Heiz- und Gefriertisch zusammen mit dem TMS92 Steuergerät und dem LNP2 Kühlsystem auf einem Olympus Mikroskop. Der Heiz- und Kühltisch wurde mit synthetischen Flüssigkeitseinschlüssen (SYNFLINC) und Schmelzpunktstandards geeicht. Alle Messungen wurden im Argonstrom durchgeführt. Die Standardabweichungen der Messungen ist $\leq 2,5$ $^{\circ}\text{C}$ für Temperaturen größer 100 $^{\circ}\text{C}$ und $\leq 0,2$ $^{\circ}\text{C}$ für kryometrische Messungen niedriger als 20 $^{\circ}\text{C}$.

Die Salinität der Einschlüsse oder Lösungen wurde nach BAKKER (2003) mit dem Programm AqSo2e Version 03/02 für das System $\text{CaCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$ abgeschätzt. Die Betonung liegt auf abgeschätzt, da die genaue Bestimmung durch das metastabile Verhalten der Einschlusslösungen und deren Komplexität erheblich erschwert wird (siehe hierzu CHI et al. 2014) und extrem zeitaufwendig ist. In der Abb. 3 wird ein Flüssig-

sigkeitseinschluss bei zwei unterschiedlichen Temperaturen während der kryometrischen Messung gezeigt.

3.4 Homogenisierungsexperimente unter Druck (conventional horizontal cold-seal pressure vessel technique)

Beidseitig polierte Quarzplättchen, ca. 500 μm dick, wurden in eine quasi-offene Goldkapsel (5×30 mm) gegeben und in einem Druckgefäß in einem vorgeheizten horizontalen Ofen (jeweils 600, 650, 700 und 750 $^{\circ}\text{C}$) geschoben. Der Druck, jeweils 1, 2 und 3 kbar, wurde mittels CO_2 eingestellt. Die Versuchszeit betrug 20 Stunden. Nach dem jeweiligen Versuch wurde das Druckgefäß unter isobaren Bedingungen rasch aus dem Ofen gezogen und mit Druckluft abgekühlt. Die Abkühlgeschwindigkeit beträgt unter diesen Bedingungen 2 $^{\circ}\text{C}$ pro Sekunde. Nach dem Öffnen der nur

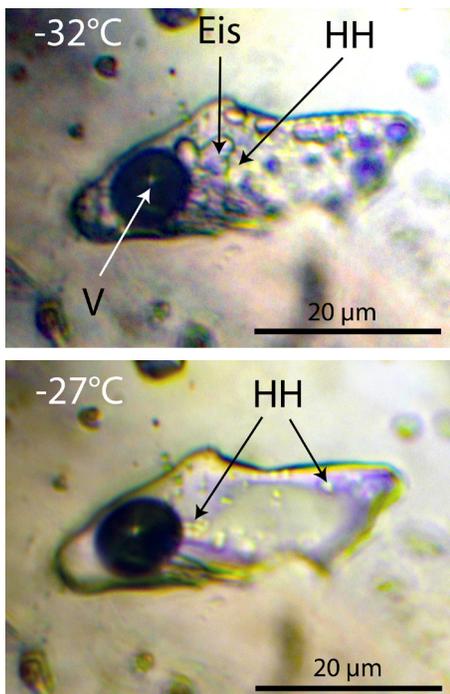


Abb. 3: Flüssigkeitseinschluss beim Aufheizen von -100 $^{\circ}\text{C}$ (Gefrieretemperatur) bei zwei unterschiedlichen Temperaturen (-32 und -27 $^{\circ}\text{C}$). Bei -32 $^{\circ}\text{C}$ sind Eis- und Hydrohalitkristalle vorhanden. Die Eiskristalle schmelzen bei -27 $^{\circ}\text{C}$ und Hydrohalit (HH) bei $-19,6$ $^{\circ}\text{C}$. V – Dampfblase.

locker geschlossenen Goldkapseln konnten die Proben ohne weitere Behandlung sofort mikroskopisch untersucht werden (siehe auch THOMAS & DAVIDSON 2016, Electronic supplementary material EMS2). Durch die Verwendung von CO_2 als Druckmittel schließt man eine Kontamination mit H_2O aus.

3.5 Ramanspektroskopie

Die Raman-Spektren wurden mit dem JobinYvon LabRamHR800 Spektrometer (Grating 1800 g/mm), gekoppelt mit einem Olympus-Mikroskop und dem LD Objektiv LMPlan 100x/0.80, aufgezeichnet. Zur Raman-Anregung wurde die 488 nm Wellenlänge des Ar^+ Lasers, Modell Innova 70C mit einer Leistung von 45 mW auf der Probe eingesetzt. Die Spektren wurden bei konstanter Umgebungstemperatur (20 $^{\circ}\text{C}$) mit einem Peltier-gekühlten CCD-Detektor (Auflösung $\leq 0,6$ cm^{-1}) aufgenommen. Die genaue Position der Raman-Banden wurden mit den Plasmaliniien des Argon-Lasers kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert.

Für die Wasserbestimmung im Einschlussglas haben wir die von THOMAS et al. (2006) angegebene Methode verwendet. Als Referenzprobe diente ein synthetisches Silikatglas mit 5,21 % (g/g) Wasser. Dieser Standard wurde mit 20 unterschiedlichen und gut charakterisierten Gläsern mit unterschiedlichen Wassergehalten (10 ppm bis 30 % (g/g) „cross-checked“ (siehe u.a. THOMAS et al. 2006).

Für die Identifizierung der Minerale und Tochter-Mineral-Phasen mittels Raman-spektroskopie in den Einschlüssen diente die RRUFF-Datei (LAFUENTE et al. 2015), als auch eigene Raman-Standards.

