

# Zeolithe – Minerale mit außergewöhnlichen Fähigkeiten

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Mineralogie als Wissenschaft</b>	<b>1</b>
<b>2 Der atomare Aufbau von Kristallen</b>	<b>2</b>
2.1 Chemische Bindung . . . . .	2
2.2 Elementarzelle und Raumgitter . . . . .	3
2.3 Koordinationszahl – Koordinationspolyeder . . . . .	4
<b>3 Klassifikation der Minerale</b>	<b>4</b>
<b>4 Strukturtypen der Silikatminerale</b>	<b>6</b>
<b>5 Zeolith – ein praktisches Gerüstsilikat</b>	<b>7</b>
5.1 Die Struktur von Zeolithen . . . . .	7
5.2 Substitution . . . . .	7
<b>6 Ladungsausgleich – Ionenaustausch</b>	<b>9</b>
<b>7 Technische Anwendungen</b>	<b>10</b>

## 1 Mineralogie als Wissenschaft

Zur Mineralogie kann man von vielen Seiten her stoßen. Der eine hat vielleicht ein naturhistorisches Museum besucht und war von der Schönheit der Kristalle begeistert. Ein anderer geht gerne wandern und möchte wissen, welchen Mineralen er dabei begegnet. Wieder ein anderer ist von den leuchtenden Edelsteinen im Schaufenster des Juweliers fasziniert.

Die Mineralogie (*mina*: Schacht, *minare*: Bergbau betreiben) geht heutzutage weit über die Lehre vom Mineral hinaus und umfasst Teilgebiete der Kristallographie, Petrologie/Petrographie (Gesteinskunde), Geochemie, Lagerstättenkunde sowie technische Mineralogie. Zunächst jedoch einige wichtige Definitionen zum besseren Verständnis:

**Kristalle:** Homogene Festkörper mit einer dreidimensional periodischen Anordnung der Bausteine (Atome, Ionen, Moleküle). Bedingt durch freies Wachstum und ihren regelmäßigen Aufbau werden Kristalle durch ebene Flächen begrenzt.

**kristallin:** Die Materie besitzt eine dreidimensionale periodische Anordnung der Bausteine (Atome, Ionen, Moleküle) – eine Kristallstruktur.

**amorph:** Ohne Gestalt. Die Verteilung der chemischen Bausteine ist ungeordnet. Amorph ist das Gegenteil von kristallin.

**Minerale/Mineralien:** Chemisch-physikalisch einheitliche (homogene), kristalline, natürliche Bestandteile der festen Erdkruste. Von wenigen Ausnahmen abgesehen sind Minerale anorganisch.

**Gestein:** Mineralvergesellschaftungen von einzelnen, gegeneinander abgegrenzten Mineralkörnern von gleicher (monomineralisch) oder unterschiedlicher Mineralart.

Heute verstehen wir den Kristallbau von seiner physikalisch-chemischen Seite her und wissen, dass die atomaren Bausteine geordnet vorliegen. Diese Ordnungslehre nennt sich Kristallographie und ist eigentlich eine physikalische Wissenschaft. Mineralogie und Kristallographie überschneiden sich somit in weiten Bereichen mit Chemie, Physik und Geologie.

## 2 Der atomare Aufbau von Kristallen

Chemische Elemente sind Grundstoffe der Materie, die sich durch chemische Verfahren nicht zerlegen lassen und deren kleinste Einheit das Atom ist. Dass Materie aus Atomen besteht, wusste schon der griechische Philosoph Demokrit im 5. Jahrhundert v. Chr. Atome wiederum bestehen aus einer Elektronenhülle (negative Ladung) sowie den Kernteilchen Protonen (positive Ladung) und Neutronen (elektrisch neutral). Durch gleiche Anzahl Elektronen und Protonen ist das Atom elektrisch neutral. Atome können jedoch auch „ionisiert“ werden, dabei erhalten sie eine positive oder negative Ladung und werden als Ionen (positiv: Kationen, negativ: Anionen) bezeichnet. Heute wissen wir, dass Atome keineswegs unteilbar (*atomos*: unteilbar) sind, dennoch gehen wir bei der Betrachtung von Mineralien davon aus, dass Atome die grundlegenden chemischen Bausteine sind.

