

Minerale

**2.1
Der Mineralbegriff**

**2.2
Mineralbestimmung
und Mineralsystematik**

**2.3
Vorkommen
und Ausbildung
der Minerale**

**2.4
Gesteinsbildende
und wirtschaftlich
wichtige Minerale**

**2.5
Biomineralisation
und medizinische
Mineralogie**

**2.6
Mineralogische
Wissenschaften und
ihre Anwendungsgebiete
in Technik, Industrie
und Bergbau**

2.1 Der Mineralbegriff

Minerale sind chemisch einheitliche, natürliche Bestandteile der Erde und anderer Himmelskörper (Mond, Meteoriten, erdähnliche Planeten unseres und anderer Sonnensysteme). Von wenigen Ausnahmen abgesehen, sind Minerale anorganisch, fest und kristallisiert (Abb. 1.1, 2.1).

Diese sehr allgemein gehaltene Mineraldefinition wird im Folgenden schrittweise erläutert.

Minerale sind natürliche Produkte

Das bedeutet, sie sind durch natürliche Vorgänge und ohne Einflussnahme des Menschen entstanden. Ein künstlich im Laboratorium hergestellter Quarz z. B. wird als *synthetischer Quarz* vom natürlichen Mineral unterschieden. Der synthetische Quarz ist zwar physikalisch und chemisch mit dem natürlichen Quarz identisch, jedoch als Kunstprodukt im Sinn der obigen Definition kein Mineral. Man spricht allerdings von *Mineralsynthese* und meint die künstliche Herstellung eines Minerals mit allen ihm zukommenden Eigenschaften. Es ist auch üblich, z. B. einen künstlich hergestellten Smaragd von Edelsteinqualität als *synthetischen Edelstein* zu bezeichnen.

In ihrer weit überwiegenden Mehrzahl sind Minerale durch *anorganische Vorgänge* gebildet worden. Darüber hinaus gibt es aber auch wichtige biogene Prozesse, durch die Minerale in oder unter Mitwirkung von Organismen entstehen können (vgl. Abschn. 2.5). So bauen Calcit, Aragonit und Opal Skelette oder Schalen von Mikroorganismen und Invertebraten (Wirbellosen) auf; Apatit ist ein wesentlicher Bestandteil von Knochen und Zähnen der Wirbeltiere (z. B. Pasteris et al. 2008); elementarer Schwefel, Pyrit und andere Sulfidminerale können durch Reduktion unter dem Einfluss von Bakterien entstehen (z. B. Templeton 2011; Konhauser et al. 2011).

Minerale bilden die *Gemengteile von Gesteinen* und bauen als solche wesentliche Teile der Erde, des Mondes und der erdähnlichen Planeten auf. Derzeit zugänglich sind uns die kontinentale Erdkruste, Serien von Bohrkernen der ozeanischen Erdkruste und untergeordnet Fragmente des oberen, selten auch des unteren Erdmantels. Wir müssen aber annehmen, dass der gesamte Erdmantel, der bis zu einer Tiefe von 2 900 km reicht, sowie der innere Erdkern (unterhalb einer Tiefe von etwa 5 100 km) aus Mineralen bestehen, über die allerdings nur theoretische oder hypothetische Vorstellungen existieren. Analoge Überlegungen gelten für den Mond, die erdähnlichen Planeten Merkur, Venus, Mars und dessen Satelliten sowie für die Asteroiden, kleine planetenähnliche Körper, welche die Sonne zwischen der Mars- und Jupiter-

bahn umkreisen. Proben der Mondkruste wurden durch die Apollo-Missionen der NASA der wissenschaftlichen Untersuchung zugänglich gemacht. Meteorite sind Bruchstücke aus dem Asteroiden-Gürtel, seltener von der Oberfläche des Mars und des Erdmondes, die gelegentlich auf die Erde fallen (Kap. 31, S. 547 ff). Auch die erdähnlichen Planeten anderer Sonnensysteme dürften zumindest teilweise aus Mineralen aufgebaut sein. Schließlich bestehen die interstellaren, circumstellaren und präsolaren Staubeilchen aus Mineralen (Tabelle 34.1, Abb. 34.2).

Minerale sind physikalisch und chemisch homogen

Als *homogener Körper* lässt sich jedes Mineral auf mechanischem Weg in (theoretisch) beliebig viele Teile zerlegen, die alle die gleichen physikalischen und chemischen Eigenschaften aufweisen. Man bezeichnet allgemein Materie als physikalisch und chemisch homogen, wenn beim Fortschreiten in einer Richtung immer wieder dieselben physikalischen und chemischen Eigenschaften angetroffen werden und wenn sich diese gleichen Eigenschaften auch mindestens in parallelen Richtungen wiederholen (Abb. 1.3). Alles andere wäre heterogen.

Die *chemische Homogenität* besteht darin, dass jedes Mineral eine ganz bestimmte oder in festgelegten Grenzen variierende stoffliche Zusammensetzung aufweist. Diese lässt sich mit einer individuellen chemischen Formel ausdrücken.

