



Spektrum  
AKADEMISCHER VERLAG

Sachbuch

Florian Neukirchen

Edelsteine

Florian Neukirchen

# Edelsteine

Brillante Zeugen für die Erforschung  
der Erde



Springer Spektrum

Florian Neukirchen  
mail@riannek.de  
www.riannek.de

Springer Spektrum  
ISBN 978-3-8274-2921-6 ISBN 978-3-8274-2922-3 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-8274-2922-3

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

*Planung und Lektorat:* Merlet Behncke-Braunbeck, Dr. Meike Barth  
*Redaktion:* Projektmanagement & Verlagslösungen Dr. Rainer Aschemeier  
*Einbandabbildung:* Aquamarin aus Pakistan © Mineralientage München  
*Einbandentwurf:* wsp design Werbeagentur GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.springer-spektrum.de](http://www.springer-spektrum.de)

*„Damit unserem unternommenen Werke nichts fehle, sind noch die Edelsteine übrig: die gleichsam ins Kleine gebrachte Herrlichkeit der Natur, welche viele im Kleinen noch bewundernswürdiger finden.“*

Plinius der Ältere, *Naturalis Historia*, Buch XXXVII.

# Vorwort

Ein Buch über Edelsteine, ganz ohne bunte Bilder? Bestimmungsbücher und Bildbände gibt es bereits einige. Mir geht es um das, was in diesen Büchern fehlt, um das Wissen, das die moderne Forschung zusammengetragen hat und das weit über die übliche Aufzählung von Zusammensetzung, Härte und Fundorten hinausgeht. In diesem Sinn kann dieses Buch als eine Ergänzung zu den vorhandenen Mineralienführern gesehen werden.

Wie entstehen Edelsteine? In der Antike glaubte man noch, dass Kristalle entweder durch Wärme verdickte Feuchtigkeit seien oder aber eine besondere Form von Eis. Nach Plinius dem Älteren spricht für die zweite These, dass sie häufig in den kältesten Regionen der Gebirge gefunden werden. Unsere Theorien haben sich natürlich weit von Plinius entfernt. So vielfältig die Welt der Edelsteine ist, so unterschiedlich sind auch die Prozesse ihrer Entstehung. Bei aller Vielfalt werden uns bestimmte Zutaten und Prozesse mehrfach begegnen, was den erstaunlichen Edelsteinreichtum mancher Regionen erklärt.

Ein weiterer Aspekt dieses Buches ist das Wissen, das wir manchen Edelsteinen verdanken: Wie eine Kapsel bewahren sie einmalige Informationen über den unerreichbar tiefen Erdmantel, über die Frühzeit der Erde und sogar über die Tiefen des Weltalls in sich auf.

Um nicht allzu weit ausholen zu müssen, setze ich ein gewisses geologisches Allgemeinwissen voraus. Wer mit den Grund-

zügen der Plattentektonik nicht vertraut ist oder mit Begriffen wie Subduktionszonen, Erdmantel, Magma und Metamorphose noch nichts anfangen kann, der sollte zunächst nach einem Buch greifen, das in die Geologie einführt. In diesem Fall kann ich die Einführung in meinem Buch *Bewegte Bergwelt* empfehlen. Einen Eindruck hiervon können Sie mit einzelnen Probeseiten unter [www.springer.com/978-3-8274-2753-3](http://www.springer.com/978-3-8274-2753-3) gewinnen. Einige Begriffe finden sich im Glossar am Ende des Buches erläutert.

Im Text selbst sind nur ausgewählte Quellen angegeben, um den Lesefluss zu verbessern. Weiterführende Literatur ist, nach Kapiteln sortiert, im Anhang zu finden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf aktuellen Studien, nicht auf einer wissenschaftshistorischen Dokumentation.

Herzlich danke ich Dr. Sebastian Staude (Universität Tübingen), dessen Kommentare zur Verbesserung des Manuskripts beigetragen haben. Hilfreich waren auch Dr. Melanie Kaliwoda (Museum Reich der Kristalle München) und Wibke Kowalski (Universität Freiburg). Für die gute Zusammenarbeit danke ich Merlet Behncke-Braunbeck und Dr. Meike Barth (Spektrum Akademischer Verlag) und Dr. Rainer Aschemeier für das sorgfältige Lektorat.

Berlin, September 2011

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	VII
<b>1 Edelsteine und ihre Eigenschaften</b> .....	1
<b>2 Minen, Märkte, Marketing im Laufe der Geschichte</b> ...	29
<b>3 Diamanten: Boten aus der Tiefe der Erde</b> .....	63
<b>4 Mikrodiamanten-Trilogie: Subduktion, Schock und Sternenstaub</b> .....	93
<b>5 Riesenkristalle und ungewöhnliche Begegnungen: Smaragd, Topas und Turmalin</b> .....	111
<b>6 Die ältesten Zirkone: Zeugen aus dem Hades</b> .....	143
<b>7 Nicht ganz so heiß gekocht: Amethyst, Achat und Opal</b> .....	161
<b>8 Vielfältiger Granat, präzises Thermometer</b> .....	179
<b>9 Edles Aluminiumoxid: Rubin und Saphir</b> .....	189



<b>10 Edelsteine in der Technik</b> .....	199
<b>Glossar</b> .....	211
<b>Literatur</b> .....	235
<b>Sachverzeichnis</b> .....	255

# 1

## Edelsteine und ihre Eigenschaften

Seit jeher bezaubern Edelsteine die Menschen. Wir bewundern ihre Brillanz, ihre Farben und ihre strenge Form. Magische Kräfte werden ihnen zugesprochen, sie schmücken und dienen als Statussymbole. Wissenschaftler werfen einen etwas anderen Blick auf Diamant und Rubin, Smaragd und Zirkon. Sie untersuchen Variationen in der Zusammensetzung, mikroskopisch kleine Einschlüsse und andere Details, denken über die Entstehung der Edelsteine nach und stellen fest, dass die Kristalle uns erstaunliche Geschichten erzählen. Darunter sind Geschichten aus unerreichbarer Tiefe oder von einer fernen Vergangenheit. Um diese Ergebnisse dreht sich der Hauptteil dieses Buches. Ich möchte jedoch zwei einführende Kapitel voranstellen, die sich mit den Eigenschaften und Vorkommen von Edelsteinen beschäftigen und ihren Wert, den Handel und ihre Geschichte beleuchten.

