

Thema

Kohle ist nicht gleich Kohle

D. Riedel

1 Was ist Kohle?

● Kohle entsteht in der Natur durch Inkohlung in der Regel von Pflanzen (Braun- und Steinkohlenbildung im Gesteinsverbund) – Tabelle 1 zeigt die im Verlauf der Inkohlung entstehenden unterschiedlichen Kohlenarten und deren Zusammensetzung. Die Unterteilung erfolgt nach dem Gehalt an flüchtigen Bestandteilen, von der niedriginkohlten Flammkohle bis hin zum Anthrazit. Die flüchtigen Bestandteile werden ermittelt, indem eine Probe auf 900 °C erhitzt und die Menge der dabei freiwerdenden Gase bestimmt wird. Dies sind im Wesentlichen auch die Bestandteile, die sich während der Inkohlung von den ursprünglich im Pflanzenmaterial vorhandenen Molekülen abspalten, wie Wasser, Methan und Kohlenstoffoxide. Entweicht dieses Gasgemisch aus der Kohlenlagerstätte und sammelt sich in anderen geologischen Formationen. Auf diese Weise bilden sich dort Erdgaslagerstätten. Übrig bleibt Kohle, die entsprechend überwiegend aus molekular gebundenem Kohlenstoff besteht.

Auch bei einer unvollständigen Verbrennung von Holz entsteht Kohle, die dann Holzkohle genannt wird. Synthetisch wird dies im Kohlenmeiler bei der Verkohlung von Holz zu Holzkohle genutzt. Auch im Autoklaven kann Kohle hergestellt werden. Entscheidend dafür, dass sich Kohle bildet (natürlich wie synthetisch), sind erhöhte Temperaturen, Druck, und Zeit; wobei der „Reaktionsraum“ sauerstoffarm sein muss, da sonst der Kohlenstoff vollständig oxidieren und somit die Substanz verbrennen würde.

2 Inkohlung – die Kohleentstehung

● Bei der Umwandlung von Pflanzen unter Luftabschluss (mit Sauerstoff würden sie verwesen) unterscheidet man zunächst die *diagenetische* Phase, in der Porenwasser ausgepresst wird und die Substanz durch biochemische Prozesse in Torf umgewandelt wird und dann langsam in Braunkohle übergeht. Gelangen die Kohleschichten in größere Tiefe, wirkt durch die überlagernden Schichten und dem damit zunehmenden

Gebirgsdruck zunehmend eine höhere Temperatur auf die Kohle ein. Dies ist die sogenannte *geochemische* Phase. Neben der Temperatur ist vor allem die Zeit ein wichtiger Faktor, wie weit die Kohlendia-genese voranschreiten kann. So sind die Kohlen des Moskauer Beckens aufgrund der geringen Absenkung und damit Sedimentüberdeckung nur bis zur Braunkohle inkohlt worden, obwohl sie aus dem Karbon stammen, dem Zeitalter vor rund 350 Mio. Jahren, indem die Steinkohle der Ruhr-Lagerstätte entstand. Umgekehrt besitzt die tertiäre Pechkohle Oberbayerns bereits Ähnlichkeiten mit einer Steinkohle. Werden kohlenstoffreiche Sedimente im Rahmen einer Metamorphose hohen Temperaturen und Drücken ausgesetzt, so bildet sich das Mineral Graphit, der aus reinem kristallinen Kohlenstoff besteht. Läuft der Inkohlungsprozess sehr schnell bei höheren Temperaturen ab, so bildet sich Koks – so z. B. am Hohen Meissner bei Kassel, wo die Braunkohle von einem Vulkanschlott durchschlagen wurde und dort im Kontaktbereich zu Naturkoks entgaste.

