

Der Erdmantel und die Entstehung von Diamanten

Eine Informationsbroschüre für Lehrer und Schüler zur Verwendung im projektorientierten Unterricht

Physik: Erdaufbau, Erbebenwellen, Phasenumwandlungen

Chemie: Phasenumwandlungen, Reaktionsgrenzen, Prinzip von Le Chatelier, Diamant

Geographie: Erdaufbau, Zusammensetzung des Erdmantels, Plattentektonik



Aus: Mineralentage München 2000, Katalog

Text und Zusammenstellung:
Thomas Stachel, Mineralogie Frankfurt

Der Erdmantel und die Entstehung von Diamanten

Einführung

Eine erste grobe Gliederung unseres Erdkörpers unterscheidet Kruste, Mantel und Kern (Abb. 1). Die kontinentale und ozeanische Kruste ist durch Bohrungen, wie etwa dem deutschen kontinentalen Tiefbohrprogramm "KTB", und durch Erosionsprofile im Innenbereich von Gebirgskörpern einer direkten Probennahme zugänglich. Beispielsweise erschließt die Ivrea-Verbano Zone in den italienischen Alpen ein Profil durch die mittlere und untere Kruste bis zur Obergrenze eines alten Erdmantels. Schnitte durch die ozeanische Kruste lassen sich trockenem Fußes in den sogenannten Ophiolithkomplexen, wie dem Trodoskomplex in Zypern, studieren, wo ehemaliger Ozeanboden im Zuge von Gebirgsbildungsprozessen an Land aufgeschoben wurde. Im Gegensatz dazu entzieht sich der Erdmantel weitgehend einer direkten Untersuchung. Aufgeschobene Schollen von Erdmantel in Gebirgskörpern haben eine komplexe Vorgeschichte, an ihnen gewonnene Daten sind daher nur bedingt auf die ungestörte Situation unterhalb der kontinentalen und ozeanischen Kruste zu übertragen.

Direkte mineralogische Untersuchungen des Erdmantels stützen sich daher vor allem auf Bruchstücke von Erdmantelgesteinen ("Xenolithe", Abb. 2), die durch rasch aufsteigende Gesteinsschmelzen im Zuge vulkanischer Ereignisse an die Erdoberfläche mitgerissen werden. Durch solche Xenolithe haben wir heute ein differenziertes Bild von der mineralogischen und chemischen Zonierung und der Temperaturverteilung innerhalb des "lithosphärischen" festen Erdmantels, wie er unter den Kontinenten anzutreffen ist. Unter besonders alten kontinentalen Bereichen, den Kratonen oder "alten Schilden", kann diese Lithosphäre bis in Tiefen von etwa 200 km hinabreichen (Abb. 1). Aus den darunter liegenden Teilen des Erdmantels scheinen aufsteigende Magmen nur äußerst selten Bruchstücke mit an die Erdoberfläche herauf zu reißen. Damit waren der tiefere Erdmantel und der Erdkern zunächst einmal ausschließlich für geophysikalische Methoden zugänglich, allen voran seismische Untersuchungen.

Die Tiefenstruktur der Erde abgeleitet aus seismischen Untersuchungen

Durch die Arbeiten Emil Wiecherts (1861-1928), dem Gründer des geophysikalischen Instituts in Göttingen und erstem Professor für Geophysik weltweit, sowie seiner Schüler, allen voran Beno Gutenberg (1889-1960, später Professor in Frankfurt und dann am California Institute of Technology in Pasadena), wurden die theoretischen und apparativen Grundlagen für eine Untersuchung des Erdinneren basierend auf seismischen Daten geschaffen.

Durch gleichzeitige Messungen verschiedener seismischer Stationen wird für ein Erdbeben der im Erdinneren gelegene Herd, das Hypozentrum, bestimmt (im Gegensatz zum Epizentrum, das der Projektion dieses Herdes an die Erdoberfläche entspricht). Danach kann dann der Weg der bei einem Erdbeben entstehenden schnelleren longitudinalen (Kompressionswellen) und langsameren transversalen Wellen (Scherwellen) durch den Erdkörper hindurch zu einzelnen seismischen Stationen zur Berechnung der Geschwindigkeitsverteilung im Erdinneren genutzt werden. Da Flüssigkeiten keinen Scherwiderstand besitzen, fällt die Geschwindigkeit von Scherwellen in teilweise aufgeschmolzenen Gesteinen stark ab, bei vollständiger Aufschmelzung werden Scherwellen gar nicht mehr weitergeleitet. Durch eine Schattenzone für Scherwellen auf der gegenüberliegenden Erdseite eines Erdbebenherdes konnte so beispielsweise die flüssige Beschaffenheit des äußeren Erdkerns abgeleitet werden. Ein deutlicher Abfall in der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Erdbebenwellen unterhalb der Lithosphäre weist auf das

Vorhandensein von Schmelzanteilen in diesem als Asthenosphäre ("Schmelzsphäre", wobei der Anteil von Schmelze allerdings nur etwa 1% beträgt) bezeichneten Teil des Oberen Erdmantels hin.

In den fünfziger Jahren ergaben Untersuchungen von Birch, dass beispielsweise die kontinuierliche Zunahme in der Geschwindigkeit seismischer Wellen im Unteren Erdmantel (660-2900 km) durch Selbstkompression mit zunehmender Tiefe befriedigend erklärt werden kann. Insgesamt befand Birch aber, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Erdbebenwellen im Erdmantel zu hoch sei, um durch reine Selbstkompression erklärt zu werden. Dazu zeigen seismische Daten eine Reihe von "Diskontinuitäten", an denen sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten von Kompressions- und Scherwellen im Erdinneren sprunghaft ändern. Diese Diskontinuitäten entsprechen abrupten Änderungen im Kompressions- und Scherwiderstand der dort vorhandenen Gesteine und belegen damit physikalisch oder chemisch bedingte Materialunterschiede zur Tiefe hin.

