

Rolf Heilmann

# Die Geheimnisse der Kristalle

Die Metamorphose  
vom Heilstein  
zum Computerchip

SACHBUCH



Springer

# Die Geheimnisse der Kristalle

Rolf Heilmann

# Die Geheimnisse der Kristalle

Die Metamorphose vom  
Heilstein zum Computerchip

 Springer

Rolf Heilmann  
Fakultät für angewandte Naturwis-  
senschaften und Mechatronik  
Hochschule München  
München, Deutschland

ISBN 978-3-662-69356-8      ISBN 978-3-662-69357-5 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-69357-5>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2024

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jede Person benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des/der jeweiligen Zeicheninhaber\*in sind zu beachten.

Der Verlag, die Autor\*innen und die Herausgeber\*innen gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autor\*innen oder die Herausgeber\*innen übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Covermotiv: © stock.adobe.com/大貴 石井/ID 564165307

Planung/Lektorat: Caroline Strunz  
Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.  
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberg Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Wenn Sie dieses Produkt entsorgen, geben Sie das Papier bitte zum Recycling.

*Meinem Freund Christoph Sramek gewidmet*

*Der Geist ist wie ein Kristall, der reflektiert,  
was sich in unserem Innern befindet.*  
*Dalai Lama*

# Inhaltsverzeichnis

<b>Haben Kristalle magische Kräfte?</b>	1
<b>Homer, Empedokles und Aristoteles: Kristalle zwischen Literatur und Philosophie</b>	7
<b>Pythagoras und Platon: Kristalle als Abbilder der Grundstrukturen unserer Welt?</b>	13
<b>Theophrastos und Plinius: Die ersten Bücher über Kristalle</b>	19
<b>Hildegard und Albertus: Heilkräfte und der „Stein der Weisen“</b>	23
<b>Agricola und die Schätze der Erde</b>	27
<b>De Boodt und Kepler: Vom Alltagswissen zur Wissenschaft</b>	33
<b>Kircher und Steno: Von der Vielfalt zum Gesetz</b>	41

<b>Hooke, das Mikroskop und der Blick auf die Details</b>	45
<b>Casciarolo, Bartholin, Huygens und das Licht</b>	49
<b>Kappeler und die Geburtsurkunde der Kristallographie</b>	55
<b>De L'Isle und eine erste Systematik</b>	61
<b>Werner, Häüy und Weiss auf der Suche nach mathematischen Beziehungen</b>	65
<b>Goethe, die romantische und die unromantische Wissenschaft</b>	75
<b>Hessel, Frankenheim und Bravais: Symmetrie und Realität</b>	83
<b>Becquerel, Kirchhoff und Bunsen: Das Licht und das Universum</b>	93
<b>Faraday, Kristalle, Elektrizität und Magnetismus</b>	101
<b>Ohm und Braun: Alles fließt – sogar in Kristallen</b>	107
<b>Schafhäütl, Verneuil, Czochralski und die Nachahmung der Natur</b>	113
<b>Von Laue und der Durchbruch: Ein jahrtausendealtes Rätsel wird gelöst</b>	123
<b>Planck, Einstein, Bohr und die Atome</b>	129
<b>Pohl und die erste Schule der Kristallphysik</b>	135
<b>Picasso, Heisenberg und Schrödinger: Die Abstrakte hat Methode</b>	143
<b>Bell, Halbleiter, die Industrie und das Militär</b>	155



