

**SCHMELZEINSCHLÜSSE IN MINERALEN GRANITOIDER GESTEINE -  
ABSCHÄTZUNG DER SOLIDUS-, LIQUIDUS- UND HOMOGENISIERUNGS-  
TEMPERATUREN UND -DRÜCKE**

von

**Rainer Thomas<sup>+</sup>**

(eingelangt am 28. 4. 1992, angenommen am 2. 6. 1992)

**Einleitung**

Bei der mikroskopischen Untersuchung von Gesteinsdickschliffen beobachtet man in transparenten Mineralen Quarz, Topas, Apatit, Turmalin, Granat, Sillimanit und manchmal auch im Kalifeldspat, neben der verwirrenden Vielfalt von Flüssigkeitseinschlüssen, silikatische Schmelzeinschlüsse. Bei Raumtemperatur bestehen solche Einschlüsse aus festen Phasen (Silikatglas und/oder Mineralphasen) und Resten fluider Komponenten (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> u.a.) in Form schwererkennbarer Filme zwischen den festen Phasen bzw. mehr oder weniger stark deformierter Gasblasen und/oder Flüssigkeitstropfen. Die Häufigkeit der Schmelzeinschlüsse variiert von Probe zu Probe beträchtlich.

Oft findet man in einem Gesteinsdickschliff von 8 cm<sup>2</sup> weniger als 10 Schmelzeinschlüsse. Jedoch gibt es auch Ausnahmen mit über 750 Schmelzeinschlüssen pro cm<sup>2</sup>.

In Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Schmelze, vom Einschließungsort und der Abkühlungsgeschwindigkeit finden wir unterkühlte Schmelzen in Form von Glaseinschlüssen in den Mineralen vulkanisch extrusiver Gesteine (Glaseinschlüsse im Phänoquarz der Rhyolithen oder im Olivin basaltischer Gesteine). Diese Glaseinschlüsse enthalten durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Schmelze und Mineralwirt in der Regel eine Gas- bzw. Dampfblase und ähneln somit im Phasenaufbau und auch dem Aussehen nach den zweiphasigen Flüssigkeitseinschlüssen. Die Einschlüsse in Mineralen plutonisch intrusiver Gesteine sind in der Regel sehr klein. Durchmesserwerte um 10 µm sind typisch (siehe Abb. 1). Als Ergebnis der langsamen Abkühlung ist der Einschlußinhalt vollständig kristallisiert. Mikroskopisch wurden in den Schmelzeinschlüssen der Granite bisher folgende Mineralphasen identifiziert: Kalifeldspat, Albit, Quarz, Hämatit, Magnetit, Titanomagnetit, Ägirinaugit und Fluorit.

---

<sup>+</sup> Dr. Rainer Thomas  
Geoforschungszentrum Potsdam  
Telegrafenberg A 50  
D-O-1561 Potsdam

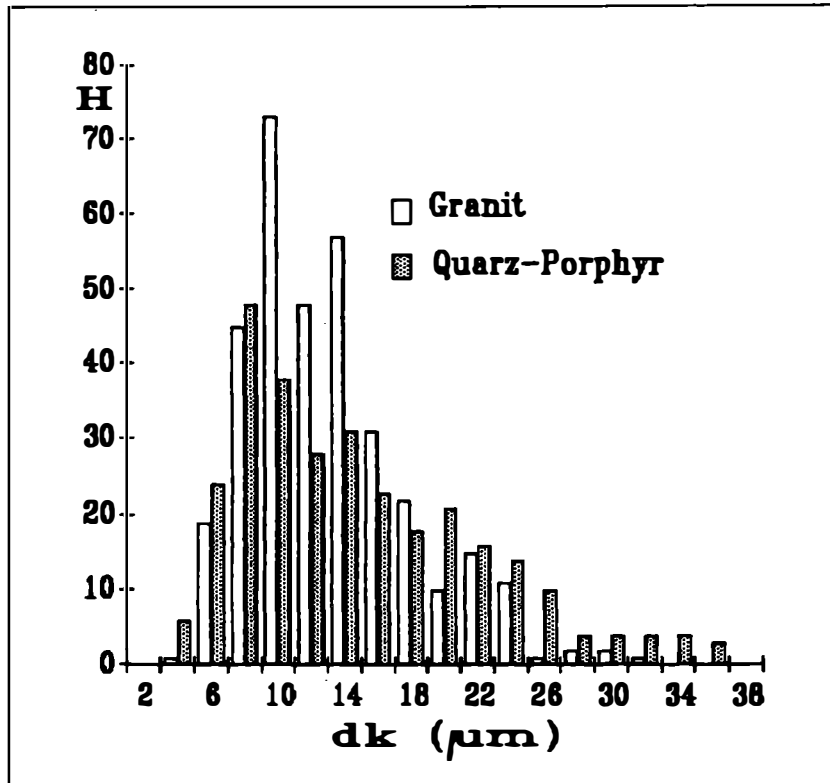


Abb. 1: Häufigkeitsverteilung der Einschlußdurchmesser  $d_k$  von Schmelzeinschlüssen im Quarz der Granite und Quarzporphyre des Erzgebirges.

Durch das Auftreten einer nahezu kugelförmigen Fluidphase (wäßrige Lösung + Dampfblase) unterscheiden sich die Schmelzeinschlüsse von eingeschlossenen Mineralphasen im Mineralwirt und sind dadurch gut zu erkennen.