Experimentelle Untersuchungen zum Aufbau der Erde

Experimentelle Untersuchungen der diesen Diskontinuitäten zugrunde liegenden Materialänderungen im Labor sind das Feld der experimentellen Petrologie. Da in den fünfziger Jahren geeignete apparativen Voraussetzungen für die Simulation der Druck- und Temperaturbedingungen des tieferen Erdmantels fehlten, führte Ted Ringwood (späterer Direktor der Research School for Earth Sciences an der Australian National University in Canberra), der große Pionier dieses Feldes, zunächst Experimente an Analogmaterialien, wie z.B. Germanatverbindungen, bei geringen Drucken durch, um daraus Vorhersagen für den Erdmantel zu treffen. Mit der Entwicklung der Vielstempelapparaturen sind nun Experimente bei Drucken bis zu 30 Gigapascal (GPa), das entspricht einer Tiefe von etwa 800 km, möglich, mit laserbeheizten Diamantstempelzellen können Drucke simuliert werden, die die Bedingungen im Erdkern überschreiten. Durch diese modernen experimentellen Methoden ließen sich die wichtigen Diskontinuitäten innerhalb des Erdmantels durch Phasenübergänge erklären, die mit einer erheblichen Verdichtung des Mantelmaterials einhergehen. Für den Erdmantel ergibt sich daraus ein Dreiteilung (Abb. 1) in einen Oberen Mantel, dominiert von den relativ locker gepackten Phasen Olivin und Orthopyroxen, eine Übergangszone (410-660 km), in der Olivin ein zunehmend dichtere Struktur annimmt (β - und γ -Phase) während sich gleichzeitig Pyroxen im Granat auflöst, sowie einen Unteren Mantel (660-2900 km), in dem Silikatperovskite und Ferroperiklas - das ist $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ - vorherrschen.

Die chemische und Zusammensetzung des Erdmantels

Begrenzungen der geophysikalischen und experimentellen Techniken erlauben es aber nicht, aus diesen Untersuchungen die exakte chemische Zusammensetzung des tieferen Erdmantels abzuleiten. Wichtige Anhaltspunkte liefern uns hier die Zusammensetzungen von primären Mantelschmelzen, wie sie an den Mittelozeanischen Rücken, den ozeanischen Inseln oder in intrakontinentalen Milieus gefördert werden. In Verbindung mit kosmochemischen Daten zur Ausgangszusammensetzung unseres Planeten kann aus solchen Untersuchungen geschlossen werden, dass der ganze Erdmantel eine relativ homogene chemische Zusammensetzung besitzt, wobei der Obere Erdmantel durch die noch andauernde Extraktion kontinentaler und ozeanischer Kruste eine Verarmung an leicht herausmelzbaren Komponenten, den sogenannten großen lithophilen ("gesteinsliebenden") Elementen, erfahren hat. Durch den Prozess der Subduktion (Abb. 1) wird solches Material aber auch teilweise wieder in den Erdmantel zurückgeführt.

Entsprechend diesen Untersuchungen setzt sich der Erdmantel chemisch hauptsächlich aus Oxiden von Silizium (45 Gewichtsprozent SiO_2), Magnesium (38% MgO), Eisen (8% FeO), Aluminium (4% Al_2O_3) und Kalzium (3% CaO) zusammen. Zu welchen chemischen Verbindungen und Strukturen sich diese Oxide zusammenschließen, hängt dann von den Temperatur- und Druckbedingungen im jeweiligen Tiefenbereich der Erde ab. Der Obere Erdmantel wird beispielsweise im wesentlichen von den Silikatphasen Olivin ($[\text{Mg,Fe}]_2\text{SiO}_4$, ca. 60%), Orthopyroxen ($[\text{Mg,Fe}]\text{Si}_2\text{O}_6$, ca. 20%) und Klinopyroxen ($\text{Ca}[\text{Mg,Fe}]\text{Si}_2\text{O}_6$, ca. 15%) aufgebaut. In Abhängigkeit von der Tiefe wird dabei aber der Aluminiumgehalt der Gesteine in den zusätzlichen Mineralen Plagioklas (ein Feldspat, oberste 15 km), Spinell (10-30 km) und Granat (> 30 km) untergebracht.

Diamant als Beispiel einer Phasenumwandlung

Die über die Selbstkompression der Erdmantelgesteine hinausgehende Verdichtung (und die damit verbundene Zunahme der Kompressions- und Schermodulen) geht also auf Phasenumwandlungen zurück, die einerseits auf chemischen Reaktionen beruhen, die mehrere Minerale betreffen (z.B. die in etwa 30 km Tiefe stattfindende Reaktion: Spinell + Orthopyroxen => Olivin + Granat) oder aber auf Umwandlungen, die nur die Struktur aber nicht die Zusammensetzung berühren. Ein Beispiel für eine solche isochemische (also nur die Struktur verändernde) Phasenumwandlung ist die Bildung von Diamant aus Graphit bei hohen Drucken.

Die Ursache von Phasenumwandlungen sind in einem bereits 1884 von Le Chatelier formulierten Prinzip beschrieben: Wird auf ein System (beispielsweise ein bestimmtes Gesteinsvolumen) durch eine Änderung der physikalischen Bedingungen ein Zwang ausgeübt, so verschiebt sich das physikalisch-chemische Gleichgewicht im System so, dass dieser Zwang minimiert wird. In erdwissenschaftlichen Zusammenhängen besteht eine Veränderung der physikalischen Bedingungen in Veränderungen der Größen Temperatur und Druck. Minimierung des Zwanges bei einer Erhöhung der Temperatur ist nur auf der Basis thermodynamischer Beziehungen verständlich, vereinfacht dargestellt reagiert ein System dadurch, dass es seinen Ordnungsgrad vermindert, sprich seine Entropie erhöht. Wesentlich einsichtiger ist das Verhalten eines Systems bei einer Veränderung des Druckes, hier erfolgt die Minimierung des Zwanges durch eine Änderung des Volumens (Abb. 3).