### 2.1 Chemische Bindung

Die chemische Bindung stellt einen wichtigen Faktor in der Kristallchemie dar. Sie ist verantwortlich für den Zusammenhalt der Bausteine in den Kristallstrukturen. Die Art der Bindungskräfte hängt von den Bausteinen und deren Zustand ab. Die Bindung beruht auf den Wechselwirkungen zwischen den Elektronenhüllen der Atome. Man unterscheidet folgende Bindungstypen:

- Metallbindungen
- Ionenbindungen
- Atombindung (kovalent)
- Van-der-Waals-Bindung
- Wasserstoffbrückenbindung

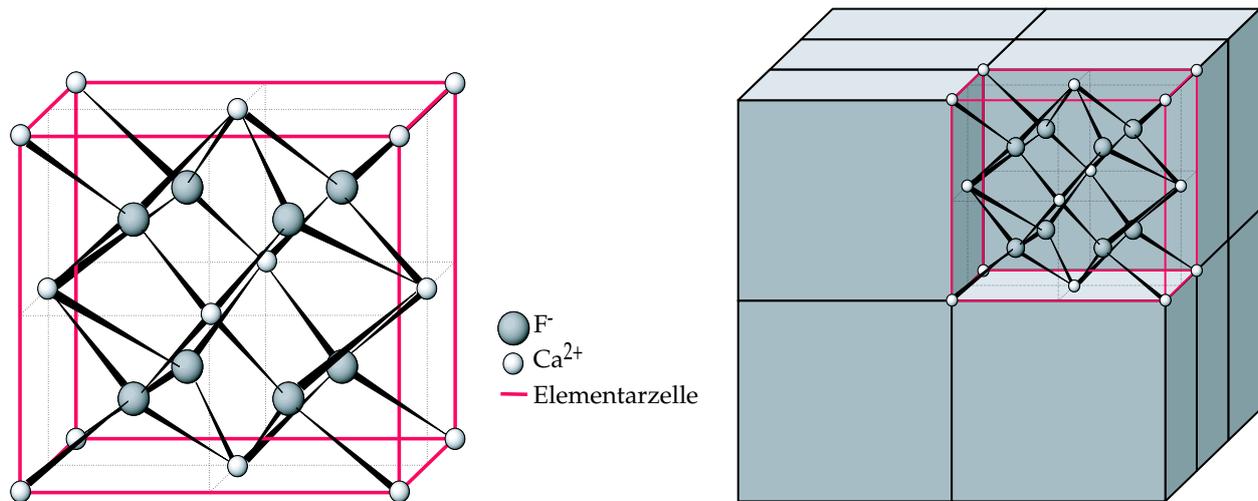


Abbildung 1: Die Elementarzelle (links, hier Fluorit  $\text{CaF}_2$ ) wird so gewählt, dass sie durch Wiederholung in alle drei Dimensionen die Kristallstruktur aufbaut. Sie enthält außerdem alle geometrischen Informationen, die eine Kristallstruktur bestimmen.

Die meisten gesteinsbildenden Minerale werden durch Ionenbindungen zusammengehalten. Diese Art Bindung tritt auf, wenn bei zwei Bindungspartnern die Fähigkeit des einen Atoms, Elektronen anzuziehen, größer ist. Dabei werden die Bindungselektronen ganz zum einen Partner hingezogen und es entstehen positiv und negativ geladene Ionen. Diese ziehen einander infolge der elektrostatischen Kräfte zwischen gegensätzlichen Ladung an, eine Ionenbindung entsteht. Die Wertigkeit (Valenz) ist die Anzahl der Elektronen eines Elementes, die an Bindungen beteiligt sind.

*Merke:* Jedes Atom hat das Bestreben in seiner äußersten Schale einen stabilen Zustand zu erreichen. Dies wird entweder durch Aufnahme oder Abgabe von Elektronen erreicht. Das elektrisch neutrale Atom wird zum Ion, ist von einem elektrostatischen Feld umgeben und übt Kraft auf seine Umgebung aus.

## 2.2 Elementarzelle und Raumgitter

In Kristallstrukturen formieren sich die Ionen, anders als in Molekülen, zu einem unendlich großen Ionengitter, auch Raumgitter genannt. Die kleinste geometrische Einheit des Raumgitters ist die Elementarzelle, die sich in drei Dimensionen periodisch wiederholt. Die Elementarzelle enthält alle Informationen, die notwendig sind um die Struktur eines Minerals zu beschreiben, und ist somit der geometrische Baustein des Minerals.

**Definition 1:** Die Elementarzelle ist die kleinste geometrische Einheit, die die Gesamtinformation des Raumgitters enthält.