Was sind eigentlich Edelsteine und was macht sie so wertvoll? Das Edle ist ja keine Eigenschaft, die den Steinen als solche anhaftet. Vielmehr sind es die spezifischen Eigenschaften ganz unterschiedlicher Minerale, die diese für Menschen begehrenswert machen. Somit ist das Wort keine wissenschaftliche Kategorie, sondern ein Schlagwort der Schmucksteinindustrie. Früher galten nur eine Handvoll Minerale als „richtige“ Edelsteine, wobei die Abgrenzung zum Rest relativ willkürlich war. Im weiten Sinn bezeichnet der Begriff alle Minerale, die als Schmuckstein

Verwendung finden. Sie sollten schön sein, nicht leicht zerkratzen und am besten auch noch selten sein. Wenn sie jedoch zu selten sind, schaffen sie es kaum, sich einen Namen zu machen und werden nur von einigen Sammlern gekauft. Die Bekanntheit spielt also auch eine Rolle. Einige Edelsteine haben zudem besondere optische Eigenschaften, die sie zum Beispiel funkeln lassen oder für die Technik interessant machen.

Früher hat man weniger wertvolle Edelsteine als Halbedelsteine bezeichnet. „Halbedel“ ist ein ziemlich unglücklicher Begriff, der nichts Bestimmtes aussagt, aber die durchaus schönen Minerale in den Augen der Käufer herabsetzt. Zudem gab es keine klare Definition, die „halbedel“ von „edel“ trennt. Dieser abwertende Begriff wird daher heute nicht mehr benutzt. Ähnlich schwierig ist das schwammige Wort „Schmuckstein“, mit dem oft ebenfalls weniger wertvolle Steine gemeint sind: Ich verwende es als Synonym für Edelsteine. Das Wort „Juwel“ wird manchmal für geschliffene Edelsteine benutzt; üblicherweise bezeichnet es ein Schmuckstück, in dem Edelsteine in Edelmetall gefasst sind.

Der Wert von Edelsteinen lässt sich nicht so einfach verfolgen wie Kursschwankungen an einer Börse. Wer mit Edelmetallen wie Gold, Silber oder Platin handelt, kann leicht den exakten Wert nachschlagen, den eine Unze des Metalls gerade hat. Bei Edelsteinen ist das nicht möglich, weil sich neben dem Gewicht noch weitere Faktoren auf den Wert auswirken. Es ist sogar unmöglich zu sagen, ob im Allgemeinen etwa ein Diamant, ein Rubin oder ein Smaragd wertvoller ist: Es kommt auf die Qualität des Einzelstücks an. Es gibt unzählige Institute, die nur damit beschäftigt sind, die Qualität von Edelsteinen und damit ihren Wert einzuschätzen. Diese Einschätzung ist durchaus subjektiv und kann bei mehrfachen Versuchen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Entsprechend ist das Zertifikat, ein Stück Papier, das die ermittelte Qualitätsklasse angibt, für den Wert fast so wichtig wie der Edelstein selbst. Übrigens wird man selbst mit einem Zertifikat selten einen Edelstein zum selben Preis verkaufen kön-

nen, zu dem man ihn kurz zuvor gekauft hat: Für Juweliere ist „secondhand“ nur interessant, wenn es sich um außergewöhnlich hochwertige Stücke handelt.

Die wichtigsten Faktoren, die sich auf den Wert eines Edelsteins auswirken, sind die „vier C“, wie es im Englischen heißt: *color*, *clarity*, *cut* und *carat*; also Farbe, Reinheit, Schliff und Gewicht. Schauen wir uns diese vier Punkte einmal genauer an.

Bei farbigen Edelsteinen sind Farbton, Helligkeit und Farbsättigung von erster Bedeutung. Je schöner die Farbe, desto wertvoller ist der Edelstein. Eine Farbe, die niemand tragen will, wird sich hingegen kaum verkaufen. Schönheit ist natürlich etwas sehr Subjektives und tatsächlich wirkt sich die jeweilige Mode stark auf den Preis aus. Falls eine beliebte Farbe auch noch selten ist, kann sich der betreffende Edelstein zu einem regelrechten Star entwickeln. Ein Beispiel ist der neonblaue Paraíba-Turmalin, der vor 20 Jahren auf den Markt kam und offensichtlich genau den modernen Zeitgeist traf – er ist so beliebt und selten, dass es selbst für Händler schwierig ist, einen am Markt zu bekommen. Ein anderes Beispiel ist Amethyst, der heute relativ günstig ist: In Zeiten, in denen Violett beliebter war als heute, zählte er noch zu den teuersten Edelsteinen.

Da sich schon kleine Variationen stark auf den Preis auswirken, wird für die Beschreibung der Farbe ein differenziertes Vokabular verwendet. Die beste Farbe, die ein Rubin haben kann, wird etwas befremdlich als „Taubenblutrot“ bezeichnet, womit ein Rot mit leichtem Blaustich gemeint ist. Beim Saphir ist Kornblumenblau besonders gefragt. Andere Edelsteine haben der idealen Farbe gleich ihren Namen gegeben: Aquamarinblau und Smaragdgrün.

Bei Diamanten sind vollkommen farblose Kristalle am gefragtesten. Es gibt jedoch auch intensiv gefärbte gelbe, braune, grüne, rote, blaue und pinke Diamanten. Mehrere berühmte Diamanten sind farbig: etwa der grüne *Dresdner* und der blaue *Hope*. Braun ist die häufigste und am wenigsten begehrte Farbe. Um den Markt

anzukurbeln, werden braune Diamanten als „cognacfarben“ bezeichnet. Gelb kommt ebenfalls relativ häufig vor. Die anderen Farben sind sehr selten und erzielen hohe Preise, die den Wert farbloser Diamanten um ein Vielfaches übersteigen können. Im Englischen heißen sie *fancy diamonds*.