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung von Braun- und Steinkohlen, u. a. nach [1], [2]

Kohlenart	Inkohlung	Kohlenstoff Gew.-%	Wasserstoff Gew.-%	Sauerstoff Gew.-%	Flüchtige Bestandteile Gew.-%	Heizwert* MJ/kg	
Braunkohle	niedrig	65–75	8–5,5	30–12	60–43	7 bis 13	
Steinkohlen:	↓	Flammkohle	75–81	6,6–5,8	> 9,8	45–40	< 32
Gasflammkohle		81–85	5,8–5,6	9,8–7,3	40–35	33 bis 34,2	
Gaskohle		85–87,5	5,6–5,0	7,3–4,5	35–28	33,9 bis 34,8	
Fettkohle		87,5–89,5	5,0–4,5	4,5–3,2	28–19	34,5 bis 35,6	
Esskohle		89,5–90,5	4,5–4,0	3,2–2,8	19–14	35,2 bis 35,6	
Magerkohle		90,5–91,5	4,0–3,75	2,8–2,5	14–12	35,2 bis 35,5	
Anthrazit		> 91,5	< 3,75	< 2,5	< 12	35 bis 35,3	
Graphit **	hoch	100	0	0	0	32,8	

alle Angaben Wasser- und aschefrei

* Der mittlere Heizwert der 2007 geförderten Steinkohle betrug rund 30 MJ/kg, der von Braunkohlen 9 MJ/kg

** Graphit zählt nicht mehr zu den Kohlen, stellt aber das Ende der Inkohlung dar.

Gering inkohlte Kohlen lassen entsprechend ihrer organischen Herkunft noch organische Texturen erkennen. So sind vielfach Zellenwände erhalten (Abb. 1).

Mit Zunahme des Inkohlungsgrades verschwinden diese, bis im Anthrazit eine organische Herkunft im Mikroskop nicht mehr nachweisbar ist. Die aus den verschiedenen Pflanzenbestandteilen entstehenden Kohlensubstanzen sind zunächst noch sehr heterogen. Makro- wie mikroskopisch sind verschieden reflektierende Bestandteile und Streifen in der Kohle erkennbar, die sogenannten Macerale. Diese sind bei Braunkohlen noch sehr vielfältig und können zu Gruppen zusammengefasst werden (Huminit, Liptinit, Inertinit); in Steinkohlen ist die Varianz kleiner. Die entsprechenden Maceralgruppen werden hier Vitrinit, Exinit und ebenfalls Inertinit genannt. Die Vitrinite lassen sich aus den holzigen Partien, Exinite aus Harzen, Zellwänden, Sporen und Algen ableiten. Mithilfe der Maceralzusammensetzung lässt sich der Inkohlungsgrad genau bestimmen.

3 | Chemische Zusammensetzung

● Während der Inkohlung werden die großen Kohlenwasserstoffmoleküle der Pflanzen (Eiweiße, Harze, Lignin, etc.) aufgrund der höheren Temperatur im Laufe der Zeit unter Luftabschluss in kleinere Moleküle zerlegt. Die chemische Struktur ist gekennzeichnet von „aromatischen Clustern mit zwei bis fünf kondensierten Ringen, die aliphatische, hauptsächlich kurz-kettige, Gruppen sowie phenolische OH-Gruppen als Substituenten tragen und miteinander durch Methylen- und Etherbrücken verbunden sind ... Nach heutigem Wissensstand bildet die Kohle ein Zweiphasensystem, in dem niedermolekulare Substanzen durch schwache Bindungen wie Wasserstoffbrücken oder Van-der-Waals-Kräfte an das makromolekulare Netzwerk gebunden sind.“ [3]. Als Beispiel für die pflanzliche Herkunft können länger-kettige Paraffine dienen, die offenbar aus Pflanzenwachsen stammen. Bei Kohle handelt es sich also immer noch um ein heterogenes Gemisch. Ein „Kohlemolekül“ im eigentlichen Sinne gibt es nicht. Als „Kohlemolekül“ werden beispielhafte Verknüpfungen von Baugruppen bezeichnet, die in der Kohle vorkommen können. Ein Beispiel ist das Modell von Given (Abb. 2).