Die Struktur von Fluorit wird zum Beispiel von  $\text{Ca}^{2+}$ -Kationen und  $\text{F}^-$ -Anionen aufgebaut. Aufgrund elektrostatischer Kräfte stoßen sich Ionen gleicher Ladung ab, während sich Ionen mit

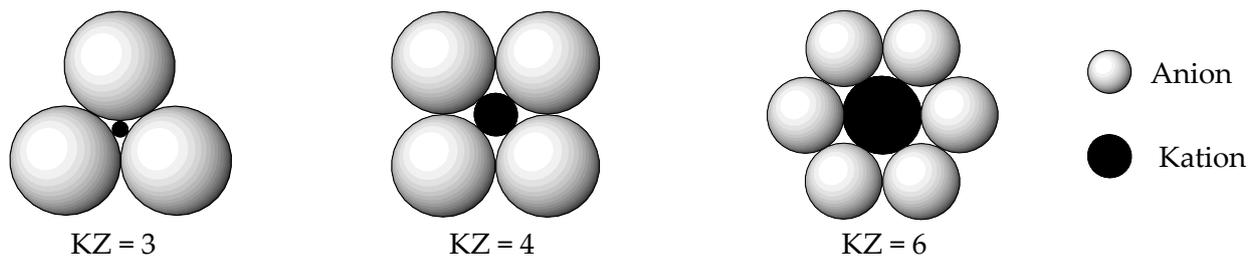


Abbildung 2: Abhängig vom Verhältnis der Ionenradien können sich unterschiedlich viele Anionen um Kationen formieren. Dies ist ein vereinfachtes zweidimensionales Beispiel. In Kristallstrukturen bilden sich auf diese Weise nicht Polygone, sondern dreidimensionale Polyeder.

entgegengesetzter Ladung anziehen. So stellt sich ein Gleichgewicht zwischen anziehenden und abstoßenden elektrostatischen Kräften und damit eine entsprechende räumliche Anordnung ein. Abbildung 1 zeigt die Anordnung im Falle der Fluorit-Struktur. Der Ausschnitt (Elementarzelle) wurde so gewählt, dass die ganze Struktur durch Aneinanderhängen dieser Einheit aufgebaut wird.

Elementarzellen können die Form eines Würfels, Quaders oder eines Rhomboeders besitzen. Sie bestimmen auch die makroskopische Erscheinung des Kristalls. Die Kantenlänge der Elementarzelle liegt für die meisten Minerale im Bereich von einigen Ångström ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ).

### 2.3 Koordinationszahl – Koordinationspolyeder

Für die Kristallchemie spielen vor allem, neben der Gesamtgeometrie der Atomanordnung, die unmittelbaren Nachbarschaftsverhältnisse der Ionen eine wesentliche Rolle. Die Koordinationszahl KZ gibt die Anzahl nächster Ionennachbarn um ein bestimmtes zentrales Ion herum an. Wie viele Anionen sich um ein Kation gruppieren können oder umgekehrt, hängt vom Verhältnis der Ionenradien ab (Abb. 2). Paulings Regel Nr. 1 beschreibt die Koordinationszahl als Funktion des Verhältnisses der Ionenradien  $R_{\text{Kation}} : R_{\text{Anion}}$ . Zu den einzelnen Koordinationszahlen gehören bestimmte Koordinationspolyeder, also geometrischen Figuren, die die räumliche Anordnung beschreiben (Tab. 1). Die Darstellung von Strukturen wird ungemein vereinfacht, wenn man solche Gruppierungen nicht als einzelne Atome zeichnet, sondern zu Polyedern zusammenfasst (Abb. 4).

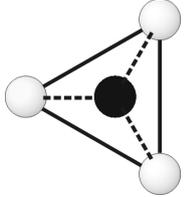
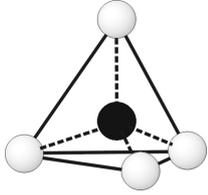
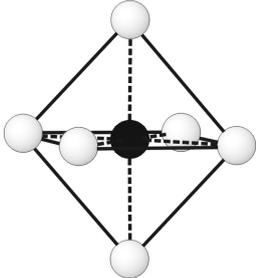
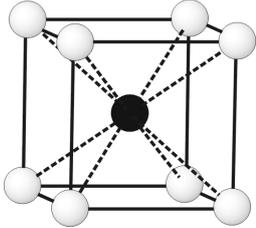
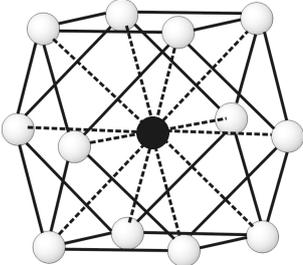
Mit Hilfe von Paulings Regel Nr. 1 können wir nun berechnen, was für ein Koordinationspolyeder Sauerstoffatome um ein Silizium-Kation bilden. Dazu benötigen wir die Ionenradien von  $\text{O}^{2-}$  und  $\text{Si}^{4+}$ , die an verschiedenen Stellen tabelliert sind<sup>1</sup>.