Viele Minerale können sehr unterschiedlich gefärbt sein; die Farbe ist daher kaum als Bestimmungsmerkmal eines Minerals geeignet. Die unterschiedlich gefärbten Varietäten tragen oft einen anderen Namen, obwohl sich die Zusammensetzung und das Kristallgitter nicht unterscheiden. Rubin und Saphir sind Farbvarietäten des Minerals Korund, beide haben die Zusammensetzung  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Smaragd und Aquamarin sind Farbvarietäten des Minerals Beryll, das die Zusammensetzung  $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$  hat. Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) wird je nach Farbe als Bergkristall, Rauchquarz, Morion, Amethyst, Prasiolith, Citrin, Rosenquarz oder Aventurin bezeichnet und diese Liste kann mit den mikrokristallinen Quarzvarietäten fortgesetzt werden: Chalcedon, Achat, Karneol, Jaspis, Onyx und Chrysopras.

Diese unterschiedlichen Namen für Farbvarietäten sind natürlich viel älter als die moderne Wissenschaft. Sie stammen aus einer Zeit, in der die Zusammensetzung der Minerale noch nicht bekannt war und die unmittelbar sichtbaren Eigenschaften als Kriterium für die Klassifizierung dienen mussten. Von allen Eigenschaften sticht die Farbe am meisten ins Auge. An zweiter Stelle dürfte die Härte gestanden haben, also der Widerstand, den die Steine dem Schleifen entgegensetzen. Daraus ergibt sich, dass man antike und mittelalterliche Schriften nicht ganz beim Wort nehmen darf, wenn sie von Smaragd, Saphir, Karfunkel oder Topas sprechen. Gemeint war ein grüner, blauer, roter beziehungsweise goldgelber Edelstein, der jedoch nicht unbedingt dem heutigen Sinn des Wortes entsprechen muss. Der Karfunkel (lateinisch *Carbunculus*) als Bezeichnung für rote Edelsteine ist weitgehend aus dem Sprachgebrauch verschwunden, wir kennen das Wort am ehesten noch aus Märchen.

Es gibt eine ganze Reihe von Ursachen der Färbung. Manche Minerale haben eine Eigenfarbe, die kaum variieren kann. Bei diesen wird die Färbung durch eines ihrer Hauptelemente ausgelöst. Ein Beispiel ist Olivin, der unter dem Namen Peridot als Edelstein verkauft wird. Olivin ist eines von vier Mineralen, aus denen das Gestein des Erdmantels, der Peridotit, aufgebaut ist. Er macht also einen guten Teil der gesamten Erde aus. Zum Glück gelangen manchmal Stücke aus dem Erdmantel an die Oberfläche: Bei der Kollision zweier Kontinente können riesige Späne des Mantels in das Gebirge eingebaut werden. An manchen Vulkanen sind Laven mit kleineren Mantelfragmenten zu finden. Olivin ist zudem das erste Mineral, das bei der Kristallisation von Basaltmagma gebildet wird.

Die grüne Farbe verdankt Olivin dem Eisengehalt. Seine Zusammensetzung kann als  $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_2\text{SiO}_4$  angegeben werden, wobei das Komma zwischen Magnesium und Eisen bedeutet, dass es sich um eine Mischungsreihe handelt: Magnesium-Ionen und zweiwertiges Eisen haben einen sehr ähnlichen Radius und der entsprechende Platz im Kristallgitter kann nach Belieben mit beiden aufgefüllt werden. Es gibt also ein Magnesium-Endglied und ein Eisen-Endglied, zwischen denen die Zusammensetzungen variieren. Das reine Magnesium-Endglied kann in Marmor vorkommen und ist farblos. Im intensiv grünen Olivin des Erdmantels kommt auf neun Magnesium-Ionen ein Eisen-Ion. Aus einem Magma kristallisierter Olivin ist oft etwas eisenreicher und daher gelblich.

In der Regel geht die Farbe von Mineralen nicht auf ein Hauptelement zurück, sondern auf Spurenelemente, die quasi als Verunreinigung in winzigen Mengen in das Kristallgitter eingebaut sind und eine Fremdfärbung hervorrufen. Diese Spurenelemente ersetzen entweder eines der Hauptelemente auf einem Gitterplatz oder sie befinden sich als Gitterdefekte zwischen den normalen Gitterplätzen. Prinzipiell ist der Einbau von Ionen unterschiedlicher Wertigkeit so gekoppelt, dass elektrische

Neutralität erhalten bleibt. In einigen Mineralen geht die Farbe auf ein einziges Metall-Ion zurück, auf  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{V}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  oder andere. Die äußeren Elektronen dieser Ionen haben alle dieselbe Energie, sie befinden sich in 3d-Orbitalen. Durch den Einbau in ein Kristallgitter geht die Symmetrie der Orbitale verloren, die Elektronen werden auf unterschiedliche Energieniveaus verteilt, die von den benachbarten Anionen abhängig sind. Das sichtbare Licht hat die benötigte Energie, um diese Elektronen auf ein anderes Energieniveau zu heben. Die Wellenlänge, die der benötigten Energie entspricht, wird dabei absorbiert. Unsere Augen nehmen ein Licht, dem bestimmte Wellenlängen fehlen, als farbig wahr. Die ausgebildeten Energieniveaus sind von Kristallgitter zu Kristallgitter unterschiedlich. Daher führt jedes der Ionen in unterschiedlichen Mineralen auch zu unterschiedlichen Farben. Ein Beryll wird durch  $\text{Cr}^{3+}$  grün gefärbt (Smaragd), ein Korund hingegen rot (Rubin).

