

# Kap.3 Kohle und Kohlenstoff

---

## 3.1 Holzkohle

ist die älteste Form, in der der Mensch sich den Kohlenstoff für seine Zwecke angeeignet hat. Die Holzkohlegewinnung war schon in frühesten Zeiten bekannt und wurde in Europa bis ins 18. Jahrhundert in großem Stile betrieben. Die Köhler fällten Baumstämme und schichteten sie zu großen Häufen auf, den Kohlenmeilern. Diese wurden mit Erde abgedeckt und unten angezündet. In der Hitze verschwelte das Holz im Meiler, Holzgas (Methan, Aceton, Wasser, Essigsäure u.a.) und Holzteer entwichen und zurück blieb die poröse Holzkohle, die recht reinen Kohlenstoff darstellt. Unter Luftzufuhr brennt sie rauchlos und entwickelt beim Brennen keine unangenehmen Gase, ohne zusätzlich Luft glüht sie durch, sodass Kohlebecken auch als offene Heizquelle dienen konnten. Daneben war die Holzkohle für die Gewinnung von Metallen, zuerst Kupfer bzw. Bronze, seit der römischen Zeit auch zunehmend Eisen, wichtig. Heute verwenden wir Holzkohle meist nur als Grillkohle.

## 3.2 Steinkohle

Das "schwarze Gold", die *Steinkohle*, schlummerte über hunderte von Millionen Jahren in den Tiefen der Erde. Alle Steinkohlen sind während eines Zeitraums von etwa 40 Millionen Jahren, den die Geologen als das "Carbon" (lat. *carbo*, Kohle) bezeichnen, entstanden. Riesenhafte Wälder von Farn-, Schachtelhalm- und Bärlappbäumen müssen damals weite Teile der Erde bedeckt haben. Zudem muss das Klima so gewesen sein, dass diese Pflanzen mit enormer Geschwindigkeit wuchsen, abstarben, von neuem überwachsen wurden, so dass sich dicke Schichten abgestorbener Blatt- und Holzmassen bilden konnten, die keine Zeit hatten, durch Fäulnis und Pilzbefall zu verrotten. Wurden diese Schichten dann von Sedimenten, Sand und Ton, überlagert, so gelangten sie mit zunehmender Versenkung in heißere Erdschichten, wo sie begannen, sich umzuwandeln. Sauerstoff und Wasserstoff traten als Wasser in die Gesteinsporen aus und zurück blieb ein Konglomerat hochkondensierter aromatischer Verbindungen, durchsetzt mit Kohlenstoff, die Steinkohle. An Stellen, wo diese Umwandlung, in der Geologie als Metamorphose bezeichnet, besonders weit ging, blieb nahezu reiner Kohlenstoff, Anthrazit, zurück. Diese Steinkohle holen wir heute in Schachtbergwerken aus bis zu 1200 m Tiefe ans Tageslicht.

Die Kohlelager, z. B. in Europa, sind keineswegs willkürlich verstreut, sondern ziehen sich in einem breiten Band von Südengland über Belgien, Lothringen, Saar- und Ruhrgebiet bis nach Schlesien und markieren eine Zone, an der der europäische Kontinent einst aus Stücken zusammenwuchs (variszische Gebirgsbildung während des Carbon).

## 3.3 Braunkohle

Aus erdgeschichtlich viel jüngerer Zeit, den Erdzeitaltern des Jura, der Kreide und des Tertiär (vor 60 – 30 Millionen Jahren), stammt die *Braunkohle* mit großen Abbaugebieten in Deutschland im Rheinischen Revier zwischen Aachen und Köln und aktuell noch in der Lausitz südlich von Cottbus. Die Pflanzen, aus denen sich die Braunkohle bildete, waren unseren heutigen Erlen und Pappeln viel näher als die urtümlichen Steinkohlewälder. Dies kann man genau an den in der Kohle konservierten Abdrücken von Holz, Blättern und Samen erkennen. Die Schichten, die heute die Braunkohlelager bedecken, bestehen nicht aus festem Gestein wie bei der Steinkohle, sondern aus Sand, Kies und Ton. In solche Lockermassen kann man nicht gut Stollen graben. Deshalb wird Braunkohle im Tagebau abgebaut. Zunächst wird eine

große, längliche Grube ausgebaggert, die bis in die Tiefe reicht, wo sich die Kohleschichten finden, 100 bis 400 m unter der Oberfläche. Diese Gruben laufen terrassenförmig nach unten, so dass auf den Absätzen sich Fahrzeuge bewegen können. Die Kohle selbst liegt in mehreren Schichten von  $\frac{1}{2}$  m bis über 20 m Mächtigkeit. Sie wird von riesigen Schaufelradbaggern abgegraben, auf Förderbänder geschüttet und über diese, oft zig kilometerweit, aus der Grube befördert.