## 3 Klassifikation der Minerale

Die Zusammensetzung eines Minerals wird durch die chemische Summenformel angegeben, die Art und Mengenverhältnisse der beteiligten Elemente angibt. Es werden jedoch nur Hauptelemente, also jene die im Wesentlichen das Mineral aufbauen, angegeben. Elemente, die in geringen Mengen an der chemischen Zusammensetzung beteiligt sind, nennt man Neben- und Spurenelemente.

<sup>1</sup>Tabelle von Ionenradien: <http://www.webelements.com>

Tabelle 1: Die Koordinationszahl, und damit auch die räumliche Verteilung von Anionen und Kationen, wird durch das Verhältnis der Ionenradien bestimmt (Paulings Regel Nr. 1).

$R_K : R_A$	KZ	Polyeder	Beispiel	
< 0.155	2	Linie	AgCl <sub>2</sub>	
0.155–0.225	3	Dreieck	[CO <sub>3</sub> ] <sup>2-</sup> -Gruppe der Carbonate [NO <sub>3</sub> ] <sup>-</sup> -Gruppe der Nitrate	
0.225–0.414	4	Tetraeder	[SiO <sub>4</sub> ] <sup>4-</sup> -Gruppe der Silikate [SO <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup> -Gruppe der Sulfate [PO <sub>4</sub> ] <sup>3-</sup> -Gruppe der Phosphate	
0.414–0.732	6	Oktaeder	[AlO <sub>6</sub> ] <sup>9-</sup> -Oktaeder im Granat [MgO <sub>6</sub> ] <sup>10-</sup> -Oktaeder in Olivin und Pyroxen Cl <sup>-</sup> um Na <sup>+</sup> in NaCl	
0.732–1	8	Würfel	F <sup>-</sup> um Ca <sup>2+</sup> im Fluorit	
≈ 1	12	Kuboktaeder	Vor allem Elementmineralien: Au, Ag, Cu	

Ein Ziel der Naturwissenschaften ist es, Ordnung in die Natur zu bringen. Vom Standpunkt des Mineraliensammlers wäre es wohl wünschenswert, Minerale nach physikalischen Eigenschaften zu klassifizieren, doch sind diese zu variabel um eine adäquate Basis für die Mineralklassifizierung zu bilden. Die Mineralogischen Tabellen von STRUNZ (1957 und 1978) klassifizieren Mineralien anhand kristallchemischer Gesichtspunkte, wobei die dominierende Stellung der Anionen oder Anionengruppen ausschlaggebend ist:

- *Elemente*: gediegene Metalle, Halbmetalle, Nichtmetalle (z. B. Silber, Diamant)
- *Sulfide*: Selenide, Telluride, Arsenide (z. B. Pyrit)
- *Halogenide* (z. B. Fluorit)
- *Oxide und Hydroxide* (z. B. Rutil)
- *Karbonate, Borate, Nitrate* (z. B. Malachit, Sinhalit)
- *Sulfate, Chromate, Molybdate, Wolframate* (z. B. Baryt)
- *Phosphate, Arsenate, Vanadate* (z. B. Türkis)
- *Silikate* (z. B. Quarz, Feldspat, Zirkon...)

Die häufigsten Elemente (Gew.-%) der Erdkruste sind: Sauerstoff (46.60%), Silizium (27.70%), Aluminium (8.13%), Eisen (5.00%). Si-O-Verbindungen sind somit sehr häufig in der Erdkruste in Form von Silikatmineralien anzutreffen. Folglich ist auch das im vorherigen Abschnitt erwähnte  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder ein Baustein, der in der Natur recht häufig vorkommt. Betrachten wir z. B. die Bestandteile von Granit: Feldspat ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) und Glimmer ( $\text{K}(\text{Mg,Fe}^{2+})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$ ), so fällt auf, dass jedes dieser Minerale einen bestimmten Anteil  $\text{Si}_x\text{O}_y$  enthält, der aufgrund der geometrischen Gegebenheiten in Form von Tetraedern vorliegen *muss*.