Am System Kohlenstoff lassen sich diese Reaktionen eines Systems auf Änderungen von Druck und Temperatur gut verdeutlichen. Abgesehen von den bei Verbrennungsprozessen entstehenden Fullerenen, haben wir es hier mit zwei Phasen zu tun, Graphit und Diamant. Der Ordnungsgrad der Kohlenstoffatome im Diamant ist höher als im Graphit (d.h. Diamant hat die geringere Entropie), von daher kann vorhergesagt werden, dass Graphit relativ zum Diamant zu höheren Temperaturen hin stabil ist. Gleichzeitig hat Diamant eine Dichte (3.52 g/cm^3), die diejenige des Graphits (2.25 g/cm^3) um ein Drittel übersteigt. Folglich muss sich Graphit bei Erhöhung des Druckes irgendwann in Diamant umwandeln. Abb. 4 ist ein sogenanntes Phasendiagramm, das die Stabilitätsbeziehungen von Graphit und Diamant darstellt. Die Phasengrenze, entlang der die Umwandlung von Graphit zu Diamant (oder umgekehrt) stattfindet, zeigt erwartungsgemäß eine positive Steigung, dem gemäß ist Graphit, als die Phase mit der höheren Entropie und der geringeren Dichte, die Niederdruck und Hochtemperatur-Modifikation der Kohlenstoffs, umgekehrt ist der Diamant die Hochdruck und Niedertemperatur-Modifikation. Entlang einer Kurve, die die Zunahme von Druck und Temperatur mit der Tiefe im Erdinneren beschreibt ("geothermischer Gradient", Abb. 4), erfolgt unter natürlichen Bedingungen die Umwandlung des Kohlenstoffs von Graphit zu Diamant ab etwa 140 km Tiefe (entsprechend circa $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ und $4,5 \text{ GPa}$). Bleibt nur noch die Frage: Warum wandelt sich der Edelstein in einem Diamantring dann nicht

einfach zu Graphit um? Die Antwort auf diese Frage gibt die chemische Kinetik, die vorhersagt, dass die Umwandlung so extrem träge ist, dass sie nur bei hohen Temperaturen stattfindet. Einen solchen Zustand, bei dem ein eigentlich instabiler Zustand durch eine Energiebarriere stabilisiert wird, bezeichnet man als metastabil. Als Vergleich kann ein durch eine Barriere aufgestauter Gebirgssee dienen, der gemäß seiner potentiellen Energie eigentlich ins Tal abfließen sollte, die Staumauer aber nicht überfließen kann.

Diamant als direktes Fenster zum Erdinneren

Bei der Untersuchung der mineralogischen und chemischen Zusammensetzung des Erdmantels bieten nun winzige Mineraleinschlüsse (Abb. 5), die in natürlichen Diamanten auftreten, eine einzigartige Möglichkeit, die Modelle über die Zusammensetzung und die Phasenzustände des tieferen Erdmantels zu testen. Diamant ist chemisch fast inert (d.h. extrem reaktionsträge) und somit ein perfekter Behälter, der seine Einschlüsse gegen alle späteren Einflüsse abschirmt. Und da es sich meist um mono-mineralische Einschlüsse handelt, fehlen den Einschlüssen auch mögliche Reaktionspartner, um beim Aufstieg chemische Gleichgewichte veränderten Druck- und Temperaturbedingungen anzupassen. Damit stellen Diamanteinschlüsse direkte Zeugen des chemischen Milieus und der Druck- und Temperaturbedingungen in den Diamantquellregionen im Erdmantel dar.

Für die Bildung von Diamanten haben sich bis jetzt drei wesentliche Quellregionen ergeben: (1) der lithosphärische Erdmantel, der unter alten kontinentalen Bereichen bis in das Diamantstabilitätsfeld, also in Tiefen von über 140 km herabreicht, (2) der tiefere Obere Erdmantel (also die zähplastische Asthenosphäre) und die Übergangszone, sowie (3) der Untere Erdmantel (Abb. 1).