4 Ergebnisse

Bei der ersten Durchsicht fallen Flüssigkeitseinschlüsse auf, die hauptsächlich in den wasserklaren Partien der Quarzkristalle auftreten und oft an die äußersten Wachstumszonen gebunden sind. Diese Einschlüsse homogenisieren bei 191 ± 5 $^{\circ}\text{C}$ ($n = 22$) in der flüssigen Phase. Ähnliche Werte wurden auch

für die Quarzkristalle von Lauba erhalten: $182 \pm 8 \text{ °C}$ ($n = 14$). Diese, die hydrothermalen und sekundären Flüssigkeitseinschlüsse, meist zweiphasig, werden jedoch im Folgenden nicht weiter berücksichtigt. Die Quarzkristalle von Lauba enthalten, neben den Flüssigkeitseinschlüssen, eine ähnliche Schmelzeinschlussparagenese wie der Quarz von Steinigtwolmsdorf und Oppach. Auch kleine Hingganit-(Y)-Kriställchen konnten im Lauba-Material nachgewiesen werden.

4.1 Primäre Flüssigkeits- und Schmelzeinschlüsse

Von den stets vorhandenen sekundären Einschlüssen abgesehen, treten in den Quarzkernen zahlreiche zweiphasige Flüssigkeitseinschlüsse auf. Zwei Gruppen mit Homogenisierungstemperaturen von $360 \pm 8 \text{ °C}$ ($n = 12$) und $425 \pm 8 \text{ °C}$ ($n = 24$) dominieren. Die Lösungen dieser Flüssigkeitseinschlüsse sind vom Typ $\text{CaCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$, und deren Konzentration schwankt in weiten Grenzen: 6,4 bis 12,1 % (g/g) NaCl und 14,1 bis 21,6 % (g/g) CaCl_2 .

Daneben findet man auch Flüssigkeitseinschlüsse mit NaCl-Tochterkristallen, wobei auch hier sehr unterschiedlich hohe Konzentrationen auftreten – bis zu 58 % NaCl konnten gefunden werden. In den Einschlüssen mit extrem hoher NaCl-Konzentration findet man oft kleine Shortit-Kristalle (maximal 2 % (vol/vol)). Shortit [$\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{CO}_3)_3$] ist etwas ungewöhnlich, da dieses Mineral hauptsächlich in Alkalipegmatiten auftritt (PEKOV 2000). Wichtig für die Untersuchungen ist auch die Beobachtung, dass bei etwa 450 °C eine intensive Dekreпитation des Quarzes einsetzt, die der Untersuchung auf dem Heiztisch klare Grenzen setzt.

In den folgenden Abbildungen (Abb. 4 bis 8) werden einige typische Schmelzeinschlüsse, sowie syngenetische Flüssigkeitseinschlüsse gezeigt. Eine ähnliche Einschlussparagenese konnte bisher noch nie im Gangquarz der Lausitz gezeigt werden. Nach dem Phasenaufbau und dem Homogenisierungsverhalten ähneln die Einschlüsse durchaus denen im Pegmatitquarz des Königshainer Granites (THOMAS et al. 2009, 2016) oder denen im Quarzgang von Oppach (THOMAS & DAVIDSON 2017).

Die erste Überraschung der Untersuchungen war der eindeutige Nachweis von extrem H_2O -reichen Schmelzeinschlüssen in den Quarzkernen. Nach der Rehomogenisierung und dem Abschrecken bestehen die Schmelzeinschlüsse aus einem Silikatglas und einer H_2O -reichen Phase mit einer Dampfblase. Bemerkenswert ist, dass sich einige Schmelzeinschlüsse durch extrem hohe NaCl-Konzentrationen auszeichnen. Die Anwesenheit von Halitkristallen in der wässrigen Phase demonstriert dies. Auch einige syngenetische Flüssigkeitseinschlüsse enthalten bis 58 % (g/g) NaCl.

Das Einschlussglas enthält nach den Raman-spektrometrischen Bestimmungen an 40 Einschlüssen $6,2 \pm 1,5 \text{ % (g/g) H}_2\text{O}$. Der Gesamtwassergehalt der Schmelzeinschlüsse ergibt sich aus der Summe der Volumenanteile des Wassers im Glas und der H_2O -reichen Phase.

Durch den hohen Wassergehalt der Schmelze ist die Erhaltung des homogenen Zustandes nicht möglich. Die Einschlüsse heterogenisieren

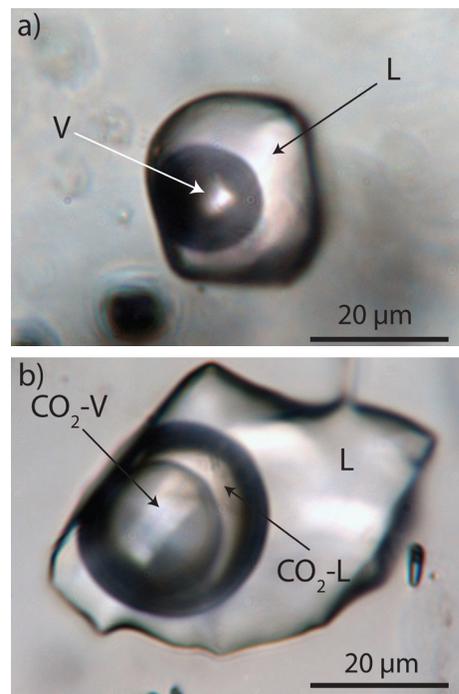


Abb. 4: Der Einschluss a) ist ein Zweiphasen-Flüssigkeitseinschluss, der bei 425 °C homogenisiert; V – Dampfblase, L – salzreiche wässrige Lösung. Der Einschluss b) ist ein gemischter $\text{H}_2\text{O-CO}_2$ -Einschluss; $\text{CO}_2\text{-V}$ – CO_2 in der Gasphase, $\text{CO}_2\text{-L}$ – bei Raumtemperatur flüssiges CO_2 , L – wässrige Lösung.

