

Ergänzung zur Übung 3 – Gesteinsbildende Silikatminerale

Bemerkungen zu den einzelnen Aufgaben:

Aufgabe 1:

- a) Wie sind die beiden wichtigsten Elemente Silizium und Sauerstoff miteinander verknüpft? Was lässt sich anhand der Ionenradien der einzelnen Elemente aussagen?

Silizium wird von 4 Sauerstoff-Ionen in Form eines Tetraeders umgeben. Dabei nehmen die 4 O-Atome die 4 Ecken eines fast regelmässigen Tetraeders ein und in der tetraedrischen Lücke befindet sich das Si-Atom. Tetraedrische Koordination ist für das Ionenradienverhältnis $r_X / r_A = \text{Si}^{4+} / \text{O}^{2-} = 0.41 \text{ \AA} / 1.4 \text{ \AA} = 0.295$ die stabile Konfiguration. Die Bindungen sind zu gleichen Teilen ionisch und kovalent. Das Bauelement aller Silikatstrukturen ist somit der SiO_4 -Tetraeder. Ladung des Tetraeders: -4.

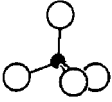
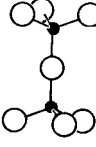
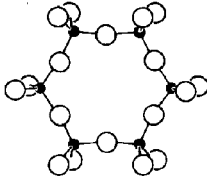
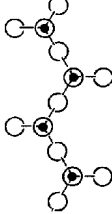
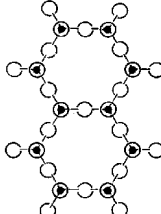
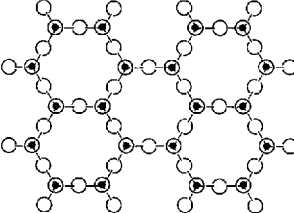
- b) Wie wird die fehlende Ladung ausgeglichen?

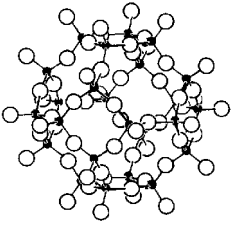
Ladungsausgleich durch Einlagerung von Kationen. Einlagerung von $1 \cdot 4^+$, $2 \cdot 2^+$ oder $1 \cdot 1^+$ und $1 \cdot 3^+$ Kationen.

Besonderheit: das 3-wertige Al^{3+} kann aufgrund seines etwas grösseren Ionenradius (0.51 \AA) als derjenige des Si^{4+} (0.42 \AA) eine Doppelrolle einnehmen. Es kann gegenüber O in 6-Koordination $\text{Al}[6]$ sowie in 4-Koordination $\text{Al}[4]$ auftreten. Damit kann es zum diadochen Ersatz von Si^{4+} [KZ 4] gegen Al^{3+} [KZ 4] oder zum Ersatz von Metallionen gegen Al^{3+} [KZ 6] kommen, vorausgesetzt Ladungsausgleich erfolgt.

Aufgabe 2: Hauptstrukturtypen und Verknüpfungsmöglichkeiten von SiO_4 -Bausteinen

- Das Bauelement aller Silikatstrukturen ist der SiO_4 -Tetraeder.
- Die SiO_4 -Tetraeder können isoliert auftreten oder zu Gruppen, Ringen, Ketten, Schichten oder dreidimensionalen Gerüsten verbunden sein.
- Der Aufbau dieser speziellen Strukturen erfolgt durch Eckenverknüpfung von Tetraedern entweder über gemeinsame O-Ionen (Brückensauerstoff) oder über zwischengeschaltete Metallionen.
- Die daraus resultierenden verschiedenen Anordnungen der SiO_4 -Tetraeder (siehe unten) werden durch Kationen untereinander verbunden. Lediglich bei den Gerüstsilikaten sitzen die Kationen in den Lücken des SiO_4 -Gerüsts.