<b>Ohl – der Mann, den niemand kannte</b>	163
<b>Shockley, Bardeen, Brattain und der Transistor</b>	167
<b>Physiker als Unternehmer: Die Gründung des Silicon Valley</b>	175
<b>Kilby, Noyce und Moore: Integrierte Schaltkreise</b>	181
<b>Strom aus Licht: Solarzellen</b>	191
<b>Licht aus Strom: LEDs und Laser</b>	197
<b>Boyle und Smith: Kristalle und die Bilderflut</b>	205
<b>Chatman und Lundblad: Synthetische Edelsteine</b>	211
<b>Shechtman und Kristalle, die es nicht geben durfte</b>	219
<b>Lessing, Opale und photonische Kristalle</b>	225
<b>Lehmann, Flüssigkristalle und die Wunderwelt der Bildschirme</b>	233
<b>Margaret Thatcher, Röntgen und Biokristalle</b>	239
<b>Nanokristalle und Quantenpunkte</b>	243
<b>Mit Tesafilm, Bakterien und KI zu neuen Kristallstrukturen</b>	249
<b>Literaturhinweise</b>	255
<b>Stichwortverzeichnis</b>	259

# Abbildungsverzeichnis

## **Haben Kristalle magische Kräfte?**

- Abb. 1 Kristalle als Symbole der Macht in der Krone der böhmischen Könige von 1347, der sogenannten Wenzelskrone. (Quelle: K. Pacovsky, Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0) . . . . . 2

## **Homer, Empedokles und Aristoteles: Kristalle zwischen Literatur und Philosophie**

- Abb. 1 Bergkristall. Seine Verwandtschaft mit Eis ist unverkennbar. (Quelle: Nubby, Pixabay) . . . . . 8

## **Pythagoras und Platon: Kristalle als Abbilder der Grundstrukturen unserer Welt?**

- Abb. 1 Die fünf platonischen Körper: Tetraeder, Hexaeder, Oktaeder, Ikosaeder und Dodekaeder . . . . . 15

**Hildegard und Albertus: Heilkräfte und der „Stein der Weisen“**

Abb. 1    Polierte Heilsteine nach Hildegard von Bingen. (Quelle: rawpixl, CC 0) ..... 24

**Agricola und die Schätze der Erde**

Abb. 1    Der Amethyst ist die am meisten geschätzte Edelsteinart des Quarzes. Die Struktur ist die gleiche wie beim Bergkristall, die violette Farbe erhält er durch geringe Beimengungen von Eisen. (Quelle: Smithsonian Museum of Natural History, CC 0) ..... 29

**De Boodt und Kepler: Vom Alltagswissen zur Wissenschaft**

Abb. 1    Ein natürlicher Smaragd-Zwillingskristall. Smaragd ist die wertvollste Varietät des Minerals Beryll und wird oft als Edelstein geschliffen. Seine grüne Farbe erhält er durch geringe Verunreinigungen von Chrom. (Quelle: Smithsonian Museum of Natural History, CC 0) ..... 35

Abb. 2    Das Wachsen einer hexagonal dichtesten Kugelpackung, um sechseckige Kristallstrukturen zu erklären. .... 37

**Casciarolo, Bartholin, Huygens und das Licht**

Abb. 1    Doppelbrechung und Lumineszenz – ein blauer Laserstrahl spaltet sich in einem Calcit-Kristall auf und erzeugt dabei noch gelbes Licht (Quelle: Jan Pavelka, Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0) ..... 52

**Kappeler und die Geburtsurkunde der****Kristallographie** .....

- Abb. 1 Pyrit aus felsigem Untergrund. (Quelle: JJHarrison, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0). . . . . 57

**De L'Isle und eine erste Systematik**

- Abb. 1 Anlegegoniometer für kristallographische Zwecke (um 1800). (Quelle: Rama, Wikimedia Commons, CC BY-SA 2.0) . . . . . 62

**Werner, Haüy und Weiss auf der Suche nach mathematischen Beziehungen**

- Abb. 1 Kristalle von Kochsalz (Natriumchlorid) in einer Aufnahme mit einem Rasterelektronenmikroskop. (Quelle: C. Eulenkamp, Hochschule München). . . . . 66
- Abb. 2 Deskreszenz – die Entstehung von verschiedenen geneigten Kristallflächen durch Abstufung nach Haüy . . . . . 69
- Abb. 3 Beschreibung von Kristallebenen durch Angabe der drei Achsenabschnitte der Achsen  $x$ ,  $y$  und  $z$ . Hier ergeben sich 3, 1 und 2. . . . . 70