Hauptanliegen der thermometrischen Untersuchungen an Schmelzeinschlüssen ist die Bestimmung der thermodynamischen Grundparameter Temperatur und Druck, d.h. Abschätzung oder Bestimmung der Solidus-, Liquidus- und Homogenisierungstemperaturen und -Drucke. Die Schmelzeinschlüsse stellen nahezu die einzigen direkt beobachtbaren Geothermometer, Geobarometer, Geopyknometer und Geoviskosimeter dar, die Informationen über die Bildungsbedingungen und Stoffeigenschaften gespeichert enthalten. Die Gewinnung dieser Daten ist ein Ziel der Thermobarometrie anhand von Einschlüssen. Darüber hinaus repräsentieren die Schmelzeinschlüsse direkte Proben des ehemaligen magmatischen Geschehens - aus der Analyse des Einschlußinhaltes mittels Mikrosondentechniken kann die stoffliche Evolution der Magmen vom Bereitstellungsraum der Schmelzen, dem Aufstieg und der Platznahme rekonstruiert werden. Mit keiner anderen Methode ist man in der Lage, solche Daten auf direktem Wege zu ermitteln.

## Phasenzusammensetzung und Phasenänderungen beim Erwärmen

Bedingt durch die geringe Größe der Einschlußobjekte ist eine detaillierte Beschreibung der Phasenänderungen aller in einem Einschlußsystem koexistierenden Phasen schwierig bzw. unmöglich - man muß sich daher auf die meßbaren Hauptänderungen, wie den Beginn der Verflüssigung (sicher erkennbar an dem Auftreten einer ersten Gasphase beim Aufheizen und nachfolgenden Abschrecken), der Verflüssigung (Schmelze + Gasphase) und der totalen Homogenisierung in der Schmelzphase (nur Schmelze) beschränken. In der Abb. 2 sind die charakteristischen Phasenänderungen in den Schmelzeinschlüssen der Granitquarze in Abhängigkeit von der Temperatur ( $t_0$ ,  $t_s$ ,  $t_M$  und  $t_H$ ) schematisch dargestellt.

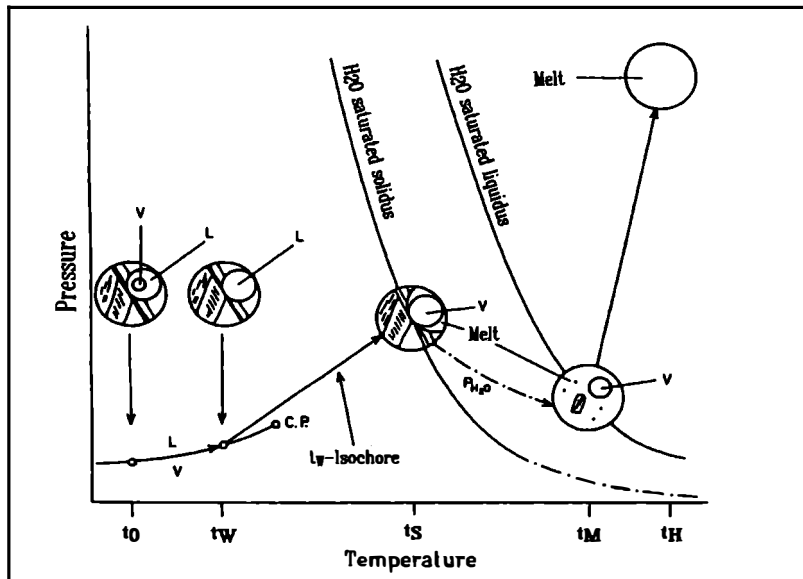


Abb. 2: Charakteristische Phasenänderungen in einem Schmelzeinschluß beim Erwärmen von Raumtemperatur  $t_0$  bis zur Homogenisierungstemperatur  $t_H$  im schematischen PT-Diagramm. V - Dampfphase, L - Lösung, C.P. - kritischer Punkt,  $t_w$  - Teilhomogenisierungstemperatur (Homogenisierung in der flüssigen Phase),  $t_s$  - Solidustemperatur,  $t_M$  - Liquidustemperatur.

Die erste wesentliche Änderung erfolgt bei Temperaturen zwischen etwa 200 und 400°C. In diesem Temperaturintervall homogenisiert die Dampfblase V in der flüssigen Phase L des Fluid-Subsystems. Die Temperatur der Homogenisierung ( $L + V = L$ ) im Subsystem wird mit  $t_w$  bezeichnet. Aus dem kryometrisch ermittelten Salzgehalt  $C_{NaCl}$  der Lösung des Fluid-Subsystems und der Teilhomogenisierungstemperatur  $t_w$  kann diejenige Isochore berechnet werden, die im PT-Raum die beiden Punkte  $t_w$  (auf der Zweiphasenkurve des Fluidsystems) und  $t_s$  (auf der Soliduskurve des Granitsystems) verbindet. Aus dem Isochorenschnittpunkt mit der Soliduskurve erhält man den Fluida-

Druck am Solidus. Darüber hinaus kann über eine Volumenbestimmung, der Temperatur  $t_w$  und der Salzkonzentration  $C_{NaCl}$  (als Äquivalent-%) der  $H_2O$ -Gehalt der Schmelzen abgeschätzt werden (siehe hierzu NAUMOV, 1979).