<p>Inselsilikate (Nesosilikate) Isolierte SiO_4-Tetrader oder isolierte SiO_4-Tetrader-Gruppen: Si:O Verhältnis: 2:7 $[\text{SiO}_4]^{4-}$</p>	 <p>Beispiele: Olivin , Zirkon, Granat</p>
<p>Gruppensilikate (Sorosilikate) Gruppen von SiO_4-Tetrader: Tetraeder über einen Brückensauerstoff eckenverknüpft Si:O Verhältnis: 2:7 $[\text{Si}_2\text{O}_7]^{6-}$</p>	 <p>Beispiele: Epidote, Vesuvian</p>
<p>Ringsilikate (Cyclosilikate) Geschlossenen Ketten: Tetraeder über 2 Brückensauerstoffe mit Nachbartetraedern verknüpft $[\text{Si}_n\text{O}_{3n}]^{2n-}$, $n = 3, 4, 6$</p> <ul style="list-style-type: none"> $[\text{Si}_3\text{O}_9]^{6-}$ $[\text{Si}_4\text{O}_{12}]^{8-}$ $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]^{12-}$ 	 <p>Beispiele: Beryll, Turmalin</p>
<p>Ketten- und Bändersilikate (Inosilikate) Offene Ketten, gestreckt: Tetraeder über 2 Brückensauerstoffe mit Nachbartetraedern verknüpft</p> <p>Einfachketten (<i>Kettensilikate</i>) Si:O Verhältnis: 1:3 $[\text{Si}_n\text{O}_{3n}]^{2n-}$, $n = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 12, 24$</p> <p>Doppelketten (<i>Bändersilikate</i>) Verknüpfung von Einfachketten, z.B. Zweierbänder, bei denen 2 Einfachketten miteinander verknüpft sind Si:O Verhältnis: 4:11 $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{6-}$</p>	<p>Beispiele:</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Pyroxene</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Amphibole</p>  </div> </div>
<p>Schichtsilikate (Phyllosilikate) 2-dimensionale Schichten durch Verknüpfung der Tetraeder über 3 Brückensauerstoffe</p> <p>Si:O Verhältnis: 2:5 $[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$ bzw. $[\text{Si}_4\text{O}_{10}]^{4-}$</p>	 <p>Beispiele: Glimmer, Chloritgruppe, Talk, Serpentin, Tonminerale</p>

<p>Gerüstsilikate (Tektosilikate)</p> <p>Jedes Sauerstoffion gehört gleichzeitig zwei benachbarten Tetraedern an. Dadurch entstehen dreidimensionale geschlossene räumliche Gerüste durch Verknüpfung der Tetraeder über alle 4 Brückensauerstoffe mit den Nachbartetraedern: $[\text{Si}_n\text{O}_{2n}]^0$</p> <p>Ausgangsbauereinheit ist elektrisch neutral, Kationen können nur eingefügt werden, wenn Si durch Al ersetzt wird:</p> <p>$[\text{SiO}_4]^{4-}$ zu $[\text{AlO}_4]^{5-}$, z.B. Feldspat-Gruppe $[\text{AlSi}_3\text{O}_8]^{1-}$</p>	 <p>Beispiele: Quarz, Feldspäte, Zeolite, Feldspatvertreter (Foid)</p>
---	--

Besteht ein Zusammenhang zwischen Struktur und äusserer Form / Eigenschaften der Mineralien?

Äussere Form, Härte und Spaltbarkeit sind Eigenschaften, die bei den Silikaten sehr stark von der jeweiligen Tetraederkonfiguration abhängen.

Auffallende Eigenschaften, die auf der Tetraederkonfiguration beruhen sind z.B. eine schichtförmige Ausbildung, sehr gute Spaltbarkeit parallel zu den Schichten und eine eher geringere Härte bei Schichtsilikaten oder stengelige Ausbildung von Kristallen bei Kettensilikaten. Inselsilikaten zeigen tendenziell höhere Härten. Die Farbe wird fast ausschliesslich durch die Kationen bestimmt, wobei Spurenelemente eine wichtige Rolle spielen.

Aufgabe 3:

Mineralien: *dunkle Mineralien: Olivin, Amphibol, Pyroxen, Biotit, Turmalin*
 helle Mineralien: Quarz, Feldspat, Zirkon, Foide (in Gestein)

- Benütze dazu das Buch „Grundzüge der Erdwissenschaften“ von V. Trommsdorff und V. Dietrich (Seiten 23-44 oder evtl. die „Tabellen zur Mineral- und Gesteinsbestimmung“ von W. F. Oberholzer und V. Dietrich).
- Wieder auf hinweisen: "Mineral-/Gesteinsbestimmen.pdf" (2015), Prof. Stosch, Uni Karlsruhe zum Herunterladen.