Die „Kohlemoleküle“ sind zueinander lamellenartig angeordnet, wobei die aroma-

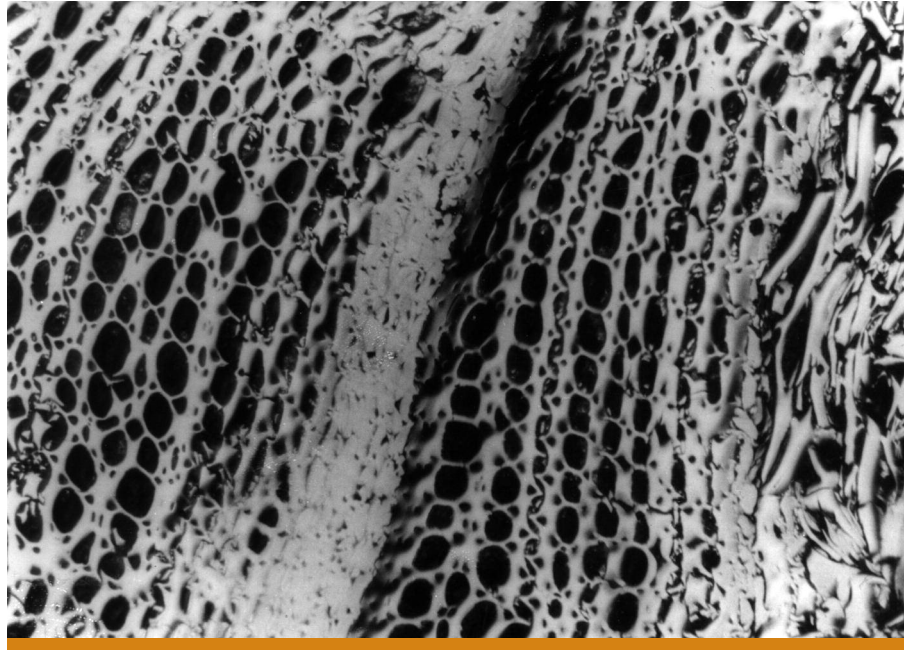


Abb. 1: Mikroskopische Aufnahme einer gering inkohlten Steinkohle. Deutlich erkennbar sind die Zellstrukturen. Maßstab: Untere Bildkante entspricht 0,5 mm (Foto: ehem. Steinkohlenbergbauverein, Essen)

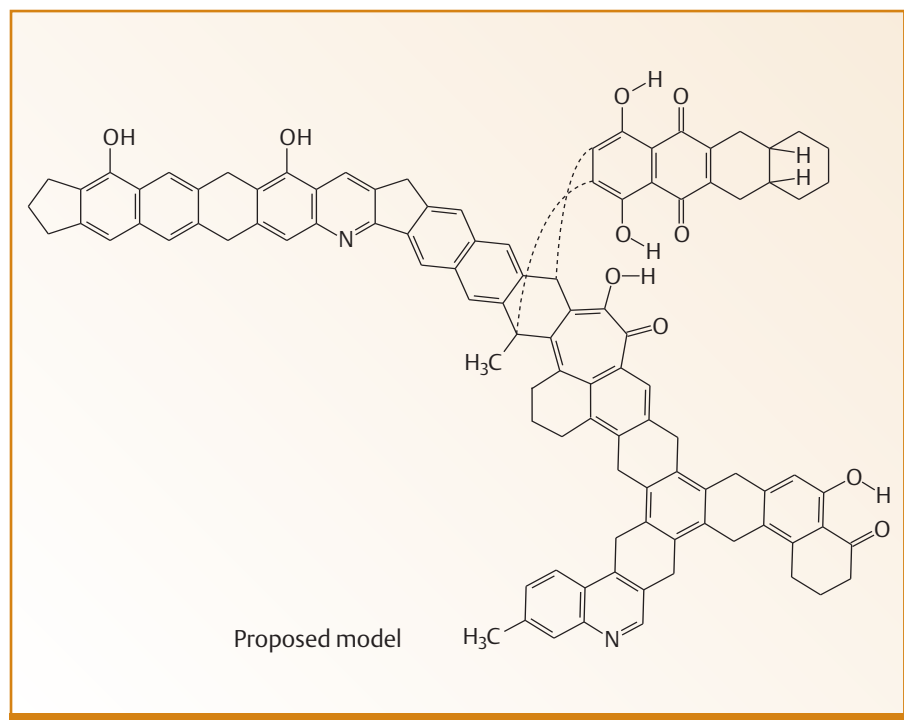


Abb. 2: Mögliche C-Vernetzungen in Kohle (sog. „Kohlemolekül“) [4]

tischen Baugruppen weitgehend planar zueinander liegen. Die aliphatischen Baugruppen ragen dreidimensional aus der Ebene heraus [5]. Die molaren Massen werden von 500 u (niedrig inkohlte Kohlen) bis zu möglichen 100000 u (Anthrazit) angegeben [6]. Neben Kohlenstoff, der zu mindestens 65 % (Weichbraunkohle) bei der Braunkohle und zu mindestens 75 % (Flammkohle) bei der Steinkohle Hauptbestandteil

ist, sind vor allem Wasserstoff und Sauerstoff in der Kohle vertreten.