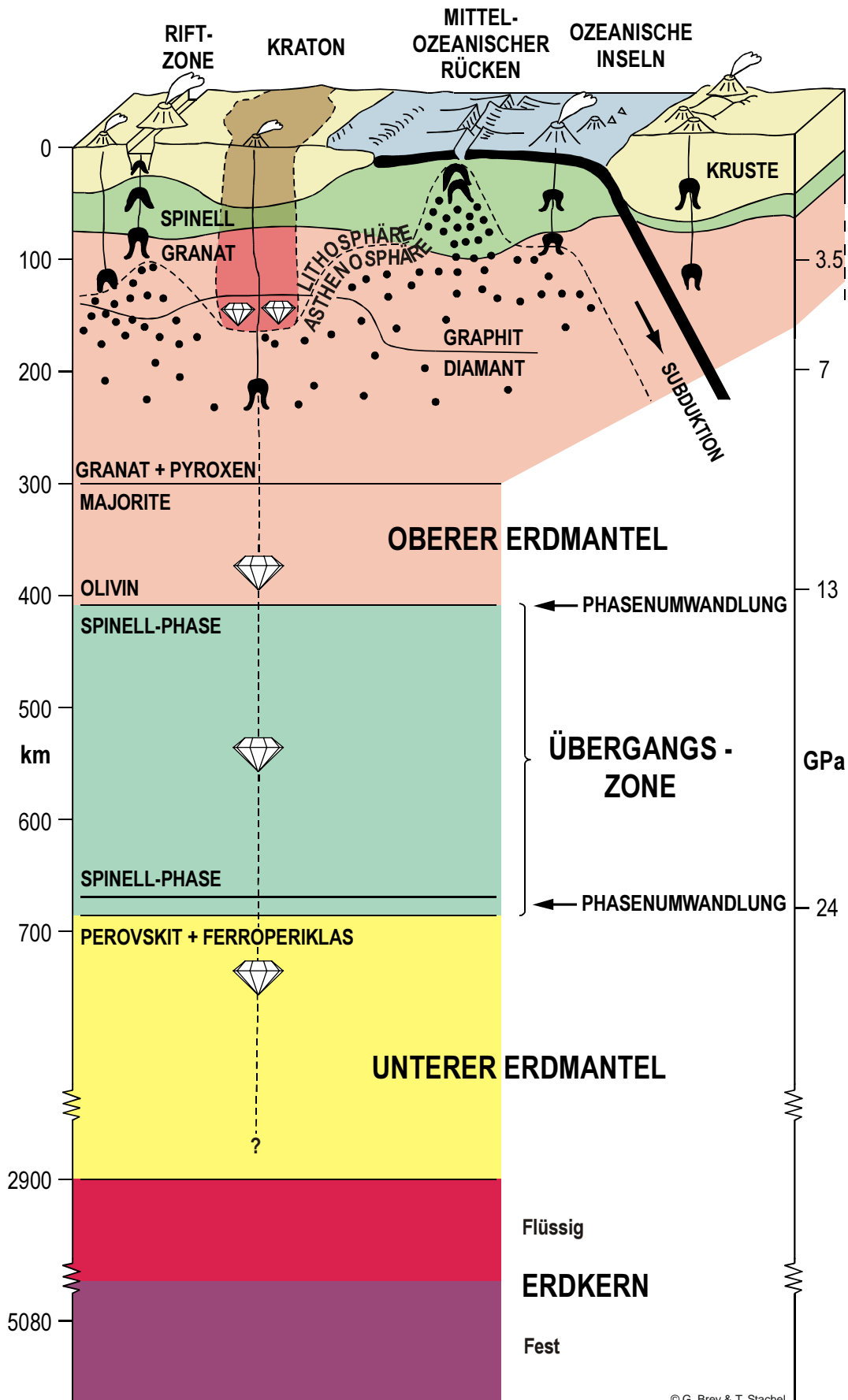
Lithosphärische Diamanten stellen das Gros der weltweiten Produktion dar und sind durch die von H.O.M. Meyer in den 60er Jahren am Geophysical Lab in Washington begründeten systematischen Untersuchungen an Mineraleinschlüssen inzwischen chemisch sehr gut charakterisiert. Dabei hat sich eine Unterscheidung in zwei Gruppen ergeben: peridotitische Diamanten, die in "normalen" peridotitischen Erdmantelgesteinen entstehen (siehe oben) und eklogitische Diamanten (Abb. 6), die in einer Umgebung mit basaltischem Chemismus wachsen. Aus vielfältigen geochemischen Daten wird geschlossen, dass die lithosphärische Diamantquellregion bereits sehr früh in der Erdgeschichte, vermutlich vor über 2,5 Milliarden Jahren (Archaikum in der geologischen Zeitskala), an Mittelozeanischen Rücken entstand: die eklogitische Diamantquellregion entspricht dabei der ehemaligen "basaltischen" ozeanischen Kruste, die peridotitische Quellregion der unterliegenden ozeanischen Lithosphäre, aus der diese Basalte herausgeschmolzen wurden. Auch heute werden ozeanische Platten durch einen, als Subduktion bezeichneten, Prozess an den Tiefseegräben wieder verschluckt (Abb. 1), durch die höheren Erdmanteltemperaturen im Archaikum waren diese Platten aber vergleichsweise heiß, leicht und schnell, so dass sie nicht in den tieferen Erdmantel herabgeführt wurden, sondern von den Kontinenten überfahren und an ihrer Basis eingeschuppt wurden (Abb. 7). Untersuchungen zur isotopischen Zusammensetzung der Diamanten selbst, zeigen allerdings, dass die Diamanten selbst wohl nicht auf subduzierten Kohlenstoff zurückgehen (also auf organisches Material und Karbonatgesteine), sondern dass sie während späterer Anreicherungsereignisse entstanden, bei denen Schmelzen und Fluide (als Fluid bezeichnet man eine Phase oberhalb ihrer kritischen Temperatur, bei der der Unterschied zwischen gasförmig und flüssig verschwindet) aus der unterlagernden Asthenosphäre in die Lithosphäre eindringen.

Diamanten aus der unterliegenden Asthenosphäre und der Übergangszone wurden erstmals 1985 durch R.O. Moore und J.J. Gurney von der Universität Kapstadt in der Monastery Mine in Südafrika nachgewiesen. Ab einer Tiefe von etwa 260 km beginnt sich

Pyroxen in der dichteren Granatstruktur zu lösen (wiederum gemäß dem Prinzip von Le Chatelier), solche Granate sind dann chemisch an einem erhöhten Siliziumgehalt zu erkennen und werden als "majoritisch" bezeichnet. Inzwischen sind solche majoritischen Granate in einer Reihe von Diamantminen nachgewiesen worden und aus einem Vergleich mit experimentell synthetisierten Majoriten ergibt sich, dass sie ein Tiefenprofil bis in die tiefe Übergangszone widerspiegeln. Interessanterweise gehören die majoritischen Granate von ihrer Zusammensetzung her zur eklogitischen Einschlusssuite, d.h. sie kristallisierten in einer basaltischen und nicht in einer peridotitischen Umgebung. Daraus kann auf eine Ableitung der Diamanten in der Asthenosphäre und der Übergangszone aus abtauchender ozeanischer Kruste geschlossen werden.

Eine der herausragenden geowissenschaftlichen Entdeckungen der 90er Jahre war die erstmalige Beobachtung von Mineralassoziationen des Unteren Erdmantels in Diamanten aus der brasilianischen Mine Sao Luiz durch die Gruppe um B. Harte und J.W. Harris an den Universitäten in Edinburgh und Glasgow. Einschlüsse in Diamanten des Unteren Erdmantels erlauben erstmals die geophysikalischen und experimentellen Vorhersagen über die Beschaffenheit des Unteren Erdmantels direkt zu überprüfen. Charakteristisch ist hier das Auftreten von Ferroperiklas mit Ca- und Mg-Silikatperovskiten und der reinen SiO₂-Phase Stishovit. In ihrer Zusammensetzung entsprechen die Perovskite den Pyroxenen des Oberen Erdmantels, allerdings sind die Sauerstoffatome in der Perovskitstruktur wesentlich dichter gepackt, das gleiche gilt für Stishovit, dessen chemisches Äquivalent in der Erdkruste das Mineral Quarz ist.