Dort wo die Kohleschichten abgebaut werden sollen muss zuerst der überlagernde Grund abgetragen werden. Dies geschieht ebenso mit großen Schaufelbaggern. Das Material wird nun zum anderen Rand der Grube transportiert, wo die Kohle schon entfernt wurde, und dort abgelagert. Auf diese Weise bewegt sich der Tagebau langsam durch die Landschaft; wo er einmal war ist der Boden unter ihm entkohlt. Die Kohle ist so wertvoll, dass es sich lohnt, Dörfer, die über Kohleschichten liegen, umzusiedeln und abzureißen.

Den Beginn des Verkohlungsprozesses kann man bei der Humusbildung studieren. Jede Ackererde enthält neben den Mineralbestandteilen einen gewissen Anteil an Humus, der aus abgestorbenen Pflanzenresten stets neu gebildet wird. Ein Teil des Humus kann mit Lauge herausgelöst werden, ein Teil ist aber auch schwarz und völlig unlöslich und dieser ist der Braunkohle bereits ähnlich. Eine Vorstufe der Braunkohle ist der Torf, der sich auf moorigem Grund aus abgestorbenen Pflanzen bildet und zu zig Meter mächtigen Schichten anwachsen kann.



Abb. 3.1 Braunkohletagebau

Braunkohle wird meist direkt in Kohlekraftwerken verbrannt, die in der Nähe des Tagebaus errichtet werden. Da sie noch im Bereich des Grundwassers liegt enthält sie meist viel Feuchtigkeit und muss zuerst getrocknet werden. Die getrocknete Kohle wird staubfein gemahlen