### **Bestimmung der charakteristischen Temperaturen mit den Methoden der Mikrothermometrie**

Die Bestimmung der Temperaturen  $t_s$  (Solidus),  $t_m$  (Liquidus) und  $t_h$  (homogene Schmelze) auf einem Mikroskopheiztisch ist durch die geringe Größe der Einschlüsse und durch die träge Schmelzkinetik der festen Silikatphasen recht schwierig. Die mittels Heiztischmethode erzielten Temperaturen dürften nach eigenen Erfahrungen in der Regel viel zu hoch ausfallen. Erschwerend kommt hinzu, daß viele Einschlüsse beim Aufheizen undicht werden. Zum "Undichtwerden" neigen insbesondere Einschlüsse  $> 10\text{mm}$ . Durch Fluidaabgabe beim "Undichtwerden" wird ein erheblicher Teil der Meßergebnisse in Richtung zu höheren Werten verfälscht. Aufgabe der thermometrischen Untersuchungen ist es daher, stets die niedrigsten Werte der charakteristischen Temperaturen zu finden.

Nach vielfältigsten Untersuchungen an Schmelzeinschlüssen mit verschiedenen Mikroskopheiztischen (Eigenbaumodelle, LEITZ-Mikroskop-Heiztisch 1350, LINKAM TH 1500) über einen langen Zeitraum kann festgestellt werden, daß die Heiztischmethode nur im Ausnahmefall zur Bestimmung der charakteristischen Temperaturen  $t_s$ ,  $t_m$  und  $t_h$  von silikatischen Schmelzeinschlüssen herangezogen werden kann. Ein Begründung für dieses Urteil wird aus den weiteren Ausführungen deutlich werden.

Als Methode der Wahl hat sich die Abschreck- oder Quenchingtechnik erwiesen. Bei dieser Technik werden die Proben in Form von kleinen Dickschliff-Chips in evakuierten Quarzampullen unter schwach reduzierenden Bedingungen bei Haltezeiten von 20 oder mehr Stunden aufgeheizt. Nach jedem Temperaturschritt wird die Probe innerhalb von wenigen Sekunden auf Raumtemperatur abgeschreckt. Die so "eingefrorenen" Phasenverhältnisse werden anschließend unter Immersionsöl mikroskopisch beurteilt. Als Einbettungsmittel und zur Herstellung von Dauerpräparaten eignet sich MOUNTEX der Firma MERCK mit einem Brechungsindex von  $\sim 1,67$ . Die Methode ist sehr zeitaufwendig, liefert jedoch korrekte Temperaturwerte, da eine genaue Eichung der Meßanordnung unproblematisch ist.

Zur Vermeidung der partiellen oder totalen Dekreпитation der Schmelzeinschlüsse mit hohen Fluidagehalten ist es zweckmäßig, die Quenchingexperimente unter Auflastdruck in einer Gasdruckapparatur durchzuführen. Als Druckmedium eignet sich z.B. He-Gas (THOMAS et al., 1992).

Zwei unterschiedliche Techniken der Quenching-Experimente wurden getestet - die Akkumulations-Technik und die Einzelschritt-Technik. Bei der Akkumulations-Technik werden die charakteristischen Temperaturen an ein und derselben Probe ermittelt, d.h. die jeweilige Probe wird hintereinander (bei gleichen Haltezeiten und  $\pm$  gleichen, relativ kleinen Temperaturschritten von ca.  $3-5^\circ\text{C}$ ) progressiv aufgeheizt und die

Probe nach jedem Temperaturschritt mikroskopisch bewertet. Durch statistische Auswertung der Beobachtungen erhält man die entsprechenden charakteristischen Temperaturen. Tabelle 1 und Abb. 3 zeigen die mit dieser Technik ermittelten Solidustemperaturen von F-reichen Schmelzeinschlüssen im Quarz und Topas aus einem Topas-Albit-Granit vom Huberstock/Schlackenwald.

Zahl der beobachteten Einschlüsse					
Temperatur (°C)	Versuchszeit (h)	Schmelzbeginn	Liquidus	unveränderte Einschlüsse	Gesamtsumme
592 ± 6	10	7 (8,5)	-	75 (91,5)	82
600 ± 4	10	31 (32,6)	-	64 (67,4)	95
609 ± 4	10	58 (50,4)	-	57 (49,6)	115
610 ± 6	10	51 (40,5)	-	75 (59,5)	126
621 ± 5	10	35 (34,6)	2 (2,0)	64 (63,4)	101
629 ± 4	10	33 (23,7)	3 (2,2)	103 (74,1)	139
634 ± 6	12	24 (34,8)	4 (5,8)	41 (59,4)	69
642 ± 6	15	14 (24,6)	11 (19,9)	32 (56,1)	57
651 ± 5	13	27 (46,6)	14 (24,1)	17 (29,3)	58
660 ± 3	13,5	25 (53,2)	13 (27,7)	9 (19,1)	47
670 ± 4	10	28 (25,2)	33 (29,7)	50 (45,0)	111
681 ± 8	10,5	68 (43,0)	54 (34,2)	36 (22,8)	158
689 ± 2	5	27 (27,0)	25 (25,0)	48 (48,0)	100
703 ± 5	10	10 (18,2)	32 (58,2)	13 (23,6)	55
718 ± 4	11	10 (18,2)	36 (65,4)	9 (16,4)	55
731 ± 7	10	17 (14,5)	80 (68,4)	20 (17,1)	117
735 ± 6	3	14 (12,4)	75 (66,4)	24 (21,2)	113
750 ± 3	8	23 (15,4)	11 (76,5)	12 (8,1)	149