**Goethe, die romantische und die unromantische Wissenschaft**

- Abb. 1 Beispiel für Isomorphie – Saphir (links) und Rubin. (Quelle: links Rawpil, CC0 und Rob Lavinsky, iRocks.com, Wikimedia Commons, CC-BY-SA 3.0) . . . . . 81

**Hessel, Frankenheim und Bravais: Symmetrie und Realität**

- Abb. 1 Bravais-Gitter . . . . . 86
- Abb. 2 Schematische Darstellung kristalliner,

polykristalliner und amorpher Strukturen  
der Festkörper . . . . . 90

**Becquerel, Kirchhoff und Bunsen: Das Licht und  
das Universum**

Abb. 1    Fluoreszenz bei einem Diamanten. Der  
          Kristall erscheint fast farblos bei Tageslicht  
          (links) und strahlt violett nach Anregung  
          mit UV-Strahlung. (Quelle: Chip Clark,  
          Smithsonian Museum of Natural History,  
          Department of Mineral Sciences, NMNH  
          G3889) . . . . . 95

**Schafhäütl, Verneuil, Czochralski und die  
Nachahmung der Natur**

Abb. 1    Geode mit Amethyst. (Quelle: Chip Clark,  
          Smithsonian Museum of Natural History,  
          Department of Mineral Sciences, NMNH  
          165.386) . . . . . 114

Abb. 2    Schmelz-Tropf-Verfahren nach Verneuil für  
          die Herstellung künstlicher Kristalle . . . . . 118

Abb. 3    Kristallzüchtung nach Czochralski –  
          Standardverfahren zur Herstellung von  
          Halbleiterkristallen . . . . . 120

**Von Laue und der Durchbruch: Ein  
jahrtausendaltes Rätsel wird gelöst**

Abb. 1    Röntgenstrukturanalyse nach Max von  
          Laue: Ein Röntgenstrahl wird beim  
          Durchgang von Kristallen gebeugt und  
          erzeugt ein Interferenzmuster. . . . . 124

**Picasso, Heisenberg und Schrödinger: Die  
Abstrakte hat Methode**

Abb. 1    Energieniveau- und Energiebandschemata  
          zur Erklärung der elektrischen und  
          optischen Eigenschaften. Aufwärts

gerichtete Pfeile zeigen Prozesse an, bei denen Energie aufgenommen wird. Bei abwärts gerichteten Pfeilen wird Energie abgegeben . . . . . 150

### **Physiker als Unternehmer: Die Gründung des Silicon Valley**

Abb. 1 Ein Ingot, ein künstlich hergestellter Silicium-Kristall, mit einem Durchmesser von 300 mm. (Quelle: Siltronic AG München) . . . . . 177

### **Kilby, Noyce und Moore: Integrierte Schaltkreise**

Abb. 1 Halbleiterscheibe (Wafer) von 300 mm Durchmesser mit Speicherchips aus dem Jahre 2003. (Quelle: Deutsches Museum/ Andreas Kaufmann, CC BY-SA 4.0) . . . . . 184

Abb. 2 Mikroprozessor am Ende der 1980er Jahre. Die Transistorgröße unterschritt erstmals 1  $\mu\text{m}$ , und mehr als 1 Mio Transistoren konnten auf einen Chip integriert werden. (Quelle: Deutsches Museum, CC BY-SA 4.0) . . 186

### **Boyle und Smith: Kristalle und die Bilderflut**

Abb. 1 CCD-Chip zur Bildaufnahme – eine strukturierte Siliciumscheibe mit lichtempfindlichen Zellen. (Quelle: Gratuit auf FREEIMAGESLIVE, CC BY-SA 3.0) . . . . . 208

### **Chatman und Lundblad: Synthetische Edelsteine**

Abb. 1 Rubinstab für einen Laser aus der Produktion von Linde, Chicago. (Quelle: Deutsches Museum/Sigmund Wimmer, CC BY-SA 4.0) . . . . . 216