Ein Sonderling ist Alexandrit, die chromhaltige Varietät des Chrysoberylls. Wie ein Chamäleon wechselt er unter verschiedenen Lichtquellen seine Farbe: Bei Sonnenlicht ist er grün, beim Licht einer Kerze oder einer Glühbirne rot. Weniger ausgeprägt wird der Alexandrit-Effekt auch in manchen Granaten und selten bei Korund beobachtet. Die wichtigste Rolle spielt hierbei die sogenannte Farbtemperatur des Lichtes. Das Licht einer Glühbirne ist reicher im roten und gelben Bereich des Spektrums und wirkt wärmer. Sonnenlicht ist reicher im blauen Bereich und wirkt kühler. Alle Objekte zeigen bei unterschiedlicher Beleuchtung eine kleine Farbverschiebung, die man jedoch kaum wahrnimmt: Der Unterschied wird teilweise von unserem Gehirn ausgeglichen. Fotografen kennen den Unterschied jedoch, sie müssen einen entsprechenden Weißabgleich vornehmen. Das besondere am Alexandrit ist, dass die absorbierten Wellenlängen so liegen, dass sie sich unterschiedlich auf warmes und auf kühles Licht auswirken. Er hat sozusagen im Spektrum des sichtbaren Lichts zwei Fenster: das eine im grünen, das andere im roten Bereich, und die

jeweiligen Lichtquellen leuchten fast nur durch eines der beiden Fenster hindurch.

Nicht immer wird die Färbung durch ein einziges Metall-Ion verursacht. Oft sind zwei benachbarte Metall-Ionen in unterschiedlichen Oxidationsstufen beteiligt, zum Beispiel die Kombination von  $\text{Fe}^{2+}$  und  $\text{Fe}^{3+}$  oder  $\text{Ti}^{3+}$  und  $\text{Ti}^{4+}$ . Das Licht kann dabei ein Elektron von einem zum anderen Ion bewegen. Dabei wird rotes Licht absorbiert, was eine blaue oder grüne Färbung bewirkt. Derselbe Effekt funktioniert sogar zwischen benachbarten Titan- und Eisen-Ionen. Die blaue Färbung von Saphir wird zum Beispiel durch den Ladungstransfer zwischen  $\text{Fe}^{2+}$  und  $\text{Fe}^{3+}$  und zwischen Eisen- und Titan-Ionen ausgelöst.

Die Kombination der benachbarten, aber unterschiedlichen Metall-Ionen wirkt als Farbzentrum. Oft gibt es in einem einzigen Kristall unterschiedliche Farbzentren, deren Mischung als Farbe wahrgenommen wird.

Da in Diamanten keine Metall-Ionen eingebaut werden können, muss bei farbigen Diamanten etwas anderes verantwortlich sein. Das einzige Element, das gut in das Diamantgitter passt und fast immer zwischen 0,001 % und 0,3 % der Kohlenstoffatome ersetzt, ist Stickstoff. Im Periodensystem steht Stickstoff rechts neben Kohlenstoff und hat entsprechend ein zusätzliches Valenzelektron. Allerdings hat Stickstoff die Eigenheit, dass in der Regel nur drei Elektronen eine kovalente Bindung eingehen, während zwei als einsames Paar zusammenbleiben, ohne eine Bindung einzugehen. Ein Stickstoffatom kann sich daher nur mit drei Kohlenstoffatomen verbinden und der Einbau erfolgt zwangsläufig in Kombination mit einer benachbarten Leerstelle, also einem unbesetzten Gitterplatz. Bei den Kohlenstoffatomen, die diese Leerstelle umgeben, gibt es ungepaarte Elektronen, die nicht an einer Bindung beteiligt sind und eine Färbung auslösen können. Eine Rolle spielt auch, ob der Stickstoff im Kristall chaotisch verteilt oder in Aggregaten angeordnet ist: An einer Leerstelle, die von mehreren Stickstoffatomen umgeben ist, sind



weniger ungepaarte Elektronen vorhanden. In frisch kristallisiertem Diamant ist der Stickstoff chaotisch verteilt, was eine schwache pinke Färbung hervorrufen kann. Die Aggregate werden häufiger, je länger der Kristall einer relativ hohen Temperatur ausgesetzt ist. Am häufigsten ist ein Aggregat von drei Stickstoffatomen, das eine Leerstelle umgibt. Dieses Farbzentrum kann eine starke gelbe Färbung hervorrufen. Der Aggregatzustand kann verwendet werden, um die Zeit abzuschätzen, den ein Diamant bei hoher Temperatur im Erdmantel verbracht hat.

Ein weiteres Element, das in Diamant vorhanden sein kann, steht im Periodensystem links vom Kohlenstoff: Bor. Manche Diamanten enthalten winzige Spuren von Bor, was eine blaue Färbung verursacht.

Eine braune Färbung kann bei Diamant durch Gitterdefekte verursacht werden, die bei mechanischer Beanspruchung durch Deformation des Kristalls entstanden sind.

Bei manchen Mineralen wird eine Färbung hingegen durch ionisierende Strahlung hervorgerufen, die durch den Zerfall von radioaktiven Elementen entsteht. Diese Strahlung kann Defekte im Kristallgitter verursachen. Farbgebende Gitterdefekte gehen oft auf bereits vorhandene Spurenelemente zurück. In Quarz (Lehmann & Bambauer 1973) sind Spuren von  $Al^{3+}$  die häufigste Verunreinigung (unter 0,1 %), die jedoch zunächst keine Färbung verursacht. Durch Bestrahlung kann an den Aluminiumionen ein Elektron abgespalten werden. Dieser Elektronendefekt wirkt als Farbzentrum, das in diesem Fall zu einer braunen Färbung führt: Es entsteht Rauchquarz. Je mehr Gitterdefekte vorhanden sind, desto dunkler wird er.