Abbildungen



© G. Brey & T. Stachel

Abb. 1: Tiefengliederung des Erdkörpers mit wichtigen Phasenübergängen und den verschiedenen Quellregionen von Diamanten. Im rechten oberen Teil der Abbildung ist das Standardmodell der Geowissenschaften, die Plattentektonik, dargestellt. An den Mittelozeanischen Rücken entsteht durch Aufstieg von Schmelzen aus dem Erdmantel beständig neue ozeanische Kruste. Da der Umfang der Erde nicht zunimmt, muss eine äquivalente Menge an ozeanischer Kruste wieder in Mantel zurückgeführt werden, ein Prozess der als Subduktion bezeichnet wird. Die vorwiegend aus Basalt bestehende ozeanische Kruste wandelt sich beim Abtauchen in den Erdmantel in ein wesentlich dichteres Gestein, den Eklogit, um. Wie tief diese ozeanischen Platten abtauchen, bevor sie sich wieder mit dem Erdmantel vermischen, ist noch nicht eindeutig geklärt, teilweise ist aber ein Absinken bis zur Kern-Mantelgrenze wahrscheinlich.

Unter der kontinentalen, beziehungsweise der ozeanischen Kruste folgt zunächst ein fest mit ihr verbundener Teil des Erdmantels, in geringen Tiefen ist das Spinellperidotit, in größeren Granatperidotit (Übergang grün-rosa). Diese oberste feste Schicht der Erde wird als Lithosphäre ("Gesteinssphäre") bezeichnet, unterlagert wird sie von der Asthenosphäre (Schmelzsphäre"), die zu einem sehr geringen Teil aus Schmelzen besteht, und die im Gegensatz zur Lithosphäre an einer konvektiven Durchmischung des Oberen Erdmantels teilnimmt. Unter den mehrere Milliarden Jahre alten "Kratonen" (in braun) ist die Lithosphäre zu enormen Mächtigkeiten (bis etwa 200 km) angewachsen. Gleichzeitig nimmt dort die Temperatur zur Tiefe hin langsamer zu als in jüngeren Bereichen üblich, so dass es zu einem Auftauchen der Phasengrenze Graphit-Diamant zu geringeren Tiefen kommt. Unter den alten Kratonen reicht die Lithosphäre daher in das Diamantstabilitätsfeld hinein und tatsächlich stellen diese Lithosphärenwurzeln die bei weitem wichtigste Quelle für Diamanten dar. Durch aufsteigende Magmen werden die Diamanten dann aus diesen großen Tiefen an die Erdoberfläche transportiert, wie es in den Kimberlitschloten im südlichen Afrika oder in Kanada der Fall ist. Daraus erklärt sich auch die Grundregel der Diamantexploration, dass primäre Diamantlagerstätten nur auf über 2 Milliarden Jahre alten Kratonen gefunden werden. Über Mineraleinschlüsse in Diamanten können nun die Bereiche ihrer Bildung in der tiefen Lithosphäre chemisch untersucht werden, um so das Wachstum der Kratone im Laufe der Erdgeschichte zu rekonstruieren.

Diamanten aus tieferen Bereichen des Oberen Erdmantels und aus der Übergangszone (410-660 km) können an Granateinschlüssen mit einer bestimmten chemischen Signatur (Majorit-Granate mit erhöhtem Siliziumgehalt) identifiziert werden. Die für die Übergangszone typischen Spinellphasen treten als Einschlüsse in Diamanten nicht auf, wahrscheinlich wandeln sie sich während des Aufstiegs isochemisch in Olivin um, der bei niedrigeren Drucken die stabile Modifikation darstellt. Diamanten aus dem Unteren Erdmantel sind äußerst selten und können durch Einschlüsse von Magesiwüstit ($[Mg,Fe]O$), zusammen mit Magnesium- und Kalziumsilikatperovskiten nachgewiesen werden. All diese besonders tiefen Diamanten werden wohl zunächst durch Konvektionsströme an die Basis der Lithosphäre herauftransportiert, bevor sie von dort durch vulkanische Ereignisse an die Erdoberfläche gefördert werden.



Abb. 2: Mantel-Xenolithe (Peridotite)

Oben: Granat-Lherzololith, mitte: Spinell-Peridotit mit Olivin in Edelsteinqualität, unten: Xenolithhaufen in der Mine Letseng-la-terae (Lesotho).

Aus: Nixon, P.H. (1987): Mantle Xenoliths. John Wiley & Sons, Chichester, 844 pp., Plate 6 und 10)

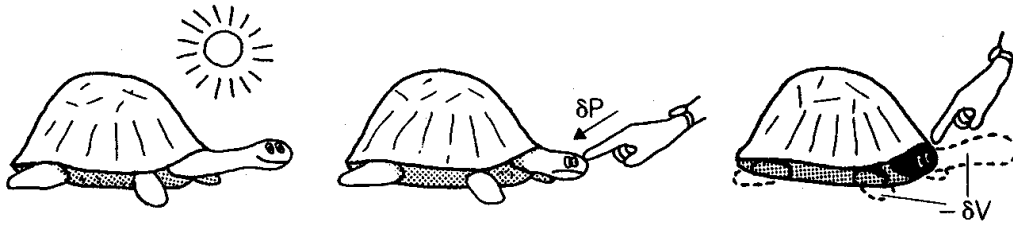


Abb. 3: Das Prinzip von Le Chatelier illustriert am Beispiel einer Schildkröte. Stadium (a): Eine glückliche Schildkröte steht im Gleichgewicht mit ihrer Umgebung. Stadium (b): Auf die Schildkröte wird ein zusätzlicher Druck ausgeübt (δP). Stadium (c): Die Schildkröte minimiert diesen äußeren Zwang durch Volumenabnahme ($-\delta V$).