Die weitaus überwiegende Zahl der Minerale sind *anorganische Verbindungen* (Tabelle 2.1). Nur sehr wenige Minerale stellen organische Verbindungen dar, wie beispielsweise das Calciumoxalat Whewellit $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, das Benzensalz Mellit $\text{Al}_2\text{C}_6(\text{COO})_6 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ oder der Kohlenwasserstoff Fichtelit $\text{C}_{19}\text{H}_{34}$. Untergeordnet treten auch chemische Elemente auf. Öfter sind es einfache chemische Verbindungen mit ganz bestimmter Zusammensetzung, wie z. B. Quarz SiO_2 . Zahlreiche Minerale sind dagegen *Mischkristalle*, in denen ein einfacher oder gekoppelter Ersatz von Kationen oder Anionen stattfindet, z. B. $\text{Mg}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$ beim Olivin mit den Endgliedern Forsterit $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$ und Fayalit $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$ oder $\text{Na}^+\text{Si}^{4+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+}\text{Al}^{3+}$ beim Plagioklas mit den Endgliedern Albit $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ und Anorthit $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$. Bei Mischkristallen können Veränderungen der Druck-Temperatur-Bedingungen während des Wachstums zu chemischem Zonarbau führen oder es kommt bei der Abkühlung zu nachträglicher *Entmischung* einer chemischen Verbindung aus einem ursprünglich homogenen Wirtkristall. Der Mineralbegriff schließt solche Inhomogenitäten mit ein.

Eine Aussage darüber, ob die Forderung der Homogenität einer Mineralprobe erfüllt ist, stößt beim Mineralbestimmen nach äußeren Kennzeichen immer wieder auf Schwierigkeiten, weil eine solche Entscheidung wesentlich von der Bezugsskala abhängt. So kann

eine Probe mit bloßem Auge betrachtet durchaus homogen erscheinen, während sie sich unter dem Polarisations-Mikroskop bei stärkerer Vergrößerung als uneinheitlich erweist. In Wirklichkeit liegt ein mikroskopisch feines Verwachsungsaggregat aus zahlreichen Mineralkörnern oder Mineralfasern vor. In vielen Fällen erweisen sich auch mikroskopisch homogene Minerale unter dem Elektronenmikroskop oder durch Röntgenbeugungsanalyse als heterogen.

Minerale sind in aller Regel Festkörper und meist kristallisiert

Das einzige Mineral, das sich bei gewöhnlicher Temperatur im flüssigen Zustand befindet, ist das gediegene Quecksilber (elementares Hg), das bei Atmosphärendruck einen Schmelzpunkt von $-38,89\text{ °C}$ aufweist (Wasser zählt nicht zu den Mineralen, wohl aber natürliches Eis). Minerale sind meist *kristallisierte Festkörper (Einkristalle)*, deren Bausteine (Atome, Ionen, Ionenkomplexe), ungeachtet zahlreicher Baufehler und Unregelmäßigkeiten, dreidimensional periodisch angeordnet sind (vgl. Kap. 1). Demgegenüber befinden sich nur wenige Minerale im *amorph*, d. h. *nichtkristallisierten* Zustand. Ihr Feinbau ist dann geometrisch ungeordnet. Zu ihnen gehören als bekanntester Vertreter der Opal $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, und zwar in den Formen Opal-AN (Hyalit, Glasopal) und Opal-AG (Edelopal; Abschn. 11.6.1, Abb. 11.49, S. 188f). Opal entwickelt wie andere ursprünglich amorph gebildete Minerale im freien Raum unter dem Einfluss der Oberflächenspannung traubig-nierige Formen und niemals Kristallformen, d. h. durch ebene Flächen begrenzte Polyeder. Das seltene natürliche Kieselglas SiO_2 (Lechatelierit) kommt in der Natur als Bindemittel zusammengesetzener Sandkörper vor und verdankt seine Entstehung meist Blitzschlägen, wurde aber auch in mehreren Meteoriten-Kratern, den Einschlagstellen von großen Meteoriten auf der Erdoberfläche, vorgefunden. Die vulkanischen Gläser (Obsidian) zählen wegen ihrer häufig heterogenen Zusammensetzung und ihres variablen Chemismus nicht zu den Mineralen, sondern werden den vulkanischen Gesteinen zugeordnet.

In den amerikanischen Lehrbüchern wird der Begriff *mineral* häufig auf kristallisierte Minerale beschränkt, während die nichtkristallisierten Minerale wie Opal oder ged. Quecksilber als *mineraloids* (Mineraloide) bezeichnet werden. Diese Abgrenzung ist im deutschen Sprachraum nicht eingeführt.

Bernstein, ein fossiles Harz von Nadel- und Laubbäumen besonders aus der Tertiär-Zeit, ist ein amorphes Gemenge aus oxidierten Harzsäuren und Harzalkoholen mit der durchschnittlichen Zusammensetzung 78 Gew.-% C, 9,9 % H, 11,7 % O, 0,42 % S. Der Begriff Bernstein entspricht demnach nicht der Mineraldefinition.