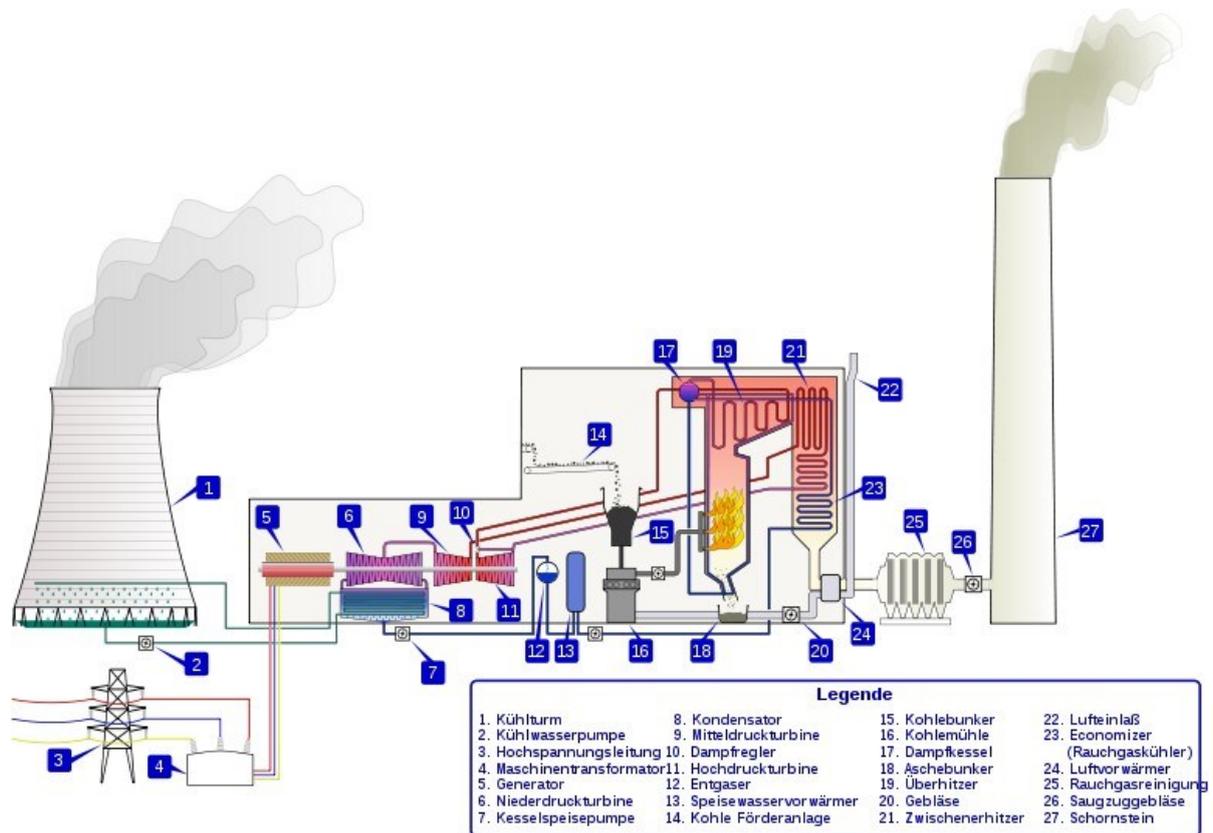


Abb. 3.2 Schema eines Kohlekraftwerks

und der Kohlestaub in die Kesselflamme eingeblasen. Im Kessel wird über Wärmetauscher Wasserdampf von bis zu 600°C erzeugt. Dieser wird auf die Turbine geleitet, die den Generator antreibt, der den elektrischen Strom erzeugt. Die Kraftwerke sind von weitem an den Kühltürmen zu erkennen, die bei feuchtem Wetter große Dampfwolken ausstoßen. Der aus der Turbine ausströmende Wasserdampf wird in einem Dampfkühler durch einen weiteren Kühlwasserkreislauf soweit abgekühlt, dass er zu Wasser kondensiert. Die Kondensation bedeutet eine gewaltige Volumenverminderung (1 l flüssiges Wasser nimmt als Dampf etwa 1400 l Volumen ein), was hinter der Turbine einen Unterdruck erzeugt, der diese zusätzlich antreibt. Das jetzt erwärmte Kühlwasser wird im Kühlturm versprüht, wobei ein Teil davon verdampft, was die sichtbare Dampfwolke bedingt und durch die Verdampfungswärme kühlt sich das restliche Wasser soweit ab, dass es dem Dampfkühler wieder zugeführt werden kann.

Solche Großfeuerungsanlagen erlauben die wirtschaftliche 'Entschwefelung' und 'Entstickung' der Rauchgase. Da die Braunkohle, ähnlich wie die Steinkohle, immer etwas Schwefel (bis zu 3%) enthält, auch pflanzliches Eiweiß hat einen gewissen Anteil an Schwefel, entsteht bei der Feuerung Schwefeldioxid,  $\text{SO}_2$ . Zusammen mit dem Kohlenstaub wird nun etwas fein gemahlener Kalk in die Flamme eingesprüht. Dieser zersetzt sich in der Hitze ähnlich wie beim Kalkbrennen (s. 10.1) zu Calciumoxid, das als Base mit dem sauren  $\text{SO}_2$  zunächst zu Calciumsulfid,  $\text{CaSO}_3$ , und mit Sauerstoff weiter zu Calciumsulfat,  $\text{CaSO}_4$ , Gips, reagiert. Der Gips wird zusammen mit der Flugasche in Rauchfiltern aus dem Abgas entfernt und kann im Baugewerbe verwendet werden.



Für die Entstickung, die Entfernung der Stickoxide  $\text{NO}_x$ , wird in die Flamme Ammoniak eingeblasen. Die Stickoxide reagieren damit zu Stickstoff und Wasser.



Was bislang unweigerlich in die Atmosphäre entweicht, ist das Kohlendioxid, der "Klimakiller". Es existieren Pläne für Versuchskraftwerke, bei denen das Kohlendioxid abgetrennt und in alte Stollen verpresst werden soll. Natürlich muss dazu ein Teil der gewonnenen Energie verwendet werden, so dass ein solches Kraftwerk insgesamt mit einem geringeren Wirkungsgrad arbeitet.

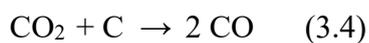
### 3.4 Koks

Die Steinkohle wird heute außer zur Feuerung von Kraftwerken hauptsächlich in Hüttenwerken gebraucht, vornehmlich für die Erzeugung von Eisen bzw. Stahl. Hierzu ist das Steinkohle genannte Gemisch aus Kohlenwasserstoffen, das man aus den Bergwerken gewinnt, aber nicht direkt geeignet. Erste Versuche um die Mitte des 18. Jahrhunderts, für die Eisengewinnung Steinkohle anstatt der damals üblichen Holzkohle einzusetzen, endeten kläglich, das so gewonnene Eisen war unbrauchbar.