4 | Nutzung der Kohlen

● Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzungen der verschiedenen Kohlenarten eignen sich diese auch in unterschiedlichem Maß für die verschiedenen Einsatzbereiche. So besitzt Anthrazit eine



Abb. 3: Steinkohlenabbau im untertägigen Streb: a) Hobel, b) Walzenschrämlader (Foto: RAG, Herne)

hohe Festigkeit und einen hohen Brennwert und eignet sich insbesondere für Kohlebrennöfen aber auch als Feinkohle für Kraftwerke. Diese müssen aber wegen der relativ hohen Flammtemperatur speziell ausgelegt sein. Fettkohlen eignen sich wegen der „Blähbarkeit“ hervorragend zur Herstellung von Koks – andere Kohlearten zerfallen dagegen bei der Verkokung. Unter Blähbarkeit versteht man die Fähigkeit der Kohle, aufgrund eines höheren Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen und der Eigenschaft, sich im Bereich von ca. 400 bis 500 °C plastisch zu verhalten, bei der ther-

mischen Behandlung „aufzuschäumen“, so dass nach dem Erkalten ein poriger, grobstückiger Koks entsteht, der für die Hüttenindustrie z. B. zur Roheisenerzeugung erforderlich ist. Bei der Koksproduktion werden außerdem Gas und „Kohlenwertstoffe“ gewonnen, die in der chemischen Industrie als Grundstoffe zu zahllosen Produkten umgewandelt werden. Speziell die Kohle mit höheren Gehalten an flüchtigen Bestandteilen, das sind die geringer inkohlten Kohlen von der Braunkohle bis zur Gaskohle, werden vor allem zur Stromgewinnung in Kraftwerken eingesetzt. Vorzugs-

weise diese Kohlenarten eignen sich aufgrund ihrer chemischen Struktur für direkte Umwandlungsprozesse zu Kohleölen und Kohlegas, die zu Treibstoffen veredelt oder auch in der chemischen Industrie eingesetzt werden. Daneben gibt es weitere rohstoffliche Nutzungen von Kohle und Kohleprodukten in industriellen Prozessen oder Baustoffen, so z. B. spezielle Aktivkohlen oder Aktivkokse, die als Molekularsiebe und Filter eingesetzt werden, Elektroden etc.

5 | Geologische und geografische Verbreitung

● Nach der Pflanzen-Explosion im Karbon kam es in allen geologischen Zeiten zur Kohlenbildung. Die meisten bekannten Steinkohlenvorkommen entwickelten sich im Laufe der Erdgeschichte aus Pflanzen des oberen und mittleren Karbons und des Perms, die Braunkohle zumeist im Tertiär. Entsprechend der Entwicklungsgeschichte der Pflanzen können vor dem Karbon keine Kohlen aus höheren Pflanzen entstanden sein. Allerdings werden z. B. die Graphite des ostbayerischen Präkambriums als ehemalige Faulschlämme interpretiert, die durch eine Metamorphose entstanden sind. Solche Faulschlämme (Sapropelie) enthalten relativ viel organischen Kohlenstoff, der aus Algen und Zersetzungsprodukten besteht. Die daraus entstehenden Gesteine (Sapropelite, kohlenstoffreiche Schiefer-tone) sind weitverbreitet, aber in der Regel nicht abbauwürdig.

Damit es zur Kohlenbildung in nennenswertem Umfang kommt, ist eine hohe Bio-produktionsrate z. B. in subtropischem Klima über einen längeren Zeitraum erforderlich. Anschließend müssen die abgestorbenen Pflanzenteile schnell mit Sediment überdeckt werden und dürfen keinen Kontakt zu Sauerstoff haben. Ideal hierfür sind die sogenannten paralischen Vorsenken am Rand von Faltengebirgen (brackisch-marine Bildungen; Beispiel ist der nordwesteuropäische Kohlegürtel von Großbritannien über das Ruhrrevier in Deutschland bis nach Polen) und in limnischen intramontanen Becken (Süßwasserbildungen; Beispiel ist das saarlothringische Becken mit dem Saarrevier). Schließlich gibt es noch Kohlenbildungen in kontinentalen Trögen, die den letzteren vergleichbar sind (Süßwasserbildung; Beispiel Südafrika). Wenn im Laufe der Zeit die Überdeckung mächtiger wird, steigen Temperatur und Druck – der Inkoh-