Nichts mit Mineralen zu tun haben Begriffe wie Mineralwasser, Mineralöl, Mineralsalze in den Nahrungsmitteln etc. Bei diesen Bezeichnungen geht es lediglich um eine Herausstellung von Naturprodukten. Gelegentlich wird der Mineralbegriff aus völliger Unkenntnis fälschlich für chemische Elemente bzw. Ionen eingesetzt wie z. B. in dem Artikel „Superstar der Küche, die Tomate“ Reader's Digest, 1991, Nr. 5: „Sie ... enthält die Vitamine A, B, C und E sowie Mineralien (darunter Eisen, Kalzium und Kalium).“

2.2

Mineralbestimmung und Mineralsystematik

Bestimmung von Mineralen

Die Bestimmung von Mineralen nach *äußeren Kennzeichen* unter Verwendung *einfacher Hilfsmittel* ist keine triviale Angelegenheit; sie erfordert vielmehr Beobachtungsgabe, ein gutes visuelles Gedächtnis, Übung und Erfahrung (vgl. Vinx 2008). Unerlässlich ist eine Lupe mit hinreichender Vergrößerung (10fach) und nicht zu kleinem Gesichtsfeld. Sehr hilfreich, insbesondere für die exakte Ansprache sehr kleiner Minerale (sog. Micromounts) ist die Verwendung eines guten Binokularmikroskops mit ausreichend großem Arbeitsabstand. Äußere Kennzeichen und physikalische Eigenschaften sind: Morphologische Ausbildung (Einkristall – Kristallaggregat – Gestein), Kristallform (Tracht – Habitus), Zwillingsbildung, Flächenstreifung, Spaltbarkeit, Bruch, mechanisches Verhalten (Elastizität, Sprödigkeit, Dehnbarkeit), Ritzhärte, Dichte, Farbe (Farbwandlung), Glanz, Lichtdurchlässigkeit, Strich auf rauher Porzellanplatte, Fluoreszenz, magnetisches Verhalten, Radioaktivität. Hierzu leisten Bestimmungstabellen Hilfe (z. B. Hochleitner et al. 1996).

Für eine *exakte Mineralbestimmung* sind dagegen aufwendigere Verfahren mit teuren Geräten notwendig, die dem Mineraliensammler nicht ohne weiteres zur Verfügung stehen. Hierzu gehört in erster Linie Röntgen-Pulver- und Röntgen-Einkristalldiffraktometer (Abschn. 1.2.3). Mit diesen Verfahren der Röntgenbeugung können Minerale sicher angesprochen und ihre Gitterkonstanten bestimmt oder auch bisher unbekannte Minerale erkannt, ihre Gitterkonstanten und ihre Kristallstruktur ermittelt werden. Besonders für die sichere Ansprache gesteinsbildender Minerale (s. u.) sind leistungsfähige Polarisations-Mikroskope für Durchlicht und Auflicht (Abschn. 1.5.2, 1.5.3) unverzichtbar, möglichst in Kombination mit einer Digital-Kamera. Für die Untersuchung des submikroskopischen Baus von Mineralen, z. B. für die Analyse von submikroskopischen Entmischungen, verwendet man Raster- und/oder Transmissions-Elektronenmikroskope. Die chemische Zusammensetzung von Mineralen wird heute routinemäßig mit der Elektronenstrahl-Mikrosonde ermittelt, die eine ortsauflösende Punktanalyse im Bereich von $1\text{--}2\ \mu\text{m}$ gestattet. Dabei werden die Minerale in einem anpolierten Gesteinsdünnschliff oder einem Erzanschliff mit einem feingebündelten Elektronenstrahl beschossen und dadurch aus der Probe charakteristische Röntgenstrahlung unterschiedlicher Wellenlänge emittiert, die mit einem Analysator-Kristall registriert werden kann (Umkehrung der Bragg'schen Gleichung [1.1]). Die jeweils ermittelte Wellenlänge ist für die Gehalte der chemischen Komponenten charakteristisch, die das Mineral aufbauen, z. B. Mg, Fe und Si beim Olivin $(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$;

die jeweilige Zählrate, die mit einem Geiger-Müller-Zählrohr gemessen und mit einem geeigneten Standard verglichen wird, ist proportional dem jeweiligen Gehalt der betreffenden Komponente. Durch solche Analysen, die an einer größeren Zahl von Messpunkten durchgeführt werden, lässt sich die durchschnittliche chemische Zusammensetzung des Minerals und seine chemische Variationsbreite bestimmen; man erhält so auch Hinweise auf einen möglichen Zonarbau und erkennt Entmischungen oder winzige Mineraleinschlüsse.

Mineralarten und Mineralvarietäten

Zu einer *Mineralart* gehören alle Mineralindividuen mit übereinstimmender chemischer Zusammensetzung und Kristallstruktur. Dabei können sich die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Individuum zu Individuum innerhalb gewisser Grenzen unterscheiden, wodurch *Mineralvarietäten* entstehen.

Es gibt rund 4 600 definierte Mineralarten (Tabelle 2.1), von denen jedoch nur ein geringer Anteil gesteinsbildend auftritt (Tabelle 2.2) und/oder wirtschaftlich bedeutsam ist. Die meisten Mineralarten sind nicht sehr häufig oder ausgesprochen selten. Jährlich werden etwa 100 Minerale neu entdeckt, die allerdings meist extrem selten und oft nur in winzigen Exemplaren vorkommen. Geringe Un-

terschiede im Chemismus einschließlich des Spurenelementchemismus und bei den physikalischen Eigenschaften einschließlich Kristalltracht und Kristallhabitus führen bei einer gegebenen Mineralart in den meisten Fällen zur Unterscheidung von *Mineralvarietäten*. Bei der Mineralart Quarz unterscheidet man z. B. eine größere Anzahl von Varietäten wie: Bergkristall (Abb. 1.1), Rauchquarz (Abb. 2.1, 2.2), Citrin, Amethyst (Abb. 11.46, S. 184), Rosenquarz.