In den folgenden Abschnitten wollen wir uns auf die Silikatminerale, und dabei in erster Linie auf eine bestimmte Mineral-Gruppe innerhalb der Silikatminerale beschränken.

#### 4 Strukturtypen der Silikatminerale

In den Silikatstrukturen können  $\text{SiO}_4$  Tetraeder isoliert, oder aber verknüpft über Sauerstoffbrücken zu Gruppen, Ringen, Ketten, Schichten oder dreidimensionalen Gerüsten verbunden sein. Mit der Anzahl Sauerstoffbrücken pro Tetraeder variiert auch das Verhältnis Si:O. Man unterscheidet folgende Strukturtypen (Abb. 3):

**Inselsilikate** Selbständige Tetraeder, es gibt keine gemeinsamen Sauerstoffbrücken zwischen den Tetraedern.

**Gruppensilikate** Zwei Tetraeder sind über eine Ecke durch ein gemeinsames Sauerstoffion verknüpft. Es gibt keine direkten Bindungen zwischen den Tetraederpaaren.

**Ringsilikate** Die Tetraeder sind über gemeinsame Brückensauerstoffe zu Dreier-, Vierer- oder Sechseringen verknüpft. Die Ringe sind untereinander nicht direkt verbunden.

**Kettensilikate** Jedes Tetraeder ist über zwei Ecken zu einer eindimensionalen, unendlichen Tetraederkette verknüpft.

**Bandsilikate** Zwei einfache Tetraederketten sind über Brückensauerstoffe zu unendlichen Doppelketten verknüpft.

**Schichtsilikate** Zweidimensional unendliche Tetraederschichten, wobei jedes Tetraeder drei seiner Sauerstoffe mit benachbarten Tetraedern teilt.

**Gerüstsilikate** Jedes Tetraeder ist über alle Ecken mit anderen  $\text{SiO}_4$ -Tetraedern verknüpft.

## 5 Zeolith – ein praktisches Gerüstsilikat

### 5.1 Die Struktur von Zeolithen

Die Anordnungsmöglichkeiten von  $\text{SiO}_4$ -Tetraedern sind unüberschaubar, es lassen sich damit fast beliebig viele unterschiedliche Strukturen bilden. Dass dabei einige etwas ausgefallenerer Varianten entstehen, erstaunt kaum. Wir wollen im Folgenden eine Gruppe von Gerüstsilikaten betrachten, die durch ihre besondere Struktur außergewöhnliche Fähigkeiten besitzen und bereits seit einiger Zeit das Interesse der Wissenschaft geweckt haben – die Rede ist von Zeolithen. Die besondere Eigenschaft der Zeolithstrukturen sind große Hohlräume oder Kanäle, deren Durchmesser so groß ist, dass sich Moleküle oder Ionen hindurch bewegen können (Abb. 4). Typischerweise misst der freie Durchmesser etwa bis zu 7 Å.

Weist ein Material solch große Poren (Hohlräume) auf, hat es erwartungsgemäß eine geringe Dichte. In der Tat liegt die Dichte von Klinoptilolith, einem weit verbreiteten Zeolithmineral, mit  $2.2 \text{ g/cm}^3$  deutlich unter derjenigen von Quarz ( $2.62 \text{ g/cm}^3$ ) und Kalzit ( $2.72 \text{ g/cm}^3$ ), zwei ebenfalls häufig vorkommenden Mineralen.

### 5.2 Substitution

Wie wir bereits festgestellt haben, besitzt ein Gerüst aus  $\text{SiO}_4$ -Tetraedern ein  $\text{Si}^{4+}:\text{O}^{2-}$ -Verhältnis von 1:2 und ist daher elektrisch neutral (Abb. 3). Für Zeolithe würde das bedeuten, dass Ionen und Moleküle zwar in die Hohlräume und Kanäle eindringen könnten, darin aber nicht gebunden würden. Wird jedoch ein Teil der Si-Ionen durch Ionen geringerer Wertigkeit ersetzt (substituiert), ohne die Änderung der positiven Ladung auf der Seite der negativen Ladungen zu kompensieren, entsteht im Gerüst ein Ladungsungleichgewicht. Dass dieser Effekt eine Voraussetzung für die technische Anwendbarkeit von Zeolithen ist, werden wir im Folgenden sehen.