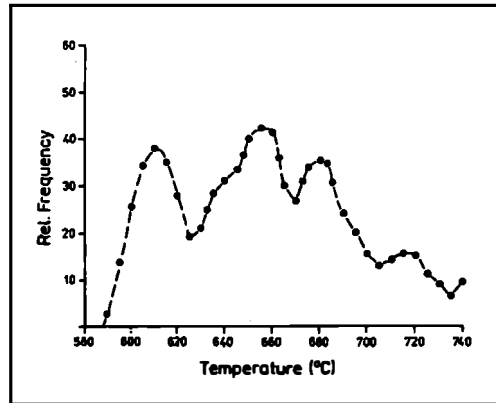
Tab. 1: Ergebnisse der thermometrischen Untersuchungen an Schmelzeinschlüssen in Quarz und Topas im Albitgranit (Phase III-IV) von Vysoky Kamen/ČSFR (18 Teilproben der Probe 17; Werte in () = auf 100 normierte Einschlußzahl).

Abb. 3: Ergebnisse der Quenching-Experimente an Schmelzeinschlüssen im Quarz und Topas aus einem Topas-Albit-Granit vom Huberstock/Schlackenwald ("Ak-kumulationsmethode"). Folgende Solidustemperaturen wurden für die Probe erhalten (Mittelwerte aus 2 Versuchsreihen):

$$t_s(1) = (607 \pm 9)^\circ\text{C}, n = 330$$

$$t_s(2) = (643 \pm 4)^\circ\text{C}, n = 771$$

$$t_s(3) = (678 \pm 4)^\circ\text{C}, n = 417$$



Bei der zweiten Technik wird für jeden Temperaturschritt eine neue Probe eingesetzt. Die einzelnen Temperaturschritte bleiben so "dokumentiert". Diese Methode ist optimierbar und liefert, wie im folgenden Abschnitt gezeigt werden wird, mehr Informationen und genauere Daten.

### **Beziehung zwischen Einschlußgröße, Temperatur und Gleichgewichtseinstellung**

Ausgehend von Untersuchungen zur Abschätzung der Gleichgewichtseinstellung bei der Durchführung von Hochdruck-Experimenten über die Interdiffusionskoeffizienten in silikatischen Schmelzen, wie sie von JOHANNES (1985) vorgenommen wurden, zeigte es sich, daß auch zwischen der Einschlußgröße und der Zeit der Gleichgewichtseinstellung im Einschlußsystem ein direkter Zusammenhang besteht, der auch durch das von JOHANNES verwendete Interdiffusionsmodell in einer ersten Näherung beschrieben werden kann. Für die Homogenisierung (bei konstanter Temperatur) in einem kugelförmigen Raum erhält man den Interdiffusionskoeffizienten  $D_i$  nach

$$D_i = \frac{r_E^2}{4 \cdot t} \quad (1)$$

( $r_E$  - Radius des kugelförmigen Einschusses in Zentimeter ( $2r_E = d_E$ ),  $t$  - Versuchszeit in Sekunden).

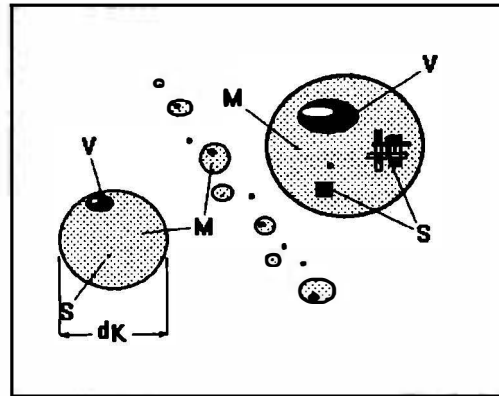
Einen großer Teil der Schmelzeinschlüsse kann man in einer ersten Näherung als kugelförmig betrachten. Abweichungen zu mehr abgeplatteten Formen (Ellipsoide) lassen sich beispielsweise mittels der Beziehung

$$2r_E = \sqrt{(D \cdot d)} \quad (2)$$

berücksichtigen ( $D$  - große Ellipsenachse,  $d$  - kleine Ellipsenachse). Als Kriterium für die Gleichgewichtseinstellung im Schmelzeinschlußsystem dienen Einschlüsse mit

kritischen Durchmesser-Werten  $d_k$ . Für die Bestimmung der Liquidustemperatur sind das Einschlüsse mit Schmelze + Dampfblase + winzigen Rest (gerade noch sichtbar!) der letzten festen Phase (siehe hierzu Abb. 4). Als Liquidusphase beobachtet man sehr häufig Kalifeldspat, Albit, Hämatit oder Magnetit. Für die Homogenisierungsexperimente dient die gerade noch sichtbare Dampfblase als Kriterium. Abb. 5 zeigt für die Liquidusexperimente den Zusammenhang zwischen dem kritischen Einschlußdurchmesser  $d_k$  und der Versuchszeit bei konstanter Temperatur. Der Zusammenhang kann durch ein Polynom 2. Grades hinreichend genau beschrieben werden.

Abb. 4. Skizze zur Definition des kritischen Einschlußdurchmessers  $d_k$  von Schmelzeinschlüssen im Quarz eines Quarzporphyrs: M - Schmelze (oder Glas bei Raumtemperatur), S - feste Kristallphasen, V - Gas- oder Dampfblase.