Systematik der Minerale auf kristallchemischer Grundlage

Für eine sinnvolle systematische Gliederung der Minerale ist die Kenntnis ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrer Kristallstruktur erforderlich. Auf dieser Kombination von chemischen und kristallstrukturellen Parametern beruht die *Mineralklassifikation*, die Hugo Strunz seit 1941 in seinen Mineralogischen Tabellen vorlegte (8. Aufl. Strunz 1982; 9. engl. Aufl. Strunz u. Nickel 2001). Auf der Grundlage ihrer vorherrschenden Anionen oder Anionenkomplexe werden die Minerale 10 verschiedenen Klassen (engl. classes) zugeordnet, die in Tabelle 2.1 aufgeführt sind. (Bei der Klasse 1, den Elementen, fehlen natürlich die Anionen.) Die Klassen werden weiter in Abteilungen (engl. divisions), *Unterabteilungen* (engl. subdivisions), *Gruppen* (engl. groups) und – wenn nötig – in



Abb. 2.1. Kristalldruse aus Fluorit (grün), Quarz (Varietät Bergkristall), Pyrit (glänzende Würfelchen) und Wolframit (schwarz) Kara Oba, Kasachstan. Bildbreite 10 cm. Mineralogisches Museum der Universität Würzburg, Schenkung Albert Schröder. (Foto: K.-P. Kelber)



Abb. 2.2. Kristalldruse aus Quarz (Varietät Rauchquarz) und Kalifeldspat (Orthoklas), Idaho, USA. Bildbreite 10 cm. Mineralogisches Museum der Universität Würzburg, Schenkung Albert Schröder. (Foto: K.-P. Kelber)

Tabelle 2.1.
Chemische Einteilung der Minerale (Vereinfacht nach Strunz 1982)

	Klasse	Abteilung	Beispiele	
1.	Elemente	Gediegene Metalle	Kupfer Cu, Silber Ag, Gold Au, Platinmetalle, Quecksilber Hg	
		Metalloide (Halbmetalle)	Arsen As, Antimon Sb, Bismut (Wismut) Bi	
		Nichtmetalle	Graphit und Diamant C, Schwefel S, Selen Se, Tellur Te	
2.	Sulfide		Galenit (Bleiglanz) PbS, Sphalerit (Zinkblende) ZnS, Argentit (Hoch-Silberglanz) Ag ₂ S	
		Selenide	Naumannit α-Ag ₂ Se	
		Telluride	Hessit α-Ag ₂ Te	
		Arsenide	Löllingit FeAs ₂ , Sperryolith PtAs ₂	
		Antimonide	Aurostibit AuSb ₂	
		Bismutide	Froodit PbBi ₂	
3.	Halogenide		Halit (Steinsalz) NaCl, Fluorit (Flussspat) CaF ₂	
4.	Oxide		Korund Al ₂ O ₃ , Quarz SiO ₂ , Hämatit (Eisenglanz) Fe ₂ O ₃	
	Hydroxide		Gibbsit γ-Al(OH) ₃ , Goethit α-FeOOH	
5.	Karbonate		Calcit (Kalkspat) Ca[CO ₃]	
	Nitrate		Nitratin (Natronsalpeter) Na[NO ₃]	
6.	Borate		Sinhalit MgAl[BO ₄]	
7.	Sulfate		Baryt (Schwerspat) Ba[SO ₄], Gips Ca[SO ₄] · 2H ₂ O	
		Chromate	Krokoit Pb[CrO ₄]	
		Molybdate	Wulfenit Pb[MoO ₄]	
		Wolframate	Scheelit Ca[WO ₄]	
8.	Phosphate		Apatit Ca ₅ [(F,Cl,OH)/(PO ₄) ₃]	
		Arsenate	Mimetit Pb ₃ [Cl/(AsO ₄) ₃]	
		Vanadate	Vanadinit Pb ₃ [Cl/(VO ₄) ₃]	
9.	Silikate	Inselsilikate	Olivin (Mg,Fe) ₂ [SiO ₄]	
		Gruppensilikate	Thortveitit Sc ₂ [Si ₂ O ₇]	
		Ringsilikate	Dreierlinge	Benitoid BaTi[Si ₃ O ₉]
			Viererringe	Papagoit Ca ₂ Cu ₂ Al ₂ [(OH) ₆ /Si ₄ O ₁₂]
			Sechserlinge	Beryll Al ₂ Be ₃ [Si ₆ O ₁₈]
		Kettensilikate	Einfachketten	insbesondere Pyroxene wie Diopsid CaMg[Si ₂ O ₆]
			Doppelketten	Amphibole wie Tremolit Ca ₂ Mg ₅ [(OH) ₂ /Si ₈ O ₂₂]
Schichtsilikate		Glimmer wie Muscovit KAl ₂ [(OH,F) ₂ /AlSi ₃ O ₁₀]		
Gerüstsilikate		Feldspäte wie Kalifeldspat K[AlSi ₃ O ₈]		
10.	Organische Minerale		Whewellit CaC ₂ O ₄ · H ₂ O	

Familien untergliedert; für die Klassen 1. Elemente und 9. Silikate sind in Tabelle 2.1 auch die Abteilungen, bei den Silikaten auch Beispiele für Unterabteilungen angeführt.