Generell stellt sich nun die Frage, ob ein Kation während des Kristallwachstums so einfach durch ein anderes ersetzt werden kann. Kann im Fall von Silikaten ein  $\text{Si}^{4+}$ -Kation des  $\text{SiO}_4$ -Tetraeders durch ein anderes Kation ersetzt werden? Die Antwort lautet: Ja, vorausgesetzt das Kation erfüllt einige Bedingungen:

- Die Ladung des Kations darf nicht zu stark von derjenigen des Siliziums (4+) abweichen, da sonst die Bindungssituation zu den umgebenden Sauerstoffatomen zu stark ändert.
- Der Ionenradius sollte demjenigen des  $\text{Si}^{4+}$  möglichst ähnlich sein, auf jeden Fall muss die Koordination von Sauerstoff nach Paulings Regel Nr. 1 immer noch tetraedrisch sein.

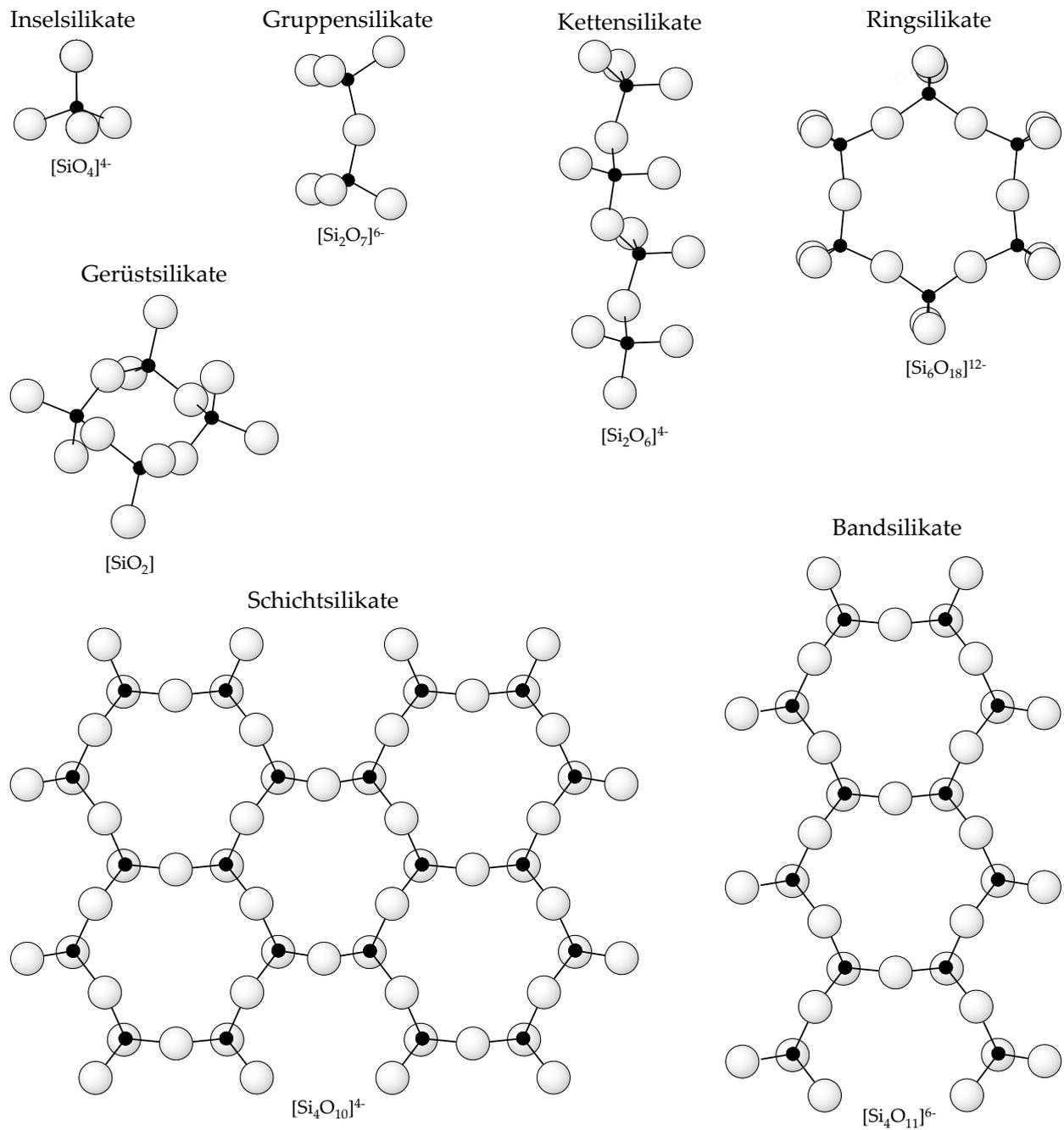


Abbildung 3: Die verschiedenen Strukturtypen von Silikat-Mineralien, aufgebaut durch Verknüpfung von  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder.