Zusammenfassung: Erkennungsmerkmale der wichtigsten gesteinsbildenden Silikate

Mineral	Eigenfarbe	H	Kristall-system	Sonstige Eigenschaften
Olivin (Mg,Fe) ₂ SiO ₄ (Forsterit-Fayalit) Inselsilikat	gelblich-flaschengrün	6,5	rh.	Glasglanz, Kristall selten, meist körnig UM und mafische Gesteine <i>Zusammen mit andere Mg-Fe reiche Mineralien</i>
Granat (Fe,Mg,Ca) ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂ Inselsilikat	Pyrop: meist tiefrot Almandin: bräunlich-rot Grossular: hell-gelblichgrün, braun-rotgelb	7	kub.	Glasglanz, muscheliger Bruch, Rhombendodekaeder, Ikositetraeder, Agg. derb, körnig-dicht UM und mafische Gesteine <i>Zusammen mit andere Mg-Fe-Ca reiche Mineralien</i>
Aluminiumsilikate Andalusit Al ₂ SiO ₅ Inselsilikat	rötlichgrau, graublau, rosa	7,5	rh.	Glasglanz, muscheliger Bruch, Kristall dicksäulig mit quadratischem Querschnitt Metapelite <i>Zusammen mit andere Al reiche Mineralien</i>
Disthen Al ₂ SiO ₅ Inselsilikat	blau, selten weiss, oft fleckig	4,5 // [001], 6,5 // [010]	trkl.	Glasglanz, teils Perlmuttglanz, Kristall breitstengelig Metapelite <i>Zusammen mit andere Al reiche Mineralien</i>
Sillimanit Al ₂ SiO ₅ Inselsilikat	weiss-grau, gelbgrau	6,5	rh.	Glasglanz, faserige Aggregate mit Seidenglanz, Kristall kleinadelig, Agg. faserig, filzig, dicht, stengelig Metapelite <i>Zusammen mit andere Al reiche Mineralien</i>
Turmalin[Si ₆ O ₂₇]B ₃ (OH,F) ₄ Ringsilikat	je nach chemischer Zusammensetzung: z.B. schwarz (Fe-reich), braun (Mg-reich), rosarot (Mn-, Li-, -Cs-haltig), starker Pleochroismus	7	trig.	Glasglanz, muscheliger Bruch, Kristall prismatisch, Querschnitt Dreieck mit gerundeten Seiten, oft vertikal Streifung, Kristall auch nadelförmig und oft zu büschelförmigen Gruppen angeordnet (Turmalinsonnen)