ren, selbst beim raschen Abkühlen. Erst mit einer Abkühlrate von 100 °C/s (Rapid-quench Technik) gelingt es die wasserreiche Schmelze homogen (aber sehr metastabil) zu erhalten. Weiterhin kann gezeigt werden, dass es in Analogie zu den Untersuchungen am Pegmatit von Ehrenfriedersdorf (THOMAS et al. 2000) prinzipiell zwei Einschlusstypen (A-Typ und B-Typ Einschlüsse) gibt, die einen Solvus in den Koordinaten Temperatur und Wassergehalt in der Schmelze bilden. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 1 und der Abb. 9 dargestellt. Ein-

zelheiten können der Arbeit von THOMAS et al. (2019) entnommen werden. Hier sollen nur die Hauptergebnisse vorgestellt werden, die die Genese des Gangquarzes bestimmen.

In der Tabelle 2 sind die Ergebnisse der kryometrischen Bestimmungen an den flüssigen Phasen der Einschlüsse zusammengefasst. Die flüssige Phase der Schmelzeinschlüsse entsteht nach der Homogenisierung unter Druck, selbst beim raschen Abkühlen (~2 °/sec). Der Volumenanteil der flüssigen Phase hängt primär vom Gesamtwassergehalt in der Schmelze ab.

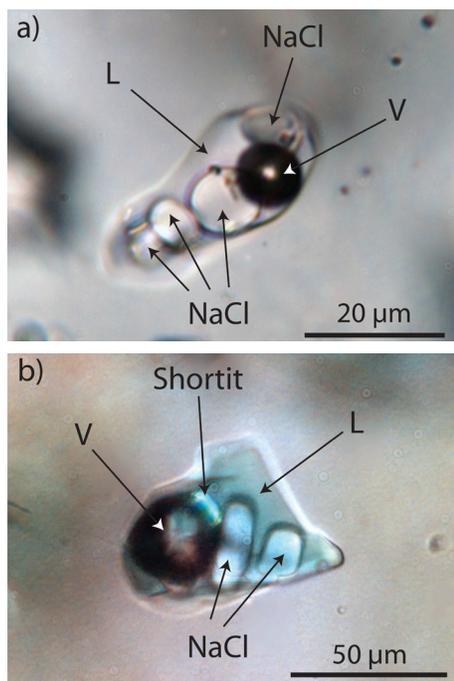


Abb. 5: Die Einschlüsse a) und b) sind salzreiche Flüssigkeitseinschlüsse. Im Einschluss b) befindet sich neben NaCl ein Shortitkristall. L – Lösung, V – Dampfblase.

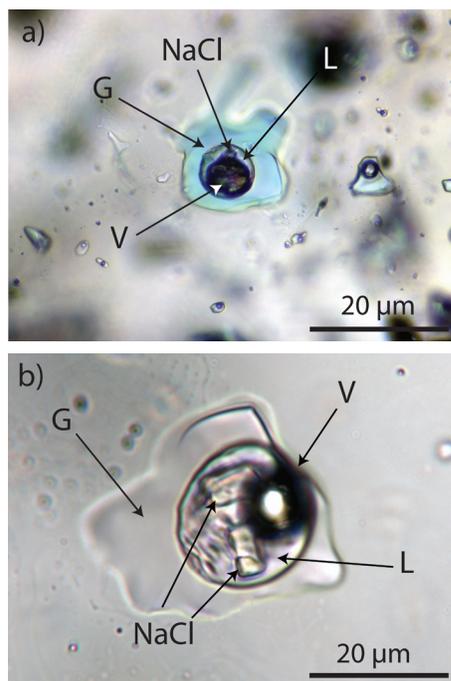


Abb. 6: Typ-A Schmelzeinschlüsse im Quarz. Diese Einschlüsse enthalten im Glas (G) eine salzreiche wässrige Lösung (L) mit Dampfblase (V) und Halitkristalle (NaCl).

Tab. 1: Ergebnisse der Wasserbestimmung an den Schmelzeinschlüssen im Quarz von Steinigtwolmsdorf. SD – Standardabweichung der H₂O-Bestimmung, n – Zahl der untersuchten Einschlüsse.

| Temperatur (°C) | H ₂ O % (g/g) | SD | Einschlusstyp | n |
|-----------------|--------------------------|-----|---------------|---|
| 700 | 13,80 | 1,5 | Typ-A MI | 2 |
| 720 | 16,85 | 1,6 | Typ-A MI | 5 |
| 740 | 21,80 | 2,0 | Typ-A MI | 5 |
| 740 | 27,00 | 1,7 | kritische MI | 4 |
| 720 | 34,30 | 2,0 | Typ-B MI | 5 |
| 700 | 36,98 | 2,0 | Typ-B MI | 2 |
| 640 | 46,66 | 2,5 | Typ-B MI | 2 |
| 560 | 56,40 | 2,5 | Typ-B-MI | 2 |

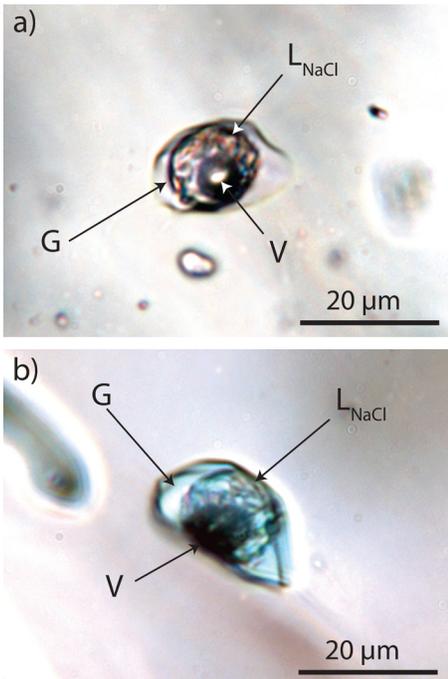


Abb. 7: Zwei extreme Schmelzeinschlüsse mit hoher NaCl-Konzentration (L_{NaCl}) in der wässrigen Lösung nach der Rehomogenisierung bei 740 °C und 3 kbar. Diese Einschlüsse wurden in der Nähe des kritischen Punktes eingeschlossen (G – Glas, V – Dampfblase, L_{NaCl} – hochkonzentrierte NaCl-Lösung). Nach Raman-spektrometrischen Untersuchungen enthalten diese Einschlüsse neben $CaCl_2$ auch hohe Gehalte an Na-Hydroxid (starke symmetrische OH-Stretching Bande bei 3664 cm^{-1} , siehe WALRAFEN & DOUGLAS 2006).