Um eine hochofentaugliche Kohle zu gewinnen, müssen die Steinkohlenverbindungen in Kohlenstoff überführt werden. Das geschieht durch Erhitzen unter Luftabschluss. Dafür wird die Steinkohle in mit Schamotte ausgemauerte Kammern gefüllt, die von außen beheizt werden und eine Temperatur von  $>1000^\circ\text{C}$  erreichen müssen. Eine solche Hitzebehandlung nennt man eine Pyrolyse. Dabei gibt die Steinkohle eine brennbare Gasfraktion, Leuchtgas und Leuchtöl, eine wässrige Fraktion, überwiegend Wasser, Ammoniak und Schwefelwasserstoff sowie eine Teerfraktion ab, den Steinkohlenteer. Im 19. Jahrhundert war dieser Steinkohlenteer ein wichtiger Rohstoff für die erste chemische Industrie. Zurück bleibt ein durch die Entgasung porös gewordener Kohlenstoff, der *Koks*, der daneben nur noch die mineralischen Bestandteile enthält, die beim Verbrennen als Asche über bleiben. Das Verfahren der Verkokung wurde 1713 von A. Darby in England erfunden und ab dann wurden Hochöfen gebaut, die mit mineralischer Kohle statt der knapp gewordenen Holzkohle betrieben werden konnten.

### 3.5 Kohleverbrennung und Kohlevergasung

Verbrennungsprodukte von Kohlenstoff sind Kohlendioxid,  $\text{CO}_2$  und Kohlenmonoxid,  $\text{CO}$ . Im offenen Feuer verbrennt Kohle zu Kohlendioxid. Bei genügender hoher Temperatur,  $>1000^\circ\text{C}$ , entsteht jedoch zunehmend Kohlenmonoxid, weil sich Kohlendioxid nach



mit Kohle zum Monoxid umsetzt, sog. Boudouard-Gleichgewicht. Es ist dies ein spezieller Fall des allgemeinen Prinzips, nach welchem exotherme Reaktionen, hier die vollständige Verbrennung zu  $\text{CO}_2$ , bei hoher Temperatur gehemmt sind. Das Boudouard-Gleichgewicht spielt eine große Rolle bei der Verhüttung von oxidischen Erzen im Hochofen.

Ein Teil der Kohle dient auch als Rohstoff für die chemische und petrochemische Industrie. Bei der sog. 'Kohlevergasung' wird glühender Koks bei  $>1000^\circ\text{C}$  mit Wasserdampf umgesetzt und reagiert nach



zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Das Gasgemisch wird als Synthesegas bezeichnet, da es zur Herstellung verschiedener Grundstoffe der organischen Synthesechemie dient. Auch der technisch gebrauchte Wasserstoff für Hydrierungen stammt überwiegend aus der Kohlevergasung. Das Verfahren läuft in der Weise, dass der Koks in einem großen Reaktor zunächst unter Luftzufuhr zum Teil verbrannt wird und sich dabei auf die nötige Reaktionstemperatur erhitzt. Danach wird Wasserdampf eingeblasen und Synthesegas gewonnen. Bei dieser Reaktion kühlt sich die Mischung wieder ab und muss dann von neuem mit Luft 'angeblasen' werden.

## 3.6 Graphit und Graphen

### A Graphit

Reinen, einheitlich aufgebauten Kohlenstoff gibt es in zwei Formen, als recht seltener Graphit und als noch viel seltenerer Diamant. Graphit ist das Endglied des oben geschilderten Metamorphoseprozesses bei der Steinkohlebildung und findet sich an einigen Stellen in Gesteinen. Die Eigenschaften von Graphitkristallen bzw. von weichem Graphitpulver spiegeln den inneren Aufbau des Stoffes. Kohlenstoffatome sind in Sechseckschichten angeordnet, sodass jedes Atom drei andere zu Nachbarn hat. Die Schichten liegen so übereinander, dass jedes zweite Atom einer Schicht in die Sechseckmitten der darüber und darunter liegenden Schicht zeigen, die anderen Atome liegen direkt übereinander (Abb.3.5). Der Abstand zwischen benachbarten (je 3) Kohlenstoffatomen in einer Schicht ist  $1.42 \text{ \AA}$  ( $1.42 \cdot 10^{-7} \text{ mm}$ ). Hingegen ist der Abstand der Schichten mit  $3.35 \text{ \AA}$  viel größer. Die Schichten bedingen die Blättchenstruktur des makroskopischen Materials. Da sie leicht gegeneinander verschiebbar sind und so die Kriställchen aufblättern hat Graphit eine weiche Konsistenz und wird deshalb als flüssigkeitsfreies Schmiermittel verwendet. Man kann Graphitpulver als Türschloss-enteiser kaufen und macht damit Schlösser von Autotüren, in die Wasser eingedrungen und gefroren ist, gängig.

Graphit ist ein recht guter Leiter für den elektrischen Strom (spezifische Leitfähigkeit  $\Lambda = 2.6 \cdot 10^4 \text{ } \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ), d. h. ein Kriställchen von 1 cm Kantenlänge hat einen Widerstand von nur  $4 \cdot 10^{-5} \text{ } \Omega$ . Das gilt aber nur in Richtung der Schichten. Senkrecht dazu ist der Widerstand  $10^4$  (zehntausend) mal größer. Formteile aus Kohle, die aus ungeordneten Graphitteilchen besteht, leiten den Strom noch immer gut genug, um als elektrische Kontakte (sog. 'Bürsten'), z. B. am Kollektor von Elektromotoren oder Generatoren, oder als Elektrodenmaterial zu dienen.