### **Shechtman und Kristalle, die es nicht geben durfte**

Abb. 1 Typisches Elektronenbeugungsmuster von einem Zn-Mg-Ho Quasikristall. (Quelle: Jgmoxness auf Wikimedia, CC BY-SA 3.0) . . . . . 220

**Lessing, Opale und photonische Kristalle**

- Abb. 1   Opale, die in verschiedenen Farben  
          „opalisieren“. (Quelle: Smithsonian  
          Museum of Natural History, CC0) . . . . . 226

**Margaret Thatcher, Röntgen und Biokristalle**

- Abb. 1   Verschiedene Proteinkristalle, im Weltraum  
          gezüchtet. (Quelle: NASA/Marshall Space  
          Flight Center, Public Domain, CC 0) . . . . . 242

**Mit Tesafilm, Bakterien und KI zu neuen  
Kristallstrukturen**

- Abb. 1   Biominalisation von Calciumcarbonat.  
          (Quelle: C. Eulenkamp, Hochschule  
          München) . . . . . 251



# Haben Kristalle magische Kräfte?

Wer heute die Geheimnisse der Kristalle zu nutzen weiß, kann die Weltwirtschaft beherrschen: Kein Computer würde ohne Kristalle funktionieren, kein Smartphone, kein Fernseher, kein Roboter. Es gäbe kein Internet und keine Künstliche Intelligenz. Spezielle Kristallsysteme, die wir Computerchips nennen, bilden die Grundlage für all diese Errungenschaften der modernen Welt. Nur ganz wenige Global Player aus den USA und Ostasien sind in der Lage, solche hochkomplexen Kristallstrukturen der neuesten Generation zu entwerfen und herzustellen. Entsprechend groß ist die wirtschaftliche Macht dieser Konzerne (Abb. 1).

Doch ungeachtet der heutigen Technik haben Kristalle die Menschen schon immer fasziniert: Schamanen und Ärzte, Wahrsagerinnen und Esoteriker schrieben diesen besonderen Naturgebilden seit Jahrtausenden besondere Kräfte zu. Diamanten, Rubine oder Smaragde zierten als Schmuck nicht nur Ringe und Ketten, sondern als





**Abb. 1** Kristalle als Symbole der Macht in der Krone der böhmischen Könige von 1347, der sogenannten Wenzelskrone. (Quelle: K. Pacovsky, Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0)

Symbole der Macht auch Zepter und Kronen. Die Kräfte der Kristalle sollten auf ihre Träger übergehen (Abb. 1).

Im Altertum nahm man an, das gesamte Universum müsse aus konzentrischen Kristallschalen aufgebaut sein, an denen die Sterne und Planeten befestigt seien. Anders ließ sich die Durchsichtigkeit des Kosmos kaum erklären. Auch wurde über direkte Beziehungen zwischen den Gestirnen und der Entstehung von Kristallen im Erdinnern spekuliert.

Geistesgrößen aller Epochen waren fasziniert von den Formen, den Farben, der Beständigkeit und der Seltenheit dieser seltsamen Gebilde: Aristoteles, Hildegard von Bingen, Albertus Magnus, Kepler, Goethe, Heisenberg<sup>1</sup> und viele andere versuchten mit ihren Mitteln, dem besonderen Geheimnis dieser regelmäßigen und oft durchsichtigen Steine auf die Spur zu kommen. Doch die Erfolge bei

---

<sup>1</sup>Zur besseren zeitlichen Einordnung sind die Lebensdaten aller im Buch erwähnten Personen im Personen- und Sachverzeichnis aufgeführt.

der Aufklärung dieser wunderbaren Eigenschaften blieben lange Zeit bescheiden.