2.3 Vorkommen und Ausbildung der Minerale

Zur Beschreibung und Identifizierung eines Minerals gehören nicht nur seine kristallographischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften, sondern auch Kenntnisse über sein Auftreten und sein Vorkommen in

der Natur. Für Rückschlüsse auf seine Entstehungsbedingungen ist dieser Befund unerlässlich.

Minerale finden sich entweder auf Wänden von Klüften, Spalten oder Hohlräumen aufgewachsen oder sind als Bestandteile von Gesteinen eingewachsen bzw. miteinander verwachsen.

Die frei *aufgewachsenen* Minerale konnten die ihnen eigene Kristallform entwickeln (Abb. 1.1, 2.1, 2.2). Sie verdanken es dem günstigen Umstand, dass sie in einen freien

Raum (Hohlraum, Kluft oder Spalte) ungehindert hineinwachsen konnten. Ihnen fehlen allerdings ebene Begrenzungen an ihrer Anwachsstelle, es sei denn, dass sie schwebend im Hohlraum oder in einem lockeren Medium kristallisiert sind.

Unter *Kristalldruse* versteht man eine Vereinigung zahlreicher Kristalle, die auf einer gemeinsamen Unterlage aufsitzen bzw. aufgewachsen sind (Abb. 1.1, 2.1, 2.2). Bei sehr vielen kleineren Kriställchen spricht man auch von einem Kristallrasen. *Mandeln* sind Mineralmassen, die rundliche Hohlräume im Gestein vollständig ausfüllen (Abb. 11.47, S. 186). Demgegenüber sind *Geoden* nur teilweise mit Mineralsubstanz gefüllt und enthalten nicht selten im Innern eine Kristalldruse, so die bekannten Achatgeoden eine Amethystdruse (Abb. 11.46, S. 184). Die „Kristallkeller“ aus den Schweizer Alpen sind ausgeweitete Zerrklüfte mit bis zu metergroßen Individuen von Bergkristall oder Rauchquarz. Auch Gipshöhlen enthalten mitunter große und schön ausgebildete Kristalle von Gips (Abb. 9.6, S. 133).

Gesteinsbildende Minerale (Abb. 2.1–2.10) haben sich bei ihrem Wachstum, wenn sie gleichzeitig kristallisiert sind, gegenseitig behindert. Sie weisen deshalb meist eine zufällige, kornartige Begrenzung auf. Eine solche Mineralausbildung im Gestein wird als *xenomorph* (grch. ξένος = fremd, μορφή = Gestalt) bezeichnet. In anderen Fällen sind gesteinsbildende Minerale dennoch von ebenen Flächen begrenzt. Ihre Form wird dann als *idiomorph* (grch. ίδιος = eigen) bezeichnet. Idiomorph ausgebildete Minerale treten besonders als sog. *Einsprenglinge* in vulkanischen Gesteinen (Abb. 2.5, 2.6)

oder als sog. *Porphyroblasten* in metamorphen Gesteinen (Abb. 2.9, 2.10) auf. Im ersten Fall handelt es sich um Frühausscheidungen aus einer Schmelze, im zweiten Fall um Minerale mit überdurchschnittlichem Größenwachstum. *Mikrokristalline* Minerale lassen sich lediglich unter dem Mikroskop, *kryptokristalline* unter dem Elektronenmikroskop oder durch Röntgenbeugung identifizieren.

Als *Mineralaggregate* bezeichnet man beliebige, auch räumlich eng begrenzte natürliche Assoziationen der gleichen oder unterschiedlicher Mineralarten. Schön kristallisierte Mineralaggregate bzw. Kristalldrusen von kommerziellem oder Liebhaber-Wert werden Mineralstufen genannt (Abb. 1.1, 2.1, 2.2).

2.4 Gesteinsbildende und wirtschaftlich wichtige Minerale

2.4.1 Gesteinsbildende Minerale

Von den etwa 4 600 bekannten Mineralarten treten nur etwa 250 gesteinsbildend auf, unter denen nur ganz wenige einen wesentlichen Teil der Erdkruste aufbauen. Wie eine grobe Abschätzung (Tabelle 2.2) zeigt, besteht die Erdkruste zu etwa 95 Volumen-% aus Silikatmineralen, wobei im Durchschnitt Plagioklas (Abb. 2.3, 2.4), Kalifeldspat (Abb. 2.2, 2.3, 2.5, 11.57, S. 196) und Quarz (Abb. 2.1, 2.2, 2.3) zusammen nahezu 65 Vol.-% einnehmen, während die dunklen Minerale, vor allem Pyroxene (Abb. 2.6, 11.32, S. 163), Amphibole (Abb. 11.35, S. 168), Glimmer, insbe-

Abb. 2.3.