Manchmal enthält Quarz stattdessen Spuren von  $Fe^{3+}$ . Das beschränkt sich prinzipiell auf Kristalle, die in relativ oberflächennahen Bereichen der Erdkruste gewachsen sind, wo das Eisen entsprechend oxidiert war, denn nur dreiwertiges Eisen passt halbwegs in das Kristallgitter. Es kann sowohl als Ersatz für Sili-

zium (Tetraeder-Position), als auch im leeren Raum zwischen den Gitterplätzen eingebaut werden. Zwei benachbarte  $\text{Fe}^{3+}$ -Ionen, von denen das eine auf einem Tetraeder-Gitterplatz sitzt und das andere auf einem Zwischengitterplatz, können beim Bestrahlen mit Gamma- oder Röntgenstrahlen reagieren: Das erste wird zu einem  $\text{Fe}^{4+}$  oxidiert, das zweite zu einem  $\text{Fe}^{2+}$  reduziert. Durch das ungewöhnliche  $\text{Fe}^{4+}$  wird eine violette Färbung hervorgerufen: Wir haben einen Amethyst. Übrigens sollte man Amethyst möglichst im Dunklen aufbewahren, da das Sonnenlicht die Reaktion rückgängig macht und den Amethyst langsam ausbleicht.

Bei Diamant kann eine durch Strahlung erzeugte Fehlstelle eine blaue oder grüne Farbe hervorrufen. Ein Turmalin kann durch Strahlung pink werden, Topas und Zirkon entweder blau oder rotbraun. Die fortschreitende Einwirkung von Strahlung kann dazu führen, dass das Kristallgitter fast völlig zerstört ist. Dieser Zustand wird als metamikt bezeichnet. Bei Zirkon passiert das häufig, weil das Mineral etwas Uran und Thorium enthält und sich daher selbst bestrahlt. Ein Zirkon mit zerstörtem Kristallgitter ist trüb und hat eine rötlich-braune Farbe.

Die entsprechende Färbung kann durch Bestrahlen auch künstlich hervorgerufen oder verstärkt werden, was gerade bei weniger hochwertigen Stücken regelmäßig gemacht wird. Besonders intensiv gefärbter Amethyst oder schwarzbrauner Rauchquarz hat nur selten seine Farbe auf natürliche Weise erhalten. Oft handelt es sich um Stücke, die ohne Behandlung so wertlos waren, dass sie auf die Halde gewandert wären. Auch bei Beryll, Katzenaugen-Chrysoberyll, Diamant, Granat, Kunzit, Perlmutter und Zuchtperlen, Rubin, Saphir, Topas, Turmalin und Zirkon wird diese Methode benutzt, um die Farbe zu „verbessern“. Künstlich bestrahlte Steine müssen im Handel allerdings als solche gekennzeichnet werden – zumindest wenn der Händler etwas auf sich hält und die Richtlinie der CIBJO, der internationalen Vereinigung der Juweliere, umsetzt.

Es gibt noch weitere Methoden, mit denen Edelsteine behandelt werden. Das „Brennen“ steht an erster Stelle, bei manchen Edelsteinen ist es sogar Standard. Dabei werden die Steine einer großen Hitze ausgesetzt, wobei die Temperatur und Dauer der Behandlung bei verschiedenen Mineralen unterschiedlich ist. Das Brennen führt zu Veränderungen im Kristallgitter, so können beispielsweise Gitterfehler verheilen und Spurenelemente umsortiert werden.

Aquamarin wird fast immer gebrannt; das intensive Aquamarinblau, das für diesen Edelstein so typisch ist, wird oft erst dadurch hervorgerufen. Grauer Saphir kann in intensiv blauen verwandelt werden. Citrin, die gelbe Varietät von Quarz, ist in der Natur sehr selten, und im Handel findet man überwiegend gelb gebrannten Amethyst: Das  $\text{Fe}^{3+}$  wird aus dem Kristallgitter ausgeschieden und sammelt sich als winzige  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Einschlüsse an. Blauer Zirkon ist sehr gefragt und in der Natur sehr selten, die meisten wurden durch Brennen von relativ wertlosem rötlich-braunen Zirkon erzeugt. Bernstein, der meistens durch kleine Luftsinschlüsse trüb und wolkig ist, wird durch Brennen transparent, weil die Luft entweichen kann. Die Liste lässt sich beliebig fortsetzen. Diese Methode ist sehr alt, in Indien wurde sie schon im Altertum angewandt. Gebrannte Minerale müssen nicht als behandelt gekennzeichnet werden.

Manchmal werden Edelsteine mit Öl, Wachs oder Kunstharz imprägniert, um den Glanz zu erhöhen, die Farbe zu verstärken und um Risse zu verstecken. Diese Methode wurde schon im antiken Rom meisterlich beherrscht. Die behandelten Steine müssen auch heute nicht gekennzeichnet werden.

Schließlich können manche Steine auch gefärbt werden. Das ist bei leicht porösen Steinen wie Achat sehr effektiv und die Kunst des Färbens wurde schon von den Römern entwickelt. In Idar-Oberstein wurde diese Methode im 19. Jahrhundert perfektioniert. Die knallig-bunten Achatscheiben, die auf manchen Märkten zu sehen sind, sind alles andere als natürlich. Meistens

stammen sie aus Brasilien, wo große Mengen von langweilig grauen bis schwach bläulichen Achaten gefunden werden. In Scheiben geschnitten werden sie in Plastikcontainer gelegt, die mit einer Lösung aus Alkohol und Farbstoff gefüllt sind. Traditionell werden mineralische Farbpigmente benutzt, es kommen aber auch immer häufiger organische Farben zum Einsatz. Anschließend werden sie unter Wasser abgewaschen. In Brasilien landet das Abwasser oft ungeklärt in Bächen, die daher ebenso bunt gefärbt werden. Diese Problematik wurde bereits zu einem eigenen Forschungsthema (Pizzolato et al. 2002): Abgesehen von den Auswirkungen auf das Ökosystem sind manche Farben kanzerogen oder lösen Allergien aus. Man sucht daher nach Reaktionen, mit denen die Farbstoffe wieder aus den Bächen entfernt werden können.