(Aus Gill, R. (1996): Chemical fundamentals of geology. Chapman & Hall, 290 pp., Abb. auf S. 33)

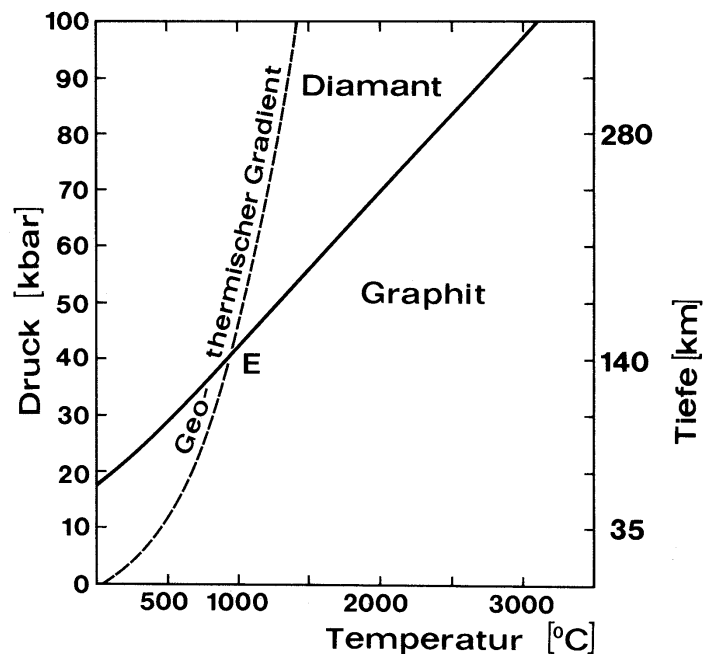
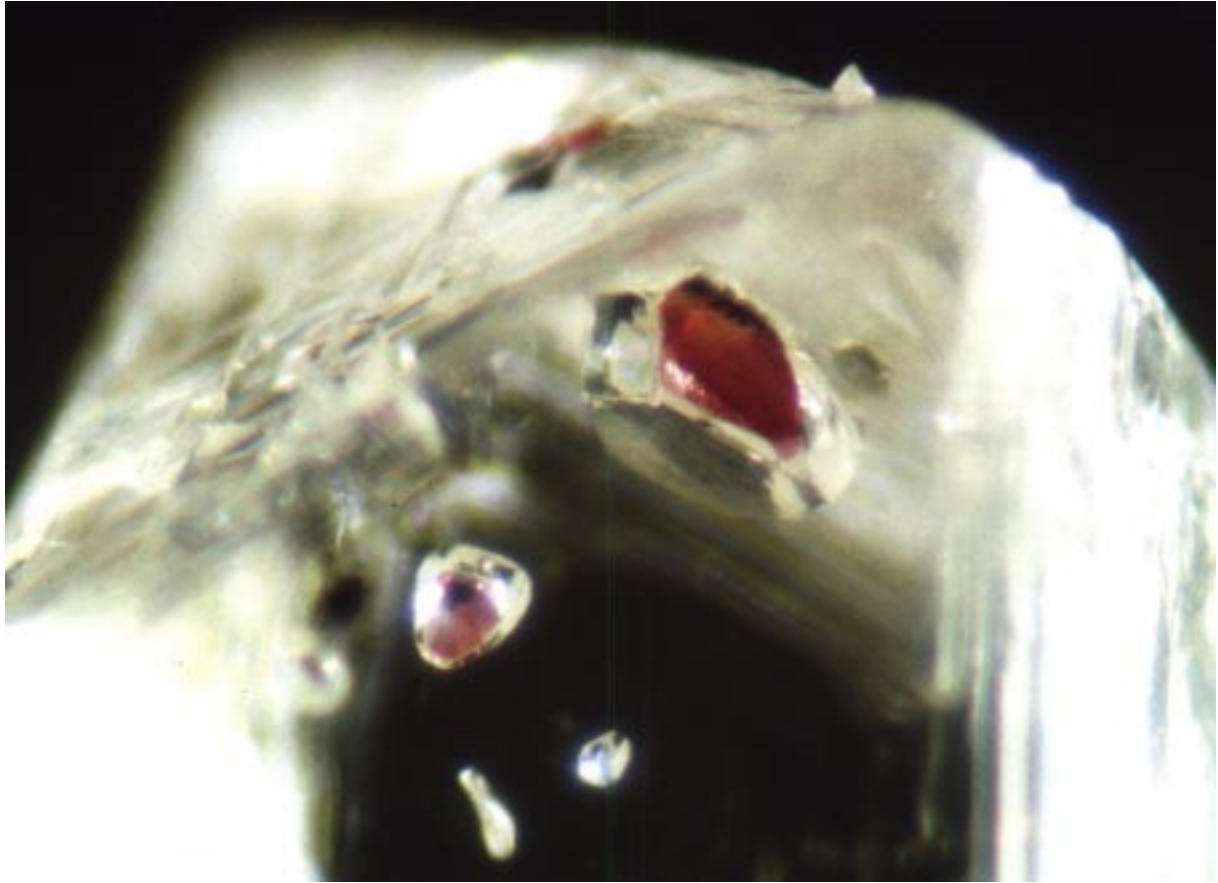


Abb. 4: Phasendiagramm für den Übergang Graphit-Diamant im Reinsystem Kohlenstoff. Bei zunehmendem Druck findet entlang der durchgezogenen Linie der Übergang von Graphit zu Diamant statt. Im Zuge dieser Umwandlung verringert sich das molare Volumen um etwa ein Drittel. Je höher die Temperatur, desto höher der benötigte Druck. Die positive Steigung der Phasengrenze ergibt sich aus dem höherem Ordnungsgrad (der geringeren Entropie) der Diamantstruktur.

Weiterhin gibt die Abbildung einen geothermischen Gradienten an, der die Zunahme der Temperatur mit der Tiefe darstellt. Am Schnittpunkt *E* zwischen diesem Gradienten und der Phasengrenze würde unter natürlichen Bedingungen die Umwandlung von Graphit zu Diamant (oder umgekehrt) stattfinden. Entlang eines geothermischen Gradienten, wie man ihn unter den alten kontinentalen Kernbereichen (den Kratonen) vorfindet, läge Punkt *E* bei etwa 1000°C und 4,5 GPa (=45 kbar in dieser Abb.), also in etwa 140 km Tiefe.

(Aus Matthes, S. (1983), Mineralogie. Springer, Berlin. Abb. 13 aus Seite 26)



(© T. Stachel)

Abb. 5: Einschlüsse von Granat in einem Diamanten aus Ghana. Der größte Einschluss misst etwa 0.2 mm. Wie generell üblich, zeigen auch hier die Einschlüsse im Diamant nicht ihre eigene Gestalt - im Falle des Granat wäre das ein Rhombendodekaeder - sondern eine durch den Diamant aufgezwungene kubo-oktaedrische Symmetrie. Das belegt eine gleichzeitige Entstehung von Diamant und Einschluss. Als chemisch inerte Container beschützt der Diamant danach seine Einschlüsse vor Veränderungen, so dass diese Einschlüsse einzigartig frisches Probenmaterial aus großen Tiefen der Erde darstellen.