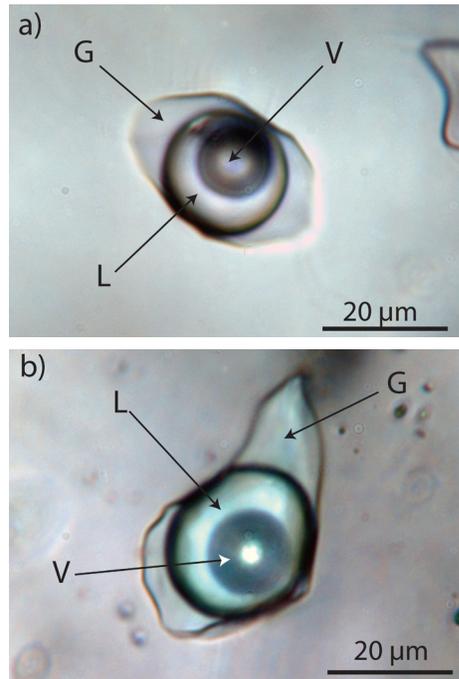


Abb. 8: Typ-B Schmelzeinschlüsse im Quarz nach dem Homogenisierungsexperiment. Diese Einschlüsse bestehen aus einem H_2O -reichen Glas (G), einer konzentrierten Lösung mit $NaCl$ und $CaCl_2 \cdot 6 H_2O$ (L).

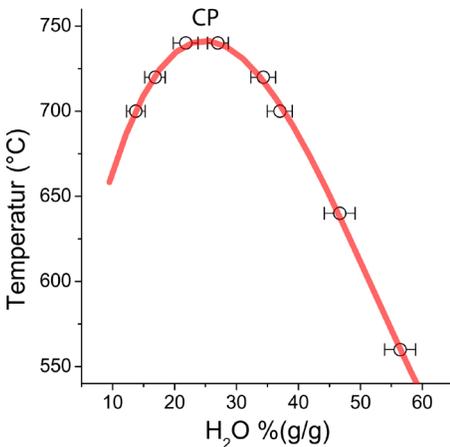


Abb. 9: Pseudobinäarer Solvus (Temperatur vs. Wassergehalt), abgeleitet aus den unterschiedlichen Schmelzeinschlüssen (Druck~4,5 kbar) im Quarz von Steinigtwolmsdorf (siehe Tabelle 1).

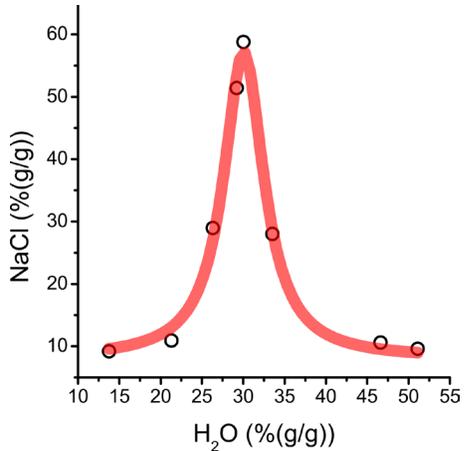


Abb. 10: Lorentz-Verteilung von NaCl in Abhängigkeit vom Gesamtwassergehalt der Schmelzeinschlüsse (siehe THOMAS et al. 2019).

Neben den beiden Hauptkomponenten NaCl und CaCl₂ findet man in der flüssigen Phase der Schmelzeinschlüsse gelegentlich kleine, doppelbrechende Kristalle, die sich mittels Ramanspektroskopie als Shorffit [Na₂Ca₂(CO₃)₃] erwiesen. Dass CO₂ im Schmelz-Wasser-System eine Bedeutung hat, erkennt man auch am Auftreten von CO₂-reichen Flüssigkeitseinschlüssen und daran, dass in den H₂O-reichen Schmelzeinschlüssen kleine doppelbrechende Kristalle beobachtet werden können, die bei +1,6 °C schmelzen. Nach NYVLT (1977) resultiert aus dieser Schmelztemperatur eine Na₂CO₃-Konzentration von ~7,0 (%(g/g)) Na₂CO₃ • 10H₂O.

Wenn man die NaCl-Konzentration der Schmelzeinschlüsse gegen den Gesamtwassergehalt aufträgt (Abb. 10), erhält man eine Lorentz-Verteilung mit den folgenden Parametern: Zentrum 30 % H₂O, Halbwertsbreite 5,9 % H₂O, Offset 8,0 % NaCl, Höhe 49,2 % NaCl. Zu beachten ist, dass neben NaCl und CaCl₂ auch erhebliche Gehalte an MgCl₂, LiOH, NaOH vorhanden sind. Dies erkennt man anhand der Abbildung 11 an den beiden symmetrischen Raman-Banden bei 3465 und 3632 cm⁻¹ (siehe MALTSEVA et al. 2019, WALRA-

FEN & DOUGLAS 2006, URIARTE et al. 2014). Das bedeutet aber auch, dass die Chlorkonzentration am kritischen Punkt noch viel höher sein wird. Die CaCl₂-Raman-Bande bei 3465 cm⁻¹ erscheint nur bei festen CaCl₂-Hydraten.