Mineral	Eigenfarbe	H	Kristall-system	Sonstige Eigenschaften
Pyroxene: Bronzit (Opx: Enstatit-Ferrosilit-Reihe) $(\text{Mg,Fe})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ Kettensilikat	braun, bronzebraun, graugrün	~ 6	rh.	Glasglanz, perlmutartig, Kristall prismatisch UM und mafische Gesteine <i>Zusammen mit andere Mg-Fe reiche Mineralien</i>
Diopsid (Kpx: Diopsid-Hedenbergit-Reihe) $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})[\text{Si}_2\text{O}_6]$ Kettensilikat	grau bis graugrün	6	mkl.	matter Glanz, # (110) deutlich, Spaltwinkel 93°, muscheliger Bruch, Kristall prismatisch mit fast rechtwinkligem Querschnitt Mafische Gesteine <i>Zusammen mit andere Mg-Fe-Ca reiche Mineralien</i>
Augit (Kpx: Diopsid-Hedenbergit-Reihe) $(\text{Ca,Na})(\text{Mg,Fe,Al})[(\text{Si,Al})_2\text{O}_6]$ Kettensilikat	dunkelgrün, schwarz	6	mkl.	Glasglanz, # (110) gut, Spaltwinkel 93°, muscheliger Bruch, Kristall kurzsäulig, nadelig, dicktafelig oder körnig, häufig Zwillinge nach (100) Mafische Gesteine
Amphibole: Hornblende $\text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$ Bändersilikat	Gemeine Amph: grün, dunkelgrün, basaltische Hbl.: schwarz mit gelblich-braunem Strich, sonst farbloser Strich	5-6	mkl.	Glasglanz bis blendeartiger, halbmattglanz, Spaltwinkel 124°, Kristall prismatisch, oft mit 6-eckigem Querschnitt, schwarze basaltische Hbl. hat höheren Fe^{3+} und Ti Gehalt Mafische Gesteine
Glimmergruppe: Biotit $\text{KMg}_3\text{Al}(\text{OH,F})_2$ Schichtsilikat	dunkelbraun, dunkelgrün, schwarz (Hellglimmer)	2,5-3	mkl.	Perlmuttglanz, Kristall tafelig, Aggregat schuppig, blättrig Granitisch und Pelitische Gesteine – K Träger!
Muskovit $\text{KAl}_2\text{Al}(\text{OH,F})_2$ Schichtsilikat	farblos, grau, gelblich	2-2,5	mkl.	Perlmuttglanz, # (001) vv, XX tafelig, kurzsäulig, Aggregat schuppig, blättrig Granitisch und Pelitische Gesteine – K Träger!
Plagioklase: Mischkristalle aus <i>Albit</i>	klar, weiss, gelblich durch Verglimmerung,	6	trik.	Polysynthetische Zwillinge (feines Liniensystem auf Spaltflächen)

Mineral	Eigenfarbe	H	Kristall-system	Sonstige Eigenschaften
Na[AlSi ₃ O ₈] und <i>Anorthit</i> Ca[Al ₂ Si ₂ O ₈] Gerüstsilikat	grünlich durch Epidotisierung			Mafisch und Granitische Gesteine
Labradorit (Plagioklas:50- 70% An) Gerüstsilikat	grau, oft blauer Schimmer durch Entmischungs- lamellen	6	trik.	Perlmutterglanz bis glasartig Mafisch und Granitisch Gesteine
Alkalifeldspäte: Mischkristalle aus Orthoklas und Albit			trik., mkl.	Zwillinge nach Karlsbader, Bavenoer, Manebacher Gesetz Granitische Gesteine
Orthoklas (Alkalifeldspat) K(AlSi ₃ O ₈) Gerüstsilikat	farblos, weiss, gelblich, rötlich	6	mkl.	Perlmutterglanz, Kristall dicktafelig nach (010), säulig nach [100], häufig Karlsbader Zwillinge // (001), Perthitentmischung Granitisch Gesteine
Quarz SiO ₂ Gerüstsilikat	meist farblos, Strich weiss	7	trig.	Glasglanz, muscheliger Bruch, Einzel Kristall oft gut ausgebildet Granitisch Gestein

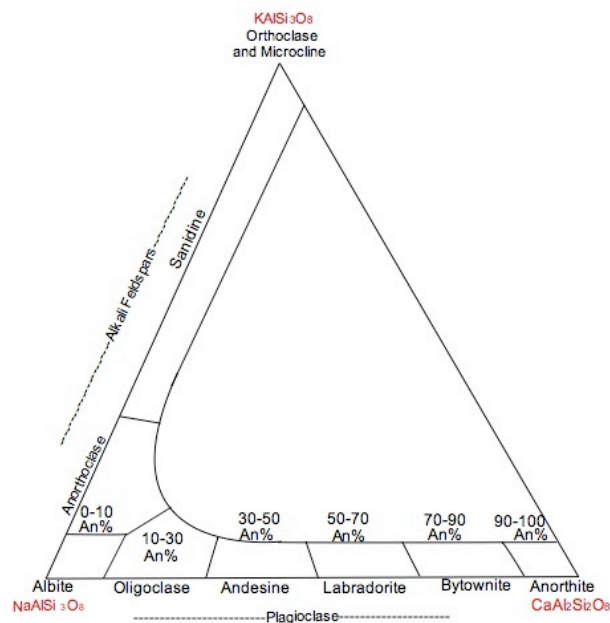
Varietäten von Quarz	Eigenschaften
Bergkristall	farblos bis wasserklar, Kristall bis zu mehreren m
Amethyst	blau-violett, durch Spuren von Fe ³⁺ und radioaktiver Bestrahlung, Färbung verschwindet beim Erhitzen, tritt bei radioaktiver Bestrahlung wieder auf
Rauchquarz	braun, mit Spuren von Al, Farbe durch Gitterfehler infolge nat. radioaktiver Bestrahlung
Gangquarz (Milchquarz)	derber, xenomorpher Quarz aus hydrothermalen Gängen, klar bis milchig trüb durch Flüssigkeit-Gas-Einschlüsse
Chalcedon	mikrokristallin, freie Oberflächen glaskopfartig, besteht aus mikroskopisch kleinen, faserförmigen Quarzkristallen, oft bläulich
Opal SiO ₂ · nH ₂ O	amorph, farblos, weiss, schwarz, grün, rot, bunte Innenreflexen, H: 5,5-6,5