### Eine neue Methode zur Bestimmung der charakteristischen Temperaturen

Über die Beziehung (1) - dem Zusammenhang zwischen dem Interdiffusionskoeffizienten  $D_i$ , dem Einschlußradius  $r$  und der Zeit  $t$  ergibt sich eine ausgezeichnete Möglichkeit zur Anpassung der Versuchsbedingungen für die Quenching-Experimente an die realen Gegebenheiten (Zeit für die Gleichgewichtseinstellung, variable Einschlußdurchmesser). Darüber hinaus können die erhaltenen Meßdaten unter einheitlichen Bedingungen (Normierung) ausgewertet werden.

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Quenching-Experimente an kristallisierten Schmelzeinschlüssen im Quarz eines Quarzporphyrs von Brand-Erbisdorf (bei Freiberg) zusammengestellt und in der Abbildung 6 graphisch dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht anschaulich den oben genannten Zusammenhang zwischen Einschlußgröße, Versuchszeit und Temperatur.

Zur Bestimmung der charakteristischen Temperaturen  $t_m$  und  $t_h$  verfährt man wie folgt: Die Proben werden bei wenigstens 3 unterschiedlichen, jedoch konstanten Temperaturen (z.B. 700°C, 750°C und 800°C) im Quenching-Ofen eine bestimmte Zeit lang (z.B. 20 Stunden) erhitzt, danach abgeschreckt und mikroskopisch begutachtet, indem man nach Einschlüssen mit kritischen Phasenverhältnissen sucht und deren Durchmesser  $d_k$  mittels geeichteten Meßschraubenokular bestimmt. Gegebenenfalls können die gleichen Proben bei den gleichen Temperaturwerten erneut erhitzt und

durch Normierung über die Beziehung (1) ausgewertet werden, indem man graphisch den normierten kritischen Einschlußdurchmesser  $d_K$  gegen die Temperatur aufträgt. Genetisch kohärente Einschlußgenerationen korrelieren im  $d_K$ - $t$ - bzw. im  $\ln D_T$ - $10000/T$ -Diagramm (Arrhenius-Plot) miteinander. Mittels dieser Untersuchungsmethodik können häufig mehrere, genetisch unterschiedliche Einschlußgenerationen herausgefiltert werden (siehe weiter unten).

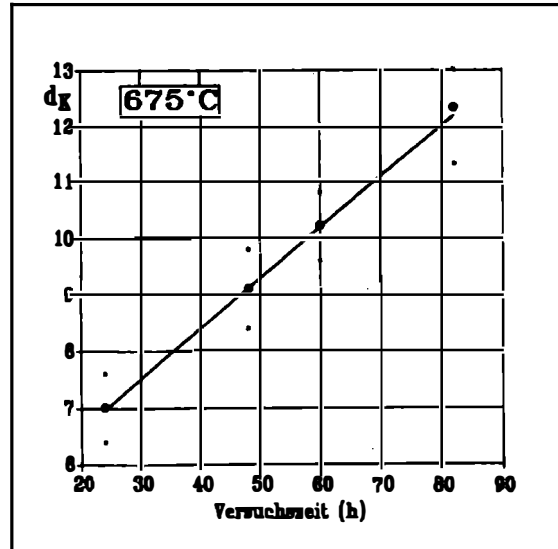


Abb. 5: Zusammenhang zwischen dem kritischen Einschlußdurchmesser  $d_K$  und der Versuchszeit (Stunden) bei konstanter Temperatur ( $675^\circ\text{C}$ ).


Erfüllen die Meßwerte die Bedingung (1), kann man durch quadratische Regression die empirische Regressionsparabel

$$d_K = A + B \cdot t + C \cdot t^2 \quad (3)$$

oder besser durch lineare Regression den Zusammenhang zwischen  $\ln D_T$  und der reziproken absoluten Temperatur  $T$  ermitteln:

$$\ln D_T = A + 1000/T + B \quad (4)$$

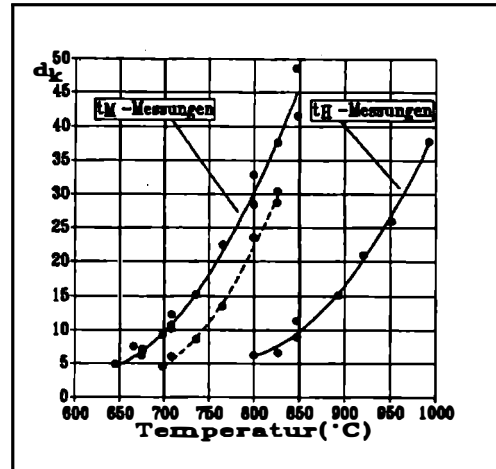
---

Tab. 2: Ergebnisse der Quenching-Experimente an Schmelzeinschlüssen im Quarz des Quarzporphyrs von Brand-Erbisdorf (Glück-Auf-Schacht): Bestimmung des Interdiffusionskoeffizienten  $D_I$  und des auf 24 Stunden normierten kritischen Einschlußdurchmessers  $d_K$ . Typen I und II: Liquidus-Experimente; Type III: Homogenisierungs-Experimente. 