Doch kehren wir zur Natur zurück. Auch die Interferenz von Licht, das an dünnen Schichten gestreut wird, ruft Farben hervor. In diesem Fall kommt es zu einem farbigen Schillern. Die dünnen Schichten können Zwillingslamellen, Entmischungen, Risse, Einschlüsse oder Bereiche mit unterschiedlicher Zusammensetzung sein. Je nach Art des Schillerns spricht man von Adularisieren (beim Mondstein, einem Alkalifeldspat), Labradorisieren (bei Labradorit, einem Plagioklas), Opalisieren (Opal) oder Irisieren (Feueropal, Perlmutter, bei Perlen spricht man von „Orient“).

Als letzte Möglichkeit der Farbgebung sind eingeschlossene Minerale zu nennen, die so klein und fein verteilt sein können, dass sie mit bloßem Auge nicht zu sehen sind. Rosenquarz zum Beispiel verdankt seine Farbe mikroskopisch kleinen Fasern eines Bor-Minerals (Goreva et al. 2001, Ma et al. 2002), das eine ähnliche Struktur und Zusammensetzung wie Dumortierit hat (selbst für Mineralogen ist es keine Schande, diesen Namen noch nie gehört zu haben). Aventurin, ein grünlich schillernder Quarz, enthält feine Schuppen eines chromhaltigen Glimmers, dem Fuchsit.

Damit sind wir bereits beim nächsten „C“, nämlich bei der Reinheit (*clarity*). Eine vollkommene Reinheit gibt es höchstens bei synthetischen Edelsteinen. Alle natürlichen Minerale enthalten winzige Einschlüsse anderer Minerale und Flüssigkeiten. Für Forscher sind diese ein Glücksfall, da sie Hinweise über die Entstehungsbedingungen geben. Bei einem Schmuckstein sollten die Einschlüsse aber nach Möglichkeit nicht mit bloßem Auge sichtbar sein. Die höchste Qualitätsstufe ist „lupenrein“: Selbst unter einer Lupe mit 10-facher Vergrößerung sind keine Einschlüsse erkennbar. Die Qualitätsstufen VVS (*very very small inclusions*), VS (*very small inclusions*) und SI (*small inclusions*) sind noch immer „augenrein“. Wesentlich weniger wertvoll sind Edelsteine, deren Einschlüsse schon mit bloßem Auge zu sehen sind. Manchmal kann ein Edelstein so geschickt geschliffen und gefasst werden, dass die Einschlüsse versteckt werden und nicht mehr stören.

Smaragd ist ein Sonderfall, da natürlicher Smaragd fast nie ganz frei von sichtbaren Einschlüssen ist. Sie werden als *jardin* (französisch für Garten) bezeichnet. Schön angeordnet können sie den Wert des Smaragds sogar erhöhen.

Es gibt jedoch auch bei anderen Mineralen erwünschte Einschlüsse, die besondere optische Effekte hervorrufen und damit den Wert erhöhen. Der leuchtende Stern eines Stern-Rubins entsteht durch eingeschlossene Rutilnadeln, die der sechsfachen Symmetrie des Rubins entsprechend angeordnet sind. Bei einem Katzenaugen-Chrysoberyll lösen eingeschlossene nadelförmige Minerale einen Effekt aus, der an das schlitzzartige Auge einer Katze erinnert. Weniger ausgeprägt kann dieser Effekt manchmal auch bei Quarz beobachtet werden.

Das dritte „C“ steht für *carat*. Das Gewicht eines Edelsteins wird fast immer in Karat angegeben, eine Einheit, die inzwischen als 0,2 g definiert ist. Der Name geht auf „Carob“ zurück, was die Bezeichnung für die Samen des Johannisbrotbaumes ist. Diese haben ein nahezu einheitliches Gewicht, und sie wurden früher auf den Basaren im Orient als Gewichte benutzt. Dieses

Karat ist nicht mit dem Karat zu verwechseln, das als Maß für die Reinheit von Gold benutzt wird.

Da sehr große Edelsteine selten sind, nimmt der Wert nicht linear mit dem Gewicht zu, sondern eher exponentiell. Nur selten wurden Diamanten gefunden, die schwerer als 100 Karat waren. In einer Mine in Südafrika wurde 1905 der größte jemals gefundene Diamant ausgegraben: Der *Cullinan* oder *Great Star of Africa* wog 3106 Karat. Aufgrund seiner Einschlüsse teilte man ihn in 105 Stücke. Das größte Stück wiegt geschliffen noch immer 530 Karat; es ziert das Zepter des britischen Königshauses und ist größer als eine Pflaume. Der zweitgrößte Diamant, *Excelsior*, wog mit 995 Karat weniger als ein Drittel des *Cullinan*. In Dresden befindet sich im Grünen Gewölbe der größte grüne Diamant, der es auf 41 Karat bringt. Kaum mehr wiegt *Hope*, der größte blaue Diamant.

Die größten Rubine und Spinelle liegen in einer ähnlichen Gewichtsklasse. Dagegen kann Beryll richtige Schwergewichte bilden, die sich niemand um den Hals hängen würde: Der größte Aquamarin wog 110 kg, der größte Smaragd 80 kg.

Das vierte „C“ steht für *cut* und es geht um Qualität und Form des Schlifffes. Dieser soll die schönsten Eigenschaften des Edelsteins hervorheben. Die durch Schleifen angebrachten Flächen heißen Facetten. Der Brillantschliff ist bei Diamanten deshalb so beliebt, weil er dessen Feuer und Brillanz am besten entfaltet. Mit Feuer ist die Dispersion, also die Aufspaltung des Lichts in seine Spektralfarben gemeint, die ein farbiges Glitzern verursacht. Die Brillanz bezeichnet die Menge des Lichts, die im Inneren reflektiert und zurückgeworfen wird. Die historischen Schlifffes hatten nur eine geringe Brillanz, ein guter Teil des Lichts konnte wie durch ein Fenster durch den Stein hindurchscheinen. Daher sind Diamanten auf alten Gemälden sehr dunkel gemalt, sie wirkten tatsächlich dunkel und etwas langweilig.