Die Wissenschaft von den Kristallen, die Kristallographie, blieb bis zum Ende des 19. Jahrhunderts im Wesentlichen eine beschreibende und ordnende Disziplin. Man suchte in Höhlen und Bergwerken nach den schönsten Kristallen, sammelte, sortierte, stellte die besten Stücke in Vitrinen aus – und mutmaßte, wie das alles entstanden sein könnte. Viele der verblüffend regelmäßigen Formen der Kristalle ließen sich sogar mathematisch-geometrisch beschreiben, aber grundlegende Erkenntnisse über den inneren Aufbau dieser magischen Gebilde oder gar einen Nutzen für die Technik gab es so gut wie nicht. Doch wie konnte es dazu kommen, dass das Wissen um diese besonderen Naturphänomene zur Entwicklung einer gigantischen, weltumspannenden Industrie geführt hat?

Um hinter die Geheimnisse der Kristalle zu kommen, untersuchten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in mühevoller Kleinarbeit die Wechselwirkungen kristalliner Materialien mit anderen Stoffen, mit Licht, Wärme, Elektrizität und Magnetismus. Dabei entdeckten sie erstaunliche Phänomene, und allmählich offenbarte sich das Potenzial, das in Kristallen steckte.

Doch seltsam: Was in einem Labor beobachtet werden konnte, gelang in einem anderen häufig schon nicht mehr. So gab es Kristalle, die äußerlich ziemlich gleich aussahen, aber völlig verschiedene Eigenschaften hatten: Einige von ihnen leiteten elektrischen Strom und andere nicht. Manche sandten Licht aus, wieder andere blieben dunkel. Etliche veränderten ihre Eigenschaften radikal, wenn sie erwärmt oder mit Licht bestrahlt wurden. Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts blieben diese Phänomene jedoch unerklärlich. Erst dann lichtete sich das Dickicht der Merkwürdigkeiten durch einige spektakuläre experimentelle Befunde. Zudem wurde in dieser Zeit eine wunderliche,

den alltäglichen Erfahrungen widersprechende Theorie entwickelt: die Quantenmechanik. Und so unglaublich das auch klingen mag: Die Welt sollte durch diese Theorie eine andere werden: Man begann plötzlich zu verstehen, was im Innern der Atome und Kristalle vor sich ging. Und mit einer besonderen Spezies von Kristallen, den Halbleitern, wurde die moderne Elektronik entwickelt, die heute unsere Welt so stark prägt.

Bemerkenswerte Parallelen: Suchte man früher durch magische Kristallkugeln einen Blick in ferne Weiten zu gewinnen, so ist dies für uns heute durch komplexe, „gezüchtete“ Kristallstrukturen alltäglich geworden: Die Informationen dieser Welt werden mit unglaublicher Geschwindigkeit von Kristallen aufgenommen, übertragen, verarbeitet und gespeichert. Was in vergangenen Jahrhunderten nur erahnt werden konnte, ist uns heute Gewissheit: Kristalle verfügen über schier unglaubliche Möglichkeiten. Doch bis zu dieser Erkenntnis war es ein weiter Weg.

Wer an Kristalle denkt, sieht vor seinem inneren Auge zunächst regelmäßig geformte Schmucksteine. Diese symmetrischen Naturschönheiten, die sich oft in einer unregelmäßig-chaotischen, felsigen Umgebung herausgebildet hatten, spielten eine wichtige Rolle in der Wissenschaftsgeschichte. Die Menschen spürten, dass sie hier ganz besondere Strukturen vor sich hatten. Sie wollten verstehen, wie die wundersamen Formen und Farben zustande kamen. Erst die dabei gewonnenen Erkenntnisse ermöglichten es, Kristalle auch für technische Belange herzustellen und zu nutzen. Der Siegeszug der heute allgegenwärtigen Elektronik seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts war nur möglich, weil vorher über Jahrtausende zu Kristallen überlegt, probiert und geforscht wurde.

Doch nicht nur in der Informationselektronik finden wir heute Kristalle: In modernen Uhren schwingen

Quarzkristalle und liefern uns die genaue Zeit. Kristalle emittieren Laserlicht, das Nachrichten übertragen oder Metallplatten schneiden kann. Flüssigkristalle bilden Grundstrukturen unserer Computer- und TV-Displays. Photonische Kristalle leiten Licht auf ungewöhnliche Weise. Silicium-Kristalle wandeln in Solarzellen Sonnenlicht in elektrischen Strom um. Proteinkristalle sind Grundbausteine moderner Medikamente.