Daneben ist Graphit sehr widerstandsfähig gegen aggressive Chemikalien, Säuren, Laugen, Chlorgas, Salzsäuren, und wird daher oft als Elektrodenmaterial bei Elektrolysen eingesetzt (s. Herstellung von Aluminium). Es gelingt z. B. nicht, Graphitpulver an der Luft mit einem Bunsenbrenner zu entzünden, auch wenn das Material hell glüht. Sollen Stoffe bei hoher Temperatur miteinander zur Reaktion gebracht werden, wird dazu ein Graphittiegel, der auch als Elektrode dienen kann, oder ein Elektroofen verwendet, in welchem zwischen Graphitelektroden ein Lichtbogen erzeugt wird.





Abb. 3.4 Naturgraphit

Abb. 3.3 Kohlebürsten

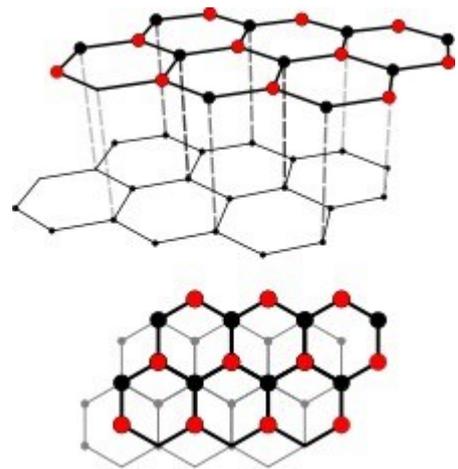
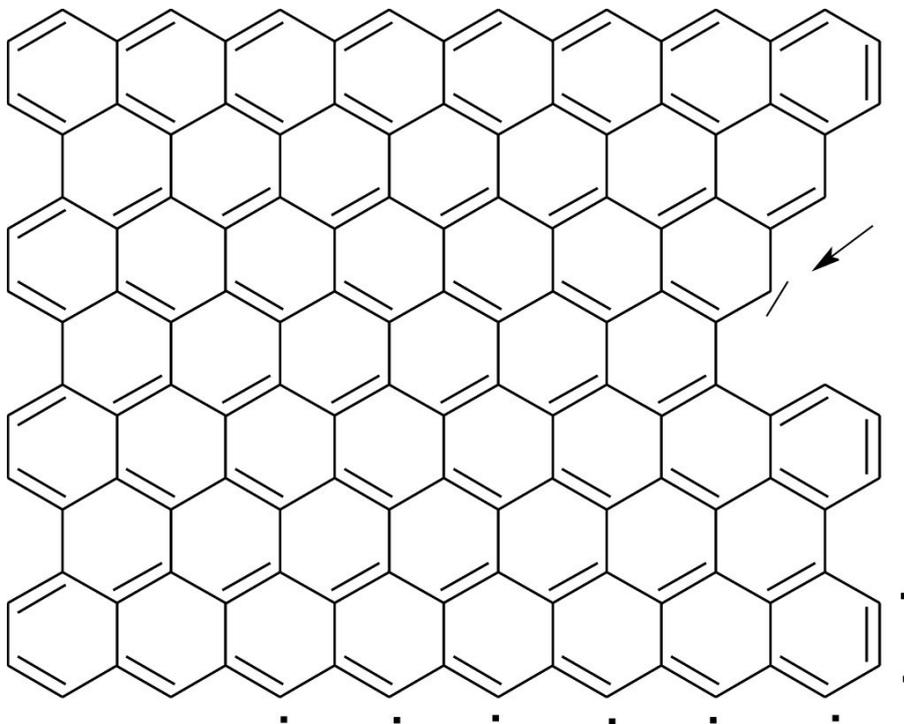


Abb. 3.5 Graphitgitter

Große Bedeutung hat künstlicher Graphit in neuerer Zeit als Bestandteil der Lithium-Ionenbatterie (s. Kap. 13) erlangt. Hierbei wandert bei der Aufladung elementares Lithium (als Li-Atome) zwischen die Graphitschichten und bei der Entladung als Li-Ionen wieder heraus in den Elektrolyten.

## B Graphen

Mittlerweile ist es sogar gelungen, auf einem geeigneten Trägermaterial eine einzige Graphitschicht, d. h. eine monoatomare Sechsecklage mit makroskopischer Ausdehnung in der Fläche, abzuschneiden. Für dieses "Graphen" wurde im Jahr 2010 ein Nobelpreis verliehen.