Überblick

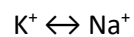
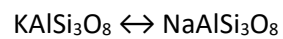
Mafische Minerale	
Inselsilikate	Olivin-Aggregat
Pyroxene	hellgrüner Diopsid
	Augit-Einzelkristall
	Bronzit-Aggregat
	Enstatit
Amphibole	Hornblende-Einzelkristall
Oxide	Magnetit
Schichtsilikate	Biotit-Aggregat

Felsische Minerale	
Alkalifeldspäte	Sanidin; Einzelkristall
	Orthoklas, rötlich
	Orthoklas, Karlsbader Zwillings
Plagioklase	Labradorit
Foide	Leucit-Kristalle in Gestein
	Nephelin im Gestein
SiO₂-Familie	Gangquarz, weiss, massiv
Schichtsilikate	Muskovit-Blatt

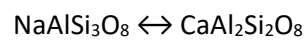
Aufgabe 4: Mischreihen



Einfache Substitution (Anorthit zu Albit)



Gekoppelte Substitution (Albit zu Orthoklas)



Aufgabe 5:

Almandin, Pyrop und Grossular gehören zur Mineralfamilie der Granate. Was ist der Unterschied im Chemismus? Unterscheiden sie sich bezüglich der Kristallstruktur?

Isomorphie: gleiche Gestalt (Kristallstruktur, Koordinationspolyeder) bei unterschiedlichem Chemismus

Polyeder von Ionenpaaren, die sich bezüglich Grösse und Ladung/Elektronenkonfiguration sehr ähnlich sind, unterscheiden sich kaum. Diese Ähnlichkeit hat zur Folge, dass sie untereinander austauschbar sind. Die gegenseitige Austauschbarkeit verschiedener Atom- bzw. Ionensorten in einer Kristallphase wird als Diadochie bezeichnet. Dies führt zur Bildung von Mischkristallen.

Granate haben die allgemeine Formel $A_3^{2+}B_2^{3+}[\text{SiO}_4]_3$. In den als Minerale vorkommenden Granaten tritt in der A^{2+} -Position Mg, Fe, Mn, Ca in 8-er Koordination auf und in der B^{3+} -Position Al, Fe, Cr in 6-er Koordination, wobei vollständige oder weitgehende Mischbarkeit innerhalb der zwei Gruppen besteht.

Der Chemismus der Al-Granate lässt sich als Dreieck mit Ca, Fe und Mg in den Ecken darstellen. Je nach Angebot der Elemente im Gestein dominiert die eine oder andere Granatchemie. Allerdings sind auch die Umgebungsbedingungen von Bedeutung: Im selben z.B. metamorphen Basalt kann ein Granat Fe-reich (bei Amphibolit-Fazies) oder Mg-reich sein (bei Eklogit-Fazies). Dies hat seinen Grund (und beantwortet den zweiten Teil der Aufgabe 4):

Für $\text{Mg}^{2+}/\text{O}^{2-}$ ist das Verhältnis ca. 0.5, bei Fe^{2+} ist es 0.56. Gerade bei hohen Drücken ist das Bestreben des Oktaederplatzes, dem idealen Radienverhältnis von 0.414 am nächsten zu sein, besonders gross. Deswegen wird Mg unter diesen Bedingungen gegenüber Fe bevorzugt. Ansonsten ist die Kristallstruktur aber identisch, d.h. Ca, Mn, Mg, Fe^{2+} sind untereinander austauschbar.

a) In welchen Gesteinen treten sie auf?