Run No.	Temperatur (°C)	Dauer (h)	$d_k$ (μm)	n	Typ	Diffusions-Koeffizient (cm <sup>2</sup> /sec)	$d_k^n$ (μm) (norm.)
1	645 ± 6	24	4.7 ± 0.8	8	I	1.598 * 10 <sup>-13</sup>	4.7
2	666 ± 6	24	7.4 ± 0.6	13	I	3.961 * 10 <sup>-13</sup>	7.4
3	675 ± 6	24	7.0 ± 0.6	6	I	3.545 * 10 <sup>-13</sup>	7.0
	675 ± 6	48	9.1 ± 0.7	8	I	2.963 * 10 <sup>-14</sup>	6.4
4	675 ± 6	60	9.4 ± 0.9	13	I	2.557 * 10 <sup>-13</sup>	5.9
5	675 ± 6	82	12.3 ± 1.0	11	I	3.203 * 10 <sup>-13</sup>	6.6
6	698 ± 6	24	4.5 ± 0.2	5	II	1.465 * 10 <sup>-13</sup>	4.5
	698 ± 6	24	9.1 ± 1.1	15	I	5.990 * 10 <sup>-13</sup>	9.1
7	708 ± 3	24	12.2 ± 1.4	14	I	1.077 * 10 <sup>-12</sup>	12.2
8	708 ± 3	48	5.2 ± 1.2	6	I	8.356 * 10 <sup>-13</sup>	10.7
9	708 ± 3	75	10.7 ± 1.0	10	II	2.650 * 10 <sup>-13</sup>	6.0
	708 ± 3	75	17.6	1	I	7.170 * 10 <sup>-13</sup>	9.9
10	708 ± 3	75	18.5 ± 0.7	10	I	7.922 * 10 <sup>-13</sup>	10.5
11	736 ± 4	24	8.6 ± 1.0	13	II	5.350 * 10 <sup>-13</sup>	8.6
	736 ± 4	24	15.2 ± 1.0	12	I	1.671 * 10 <sup>-12</sup>	15.2
12	765 ± 4	26	14.0 ± 1.6	9	II	1.309 * 10 <sup>-12</sup>	13.4
	765 ± 4	26	23.2 ± 2.3	10	I	3.594 * 10 <sup>-12</sup>	22.3
13	800 ± 6	15	22.4 ± 2.3	11	I	5.807 * 10 <sup>-12</sup>	28.3
14	800 ± 6	15	25.9 ± 2.2	10	I	7.764 * 10 <sup>-12</sup>	32.8
	800 ± 6	15	18.6 ± 0.4	8	II	4.004 * 10 <sup>-12</sup>	23.5
	800 ± 6	15	5.1 ± 0.6	6	III	3.010 * 10 <sup>-13</sup>	6.4
15	826 ± 5	25	29.3	1	II	5.962 * 10 <sup>-12</sup>	28.7
	826 ± 5	25	6.8 ± 1.4	6	III	3.211 * 10 <sup>-13</sup>	6.6
16	826 ± 5	10	19.7 ± 2.2	12	II	6.738 * 10 <sup>-12</sup>	30.5
	826 ± 5	10	24.2 ± 1.9	6	I	1.017 * 10 <sup>-11</sup>	37.5
17	847 ± 7	10	31.4 ± 3.8	10	I	1.712 * 10 <sup>-11</sup>	48.6
	847 ± 7	10	7.3 ± 0.8	11	III	9.252 * 10 <sup>-13</sup>	11.3
18	847 ± 7	30	46.3	1	I	1.241 * 10 <sup>-11</sup>	41.4
	847 ± 7	30	10.0 ± 1.0	10	III	5.787 * 10 <sup>-13</sup>	8.9
19	894 ± 5	30	17.0 ± 1.5	10	III	1.672 * 10 <sup>-12</sup>	15.2
20	920 ± 6	20	20.9	2	III	3.160 * 10 <sup>-12</sup>	20.9
21	951 ± 12	11	17.6	1	III	4.890 * 10 <sup>-12</sup>	26.0
22	992 ± 12	11	25.7	1	III	1.039 * 10 <sup>-11</sup>	37.9

Abb. 6: Ergebnisse der Quenching-Experimente (Liquidus- und Homogenisierungs-Experimente) an Schmelzeinschlüssen im Quarz des Quarzporphyrs von Brand-Erbisdorf/Erzgebirge:  $d_k$  - Temperaturkorrelation für eine Versuchszeit von 24 Stunden. Bei den  $t_M$ -Experimenten wurde eine zweite Einschlußgruppe ausgehalten, die wahrscheinlich auf Wasserverlust (Diffusion?) zurückzuführen ist.



Da der kritische Einschlußdurchmesser  $d_k$  bei konstanter Temperatur mit der Versuchszeit ansteigt, empfiehlt sich die zweite Darstellung für die Auswertung der Meßwerte. In Abbildung 7 sind die in der Tabelle 2 aufgeführten  $t_M$ -Meßergebnisse als Arrhenius-Plot dargestellt. Der sehr gute lineare Zusammenhang weist darauf hin, daß die Auflösung der Liquidusphasen in der silikatischen Schmelze hauptsächlich durch die Diffusion gesteuert wird.

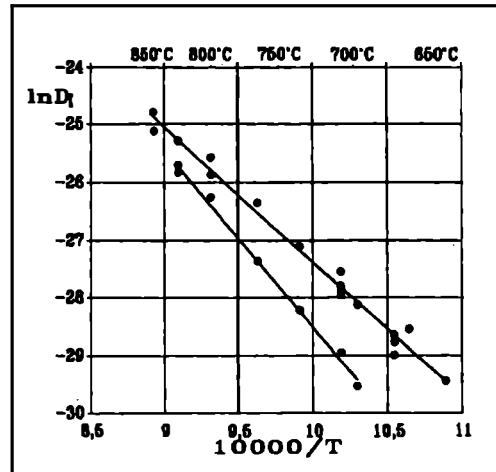


Abb. 7: Arrhenius-Plot für die Liquidus-Experimente an Schmelzeinschlüssen im Quarz des Quarzporphyrs von Brand-Erbisdorf.