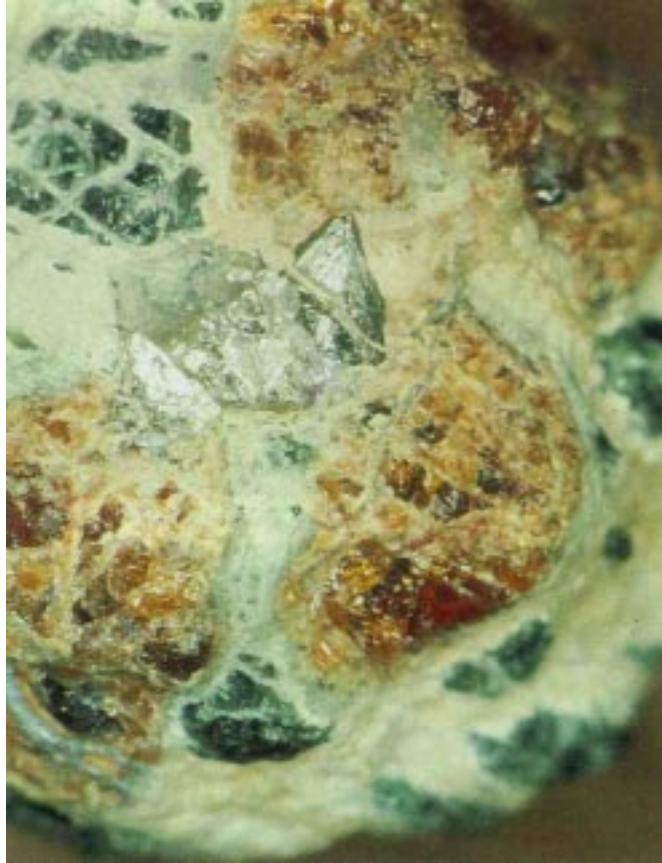


Abb. 6: Exlogitxenolith mit Diamant. Foto eines Eklogitxenoliths mit einem Diamanten. Die Granate zeigen die typische orange Farbe einer eklogitischen Paragenese. Der grünliche, natriumreiche Klinopyroxen ist z.T. schon stark alteriert ("zerstört").

(Aus: Nixon, P.H. (1987): Mantle Xenoliths. John Wiley & Sons, Chichester, 844 pp., Fig. A auf Plate 21)