Es gibt unzählige Variationen des modernen Brillantschliffs. Manche haben optimale optische Eigenschaften, andere sind ein Kompromiss zwischen Optik und dem erzielbaren Gewicht. Daneben gibt es noch die *fancy cuts*, zum Beispiel herzförmig oder tropfenförmig geschliffene Diamanten, die sich weniger durch Brillanz und Feuer, als durch die originelle Form hervorheben und eine Nische auf dem Edelsteinmarkt belegen. Der Schleifer muss also entscheiden, mit welcher Form er den besten Gewinn erzielen kann.

Bei farbigen Edelsteinen steht die Farbe im Mittelpunkt, und der Schliff sollte sie möglichst gut zur Geltung bringen. Das Feuer spielt dabei keine Rolle, ohnehin haben viele farbige Edelsteine nur eine geringe Dispersion. Wichtiger ist die Brillanz, der Stein sollte lebendig wirken und die Farbe zum Leuchten gebracht werden. Die Farbe sollte zudem möglichst gleichmäßig sein.

Farbedelsteine werden in der Regel so geschliffen, dass kleine längliche Facetten um eine große flache Tafel angeordnet sind. Der Grundriss kann oval, rechteckig, quadratisch oder achteckig sein, dabei wird ein Schleifer die Form des Rohedelsteins berücksichtigen, um möglichst wenig Gewicht zu verlieren. Der typische Smaragdschliff hat zum Beispiel eine große flache Tafel, achteckig und länglich, die von schmalen, immer steiler abfallenden Facetten umgeben ist.

Manchmal ist die Tafel gewölbt; ein Kompromiss, der eine geringere Brillanz, aber ein etwas höheres Gewicht bewirkt. Die Dicke des geschliffenen Steins sollte das richtige Verhältnis zur Fläche haben. Sie wirkt sich natürlich ebenfalls auf das Gewicht aus, aber auch auf Brillanz und Farbintensität.

Neben der Form spielt die Qualität des Schliffes und der Politur eine große Rolle. Der schönste Edelstein kann durch einen schlechten Schliff ruiniert werden. Die Facetten sollten exakt angeordnet und von scharfen Kanten begrenzt sein, und es dürfen keine Kratzer oder Flecken zu sehen sein.

Ein Facettenschliff macht bei opaken (also lichtundurchlässigen) Edelsteinen keinen Sinn. Bei bestimmten optischen Effekten, wie beim Sternrubin, beim Katzenauge und so weiter, sind Facetten ebenso ungeeignet. Bei diesen wird der Cabochon-Schliff bevorzugt, eine runde oder ovale, nach oben gewölbte Schliffform. Bis zur Entwicklung des Facettenschliffs im späten Mittelalter spielte der Cabochon-Schliff auch bei transparenten Edelsteinen eine Rolle.

Die Bedeutung der vier „C“ liegt darin, dass es auch um Unterschiede innerhalb einer „Sorte“ von Edelsteinen geht. Man kann also Rubine mit Rubinen, Diamanten mit Diamanten vergleichen. Edelsteine haben noch weitere Eigenschaften, die jedem Korund oder jedem Diamant gemein sind, sich aber zwischen beiden unterscheiden. Diese sind zum Teil hervorragend geeignet, um einen Edelstein zu bestimmen. Insbesondere die optischen Eigenschaften wirken sich prägend auf die Wirkung eines Edelsteins aus. Die Dispersion, also die Aufspaltung des Lichts in seine Spektralfarben, habe ich bereits genannt. Sie bewirkt die farbigen Lichtblitze, die als Feuer bezeichnet werden. Das Feuer ist bei Diamant und Zirkon stark ausgeprägt.

Ein anderes Beispiel ist der Glanz oder Lüster, der die Reflexion von Licht an der Oberfläche beschreibt. Man unterscheidet Diamantglanz (adamantin), Metallglanz, Glas-, Fett-, Wachs-, Perlmutter- und Seidenglanz.

Der Brechungsindex ist ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal, da er leicht gemessen werden kann. Er wirkt sich zudem unmittelbar auf die Brillanz aus. Ein weiteres Kriterium ist die Doppelbrechung. In fast allen Kristallen (das kubische Kristallsystem ausgenommen) wird ein Lichtstrahl in zwei Strahlen aufgeteilt, die unterschiedlich polarisiert sind. Die Stärke der Doppelbrechung ist charakteristisch für jedes Mineral. Die Doppelbrechung kann auch zu einem Effekt führen, der Pleochroismus genannt wird. Dabei ändert sich die Farbe bei wechselnder Blickrichtung. Das kann ein schönes Farbenspiel bewirken, in an-



deren Fällen passen die verschiedenen Farben nicht zusammen und der Schleifer muss versuchen, den Effekt zu minimieren.

Eines der wichtigsten Geräte zur Bestimmung von Edelsteinen ist das Spektroskop, mit dem die charakteristischen Absorptionsspektren gemessen werden. Wir wissen bereits, dass die Farbe durch die Absorption bestimmter Wellenlängen aus dem Licht hervorgerufen wird. Die Farbe, die wir wahrnehmen, ist jedoch kaum zur Bestimmung geeignet. Umso effektiver sind die genauen Positionen der „fehlenden“ Wellenlängen.

In vielen Museen werden Minerale gezeigt, die mit UV-Strahlen zum Leuchten angeregt werden. Diese Fluoreszenz ist ein Spezialfall von einem Effekt, der Lumineszenz genannt wird. Diese Minerale wandeln die Strahlen in sichtbares Licht um. Für die Bestimmung ist dieser Effekt leider weniger geeignet.