Durch Extrapolation auf die empirisch ermittelten Einschlußdurchmesser-Werte  $d_k$  (Solidus und Homogenisierung) =  $1,105 \mu\text{m}$  und  $d_k = 1,427 \mu\text{m}$  und  $t = 3600$  Sekunden erhält man als gute Näherung die Solidus-, Liquidus- und Homogenisierungstemperaturen der untersuchten Schmelzeinschlüsse aus den beiden Gleichungen (1) und (4) durch Gleichsetzen:

$$\ln D_1 = A \cdot 10000 / T + B \quad (5)$$

bzw.

$$t(^{\circ}C) = 1 / ((\ln D_1 - B) / A) - 273,15 \quad (6)$$

Die Konstanten A und B ergeben sich aus dem Arrhenius-Plot durch linearen Regression und  $\ln D_1$  ist die Normierungskonstante für die charakteristischen Temperaturen. Für die Solidus- und Homogenisierungstemperaturen ist  $\ln D_1 = -29,182$  zu setzen, die Liquidustemperatur erhält man mit  $\ln D_1 = -28,671$ .

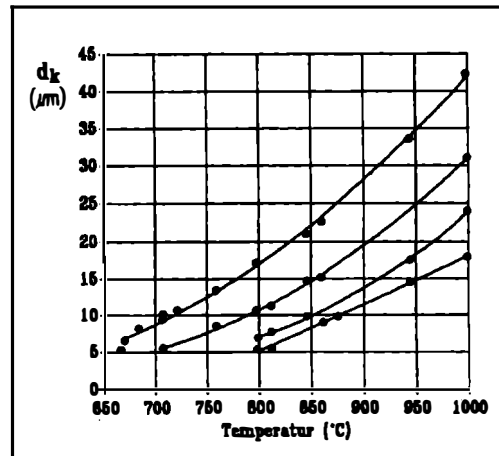


Abb. 8: Ergebnisse der Liquidus-Experimente an Schmelzeinschlüssen im Granitquarz (Kirchberger Granit OG3):  $d_k$  - Temperatur-Korrelation.

### Abschätzung des Druckes

Neben der Bestimmung des Druckes aus dem Schnittpunkt der aus  $t_w$  und der Salzkonzentration des Fluida-Subsystems berechneten Isochoren (z.B. nach ZHANG und FRANTZ, 1987) mit der Soliduskurve kann der Druck auch direkt über die jeweils ermittelten Solidustemperaturen abgeschätzt werden, da aus zahlreichen thermometrischen Untersuchungen an Schmelzeinschlüssen in Mineralen granitoider Gesteine hervorgeht, daß beim Aufheizen in den Schmelzeinschlüssen sich zuerst stets eine wassergesättigte Schmelze bildet. Die Solidustemperatur bzw. der Schmelzbeginn und der Fluida-Druck im Einschlußsystem ist dann eindeutig vom Wassergehalt der Schmelze und vom Bildungsdruck abhängig. Von Fluor-reichen Schmelzen abgesehen, können die meisten Granit-H<sub>2</sub>O-Systeme hinreichend genau mit dem Haplo-Granitsystem Qz-Or-Ab-H<sub>2</sub>O modelliert werden.

## Konstruktion des Phasendiagramms aus thermobarometrischen Untersuchungen an Schmelzeinschlüssen

Am Beispiel der Untersuchungen an einer Granitprobe (OG3-305/85(13)) aus dem Kirchberger Massiv/Westerzgebirge soll die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Methodik demonstriert werden.

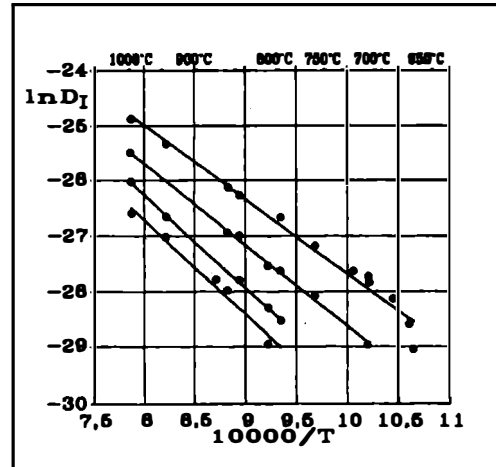


Abb. 9: Ergebnisse der Liquidus-Experimente an Schmelzeinschlüssen im Granitquarz (Kirchberger Granit OG3). Arrhenius-Plot:  $\ln D_I$  -  $1/T$  - Korrelation;  $D_I$  - Interdiffusionskoeffizient (in  $\text{cm}^2/\text{sec}$ ).

In den Abb. 8 und 9 sowie der Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Quenching-Experimente unter Atmosphärendruck dargestellt. Ergänzt wurden diese Untersuchungen durch Hochdruck-Quenching-Experimente (THOMAS et al., 1991) - Abb. 10. Die nach beiden Methoden erhaltenen Daten wurden im PT-Diagramm (Abb. 11) zusammengefaßt. Aus der Abbildung folgt, daß aus den Untersuchungen von Schmelzeinschlüssen sehr wichtige petrogenetische Daten gewonnen werden können, die sonst kaum oder nur durch einen sehr hohen experimentellen Aufwand zugänglich sind.