lungsprozess beginnt. Wiederholt sich dieser Prozess, indem sich der Untergrund periodisch senkt und wieder hebt, dann bilden sich mehrere Kohlenflöze aus, die durch Sedimentlagen (Sande und Ton, die zu Sandstein und Tonschiefer werden) abgelöst werden. So sind im Oberkarbon des Ruhrreviers über 100 Flöze bekannt.

Größere Kohlenvorkommen gibt es geografisch gesehen zwar nur in einigen Ländern, allerdings auf allen Kontinenten der Welt. Die größten Lagerstättenreserven (sog. wirtschaftlich gewinnbare Vorräte) befinden sich vor allem in den USA, den Staaten der ehem. Sowjetunion, in China, Indien, Australien und Südafrika (Tab. 2). Die Kohlenvorräte der EU mit insgesamt 58,1 Mrd. t SKE (Braun- und Steinkohle) sind dabei höher als die von Australien. Allein die Steinkohlenvorräte Deutschlands werden mit 23 Mrd. t SKE angegeben; die geologischen Ressourcen werden hier sogar auf das zehnfache, d. h. 230 Mrd. t beziffert.

6 Gewinnungsmethoden

Weltweit wird Kohle im Tiefbau und im Tagebau gewonnen. Während die Tagebaukohle meist relativ kostengünstig gewonnen werden kann, sind für die untertägige Gewinnung bis in Teufen von weit über 1000 m, wie z. B. in Deutschland oder anderen europäischen Ländern, relativ kostenaufwendige technische Voraussetzungen zu schaffen. Mit der Tiefe einhergehende Temperaturen und Gebirgsdrücke bedürfen ausgefeilter Abbaufahrverfahren, Sicherheitsvorkehrungen, Klimatechnik, Logistik etc. Tendenziell dürfte auch in Ländern mit heute vorwiegend

Tagebaugewinnung der Abbau tiefer liegender Lagerstätten zunehmen und eines nicht mehr fernen Tages nur noch im Tiefbau möglich sein.

In Deutschland werden heute ausschließlich tertiäre Braunkohlen im Tagebau und karbonische Steinkohlen im Tiefbau gewonnen. Früher wurden auch Steinkohlen aus anderen geologischen Epochen gewonnen (z. B. aus der Kreide in Niedersachsen); allerdings handelte es sich dabei durchweg um kleinere Vorkommen von eher lokaler Bedeutung.

Braunkohle wird im Revier Rheinland, in der Lausitz, in Mitteldeutschland bei Leipzig und bei Helmstedt abgebaut. 2007 wurden 180,4 Mio. t Braunkohle, entsprechend 55,5 Mio. t SKE, gefördert. Große Bagger sind im Tagebau im Einsatz, um die Rohkohle auf Förderbänder zu bringen.

Steinkohle wird in den Revieren Ruhr, Saar und Ibbenbüren gewonnen. 2007 wurden in 8 Bergwerken 21,3 Mio. t Steinkohle (entsprechend 22,0 Mio. t SKE) gefördert. Anfang 2009 werden es noch 6 Bergwerke sein und 2013 sollen es nach derzeitiger Planung nur noch drei in dann zwei Revieren sein. Schon längst nicht mehr wird der vor allem in der ersten Hälfte des vorigen Jahrhunderts genutzte Abbauhammer zu Gewinnung von Steinkohle eingesetzt. Heute sind der Hobel (Abb. 3a) und der Walzenschrämlader (Abb. 3b) in Deutschland wie weltweit im Einsatz, elektronisch ausgerüstet und zumeist von übertage zentral gesteuert und überwacht. Der nahezu mannlose Abbau ist auch unter Tage schon mehr als eine technologische Vision.