Wir wissen heute, dass Kristalle symmetrisch-periodische Anordnungen von Atomen sind. Kristalle repräsentieren damit ein wesentliches Prinzip, wonach das ganze Universum aufgebaut ist. Wer sie erforschte, erhielt tatsächlich Antworten auf die faustische Frage, „was die Welt im Innersten zusammenhält“.

Dieses Buch beschreibt, wie die Menschen die Geheimnisse der Kristalle entschlüsselten. Welche Wege und Irrwege wurden dabei beschritten, welche Probleme mussten gelöst, welche neuen Sichtweisen gewonnen werden? Welche Kristalle waren dabei besonders wichtig? Und können wir uns heute das frühere Staunen über die Kristalle noch bewahren? Gibt es Zusammenhänge zwischen dem eher erahnten Wissen unserer Vorfahren und der modern-abstrakten Wissenschaft? Welche Rolle werden Kristalle für unsere Zukunft spielen? Wer sich für diese Fragen interessiert, sollte dieses Buch lesen.



# Homer, Empedokles und Aristoteles: Kristalle zwischen Literatur und Philosophie

Homer, der legendäre Dichter der Antike aus dem 8. Jahrhundert vor Christus, hat in seiner „Ilias“ das Wort *krýstallos* für Eis verwendet. Sprachforscher nehmen an, dass sich diese Bezeichnung aus *krýos* = Kälte, Frost und *stellessdai* = erstarren, festwerden gebildet hat. Es beschreibt daher etwas, das „durch Kälte erstarrt“ ist. Die Erfahrung lehrt uns, dass dem bei Eis(kristallen) so ist.

In Schriften, die drei bis vier Jahrhunderte später entstanden, wurde das Wort allerdings auch schon für den Bergkristall benutzt, der dem Eis in seiner Klarheit und seiner glatten Oberfläche ähnlich ist. Doch zwischen beiden gibt es auch auffällige Unterschiede: Bergkristalle sind oft sechskantige Prismen mit pyramidenartigen Spitzen (Abb. 1). Eis hingegen kann prinzipiell alle Formen annehmen, die sich noch dazu beim Schmelzen in unstrukturiertes Wasser umwandeln.

Äußerlich ähnlich sind auch die Kristalle des Speisesalzes. Sie lösen sich allerdings im Unterschied zum



**Abb. 1** Bergkristall. Seine Verwandtschaft mit Eis ist unverkennbar. (Quelle: Nubby, Pixabay)

Bergkristall problemlos in Wasser auf. Wenn das Wasser verdunstet und verdampft, bleibt wieder Salz zurück. Hier entstehen die Kristalle also nicht durch Kälte, sondern – im Gegenteil – durch Wärme.

Die Sache mit der Entstehung von Kristallen war von Anfang an schwer und offenbar nicht nur durch einen Prozess zu erklären. Und was ist mit den anderen „edlen Steinen“, die zwar zum Teil ähnliche Formen aber ganz andere Farben als der Bergkristall haben?

Schon in den Zeiten der alten Hochkulturen in Babylon und Ägypten wurden besonderen Steinen angesichts ihrer auffälligen Eigenschaften wie Durchsichtigkeit, Glanz, Farbe und Form magische Kräfte zugesprochen. Diese sollten bis in den Himmel reichen. So ordnete man beispielsweise schon früh jedem der zwölf Tierkreiszeichen einen bestimmten Stein zu. Im alten Judentum war als Symbole der Macht und der Verbindung mit Gott das Amtsschild des Hohepriesters mit zwölf verschiedenen Steinen besetzt, von denen jeder einen der Stämme Israels verkörperte. Im Christentum finden wir Vorstellungen von einer auf Edelsteinen aufgebauten Welt nach dem jüngsten Gericht. In der Offenbarung des Johannes heißt

es über das nach der Apokalypse neu entstehende Himmlische Jerusalem: „Die Grundsteine der Stadtmauer sind mit edlen Steinen aller Art geschmückt; der erste Grundstein ist ein Jaspis, der zweite ein Saphir, der dritte ein Chalcedon, der vierte ein Smaragd ...“