Es existieren mittlerweile ein Anzahl von Techniken, um solche Graphen-Blättchen herzustellen. Sie basieren alle darauf, Schichten von einem Graphit-Einkristall abzulösen. Wird z. B.

ein Klebeband aufgelegt und abgezogen, bleiben eine Anzahl Graphitlagen daran haften. Der Vorgang wird so oft wiederholt, bis eine monoatomare Schicht über bleibt. Diese kann durch Auflösen der Klebmasse abgelöst und auf ein geeignetes Substrat übertragen werden. Bemerkenswerterweise haben die isolierten Graphenschichten nicht die Tendenz, sich wieder zum Graphit zusammen zu lagern. Das kann man verstehen, wenn eine Graphenschicht als ein kondensierter Aromat riesenhaften Ausmaßes (im atomaren Maßstab) angesehen wird. Das an jedem Kohlenstoffatom noch übrige 4te Valenzelektron, welches im Graphit die Bindung zwischen den Schichten besorgt, ist im Graphem über das ganze Molekül delokalisiert, hier dargestellt als Doppelbindung. Die Doppelbindungen sind allerdings nicht lokalisiert. (Vgl. die Erklärungen für Benzol in Kap. 15) Nur am Rand müssen diese Elektronen durch angebundene chemische Gruppen abgesättigt sein.

### 3.7 Ruß

Ist ein Kerzendocht zu lang, oder wird Benzin abgebrannt, so entlässt die Flamme eine Rußfahne. Auch Ruß ist Kohlenstoff und zwar ziemlich reiner und er kann noch zu vielem andern dienen als nur dem Schwarzen Peter eine schwarze Nase zu malen. Industriell werden eine Anzahl verschiedener Rußsorten für unterschiedliche Anwendungen durch Verbrennen von Erdöl und Erdgas bei ungenügender Luftzufuhr, ähnlich der rußenden Kerzenflamme, hergestellt, wobei die Flammengase oft an kalten Flächen oder durch Einleiten in Wasser abgeschreckt werden. Die Weltjahresproduktion liegt im Bereich von  $10^9$  t.

Alle Ruße bestehen aus submikroskopisch kleinen (20 – 30 Å), nur mit dem Elektronenmikroskop sichtbar zu machenden, kugeligen Kohlenstoffteilchen, die Ausschnitte von zusammen gebogenen Graphitschichten darstellen. Diese kleinsten Rußteilchen lagern sich zu den größeren Aggregaten zusammen, die wir mit bloßem Auge sehen.

Die Hauptmenge des Industrierußes geht in die Produktion von Gummi, insbesondere von Autoreifen, die deshalb auch schwarz sind. Die Gummimasse selbst, natürlicher oder künstlicher Kautschuk, ist elastisch aber auch klebrig und bleibt auf allen Oberflächen haften. Erst die Beimengung mineralischer Füllstoffe wie Zinkoxid, Schwefel und eben Ruß erzeugt das nicht mehr klebende Material. Der Schwefel verbindet beim Erhitzen die Kautschukmoleküle und der Ruß nimmt dem Gummi die Klebrigkeit. Das Verfahren des Vulkanisierens wurde von dem Amerikaner Charles Goodyear 1839 durch einen berühmten „wissenschaftlichen Zufall“ entdeckt. Eine Schwefel-Kautschuk-Mischung fiel auf eine heiße Herdplatte, und das Ergebnis war eine trockene und dauerhaft elastische Substanz. Seitdem kann man aus Kautschuk in der Praxis verwendbaren Gummi herstellen.

Eine weitere wichtige Verwendung von Ruß ist die als schwarzes Farbpigment. Nicht nur die Druckerschwärze für Bücher und Zeitungen, auch alle schwarzen Kunststoffteile bekommen ihre Färbung durch Ruß und schwarze Tusche ist eine Aufschlämmung von Ruß in Wasser/Glycerin.

Durch Erhitzen von kohlenstoffhaltigem Material ähnlich wie bei der Herstellung von Holzkohle kann kompakter Kohlenstoff mit vielen Poren, d. h. mit einer großen inneren Oberfläche (bis zu  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ ) erhalten werden. Es wird dabei vor der Pyrolyse Salz zugesetzt, welches ein Zusammensintern der Kohlenstoffteilchen verhindert und das nachher herausgelöst wird. In den Poren mit ähnlicher Struktur wie bei den Rußen können sich Fremdstoffe anlagern, mitunter bis zum halben Eigengewicht der Kohle. Es sind dies sog. Aktivkohlen. Sie werden in industriellen Prozessen, besonders auch in der Lebensmittelindustrie als Klärmittel und Entfärbemittel eingesetzt.