Hypidiomorph-körniges Gefüge eines Granits, typisch für Tiefengesteine (Plutonite). Die Minerale haben sich bei ihrem Wachstum gegenseitig behindert: Plagioklas (weiß), Kalifeldspat, teilweise idiomorph ausgebildet (rosa), Quarz, meist xenomorph (grau), Biotit (schwarz). Reichenbach (Dzierzoniów), Niederschlesien, Polen. Mineralogisches Museum der Universität Würzburg. (Foto: K.-P. Kelber)



sondere Biotit (Abb. 2.3, 2.7), Olivin (Abb. 2.8) sowie Tonminerale und Chlorit (Abb. 2.9) zusammen nur knapp 30 Vol.-%, die übrigen gesteinsbildenden Silikatminerale ca. 4,5 Vol.-% ausmachen. Nichtsilikatische Minerale, insbesondere Karbonate, hauptsächlich Calcit (Abb. 8.3, 8.4, S. 119) und Dolomit, Oxide, besonders Magnetit (Abb. 2.9), Ilmenit und Hämatit (Abb. 7.7, S. 108) und Phosphate wie Apatit (Abb. 10.2, S. 139) erreichen zusammen nur etwa 4 Vol.-%.

Tabelle 2.2. Häufigkeit von Mineralen in der Erdkruste in Vol.-%. (Nach Ronov u. Yaroshevsky 1969)

Mineral	Vol.-%
Plagioklase	39
Alkalifeldspäte	12
Quarz	12
Pyroxene	11
Amphibole	5
Glimmer	5
Olivin	3
Tonminerale (+ Chlorit)	4,6
Calcit (+ Aragonit)	1,5
Dolomit	0,5
Magnetit (+ Titanomagnetit)	1,5
Anderer (Granat, Kyanit, Andalusit, Sillimanit, Apatit etc.)	4,9



Abb. 2.5. Einsprengling von Alkalifeldspat (Sanidin) im Trachyt vom Drachenfels, Siebengebirge. Mineralogisches Museum der Universität Würzburg. (Foto: K.-P. Kelber)

Abb. 2.4.

Plagioklas (Labradorit) mit polysynthetischen Zwillinglamellen, Madagaskar. Das spektakuläre Farbenspiel des Labradorisierens ist durch Beugung an submikroskopischen Entmischungslamellen bedingt, den sog. Böggild-Verwachsungen. Mineralogisches Museum der Universität Würzburg. (Foto: K.-P. Kelber)





Abb. 2.6. Pyroxen (basaltischer Augit), großer Einsprengling im Basalt; daneben eine zweite, wesentlich kleinere Einsprenglings-Generation. Böhmisches Mittelgebirge, Tschechien. Bildbreite 3 cm. Mineralogisches Museum der Universität Würzburg. (Foto: K.-P. Kelber)

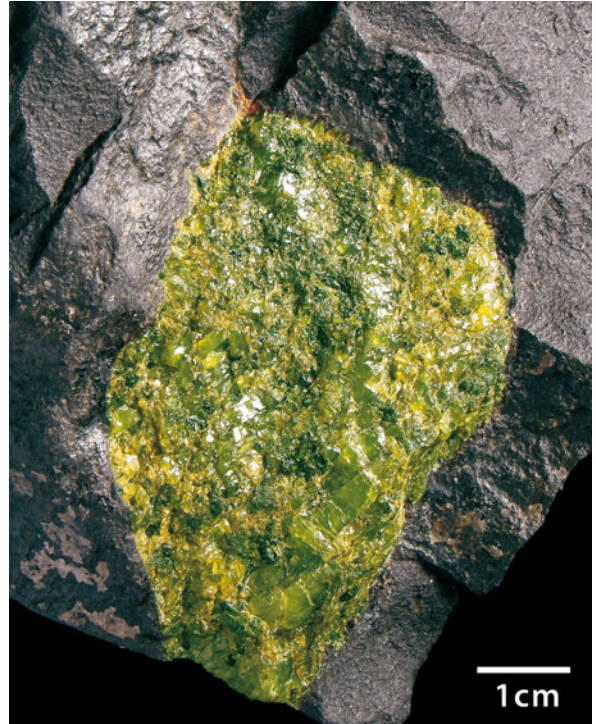


Abb. 2.8. Olivinknolle als Einschluss im Basalt, Bauersberg, Rhön. Mineralogisches Museum der Universität Würzburg. (Foto: K.-P. Kelber)

Abb. 2.7.
Biotit im Nephelinsyenit-Pegmatit, Saga-Steinbruch, Tvedalen bei Larvik, Norwegen. Mineralogisches Museum der Universität Würzburg. (Foto: K.-P. Kelber)





Abb. 2.9. Porphyroblasten von Magnetit (Oktaeder) in Grünschiefer (Chloritschiefer), Erbdorf, Oberpfalz. Mineralogisches Museum der Universität Würzburg. (Foto: K.-P. Kelber)