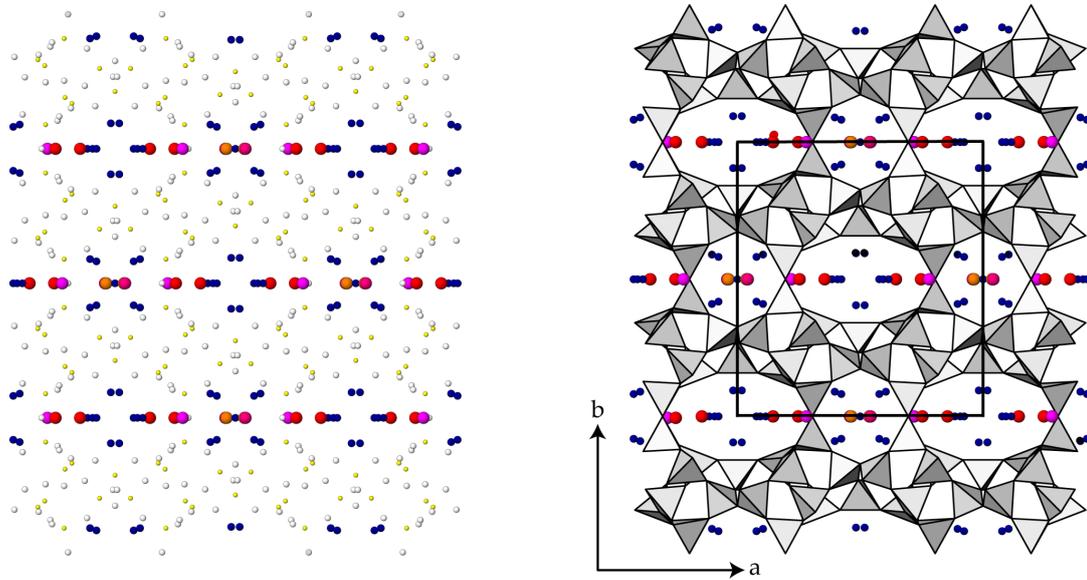
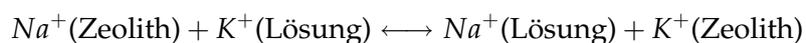


Abbildung 4: Die Strukturen von Zeolithen (hier Klinoptilolith) enthalten große Kanäle, in denen Kationen und Wassermoleküle Platz finden. Wird das Silikatgerüst nicht als einzelne Atome (links), sondern als Verknüpfung von  $\text{SiO}_4$ -Tetraedern (rechts) dargestellt, werden grafische Darstellungen wesentlich übersichtlicher. Die Einheitszelle ist als schwarzes Rechteck eingezeichnet.

Damit ist die Auswahl an möglichen Substitutionen bereits stark eingeschränkt. Im Fall von natürlichen Zeolithen findet man vor allem Aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ) als Substituent für Silizium ( $\text{Si}^{4+}$ ). Bei dieser Substitution wird die Struktur durch die fehlende positive Ladung negativ geladen. In natürlichen Zeolithen kann der Grad dieser Substitution schwanken, typische Werte für den oben erwähnten Klinoptilolith liegen im Bereich von 25 %. Die Zusammensetzung des Tetraedergerüsts von Heulandit lautet also  $[\text{AlSi}_3\text{O}_8]^-$  anstelle von  $\text{Si}_4\text{O}_8$ . Generell kann der Grad der Substitution von  $\text{Si}^{4+}$  durch  $\text{Al}^{3+}$  in Silikatstrukturen das Verhältnis 1:1 nicht überschreiten.