Noch weiter gehen die Vorstellungen, Kohle untertägig zu vergasen. Dieses auch In-situ-Vergasung oder UCG (underground

coal gasification) genannte Verfahren stammt aus dem Beginn des 20. Jahrhunderts, wurde vor rund 25 Jahren bereits fortentwickelt und wird derzeit wieder in einigen Ländern intensiv wissenschaftlich untersucht. Dabei wird über Bohrungen ein Vergasungsmittel in tief liegende Kohleflöze eingebracht. Das dadurch entstehende Produktgas wird über eine weitere Bohrung zu Tage gefördert und weiter verarbeitet.

Literatur

- [1] H.-G. Franck und A. Knop, Kohleveredlung – Chemie und Technologie, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1979; nach G. Kölling und F. Schnur. In: J. Falbe (Hrsg.), Chemierohstoffe aus Kohle. Thieme, Stuttgart 1977
- [2] Ruhrkohlen Handbuch, 6. Auflage, Glückauf, Essen 1984
- [3] K. H. van Heek und W. Hodek, Kohle als makromolekulares System. in: Erdöl und Kohle – Erdgas – Petrochemie. Bd. 45, Heft 11, Nov. 1992
- [4] P. H. Given, The Distribution of Hydrogen in Coals and its Relation to Coal Structure, in: Fuel, Vol. 39, S. 147 ff., Butterworths Scientific Publ., London, 1960
- [5] C. L. Spiro, Space-filling models for Coal: a molecular description of coal plasticity, in Fuel, Vol. 60, S. 1121 ff., IPC Business Press, 1981
- [6] D. H. Sauter, Coal, in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, 2006
- [7] E. Meller, G. Milojcic, G. Schöning und F.-J. Wodopia (Hrsg.), Jahrbuch der europäischen Energie- und Rohstoffwirtschaft 2008, 115. Jg. VGE, Essen 2007

Tab. 2: Wirtschaftlich gewinnbare Stein- und Braunkohlenvorräte [7]

Land	Steinkohle Mrd. t	Braunkohle Mrd. t	Kohle insgesamt Mrd. t SKE
USA	111,3	135,3	207,5
Ehem. UdSSR	94,5	132,7	189,4
Indien	90,1	2,4	90,9
China	62,2	52,3	94,6
EU(25)	40,2	54,4	58,1
Deutschland	23,0	43,0	35,9
Australien	38,6	39,9	53,5
Südafrika	48,8	0	48,8
Welt	501,6	466,7	783,1

Anschrift des Verfassers

Dr. Detlef Riedel, Referent Öffentlichkeitsarbeit,
Gesamtverband Steinkohle, Rüttenscheider Str. 1–3,
45128 Essen, E-Mail: detlef.riedel@gvst.de

Verwendung von Steinkohle

Historische Entwicklung

M. Farrenkopf

1 | Historische Grundlagen der Kohlenutzung und -veredlung

Seitdem Steinkohle mit bergbaulichen Verfahren gewonnen und gefördert wird, liegt diesem Vorgang immer auch eine Vorstellung von der Verwendung oder Nutzung des Rohstoffes zugrunde. Erst die Verwendung für bestimmte Zwecke rechtfertigte den technischen und ökonomischen Aufwand bergbaulicher Produktion, mag dieser in den Anfangszeiten im Vergleich zum Übergang in die Phase der Industrialisierung auch begrenzt gewesen sein. Schon dem literarischen Werk des *Theophrast* ist zu entnehmen, dass den Griechen die Brennbarkeit der Steinkohle bekannt war, und im zweiten Jahrhundert n. Chr. nutzten die Römer diese in England zu Heizzwecken [1, S. 2]. Der Einsatz der Kohle als Brennstoff zur Erzeugung von Wärme blieb über zwei Jahrtausende deren alleiniges Nutzungsprinzip.

Ein erster grundlegender Wandel vollzog sich erst im Verlauf des 18. Jahrhunderts, als es von England ausgehend gelang, mineralische Kohle durch den thermischen Veredlungsprozess der Verkokung in Koks umzuwandeln [2]. Eine Veredlung sowohl von Stein- als auch von Braunkohle findet immer dann statt, wenn besagter Rohstoff nicht allein zu Heizzwecken eingesetzt, sondern auf mechanischem, thermisch-chemischem oder mikrobiologischem Wege behandelt und zweckgebunden verändert wird [3]. Sukzessive steigerte sich nun der Einsatz des mineralischen Koks anstelle von Holzkohle im Hochofen zur Eisenerzreduktion. In Verbindung mit der Entwicklung der Dampfmaschine zählt das Verkokungsverfahren zu den Basisinnovationen der Industrialisierung. Ohne die Einsatzmöglichkeiten von Steinkohlenkoks wäre der Übergang zur Massenstahlerzeugung im 19. Jahrhundert nicht möglich gewesen, und bis heute ist die Erzschnmelze im Hochofen unter Einsatz von mineralischem Koks das weltweit bestimmende Verfahren der Roheisenerzeugung.