Kristallen wurden auch schon frühzeitig in vielen Kulturen heilende und prophetische Kräfte zugeschrieben, die häufig aus äußerlichen Analogien abgeleitet wurden: So soll der klare Bergkristall die Reinheit der Seele bewahren. Der violette Amethyst müsse von Vergiftung schützen und der grüne Smaragd den Blick in die Zukunft ermöglichen. Die milden Farben von Jade und Rosenquarz würden Liebe und Harmonie fördern. Auf entsprechende Vorstellungen von Heilsteinen treffen wir noch in unseren Tagen in Esoterik-Kreisen, Internetforen, Mineralien-Messen oder Schmuck- und Buchläden. Selbst Künstliche Intelligenzen verbinden heute Kristalle mit dem Geheimnisvollen: Bittet man sie, Bilder mit Kristallen zu entwerfen, so werden diese meist eindrucksvoll in einer Fantasy-Umgebung mit magischem Licht dargestellt.

Doch Menschen wollen nicht nur Außergewöhnliches sehen und zu ihrem Vorteil nutzen. Viele wollen auch verstehen und erklären. Magie und Mythen halfen zwar, die Umwelt verständlich zu machen, doch mit der Zeit reichten diese Betrachtungsweisen nicht mehr, um natürliche Phänomene oder Vorgänge widerspruchsfrei zu erklären. Um 500 vor Christus begann daher an den Küsten des Mittelmeeres eine fundamentale Neuorientierung im Denken: Die abendländische Philosophie wurde geboren. Die „Freunde der Weisheit“, wie man die Philosophen nach *philos*=Freund und *sophia*=Weisheit nannte, entwickelten völlig neue Perspektiven auf die Welt. Sie suchten natürliche und rationale Prinzipien, nach denen die Welt in ihrer Vielfalt gedeutet werden konnte. Regelmäßig geformte Kristalle mochten hier Indikatoren dafür sein, dass

trotz des Durcheinanders in der Welt Gesetzmäßigkeiten wirken.

Die Suche nach dem „Urgrund“ und dem „Urgesetz“ war zunächst rein spekulativ und enthielt noch viele mystische Elemente. Doch nach und nach entwickelten sich ganze Gedankensysteme, welche die Reichhaltigkeit der natürlichen Erscheinungen zu ordnen begannen. Ähnlichkeiten und offensichtliche Verwandtschaft wurden benutzt, um die Beziehungen zwischen den Dingen zu verstehen.

Als erster Naturphilosoph gilt Thales, dessen Namen heute vor allem durch den nach ihm benannten geometrischen Lehrsatz bekannt ist. Thales lebte um 550 vor Christus und sah im Wasser den Grundstoff aller Dinge. Eis und Bergkristall würden diesen Urstoff auf augenfällig-erstarrter Weise verkörpern. Thales' Zeitgenosse Anaximenes hingegen nahm an, dass alles Stoffliche aus mehr oder minder verdichteter Luft aufgebaut sei. Auch diese ist durchsichtig. Doch was ist mit den vielen anderen farbigen und nicht durchsichtigen Dingen auf der Welt? Lässt sich alles durch Verdichtung oder Verdünnung eines Stoffes erklären?