Die Differenz zwischen dem Zentrum (30 % H₂O) der Lorentz-Kurve und dem kritischen Punkt (27 % H₂O) des Solvus resultiert aus der schwierigen Bestimmung der kritischen Temperatur – die Kurve in der Nähe des kritischen Punktes verläuft sehr flach. Außerdem ist mit Wasserverlusten durch Diffusion zu rechnen. Die genaue Größenordnung kann momentan nicht abgeschätzt werden. Aber an der Grundaussage ändert sich dadurch nichts.

Solche Elementverteilungen über dem Solvus sind typisch für den superkritischen Zustand im magmatischen Temperaturbereich (siehe THOMAS et al. 2019).

Das Nebeneinander der unterschiedlichen Einschlusstypen (H₂O-reiche Schmelzeinschlüsse, Halit-reiche Flüssigkeitseinschlüsse, zweiphasige Flüssigkeitseinschlüsse, gemischte CO₂-haltige Flüssigkeitseinschlüsse) spricht für ein hochdynamisches Kristallisationsgeschehen zu Beginn der Quarzgang-

Tab. 2: Ergebnisse der kryometrischen Untersuchungen an Flüssigkeits- und Schmelzeinschlüssen im Quarz von Steinigtwolmsdorf. T_H – Homogenisierungstemperatur, T_{Eis} – Eis-Schmelztemperatur, T_{HH} – Hydrohalit-Schmelztemperatur, T_{NaCl} – Halit-Lösungs-Temperatur, A – Typ-A Schmelzeinschlüsse, B – Typ-B Schmelzeinschlüsse, C- Schmelzeinschlüsse in der unmittelbaren Nähe des kritischen Punktes gebildet, n – Zahl der Bestimmungen.

| Flüssigkeitseinschlüsse | | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|---|
| | T _H (°C) | T _{Eis} (°C) | T _{HH} (°C) | NaCl (%) | CaCl ₂ (%) | n | |
| | 360 ± 8 | -27,0 | -19,6 | 12,1 | 14,1 | 5 | |
| | 425 ± 8 | -28,7 | -19,5 | 8,7 | 17,8 | 5 | |
| | 422 | -30,4 | -18,4 | 7,5 | 19,6 | 2 | |
| Schmelzeinschlüsse | | | | | | | |
| Einschluss-Typ | H ₂ O (%(g/g)) | T _{NaCl} (°C) | T _{Eis} (°C) | T _{HH} (°C) | NaCl (%) | CaCl ₂ (%) | n |
| A | 13,8 | - | -28,7 | -7,8 | 9,6 | 17,9 | 5 |
| A | 18,2 | 144 | - | -3,0 | 26,3 | 2,9 | 1 |
| A | 21,3 | - | -28,1 | -2,0 | 10,9 | 17,2 | 5 |
| A | 26,3 | 279 | - | -7,8 | 29,0 | 12,7 | 1 |
| C | 29,2 | 456 | - | - | 51,4 | n.b. | 1 |
| C | 30,0 | 526 | - | - | 58,8 | n.b. | 1 |
| B | 33,5 | 147 | - | -3,0 | 26,4 | 3,0 | 1 |
| B | 46,6 | - | -28,2 | -3,0 | 10,6 | 17,3 | 3 |
| B | 51,1 | - | -28,7 | -7,8 | 9,6 | 17,9 | 2 |

bildung im superkritisch-magmatischen bis hoch-hydrothermalen Zustandsbereich.

Die hohen Temperaturen (≥ 700 °C) werden auch durch das Auftreten von ca. 10 bis 20 μm großen hoch-geordneten Graphitkristallen im Quarz angezeigt. Das Raman-Spektrum dieses Graphits ist durch das Fehlen der D1-Bande bei ~ 1355 cm^{-1} und der sehr scharfen symmetri-

schen G-Bande bei 1581 cm^{-1} (Halbwertsbreite 13,3 cm^{-1}) gekennzeichnet (siehe HURAI et al. 2015 und THOMAS et al. 2018). Der Quarz aus einem O–W-streichenden Gang im Königshainer Granit (THOMAS & DAVIDSON 2016) enthält ebenfalls ganz analoge Graphitkristalle: G-Bande bei 1580 cm^{-1} mit einer Halbwertsbreite von 14,1 cm^{-1} .