## 6 Ladungsausgleich – Ionenaustausch

Durch die negative Ladung des Gerüsts bietet sich nun Kationen und polaren Molekülen (z. B.  $\text{H}_2\text{O}$ ) die Möglichkeit, in die Hohlräume und Kanäle zu diffundieren, um dort schwache elektrostatische Bindungen zum Silikatgerüst zu bilden. Je vollständiger die  $\text{Si}^{4+} \leftrightarrow \text{Al}^{3+}$ -Substitution, desto größer ist das Ladungsdefizit und desto größer ist die Zahl der Kationen oder polaren Moleküle, die für die elektrische Neutralität benötigt wird. Praktisch wird die Ionenaustauschkapazität durch weitere Faktoren wie Temperatur, Radius und Ladung der Kationen sowie Konzentration der Kationenart in der Lösung beeinflusst. Eine mögliche Ionenaustausch-Reaktion wäre somit



Die Kanäle enthalten außerdem relativ große Mengen  $\text{H}_2\text{O}$ . Die neutralen  $\text{H}_2\text{O}$ -Moleküle haben keinen Einfluss auf das Ladungsgleichgewicht und können daher recht einfach, zum Beispiel

durch Erhitzen, aus der Struktur ausgetrieben werden. Der Vorgang lässt in den meisten Fällen die Struktur intakt und ist vollständig reversibel.

## 7 Technische Anwendungen

Aus den chemischen und physikalischen Eigenschaften von Zeolithen ergeben sich interessante Anwendungsmöglichkeiten. So können sie zum Beispiel als molekulare Siebe eingesetzt werden, da kleine Ionen und Moleküle durch die Kanalsysteme wandern können, größere Partikel, Ionen und Moleküle aber zurückgehalten werden. Durch die Möglichkeit zur Abgabe und Aufnahme von Wasser können Zeolithe auch als Trocknungsmittel genutzt werden. Als Geschenk der Natur kann man auch Zeolithe betrachten, die bevorzugt Elemente wie Cadmium ( $\text{Cd}^{2+}$ ), Strontium ( $\text{Sr}^{+}$ ) und Cäsium ( $\text{Cs}^{+}$ ) aufnehmen. Diese Elemente sind äußerst gefährlich für Pflanzen und Lebewesen, weshalb die Möglichkeit, sie mit Hilfe von Zeolithen aus der Biosphäre zu entfernen, von großer Bedeutung ist.

Neben den natürlichen Zeolithen existieren auch synthetisch hergestellte Strukturen. Die bekannteste darunter heißt Linde Typ A (LTA) und wird zur Katalyse sowie als Ionenaustauscher in Waschmittel eingesetzt. Allgemein finden Zeolithe heutzutage in folgenden Bereichen Anwendung:

**Landwirtschaft:** Zeolithe dienen als Trägermaterial zur langsamen Abgabe von  $\text{K}^{+}$  und  $\text{NH}_4^{+}$ , und werden somit als Dünger eingesetzt. Mit dem Begriff *zeoponics* werden Pflanzenkulturen bezeichnet, die in künstlichem Boden mit einem großen Anteil an Zeolithen wachsen. Diese Art der Pflanzenaufzucht könnte in Orten mit reduzierter Schwerkraft wie Mond- und Marsstationen einmal eine wichtige Rolle spielen. Auf der russischen Raumstation MIR wurde bereits im Jahre 1990 erfolgreich zeoponisches Gemüse gezüchtet.

**Tierhygiene:** Durch die hohe Austauschkapazität von  $\text{NH}_4^{+}$  (Ammonium) und die Oberflächenabsorption von Geruchsstoffen werden Zeolithe auch als Katzenstreu geschätzt – und zu einem sehr profitablen Preis von 800 US\$ pro Tonne verkauft.

**Gesundheit und Ernährung:** Der Nahrung beigemischte Zeolithe erhöhen nachgewiesenermaßen die Leistung des Verdauungstraktes bei Schweinen, Wiederkäuern und Geflügel ohne erkennbare Schäden für das Tier.

**Gasreinigung und -separation:** Mit Hilfe von Zeolithen lassen sich Gase voneinander trennen und reinigen. Für medizinische Anwendungen lässt sich so der  $\text{CO}_2$ -Gehalt von Luft verringern. Die Separation von  $\text{N}_2$  und  $\text{O}_2$  ist ein wichtiger Prozess, da Stickstoff und Sauerstoff zu den volumenmäßig weltweit am meisten hergestellten Chemikalien gehören.

**Dekontamination:** Aufgrund der hohen Selektivität für einige toxische und radioaktive Elemente werden Zeolithe zur Reinigung von kontaminierten Abwässern aus der Industrie, oder zur Dekontamination von radioaktiv verseuchten Gebieten eingesetzt.

Im zweiten Teil befassen wir uns mit der Entstehung von natürlichen Zeolithen, und betrachten an einem der wohl spektakulärsten Fallbeispiele, dem Reaktorunfall von Tschernobyl im Jahre 1986, wie Zeolithe zur Dekontamination von radioaktiv verseuchten Gebieten eingesetzt werden.