Mit der Zeit wurde deutlich, dass die Sachverhalte weitaus komplizierter lagen, als man vermutet hatte. EIN Urstoff genügte offenbar nicht. Zu viele Fragen blieben offen. Empedokles nahm daher ungefähr ein Jahrhundert später vier Grundstoffe, vier sogenannte *Elemente* an: Wasser, Erde, Luft und Feuer. Diese sollten über die beiden „Kräfte“ Liebe und Hass miteinander verbunden sein: Bei absoluter Liebe lägen sie in reiner Form vor. Wirkt der Hass mit hinein, entstünden durch Vermischung die konkreten Stoffe und Dinge. Eine solche Beschreibung ist sehr eingängig und kann anschaulich und emotional zum Erklären der Vielfalt der Stoffe genutzt werden. Eis und der Bergkristall konnten somit als feste Formen des Wassers



gesehen werden. Sind die Gesteine farbiger, war noch ein mehr oder minder großer Anteil „Erde“ mit enthalten.

Wiederum etwa ein Jahrhundert später, um 330 vor Christus, hat der große Aristoteles diese Auffassungen weiterentwickelt und in seine umfassenden Werke eingebunden. Er hat den vier Elementen noch die fundamentalen Eigenschaften warm/kalt und feucht/trocken zugeordnet: Das Feuer ist dabei warm und trocken, die Luft warm und feucht. Das Wasser ist kalt und feucht, die Erde kalt und trocken. Wir müssen allerdings bedenken, dass Aristoteles mit seinen Elementen nicht die realen Stoffe meinte, sondern ihnen eher die Funktion von geometrisch nicht beschreibbaren „Körpern“ zuschrieb, aus denen die realen Dinge aufgebaut sind. Ungeachtet dieser Abstraktheit ließ sich mit diesem Gedankensystem recht anschaulich erklären, wieso Kristalle sowohl durch Wärme als auch durch Kälte entstehen können: Einerseits war bekannt, dass Flüssigkeiten durch Kälte erstarren. Andererseits aber verschwindet Feuchtigkeit bei Wärmezufuhr: Verflüchtigt sich das Wasser aus einer Lösung, so bleiben die gelösten festen Stoffe, also nach Aristoteles spezielle Arten von „Erden“, übrig. Zur Salzgewinnung aus Meerwasser wurde diese Erkenntnis schon lange angewandt.

Versuchen wir uns auf unserem Wege durch die Geschichte vorzustellen, wie wenig bekannt damals noch vieles war. Wie schwer der Weg der Erkenntnis wurde, mag vielleicht seine Zeitdauer zeigen: Erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts, also mehr als 2200 Jahre nach Aristoteles, gewannen Physiker mithilfe von Röntgenstrahlen und Mathematik annähernd ein „Bild“ vom Wesen der Kristalle. Bis dahin konnte man nur spekulieren, wie sie tatsächlich im Inneren aufgebaut sein könnten.

Die Vielzahl und die Vielfältigkeit der Dinge und Phänomene forderten nicht nur in der Gesteinskunde eine systematische Erfassung. Der große Sortierer und

Systematisierer Aristoteles leistete dabei auf vielen Gebieten Bahnbrechendes. Damit war er zwar der einflussreichste, aber natürlich nicht der einzige überragende Denker der griechischen Antike. Seine umfassenden Werke waren jedoch so anschaulich und von Erfahrungen geprägt, dass andere Erklärungen und Weltbilder dagegen kaum eine Chance hatten. Spätere Generationen, von islamischen Gelehrten bis zu bedeutenden Vertretern der europäischen Renaissance, beriefen sich daher sehr lange Zeit vor allem auf ihn. Alternative Betrachtungsweisen wurden für Jahrtausende nicht so stark beachtet oder sogar ganz vergessen.

Da gab es zum Beispiel Leukipp und Demokrit. Nach deren Auffassung war die Welt aus kleinen, unsichtbaren Teilchen aufgebaut, die sie nach ihren vermuteten Eigenschaften Atome (von *átomos*=nicht teilbar) benannten. Diese Ansichten wurden von Aristoteles rundweg abgelehnt. Aufgrund ihrer Abstraktheit und buchstäblichen Unanschaulichkeit hatten diese Ideen bis ins 19. Jahrhundert keine Chance. Erst dann wurde die Existenz von Atomen immer offensichtlicher und konnte auch zur Erklärung des Phänomens Kristall benutzt werden.