### Schlußfolgerungen

Die Untersuchungen an silikatischen Schmelzeinschlüssen in Mineralen granitoider Gesteine mit der hier vorgestellten Quenching-Technik und Auswerte-Methodik gestatten die Ableitung wichtiger petrogenetischer Daten und qualifizieren diese Untersuchungstechnik zu einer quantitativen thermoanalytischen Meß-Methodik, die in Verbindung mit den Verfahren der Mikrosondentechniken einzigartige Daten zur Evolution granitischer Magmen liefern kann.

Die hier vorgestellte Methodik ist nicht nur auf  $\text{SiO}_2$ -reiche, saure Schmelzen beschränkt. Untersuchungen an Fluida-reichen Schmelzeinschlüssen in Mineralen eines Polzenites (Olivin-Mellilit) oder die Untersuchungen an wasserarmen Schmelzeinschlüssen in Mineralen aus granulitfazialer Umgebung zeigten die prinzipielle Anwendbarkeit dieser Methodik auf silikatische Einschlüsse schlechthin.

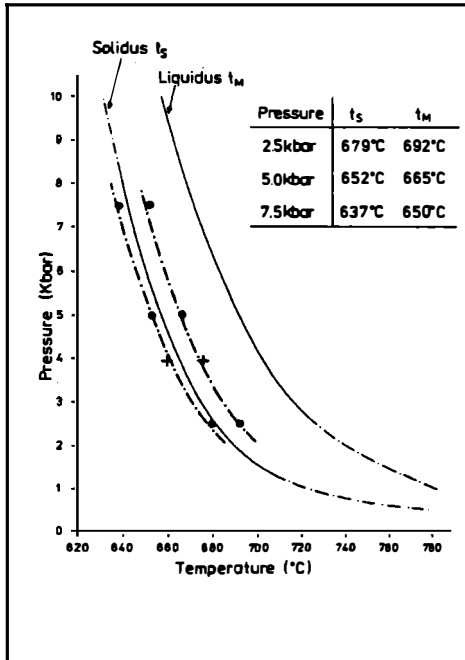


Abb. 10: Ergebnisse der Hochdruck-Quenching-Experimente am OG3-Granit von Kirchberg/Westerzgebirge (siehe hierzu: THOMAS et al., 1992).

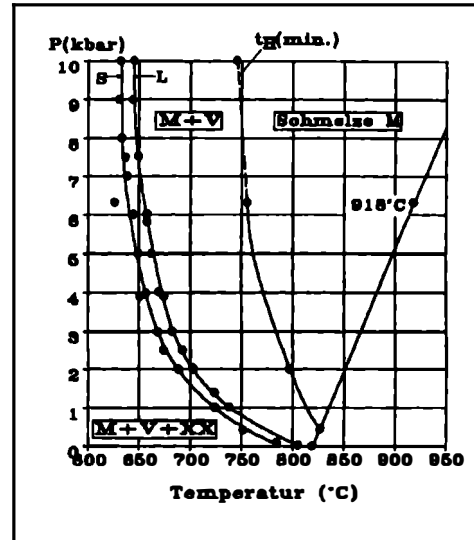


Abb. 11: PT-Diagramm für den OG3-Granit von Kirchberg - zusammengestellt aus den Ergebnissen der Quenching-Experimente unter He-Schutzgas-Druck und Atmosphären-Druck. S - Solidus, L - Liquidus, M - Schmelze, V - Dampfphase, XX - Kristallphasen.

Die Untersuchungen zeigen auch, daß ein großer Teil der bisher durchgeführten thermometrischen Bestimmungen an Schmelzeinschlüssen mehr oder weniger stark fehlerbehaftet sind, da Fragen der Gleichgewichtseinstellung in der Regel kaum oder nur rein qualitativ berücksichtigt wurden.

*"Measurements at melt inclusions require beside the determination of the temperature two further base units: metre as the unit of length and seconds as the unit of time. That's the point!"* (THOMAS et al., 1992).

Einschluß- gruppe	A	B	$t_s$	$t_M$	$t_H$
Liquidus-Experimente:					
I	-1,345	-14232	626°C	658°C	n.b.
II	-1,462	-14,004	690°C	724°C	n.b.
III	-1,671	-12,893	753°C	786°C	n.b.
IV	-1,701	-13,101	785°C	819°C	n.b.
Homogenisierungs-Experimente:					
I	-2,341	-6,431	n.b.	n.b.	756°C
II	-2,544	-5,419	n.b.	n.b.	798°C
III	-2,238	-8,832	n.b.	n.b.	827°C
IV	-2,994	-4,055	n.b.	n.b.	918°C

Tab. 3: Ergebnisse der Quenching-Experimente an Schmelzeinschlüssen im Granit-quarz der Probe 305/85(13). Koeffizienten der Gleichung  $\ln D_1 = A \cdot 10000/T + B$  und die Solidus- ( $t_s$ ), Liquidus- ( $t_M$ ) und Homogenisierungstemperaturen ( $t_H$ ).

## Literatur

- JOHANNES, W. (1985): The significance of experimental studies for the formation of migmatites. In: ASHWARD, J. R. (Ed.) Migmatites. - 36-85.
- NAUMOV, V. B., (1979): Determination of concentration and pressure of volatiles in magmatic melts based on study of inclusions in minerals. - Geochimija 7, 997-1007.
- THOMAS, R., MÜLLER, H.-J., RAAB, S. (1992): Quenching experiments on melt inclusions in minerals of granitic rocks - determination of the solidus, liquidus and viscosity of the melt. Chemie der Erde, in Vorbereitung.
- ZHANG, Y., FRANTZ, J. D. (1987): Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl-KCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O using synthetic fluid inclusions. Chemical Geology, 64, 335-350.