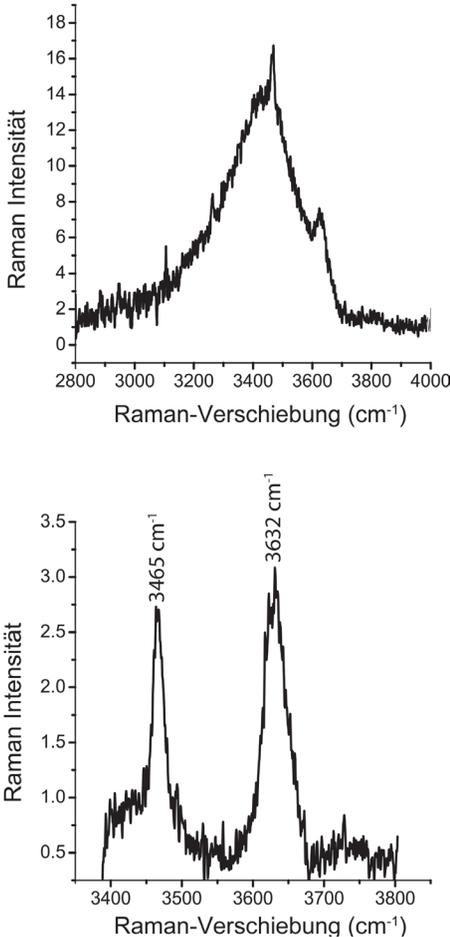


Abb. 11: Raman-Spektrum im (2800–4000 cm^{-1})-Bereich der fluiden Phase in einem Einschluss (siehe Abb. 7a, 7b) bei Raumtemperatur, der nahe der superkritischen Bedingungen gebildet wurde. Das Spektrum a) zeigt das Gesamtspektrum des molekularen Wassers mit den Satellitenbanden bei 3465 und 3632 cm^{-1} . Im Spektrum b) wurde der Anteil des molekularen Wassers subtrahiert. Die beiden symmetrischen OH-Banden repräsentieren im Wesentlichen Kristallisationswasser (LUTZ 1988) und resultiert hier aus den hohen Konzentrationen an $\text{CaCl}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ (linke Bande) und die rechte Bande ergibt sich aus relativ hohen Konzentrationen an NaOH , $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ und $\text{AlCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$.

5 Interpretation der Beobachtungen

Der Nachweis von Schmelzeinschlüssen im Quarz von Steinigtwolmsdorf zeigt klar, dass die Bildung der Quarzgänge um Steinigtwolmsdorf auf magmatische Prozesse zurückzuführen ist. Weiterhin wird klar, dass nach der primären Anlage unter hohen Temperaturen und Drucken, die Quarzgänge mehrfach hydrothermal, dann doch bei wesentlich niedrigeren Temperaturen, überprägt wurden. Die Überprägung war jedoch nicht so intensiv, da die primären Schmelzeinschlüsse nicht ausgelöscht wurden. Zu Beginn der Gangbildung bilden sich nach der ersten intensiven Quarzkristallisation aus der extrem H_2O -reichen Silikatschmelze in der Tiefe superkritische Lösungen, die hinsichtlich ihrer Zusammensetzung exotisch sind (siehe hierzu SMITH 1948). Die extrem hohe NaCl - und CaCl_2 -Konzentration einer H_2O -reichen Silikatschmelze ist ein Novum. Die höchsten NaCl - und CaCl_2 -Konzentrationen dieser Silikatschmelze werden in der Nähe des kritischen Punktes des Silikatschmelze- H_2O -Solvus, also bei rund 750 °C erreicht. Das heißt, im superkritischen Zustand sind NaCl und auch CaCl_2 in sehr hohen Konzentrationen gelöst. Beim geringfügigen Abkühlen kommt es zur Schmelzenbildung, die sich entlang eines Solvus entwickelt, d. h. es koexistieren jeweils zwei Schmelzen mit unterschiedlichen Wassergehalten. Gleichzeitig werden auch fluide Phasen mit sehr hohen NaCl - und CaCl_2 -Konzentrationen ausgeschieden. Diese Phasenverhältnisse, möglicherweise metastabil, sind in dieser Form bisher in der Natur noch nicht beobachtet und beschrieben worden.

Zu Beginn der Quarzgangbildung kristallisieren aus den beiden koexistierenden Silikatschmelzen granitische Silikatphasen neben viel Quarz aus. Mit Abnahme der Temperatur

unter etwa 600 °C wird hauptsächlich Quarz ausgeschieden, der später im Wesentlichen nur noch umkristallisiert wird.

Über den Ort des primären Geschehens erhält man eine erste Auskunft von den syngenetischen Flüssigkeitseinschlüssen. Für die Einschlüsse, die bei 425 °C homogenisieren, ergibt sich nach BAKKER (2003) ein Druck von etwa $4500 \cdot 10^5$ Pa bei 750 °C (Isochorengleichung: $P (10^5 \text{ Pa}) = 12,59 \cdot t (^\circ\text{C}) - 5007,4$). Diesem Druck entspricht eine Tiefe von etwa 15 km. Da die meisten der untersuchten Einschlüsse aus relativ klaren Quarzkristallen stammen, kann man davon ausgehen, dass primär sogar mit höheren Temperaturen und höheren Drucken gerechnet werden muss. Die Kristallisation des Drusenquarzes erfolgt im Tiefquarz-Feld, da ansonsten durch die α - β -Umwandlung die primären Einschlüsse ausgelöscht worden wären. Nach FRONDEL (1962) ergeben sich für die Temperaturen von 750 und 700 °C jeweils Drucke von 7300 und $5200 \cdot 10^5$ Pa als Maximum. Damit verschiebt sich der Existenzbereich von offenen Drusen zu deutlich höheren Druckwerten (von kleiner 3 kbar zu Werten um 5 oder mehr kbar); siehe hierzu die Diskussion in MÜLLER et al. (2018).

Da die untersuchten Proben von der heutigen Oberfläche stammen, folgt daraus, dass seit der Bildung des Quarzanges von Steinigtwolmsdorf eine erhebliche Abtragung stattgefunden haben muss. TIETZ et al. (2018) konnten anhand von Inkohlungsmessungen eine postkretazische Hebung des benachbarten Zittauer Gebirges um 3,9–4,8 km postulieren. Der berechnete Betrag dürfte trotzdem auf erhebliche Interpretationsschwierigkeiten stoßen. Das resultierende Dilemma kann nur durch weitere, vertiefende Untersuchungen gelöst werden. Ein möglicher Ansatz wäre die Annahme, dass das superkritische System gegenüber der Umgebung als hermetisch geschlossenes System (natürlicher Autoklav) betrachtet werden muss. Der Einschluss in Abbildung 12 weist auf so eine Möglichkeit hin. Die Phasengrenze zum Quarz wird durch Ausscheidung von Silikatphasen (Feldspat) stabilisiert und ermöglicht den Aufbau eines wesentlich höheren Interndrucks. Eine Analogie zu den miarolitischen Pegmatiten von Königshain kann durchaus gesehen werden (THOMAS & DAVIDSON 2016).