Mit dem in der Industrialisierung einsetzenden Wachstum der Kohlenutzungsarten

stiegen die Qualitätsanforderungen an die Förderkohle. Letztere bildet ein Gemisch, das von den größten Stücken bis zum feinsten Staub aller Korngrößen reicht und mehr oder weniger große Mineralmengen enthält. Diese stammen aus den die Kohlenflöze begleitenden Gesteinsschichten oder sind als Bergemittel mit der Kohle verwachsen. Da sie als unverbrennliche Bestandteile sowohl den Heizwert der Kohle verringern als auch deren Transport verteuern, entwickelte der Bergbau bis in jüngste Zeit beständig optimierte Aufbereitungsverfahren [4, 5]. Ein Problem blieb zunächst die industrielle Nutzung der Feinkohle, die sich nur schlecht zu Feuerungszwecken einsetzen ließ. Eine Lösung für Braun- und Steinkohle ergab sich in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts durch die Entwicklung der Brikettieretechnik. Hierbei wurde die getrocknete Feinkohle unter Zusatz von Pech, einem Destillationsrückstand des bei der Verkokung anfallenden Teers, in Stempel- oder Walzenpressen unter hohem Druck zu Briketts verschiedener Form und Größe geformt.

Eine grundlegende Erweiterung der Verwendungsarten für Steinkohle resultierte gegen Ende des 19. Jahrhunderts aus technischen Innovationen der Verkokung. Es gelang, die bis dahin dominierenden Flammöfen so zu verbessern, dass die zum Erhalt von Kohlenwertstoffen notwendige Abkühlung des prozessbedingt anfallenden Rohgases ohne Beeinträchtigung des Wärmehaushalts der Öfen kompensiert werden konnte. Wenig später gelang es sogar, einen immer größeren Anteil als Überschussgas an fremde Nutzer abzugeben. So wurde es möglich, sowohl einen hüttenfähigen Koks als auch zentrale Grundstoffe für die seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wissenschaftlich und verfahrenstechnisch aufblühende chemische Industrie zu erzeugen. Die vorrangig aus dem Kokereigas gewonnenen Nebenprodukte waren Teer (Abb. 1), Ammoniak, Benzol und Schwefel [6–8], sie galten als Ausgangsstoffe für die Weiterverarbeitung in der Teerfarben- und Pharmaindustrie.

Die um 1900 errichteten Großkokereien wurden zumeist für den Betrieb innerhalb eines Energieverbands mit Hütten-, Gasversorgungs- oder Chemieanlagen konzipiert. Im Rahmen des Gasverbands Kokerei – Hütte wurde das kalorienreiche Starkgas der Kokerei an die Hütte abgegeben, während diese das im Hochofenprozess anfallende Gichtgas zur Unterfeuerung der Koksöfen zurückführte. Seit der Jahrhundertwende hatten die Kokereibetriebe ferner begonnen, das von den Kohlenwertstoffen befreite Gas an Städte und Kommunen zu Beleuchtungs- und Heizzwecken zu verkaufen. Der Wettbewerb mit den Gaswerken verlief dabei zumindest im Ruhrrevier mit Vorteilen für die Kokereien, da die Städte und Gemeinden gegen Ende des 19. Jahrhunderts in Erwartung lukrativer Gewinne zahlreiche Gasanstalten in eigenen Besitz übernommen hatten. Je mehr nun Koksgas zur Verfügung stand, umso mehr scheuten sie sich, die zum Teil veralteten Gasanstalten mit hohem Finanzbedarf zu erneuern. Immer häufiger schlossen sie dagegen Lieferverträge mit den umliegenden Kokereien ab, sodass beispielsweise in den Gemeinden Castrop oder Hamborn schon um 1900 erste Gasverteilungsnetze entstanden.