2.4.2 Nutzbare Minerale

Die meisten wirtschaftlich wichtigen Minerale sind nur ganz untergeordnet am Aufbau der Erdkruste beteiligt. Um sie mit vertretbarem Aufwand gewinnen zu können, müssen sie durch spezielle geologische Prozesse zu nutzbaren *Erz- oder Minerallagerstätten* angereichert werden, und zwar teilweise um mehrere Größenordnungen (Tabelle 33.5, S. 602). Wie in Abschn. 3.6 (S. 63) näher ausgeführt wird, sind in Erzlagerstätten *Erzminerale* konzentriert, aus denen nutzbare Metalle gewonnen werden können. Die meisten Erzminerale sind *Metall-Sulfide* oder *-Oxide*, seltener *Karbonate*, *Chromate*, *Molybdate*, *Wolframate*, *Arsenate* oder *Vanadate*; daneben kommen *Edelmetalle* auch in gediegener (elementarer) Form vor. Andere Minerale, die *Nichterze*, z. B. *Halogenide*, *Karbonate*, *Nitrate*, *Borate*, *Sulfate*, *Phosphate* und *Silikate*, dienen nicht der Metallgewinnung, können aber zu unterschiedlichen technischen Zwecken abgebaut werden. Man setzt sie z. B. im Baugewerbe, in der chemischen, metallurgischen und keramischen Industrie, bei der Herstellung von Werkstoffen oder als Düngemittel ein. Eine besondere Rolle unter den nutzbaren Mineralen spielen die Edelsteine, denen wir einen eigenen Abschnitt widmen.



Abb. 2.10. Glimmerschiefer mit Porphyroblasten von Staurolith (braun) und Granat (rot) mit deutlich erkennbarer Flächenkombination Rhombendodekaeder {110} und Ikositetraeder {211}. Jakutien, Ostsibirien. Mineralogisches Museum der Universität Würzburg. (Foto: K.-P. Kelber)

2.4.3 Edelsteine

Unter den mineralischen Rohstoffen, die uns die Erde liefert, nehmen Edelsteine zwar in der geförderten Menge einen geringen Rang ein; in der Wertschöpfung stehen sie jedoch an vorderer Stelle. Jährlich werden Schmuckwaren aus Gold und anderen Edelmetallen mit oder ohne gefasste Edelsteine im Wert von etwa 150 Mrd. US\$ auf den Markt gebracht (Fritsch u. Rondeau 2009). Dienen diese Preziosen in unserer modernen Gesellschaft ausschließlich der privaten Schmuckfreude, insbesondere auch dem Repräsentationsbedürfnis der Reichen und Superreichen, waren Edelsteine in früherer Zeit auch ein Mittel zur Darstellung von weltlicher und klerikaler Macht. Erinnert sei an die Kroninsignien wie den Kronschatz des Deutschen Kaiserreiches in der Wiener Hofburg, den britischen Kronschatz im Londoner Tower, die Krone Ludwigs XV. im Pariser Louvre, die russische Reichskrone im Moskauer Kreml oder die Pahlevi-Krone im Teheraner Kronschatz.

Von wenigen Ausnahmen abgesehen – insbesondere dem Bernstein – sind fast alle Edelsteine Minerale. Von den uns bekannten Mineralarten wurden weniger als 200 als Edelsteine verwendet. Der Gesamtwert ihrer jährlichen

Förderung liegt in der Größenordnung von 20–25 Mrd. US\$ (Fritsch u. Rondeau 2009). Mit einem Anteil von ca. 85 % steht *Diamant* mit weitem Abstand an der Spitze (Abschn. 4.3, S. 75ff): es folgen *Korund* Al_2O_3 (Abschn. 7.4, S. 110f) mit den beiden Varietäten *Rubin* und *Saphir*, das Ringsilikat *Beryll* $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ (Abschn. 11.3, S. 156f) mit den Varietäten *Smaragd* und *Aquamarin*, das komplexe Ringsilikat *Turmalin* (Abschn. 11.3, S. 156ff), das Inselsilikat *Topas* $\text{Al}_2[\text{F}_2/\text{SiO}_4]$ (Abschn. 11.1, S. 145f) und die Quarzvarietät *Amethyst* (Abschn. 11.6.1, S. 179f).

Wodurch wird ein Mineral zum Edelstein? Zum einen sind es besondere *physikalische Eigenschaften*, die ein Mineral – meist in geschliffener Form – als Schmuckstein besonders attraktiv machen, zum anderen ist es die *Seltenheit* der Edelstein-Mineralen, die ihre Nachfrage und damit auch ihren Preis bestimmen. Das anwendungsorientierte Fachgebiet der *Edelsteinkunde* (*Gemmologie*) beschäftigt sich mit der Bestimmung von Edelsteinen mit mineralogischen Methoden, der Unterscheidung von natürlichen und synthetischen Edelsteinen, der Erkennung von künstlich – durch Erhitzen, Bestrahlen oder Färben – veränderten Edelsteinen und von Fälschungen, aber auch mit der Erforschung von geologischen Prozessen, durch die Edelstein-Mineralen in der Natur entstehen, sowie mit der Auffindung und Ausbeutung neuer *Edelstein-Lagerstätten*.