### 3.8 Diamant

Es kam einer wissenschaftlichen Sensation gleich, als herausgefunden wurde, dass der Edelstein Diamant stofflich nichts anderes ist als reiner Kohlenstoff. Das Experiment lief so, dass auf einen Diamanten, der im Inneren eines luftgefüllten Glasgefäßes angebracht war, eine große Sammellinse gerichtet wurde, sodass sich der Diamant genau im Brennpunkt derselben befand. Schien die Sonne auf die Anordnung, so erhitze sich der Diamant und brannte ab. Anschließend konnte in dem Gefäß genau die Menge Kohlendioxid nachgewiesen werden, die zu erwarten war, wenn die Masse des Diamants reiner Kohlenstoff ist.

Diamanten findet man an einigen Stellen der Erde und zwar in ehemaligen Vulkanschloten wie dem Kimberley-Schlot bei Johannesburg in Südafrika. Während der aktiven Zeit des Vulkans war im Gestein eingeschlossener Kohlenstoff unter Luftausschluss gleichzeitig großem Druck und hoher Temperatur ausgesetzt. Dauern diese Verhältnisse lange genug an, so wandelt sich graphitischer Kohlenstoff in Diamant um. Entscheidend für die Umwandlung ist der Druck von tausenden von bar. Weil Diamant (Dichte  $3.514 \text{ g/cm}^3$ ) dichter ist als Graphit (Dichte  $2.26 \text{ g/cm}^3$ ) bildet er sich bevorzugt unter Druck. Die hohe Temperatur ist nur notwendig um die Umwandlung zu beschleunigen. Wird Diamant bei Normaldruck auf  $> 1500^\circ\text{C}$  erhitzt, wandelt er sich wieder in Graphit um. Umgekehrt werden heute im Tonnenmaßstab bei  $1800^\circ\text{C}$  und 100 000 bar aus Graphit künstliche Diamanten gewonnen. Die bis zu 1 mm großen Kriställchen haben keine Schmuckqualität und werden als Schleifmittel, zur Bestückung von Sägeblättern, z. B. für die Flex, und von Bohrspitzen verwendet.



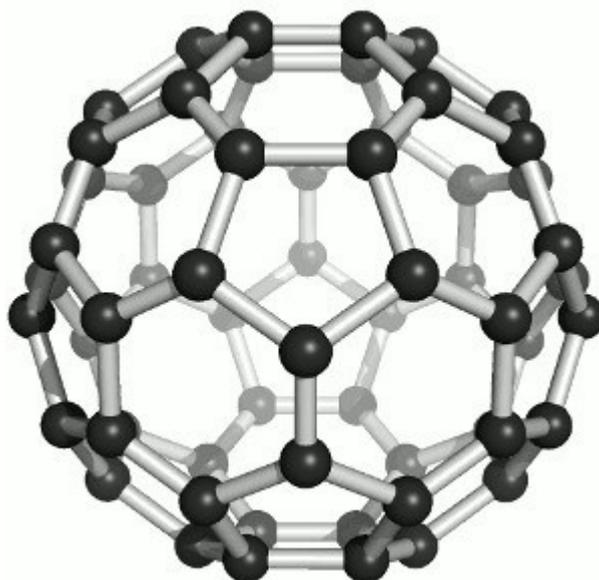
Durch Zersetzung von Kohlenwasserstoffgasen in Plasmen oder an sehr heißen Oberflächen können dünnste Schichten von Diamantkohlenstoff abgeschieden werden, die das darunter liegende Material vor Angriff schützen.

Wie kommt es zu der höheren Dichte und der großen Härte des Diamanten? Während im Graphit jedes Kohlenstoffatom mit drei Nachbarn in einer ebenen Schicht verbunden ist, sind im Diamant an jedes Kohlenstoffatom vier weitere und

zwar im Abstand von  $1.54 \text{ \AA}$  gebunden. Um ein gegebenes Atom bilden diese vier Nachbarn ein Tetraeder, so dass man sich den Aufbau auch als über Dreiecksflächen verknüpfte Tetraeder vorstellen kann (jede Tetraederfläche gehört zwei benachbarten Tetraedern an). Dadurch kommen die Kohlenstoffatome insgesamt näher aneinander zu liegen, was die höhere Dichte bedingt. Die große Festigkeit, bei gleichzeitig großer Sprödigkeit ist durch die Verknüpfung in allen Raumrichtungen bedingt.