Granate kommen fast ausschliesslich in Metamorphiten vor.

Melanit (ein Teil des CaFe des Andradits durch NaTi ersetzt) in alkalibetonten Magmatiten. Der Chemismus der einzelnen Mineralphasen ist charakteristisch für das Herkunftsgestein.

b) Zusätzlich: Weitere Beispiele für einen Mischkristall (isomorphe Mischungsreihe)?

Olivin $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$: lückenlose Reihe von Mischkristallen mit den Endgliedern Mg_2SiO_4 (Forsterit) und Fe_2SiO_4 (Fayalit).

Orthopyroxene: Isomorphe Mischungsreihe von $\text{Mg}[\text{SiO}_3]$ und $\text{Fe}[\text{SiO}_3]$

Andalusit, Sillimanit und Disthen sind Aluminosilikate. Welche Gemeinsamkeit haben die drei Minerale?

Polymorphie: gleicher Chemismus (isochemisch) bei unterschiedlicher Kristallstruktur.

Polymorphe Formen eines Minerals, die zu verschiedenen Strukturtypen gehören, treten in

Abhängigkeit von den thermodynamischen Zustandsbedingungen (Temperatur, Druck) in Erscheinung.

Gemeinsamkeit der Alumosilikate ist somit ihr Chemismus.

a) Warum handelt es sich trotzdem um drei verschiedene Minerale?

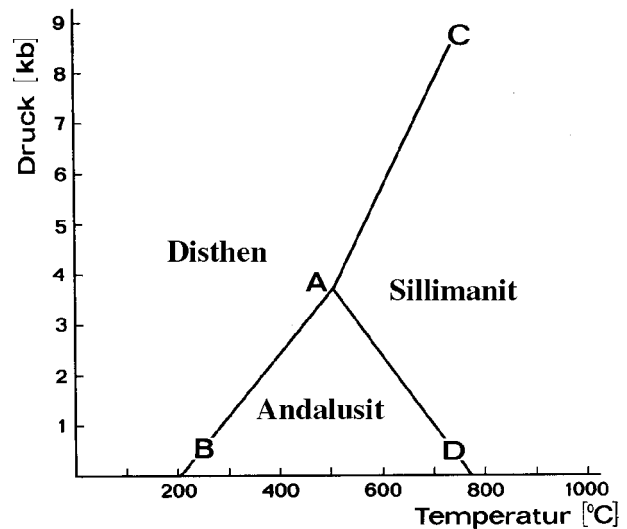
Alle drei Alumosilikate haben aber unterschiedliche Kristallstrukturen und unterscheiden sich in ihrer Al-Al-Koordination.

Disthen Hochdruckmodifikation, $[\text{Al}]^6[\text{Al}]^6[\text{O}/\text{SiO}_4]$, trkl.

Andalusit Niedrigdruckmodifikation, $[\text{Al}]^6[\text{Al}]^5[\text{O}/\text{SiO}_4]$, rh.

Sillimanit Hochtemperaturmodifikation, $[\text{Al}]^6[\text{Al}]^4[\text{O}/\text{SiO}_4]$, rh.

Bei Disthen (Hochdruck-Polymorph) ist kein Al auf dem Tetraederplatz zu finden, bei Sillimanit hingegen schon (Hochtemperatur-Polymorph.).



b) Welche geologische Bedeutung kommt diesen Alumosilikaten zu?

Die Alumosilikate haben ein Zustandsdiagramm mit Tripelpunkt (A). Je nach Temperatur und Druckbedingungen in der Erdkruste tritt ein bestimmtes Al-Silikat auf. Diese Minerale sind somit wichtige Indikatoren der Bedingungen die bei der Gesteinsbildung herrschen. Die Kenntnis ihrer Stabilitätsfelder wird oft bei der Einstufung des Metamorphosegrades eines metamorphen Gesteines herangezogen.

c) Zusätzlich erklären: Können alle 3 Minerale nebeneinander auftreten? Wenn ja, unter welchen Bedingungen?

Im Tripelpunkt (A) koexistieren alle 3 Minerale nebeneinander.