Physikalische Eigenschaften der Edelstein-Mineralen

- An erster Stelle steht die **Farbe** der Edelstein-Mineralen, wie z. B. das herrliche Grün des Smaragds, das sog. Taubenblutrot des Rubins, oder die absolute *Farblosigkeit*, durch die sich Diamanten hoher Qualität auszeichnen. Für die Färbung der oxidischen und silikatischen Edelsteine sind geringe Beimengungen von Metallionen aus der Gruppe der *Übergangselemente* verantwortlich, insbesondere von Titan, Vanadium, Chrom, Mangan, Eisen und Kupfer. Spurenelement-Gehalte von V^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{3+} und Cu^{2+} , die in der Größenordnung von 0,1 Gew.-% bzw. wenigen ppm (part per million) liegen, können starke Farbeffekte erzeugen, die durch elektronische Übergänge in den d-Orbitalen bedingt sind (z. B. Rossman 2009). Gemäß der Kristallfeld-Theorie spalten diese Orbitale in ionaren Verbindungen in unterschiedliche Energieniveaus auf, und durch Absorption einer Wellenlänge des sichtbaren Lichts, die dieser Kristallfeldaufspaltung entspricht, können Elektronenübergänge angeregt werden. Darüber hinaus können durch Metall-Metall-Ladungsübergänge (Intervalence Charge Transfers, IVCT) auch Elektronenwechsel-Vorgänge zwischen strukturell benachbarten und ungleich geladenen Kationen, z. B. Fe^{2+} und Fe^{3+} oder Fe^{2+} und Ti^{4+} zu starken Farbeffekten führen. Eine Reihe von Edelstein-

Mineralen zeigt eine ausgeprägte *Anisotropie der Farbe*; sie sind *dichroitisch*, z. B. der optisch einachsige Turmalin, oder *pleochroitisch*, z. B. der optisch zweiachsige Cordierit (Abschn. 11.3, S. 156f). Bei dem ebenfalls pleochroitischen *Alexandrit*, einer Cr-haltigen Varietät des *Chrysoberyll* BeAl_2O_4 (Abschn. 7.2, S. 104) ist die Erscheinung des *Changierens* besonders ausgeprägt. Sie ist durch die Existenz von zwei Banden im optischen Absorptions-Spektrum bedingt: Gelb und Blau werden absorbiert, Grün und Rot durchgelassen. Dementsprechend erscheint Alexandrit bei Tageslicht grün, bei Kunstlicht rot.

- Eine hohe **Lichtbrechung** verleiht Edelstein-Mineralen in geschliffener Form einen schönen *Glanz*. Mit einer Lichtbrechung von 2,419 (für gelbes Licht) steht hier Diamant an erster Stelle, während Korund deutlich geringere Brechungsindizes (n_e 1,759–1,763, n_o 1,767–1,772) aufweist. Der Wert der Beryll-Varietäten Smaragd und Aquamarin, deren Brechungsindizes noch geringer sind (n_e 1,565–1,590, n_o 1,569–1,598), ist weniger in ihrem Glanz, als vielmehr in ihren Farben begründet.
- Die **Dispersion der Lichtbrechung**, d. h. die Abhängigkeit der Brechungsindizes von der Wellenlänge, führt dazu, dass an den Facetten eines geschliffenen Edelsteins die unterschiedlichen Wellenlängen des einfallenden weißen Lichtes in unterschiedlichen Winkeln gebrochen, reflektiert oder totalreflektiert werden. Dadurch entsteht ein attraktives Farbenspiel, das *Feuer*. Besonders ausgeprägt ist die Dispersion beim *Diamant*, bei dem die Lichtbrechung für violettes Licht ($\lambda_F = 396,8$ nm) bei $n_F = 2,465$, für rotes Licht ($\lambda_C = 656,3$ nm) dagegen nur bei $n_C = 2,410$ liegt. Die optischen Effekte, die durch die Dispersion der Lichtbrechung bedingt sind, können durch eine geeignete Schliiffform, insbesondere durch den um 1910 entwickelten *Brilliantenschliiff* (Abb. 4.13, S. 78) optimiert werden.
- **Besondere Lichteffekte** entstehen durch – in anderen Fällen unerwünschte – Fremdeinschlüsse in Edelstein-Mineralen sowie durch Realbau-Phänomene der Kristalle wie Spaltrisse, Zwilling- oder Entmischungs-Lamellen. Als *Asterismus*, der bereits von Plinius d. Ä. (~23–79 n. Chr.) beschrieben wurde, bezeichnet man einen sternförmigen Lichtschein, der durch orientierte Einwachungen von *Rutil*-Nädelchen erzeugt wird. Er tritt hauptsächlich bei den Korund-Varietäten *Sternrubin* und *Sternsaphir*, aber auch beim *Rosenquarz*, seltener bei *Granat* und *Zirkon* auf. Das *Chatoyieren* (franz. chat = Katze, oeil = Auge), auch Katzenaugen-Effekt genannt, ist ein wogender Schimmer, der durch orientiert eingelagerte Hohlkanäle, wie beim *Chrysoberyll-Katzenauge* BeAl_2O_4 (Abschn. 7.2, S. 104) bedingt ist, ferner beim *Beryll*-, *Turmalin*- und *Quarz-Katzenauge*; das blau schimmernde *Falkenauge* und das durch Oxidation von Fe^{2+} zu Fe^{3+} bronzegelb schimmernde *Tigerauge* entstehen durch Verkieselung von Kroky-



<http://www.springer.com/978-3-642-34659-0>

Mineralogie

Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie
und Lagerstättenkunde

Okrusch, M.; Matthes, S.

2014, XX, 728 S. 328 Abb., 33 Abb. in Farbe., Hardcover

ISBN: 978-3-642-34659-0