### 3.9 Fullerene, Nanoröhrchen und Carbonfasern

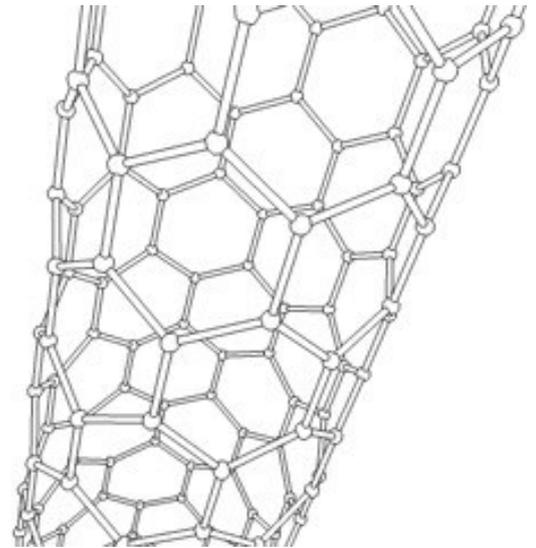
Seit etwa 1980 kennt die Wissenschaft noch weitere, neu Arten von Kohlenstoff. Aus einem Ruß, der bei sehr hoher Temperatur entstanden ist, kann man mit dem Lösungsmittel Toluol etwas Kohlenstoff in Form einer roten Lösung herauslösen. Nach dem Verdunsten des Lösungsmittels bleibt ein braunes Pulver zurück. Tritt Kohlenstoff in einer löslichen Form auf, so können die Atome nicht mehr in unendlicher Folge wie im Graphit oder Diamant ver-



knüpft sein, sondern es müssen Kohlenstoffteilchen einer bestimmten Größe und mit einer bestimmten Anzahl Atome, also Kohlenstoffmoleküle vorliegen. Eine Hauptfraktion des löslichen Rußes besteht aus Kohlenstoffmolekülen mit genau 60 Atomen, d. h. mit der molaren Masse  $12 \cdot 60 = 720$  g/mol. Die 60 Kohlenstoffatome bilden eine Kugel wie ein Fußball. Auch hier hat jedes Atom 3 Nachbarn (wie im Graphit) doch besteht die Anordnung aus 12 Fünfecken und 20 Sechsecken und zwar in der Weise, dass jedes Fünfeck nur an Sechsecke grenzt und jedes Sechseck an drei Fünfecke und andere Sechsecke, die sich ihrerseits nicht berühren. Um 1920 hatte der Bauhausarchitekt Richard Buckminster Fuller Kuppeln konstruiert, die diese Elemente enthalten und nach ihm wird diese Kohlenstoffart als *Fulleren* bezeichnet.

Neben dem  $C_{60}$  Fulleren gibt es weitere,  $C_{70}$ ,  $C_{76}$ ,  $C_{78}$ ,  $C_{80}$ , deren Form dann eher einem Rotationsellipsoid ähnelt. An den Fullerenen wurde eine Anzahl von chemischen Reaktionen durchgeführt, doch gibt es noch keine praktischen Anwendungen.

Näher an einer solchen Anwendung sind die Kohlenstoff-Nanoröhrchen. Denkt man sich aus einer Graphitschicht einen parallelen Streifen von 7 oder 10 Sechsecken Breite ausgeschnitten, zu einem Röhrchen gebogen und an der Naht zusammengefügt, dann hat man ein sog. *Nanoröhrchen* aus Kohlenstoff. Nano deshalb, weil der Durchmesser des (hohlen) Röhrchens im Nanometerbereich ( $10^{-7}$  mm) liegt (3.15 nm bei 10 Sechsecken). Die Röhrchen selbst können bis zu Bruchteilen von mm lang sein. Was sich von der Graphitstruktur erhalten hat ist die gute elektrische Leitfähigkeit entlang der Schichtebene, jetzt entlang der Röhrchenachse. Man kann sich ausrechnen, dass Bündel solcher Nanoröhrchen ein um ein Vielfaches höheres Leitvermögen haben als ein Kupferdraht mit gleichem Querschnitt und dazu noch erheblich leichter sind. In dieser Richtung wird wohl zunächst eine Anwendung des neuartigen Kohlenstoffs liegen.



Seit längerem in der praktischen Anwendung sind die Kohlenstofffasern, auch bekannt als *Carbonfasern*. Man gewinnt sie durch Pyrolyse von Kunststofffasern unter Zug. Auch sie weisen eine graphitartige Struktur und deshalb in Faserrichtung eine hohe Zugfestigkeit auf. Eingebettet in eine Kunststoffmatrix werden sie als sog. Verbundwerkstoffe eingesetzt wo mechanische Stabilität bei gleichzeitig geringem Gewicht verlangt wird: Tennisschläger, Rahmen und Felgen von Rennrädern, Skier, im Fahrzeug- und Flugzeugbau.