Edelsteine sollten nicht nur schön anzusehen, sondern auch möglichst beständig sein. Die Härte von Edelsteinen macht sie unempfindlich und ermöglicht zugleich wichtige Anwendungen in der Technik.

Diamant ist die härteste Substanz, die wir kennen, und es ist allgemein bekannt, dass Diamant nur mit Diamant geschliffen werden kann. Dabei wird die Tatsache ausgenutzt, dass die Härte abhängig von der Flächenlage und von der Schleifrichtung ist. Es gibt also Richtungen und Flächen, die nicht oder nur sehr langsam geschliffen werden können, während andere etwas leichter zu bearbeiten sind. Beim Schleifen können nur diejenigen Körner des Diamantpulvers einen Diamanten ritzen, die zufällig richtig liegen und daher härter sind (mehr dazu in Kapitel 10).

Das härteste und teuerste Mineral hat noch weitere ungewöhnliche Eigenschaften, obwohl seine Zusammensetzung sehr gewöhnlich ist: Es besteht aus reinem Kohlenstoff, der nach Wasserstoff, Helium und Sauerstoff das vierthäufigste Element des Sonnensystems ist.

Diamant ist die Hochdruck-Modifikation des Kohlenstoffs. An der Erdoberfläche ist eine andere Modifikation stabil, und

zwar Grafit, der am anderen Ende der Härteskala liegt. Grafit ist eines der weichsten Minerale überhaupt. Während Diamant zum Schleifen und Bohren der härtesten Substanzen benutzt werden kann verwendet man Grafit als Schmiermittel. Dieser erstaunliche Unterschied geht auf das jeweilige Kristallgitter zurück, in dem die Kohlenstoffatome angeordnet sind.

Kohlenstoff besitzt sechs Elektronen. Zwei davon besetzen die innere 1s-Schale, die anderen verteilen sich auf unterschiedliche Energieniveaus der zweiten Schale. Diese äußeren Elektronen können so angeregt werden, dass sie vier energetisch gleichwertige Orbitale bilden: sogenannte  $sp^3$ -Hybrid-Orbitale. Diese umgeben den Atomkern wie vier Keulen, die so im Raum orientiert sind, dass sie den größtmöglichen Abstand voneinander haben. Die Endpunkte der vier Keulen entsprechen den Ecken eines Tetraeders. Nun ist jedes der vier Orbitale mit einem Orbital eines Nachbaratoms verbunden. Somit geht jedes Atom eine kovalente Bindung mit vier benachbarten Atomen ein, die es wie die Spitzen eines Tetraeders gleichmäßig umgeben. Diese kovalenten Bindungen zwischen zwei Atomen desselben Elements sind vollkommen symmetrisch: Es sind also ideale kovalente Bindungen, bei denen beide beteiligten Atome die beteiligten Valenzelektronen gleich stark anziehen. Diese in einem dreidimensionalen Gitter angeordneten Bindungen haben eine sehr hohe Bindungsenergie und können nur schwer aufgebrochen werden. Aus den starren Bindungen ergeben sich einige der besonderen Eigenschaften des Diamants: seine Härte, seine Inkompressibilität, seine Resistenz gegen chemische Reaktionen, seine außergewöhnliche Wärmeleitfähigkeit und seine Eigenschaft als elektrischer Isolator. Der hohen Symmetrie entsprechend gehört die Struktur dem kubischen Kristallsystem an: Die typische Kristallform ist der Oktaeder.

Im Grafit ist eines der Elektronen nicht an der Hybridisierung beteiligt: neben drei  $sp^2$ -Hybrid-Orbitalen, die wie ein Dreieck in einer Ebene liegen, verbleibt ein senkrecht dazu stehendes

p-Orbital. In diesem Fall geht jedes Kohlenstoffatom nur drei kovalente Bindungen zu benachbarten Atomen ein. Die Anordnung ergibt ein zweidimensionales Gitter mit sechseckigen Maschen. Es gibt auch Wechselwirkungen zwischen den p-Orbitalen, die zwischen den Schichten liegen. Deren Elektronen bewirken nur eine geringe Bindungsenergie, die einzelnen Schichten können entsprechend leicht gegeneinander bewegt werden. Diese Elektronen sind ähnlich wie die Valenzelektronen von Metallen relativ frei beweglich und machen Graphit zu einem guten elektrischen Leiter.

Diamant ist zwar die härteste Substanz, die wir kennen, er hat aber gleichzeitig eine vollkommene Spaltbarkeit. Schon ein leichter Schlag mit einem Juwelierhämmerchen reicht aus, um ihn zu spalten. Die Spaltflächen entsprechen den Oktaederflächen und daher ist es kaum verwunderlich, dass die früheste Bearbeitung von Diamanten darin bestand, unförmige Rohdiamanten zu Oktaedern zu spalten. Die Spaltbarkeit bewirkt leider auch, dass bei harten Stößen kleine Stücke absplintern können. Diamanten sind also nicht wirklich unzerstörbar.

Korund ist das zweithärteste Mineral und hat den Vorteil, dass er keine Spaltbarkeit hat. Seine absolute Härte beträgt nur ein hundertvierzigstel der Härte des Diamants, was allerdings noch immer beachtlich ist. Die meisten anderen Edelsteine haben eine Härte, die zwischen Korund und Quarz liegt.

Es gibt allerdings Ausnahmen, die alles andere als hart sind. Der tiefblaue Tansanit zählt zu den teuersten Edelsteinen, obwohl er weicher als ein Messer ist und entsprechend vorsichtig behandelt werden muss. Es handelt sich um eine Varietät von Zoisit, die nur an einem einzigen Ort der Welt gefunden wird, und zwar in der Nähe von Arusha in Tansania, im Schatten des Kilimandscharo. Zoisit ist ein häufiges und normalerweise unscheinbares Mineral. Dennoch löste der Stein nach der Entdeckung 1967 enthusiastische Reaktionen aus. Als er in New York von Tiffany vorgestellt wurde, feierte man ihn als den „Edelstein