Aus dem Solvus folgt, dass das System offenbar bis 600 oder 550 °C als geschlossen gelten kann (Drusen-Raum). Danach öffnet sich das System (tektonische Aktivität) und aus der Isochoren-Gleichung (siehe oben) resultiert nun ein Druck von 1,9 kbar. Diesem Wert entspricht eine Tiefe von etwa 7,25 km als Maximum, was der Realität schon näher kommt, aber wahrscheinlich immer noch zu tief ist.

Der Phasenaufbau der Einschlüsse und die Temperatur- und Druckbedingungen bei der Kristallisation des Quarzes legt einen klaren genetischen Zusammenhang zu den jüngsten Granitintrusionen im Lausitzer Massiv (Königshain, Stolpen) nahe. Der Aussage von BARTNIK (1969), dass eine liquidmagmatische oder pegmatitische Entstehung ausscheidet, kann in dieser Absolutheit nicht geteilt werden. Zu klären wäre auch die Frage, ob es sich bei den Quarzängen vom Typ „Steinigtwolmsdorf“ um die Wurzeln ehemaliger hydrothermaler Erzgänge handelt (LEH, M. – mündliche Mitteilung), die durch Erosion abgetragen wurden (siehe hierzu auch THOMAS & DAVIDSON 2017). Eine genaue Einordnung des Alters der Gänge kann, wie bereits ausgeführt, momentan nicht vorgenommen werden. Auf jeden Fall wurde der Quarzgang von Steinigtwolmsdorf unter magmatischen Bedingungen angelegt. Die Schmelzeinschlüsse im Quarz von Steinigtwolmsdorf ähneln durchaus den Einschlusspa-

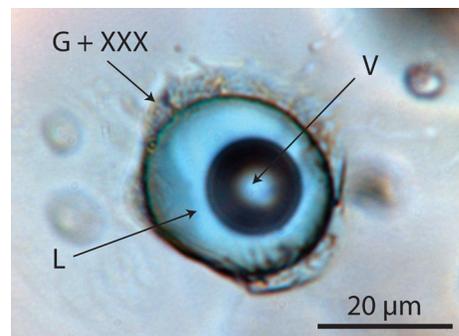


Abb. 12: H₂O-reicher Typ-B Schmelzeinschluss im Quarz von Steinigtwolmsdorf nach der Rehomogenisierung (L – Salz-reiche wässrige Lösung, V – Dampfblase, G+XXX – Glas mit Orthoklas-Kristallen). Beim Abkühlen wurde an der Einschlusswandung Glas und Feldspat abgelagert. Beginnender Wasserverlust wird durch die Versiegelung der Einschlusswandung verhindert. Die Versiegelung erkennt man an den schwach angedeuteten „Schmelzfahnen“ auf der rechten Seite des Einschlusses, d. h. der Einschluss hat bereits über Mikrorisse etwas Wasser verloren.

ragenesen im Quarz von Lauba, Oppach, dem E–W-streichenden Quarzgang von Königshain und auch den miarolitischen Pegmatiten im Königshainer Granit selbst. Aus diesen Beobachtungen folgt, dass das wahrscheinlichste Alter der Primäranlage der genannten Gänge mit dem Alter des Königshainer Stockgranites nahezu gleichzusetzen ist (siehe LANGE et al. 2004, SCHWARZ et al. 2015). Das Auftreten von Rubiclin und anderen seltenen Mineralen spricht durchaus dafür. Weiterhin folgt aus den Untersuchungen, dass eine spätere intensive tektonische Beanspruchung der hier genannten O–W-streichenden Gänge ausgeblieben ist. Das guterhaltene Einschlussinventar belegt das sehr überzeugend. Durch das postulierte primäre Alter rückt die angedeutete große Abtragungsrate in den Bereich der Möglichkeit.

Danksagung

Die Autoren möchten Michael Leh (Neschwitz) für die Anregung zu dieser Arbeit danken. Die Autoren danken weiterhin Dr. Hans-Jörg Hunger (Erfstadt) und Dr. Axel Bernd Müller (Oslo) für ihre konstruktiven Gutachten.