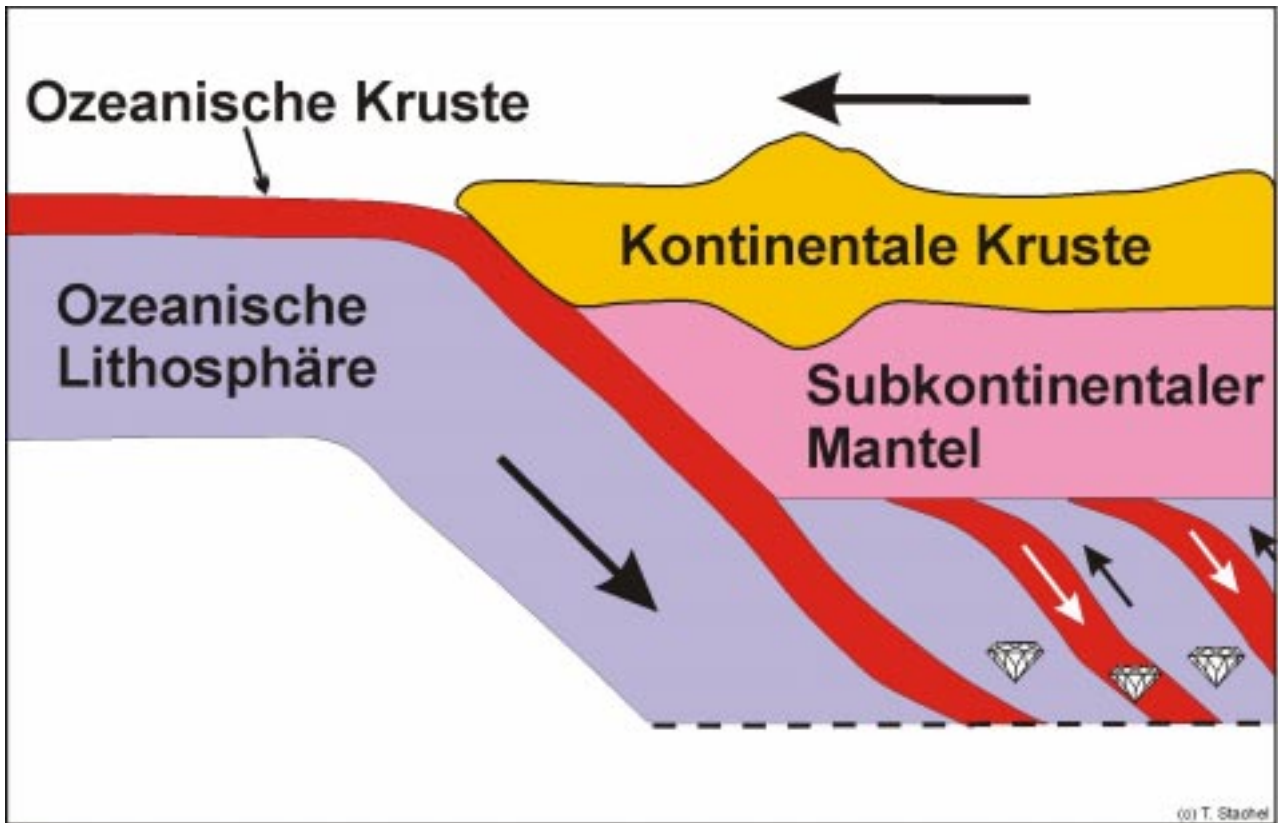


Abb. 7: Modell für die Entstehung diamantführender Lithosphäre unter alten kontinentalen Bereichen. Wegen der vermutlich um etwa 200 °C höheren Erdmanteltemperaturen fanden im Archaikum (> 2,5 Milliarden Jahre) die Bewegungen ozeanischer Platten mit deutlich größerer Geschwindigkeit statt. So kam ozeanische Kruste zur Subduktion, die eigentlich noch nicht durch langsame Abkühlung die nötige Dichte erreicht hatte, um in den Erdmantel zurückgeführt zu werden. So konnte im Archaikum ozeanische Kruste gemeinsam mit Teilen der unterlagernden ozeanischen Lithosphäre unter den Kontinenten eingeschuppt werden (Imbrikationsmodell von Helmstaedt & Schulze, 1989). Beim Zusammentreffen von aus dem tieferen Erdmantel aufsteigenden CH₄-reiche Fluiden mit diesen relativ oxidierten Stücke alter ozeanischer Platten kam es dann zu Redoxreaktionen ($\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + \text{C}$), bei denen Diamanten abgeschieden wurde.

Weiterführende Literatur:

Erdmantel:

Lamb, S. & Sington, D. (2000) Die Erdgeschichte. Eine Spurensuche durch Jahrtausende. Könenmann, Bonn, 240 S.

Schmincke, H.U. (2000) Vulkanismus. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 264 S.

In Englisch:

Brown, G.C., Hawkesworth, C.J. & Wilson, R.C.L. (1992): Understanding the Earth. Cambridge University Press, Cambridge, 551 S.

Cattermole, P (2000) Building planet Earth. Cambridge University Press, 283 S.

Davies, G.F. (1999) Dynamic Earth. Cambridge University Press, 458 S.

Nixon, P.H. (Hrsg.) (1987): Mantle Xenoliths. John Wiley & Sons, Chichester, 844 S.

Press, F & Siever, R. (1985): Earth. W.H. Freeman, New York, 656 S.

Diamanten:

Diamant. Der extreme Edelstein, das geniale Werkzeug. Extra-Lapis No. 18 (2000)

Legrand J. (Hrsg.) (1991): Der Diamant. Mythos, Magie und Wirklichkeit. Karl Müller Verlag, Erlangen, 288 S.

In Englisch:

Harlow G.E. (Hrsg.) (1998): The Nature of Diamonds. Cambridge University Press, Cambridge, 278 S.

Hazen, R.M. (1999): The diamond makers. Cambridge University Press, Cambridge, 244 S.

Foliensammlung

Einführung

S. 1-2: Chemische Zusammensetzung der Erde, Zusammensetzungsunterschiede Kern - Mantel - Kruste.

S. 3-5: Schnitte, die die Tiefengliederung der Erde (fester innerer Kern, flüssiger äußerer Kern, Unterer Mantel, Übergangszone, Oberer Mantel und Kruste), Konvektionsströme und Plattenbewegungen darstellen.

S. 6: Prinzip der Plattentektonik

Tiefengliederung der Erde

S. 7-13: Ergebnisse zum Aufbau der Erde, die sich aus geophysikalischen Messungen ergeben. Anhand der Abbildungen kann eingeführt werden, (1.) dass sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit seismischer Wellen mit der Tiefe ändert (allgemein eine Zunahme mit der Tiefe, allerdings mit starken Sprüngen an bestimmten Grenzflächen), (2.) dass bei seismischen Untersuchungen vor allem zwei Wellenarten im Vordergrund stehen, Kompressions- (P-) und Scherwellen (S-Wellen), (3.) dass geschmolzene Bereiche im Erdinnern durch einen Abfall in der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Kompressionswellen und einen Wegfall von Scherwellen erkennbar sind ("Kernschatten" des geschmolzenen äußeren Kerns). Seite 12 stellt die seismischen Daten in Beziehung zu einer Verdichtung der Struktur der Minerale des Erdmantels.

S. 14-17: Die Diamantstempelzelle als ein Beispiel für Methoden der experimentellen Petrologie

S. 18-19: Gliederung des Erdmantels nach seismischen und experimentellen Befunden. Eine erhebliche Verdichtung der Erdmantelgesteine geht auf eine Veränderung in der Packungsart der Sauerstoffatome zurück. Bei hohen Drucken (großen Tiefen) liegen im Erdmantel daher Phasen vor, die die dichtere, kubische Sauerstoffpackung aufweisen.

S. 20-21: Die beiden wichtigsten Erdmantelgesteine Peridotit und Eklogit

Diamanten, Kristalle aus dem Erdmantel

S. 22-23: Diamanten werden von aufsteigendem Magma an die Erdoberfläche transportiert. Die Vulkanform ähnelt den Maarvulkanen der Eifel. Es handelt sich um explosiv gebildete Tuffschlote, die karottenförmig 1-2 km unter die Erdoberfläche herabreichen können.

S. 24-29: Diamanten in verschiedenen Gesteinen: (1.) in einem Erdmantelgestein, in dem dieser Diamant sich auch ursprünglich bildete (S. 24), (2.) in Kimberlit, dem vulkanischen Gestein, das die primären Diamantlagerstätten enthält und (3.) in einem Sedimentgestein (S. 28), in das der Diamant durch die Prozesse der Verwitterung und Umlagerung gelangte.

S. 30: Einschlüsse in Diamanten

S. 31-32: Vergleich der beiden Kohlenstoffmodifikationen Graphit und Diamant

S. 33: Verschiedene Formen, in denen Diamant auftreten kann. Ursachen sind sowohl unterschiedliche Wachstumsbedingungen als auch spätere Resorption der Diamanten im Erdmantel (dodekaedrische Diamanten) und im aufsteigenden Kimberlitmagma.

Wirtschaftliche und technische Bedeutung von Diamant

S. 34: Wirtschaftliche Bedeutung von Diamant

S. 35: Ein technisch-angewandter Aspekt. Die Herstellung von dünnen Diamantfilmen und Diamantfenstern bei niedrigen Drucken durch Chemical-Vapor-Deposition (CVD) eröffnet neue Möglichkeiten in der Materialforschung (bedingt vor allem durch die hohe Härte und die sehr gute Wärmeleitfähigkeit von Diamant).