Literatur

- BAKKER, R.J. (2003): Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. – *Chemical Geology* **194**: 3–23
- BARTNIK, D. (1969): Die Quarzgänge im Lausitzer Massiv – *Geologie* **18**: 21–40
- CHI, G., H. CHU, R. SCOTT & I.M. CHOU (2014): A new method for determining fluid compositions in the H₂O–NaCl–CaCl₂ system with cryogenic Raman spectroscopy. – *Acta Geologica Sinica* **88**: 1169–1182
- EBEL, H.F., C. BLIEFERT & W.E. RUSSEY (2004): *The Art of Scientific Writing*. – Wiley-VCH Verlag GmbH 6 Co; Weinheim: 595 S.
- FRONDEL, C. (1962): *The system of Mineralogy*. III, Silica minerals. – John Wiley and Sons, Inc; New York and London: 334 S.
- GERTH, A. (2012): *Reise in die Erdgeschichte der Oberlausitz, des Elbsandsteingebirges und Nordböhmens*. Teil 1 (Proterozoikum bis Kreide). – Oberlausitzer Verlag Frank Nürnberger; Spitzkunnersdorf: 528 S.
- HURAI, V., M. HURAIJOVÁ, M. SLOBODNÍK & R. THOMAS (2015): *Geofluids*. – Elsevier; Amsterdam: 489 S.
- LAFUENTE B., R.T. DOWNS, H. YANG & N. STONE (2015): The power of databases: the RRUFF project. In: ARMBRUSTER T. & R. M. DANISI (eds): *Highlights in mineralogical crystallography*. W. De Gruyter; Berlin: 1–30
- LANGE, W., G. TISCHENDORF & U. KRAUSE (2004): *Minerale der Oberlausitz*. – Verlag Gunter Oettel; Görlitz-Zittau: 258 S.
- LUTZ, H. D. (1988): Bonding and structure of water molecules in solid hydrates. Correlation of spectroscopic and structural data. – *Structure and Bonding* **69**, Springer; Berlin: 97–125
- MALTSEVA, A, V. SHKIRSKIY, G. LEFÈVRE & P. VOLOVITCH (2019): Effect of pH on Mg(OH)₂ film evolution on corroding Mg by in situ kinetic Raman mapping (KRM). *Corrosion Science* **153**: 272–282
- MÜLLER, A., J. SPRATT, R. THOMAS, B.J. WILLIAMSON & R. SELTMANN (2018): Alkali-rich albite zones in evolved NYF pegmatites: The product of melt-melt immiscibility. *Canadian Mineralogist* **56**: 657–687
- NÝVLT, J. (1977): *Solid-Liquid Phase Equilibria*. – Elsevier; Amsterdam: 248 S.
- PEKOV, I.V. (2000): *Lovozero Massif*. – Vneshtorgizdat Publishing; Moskau: 480 S.
- REINICKE, R. (2017): *Oberlausitzer Diamanten*. – Oberlausitzer Hausbuch für 2016. Lusatia Verlag; Bautzen: 102–103
- SCHWARZ, D., O. TIETZ, O. ROGALLA & F. ROSCH (2015): Ein Quarzgang am Gemeindeberg von Kollm in der Oberlausitz. – *Berichte der Naturforschenden Gesellschaft der Oberlausitz* **23**: 139–150
- SMITH, F.G. (1948): Transport and deposition of the non-sulphide vein minerals. III, Phase relations at the pegmatitic stage. – *Economic Geology* **43**: 535–546
- THOMAS, R. & P. DAVIDSON (2016): Origin of miarolitic pegmatites in the Königshain granite/Lusatia. – *Lithos* **260**: 225–241
- THOMAS, R. & P. DAVIDSON (2017): Hingganite-(Y) from a small aplite vein in granodiorite from Oppach, Lusatian Mts., E-Germany. – *Mineralogy and Petrology* **111**: 821–826
- THOMAS, R., P. DAVIDSON & K. APPEL (2019): The enhanced element enrichment in the supercrit-

- ical states of granite-pegmatite systems. – *Acta Geochimica* **38**: 335–349
- THOMAS, R., P. DAVIDSON, D. RHEDE & M. LEH (2009): The miarolitic pegmatites from the Königshain: a contribution to understanding the genesis of pegmatites. – *Contribution to Mineralogy and Petrology* **157**: 505–523
- THOMAS, R., V.S. KAMENETSKY & P. DAVIDSON (2006): Laser Raman spectroscopy measurements of water in unexposed glass inclusions. – *American Mineralogist* **91**: 467–470
- THOMAS, R., A. RERICHA, L. POHL & P. DAVIDSON (2018): Genetic significance of the 867 cm⁻¹ out-of-plane Raman mode in graphite associated with V-bearing green grossular. – *Mineralogy and Petrology* **112**: 633–645
- THOMAS, R., J. D. WEBSTER & W. HEINRICH (2000): Melt inclusions in pegmatite quartz: complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids at low pressure. – *Contribution to Mineralogy and Petrology* **139**: 394–401
- TIETZ, O., W. LANGE, N. VOLKMANN, H. GERSCHEL, E. WENGER, M. WILMSEN, M. SVOBODOVÁ & J. BÜCHNER (2018): Steinkohle in den Oberkreide-Sandsteinen von Waltersdorf im Zittauer Gebirge, Sachsen. – *Berichte der Naturforschenden Gesellschaft der Oberlausitz* **26**: 77–105
- URIARTE, L.M., J. DUBESSY, P. BOULET, V.G. BAONZA, I. BIHANNIC & P. ROBERTS (2014): Reference Raman spectra of synthesized CaCl₂ • nH₂O solids (n = 0, 2, 4, 6)
- VOLLSTADT, H. (1979): *Einheimische Minerale*. – VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig: 399 S.
- WALRAFEN, G.E. & R.T.W. DOUGLAS (2006): Raman spectra from very concentrated aqueous NaOH and from wet and dry, solid, and anhydrous molten, LiOH, NaOH, and KOH. – *The Journal of Chemical Physics* **124**: 114504-1–114504-14
- WITZKE, T. & T. GIESLER (2011): Neufunde und Neubestimmungen aus der Lausitz (Sachsen), Teil 3. – *Der Aufschluss* **62**, 1/2: 27–38

Anschriften der Verfasser

Dr. sc. nat. Rainer Thomas
Helmholtz-Zentrum Potsdam
GeoForschungszentrum Potsdam,
Sektion 3.6
Telegrafenberg
D-14473 Potsdam
E-Mail: thomas@gfz-potsdam.de

Dr. Paul Davidson, CODES, Centre for Ore
Deposit and Earth Science
University of Tasmania
Hobart 7001, Australia
E-Mail: paul.davidson@utas.edu.au

Dr. rer. nat. Adolf Rericha
Alemannenstr. 4a
D-14612 Falkensee,
E-Mail: ruth.rericha@gmx.de

Dr. Olaf Tietz
Senckenberg Museum für Naturkunde
Görlitz
Am Museum 1
02826 Görlitz
E-Mail: olaf.tietz@senckenberg.de

| | |
|-------------------|------------|
| Manuskripteingang | 30.7.2019 |
| Manuskriptannahme | 16.9.2019 |
| Erschienen | 24.10.2019 |

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der Naturforschende Gesellschaft der Oberlausitz](#)

Jahr/Year: 2019

Band/Volume: [27](#)

Autor(en)/Author(s): Thomas Rainer, Davidson Paul, Rericha Adolf, Tietz Olaf

Artikel/Article: [Eine außergewöhnliche Einschlussparagenese im Quarz von Steinigtwolmsdorf/Oberlausitz 161-172](#)