Die auf Basis der Verkokung entwickelte Kohlenchemie hatte bis in die 1930er-Jahre ein überaus breites Feld von Absatzprodukten geschaffen. Daneben wurden seit 1913 (*Friedrich Bergius*) und 1925 (*Franz Fischer* und *Hans Tropsch*) mit der Kohlenhydrierung bzw. Kohlenverflüssigung weitere kohlenchemische Veredlungsverfahren entwickelt. Im Rahmen der Autarkiebestrebungen des „Dritten Reiches“ kam der Kohlenverflüssigung eine wichtige Bedeutung für die Treibstofflieferung zu. So wurden seit 1936 zahlreiche Hydrierwerke im Ruhrgebiet gegründet. Unter den kriegswirtschaftlichen Bedingungen erhöhte sich zudem der Bedarf am aus dem Kokereigas gewonnenen Benzol, dessen Verwendung als Kraftstoff für Explosionsmotoren bereits 1904 gelungen war. Nach dem Ersten Weltkrieg hatte der Benzolverband einen durch Zusatz von Benzol besonders klopfesten Treibstoff unter

der Markenbezeichnung ARAL geschaffen. Dieses Gemisch aus Benzol- (Aromaten) und Benzin- (Aliphaten) Kohlenwasserstoffen löste in der Folgezeit das unvermischte Motorenbenzol als Vergaserkraftstoff vollständig ab. Kokereibenzol als Motorenkraftstoff mit den Hauptbestandteilen der Aromaten Benzol, Toluol und Xylol blieb auch in den frühen Jahren der Bundesrepublik hoch begehrt [9, 10].

2 | Strukturen der Kohleverwendung in Deutschland nach 1945

Der Wiederaufbau Deutschlands nach Beendigung des Zweiten Weltkriegs vollzog sich vorrangig auf Basis der Steinkohle. Über 90 % der Primärenergieversorgung wurden seinerzeit durch Kohle gedeckt, davon etwa 70 % Steinkohle und 20 % Braunkohle [11]. Bis 1956 hatte die Steinkohlenförderung in der Bundesrepublik Deutschland wieder das Vorkriegsniveau erreicht, als 1957/58 die Kohlenkrise ausbrach. Zunächst als befristete Episode angesehen, stellte sie sich bald als grundlegender und bis heute andauernder struktureller Wandel des Energie- und Kohlenmarktes dar [12, 13]. Die deutsche Steinkohle wurde seither von billigerer Importkohle sowie von Heizöl und Erdgas als alternativen Energieträgern vom Markt verdrängt. In den letzten 50 Jahren vollzog sich deshalb ein stetiger Prozess der Rücknahme der deutschen Steinkohlenförderung bei gleichzeitiger Anpassung an herrschende Bedarfsstrukturen.

Begleitet wurde der Prozess seit den 1960er-Jahren durch kohlepolitische Maßnahmen. Die Verstromungshilfen („Jahrhundertvertrag“, 1980) und die Kokskohlenbeihilfe (Abschluss des Hüttenvertrags mit Gründung der Ruhrkohle AG, 1969) flankierten langfristige Verträge mit den Abnehmern in der Stromwirtschaft und der Stahlindustrie. Weitgehend ungeschützt blieb hingegen der einst den Kohlenabsatz dominierende Wärmemarkt, sodass dieser bis heute anteilig am meisten geschrumpft ist. Eine gewisse Stabilisierung des deutschen Kohlesektors ergab sich allein im Umfeld der beiden Ölkrisen 1973/74 und 1979/80, als das Risiko einseitiger Abhängigkeiten bei der Brennstoffversorgung unter anderem das Konzept des Energiemix – seinerzeit vorrangig auf Basis von Kohle und Kernenergie – entstehen ließ. Als Mitte der 1980er-Jahre ein drastischer Preisverfall an den Energiemärkten einsetzte, endete die Stabilisierungsphase, und in den

folgenden Kohlerunden wurden weitere einschneidende Rücknahmen der Steinkohlenförderung beschlossen. Das aktuelle Szenario sieht einen kontrollierten Ausstieg aus dem deutschen Steinkohlenbergbau bis 2018 bei einer Prüfung der Marktbedingungen im Jahr 2012 vor.

2.1 Wärmemarkt

Im Zuge des umrissenen Anpassungsprozesses sind bei einer Verschiebung der Anteile bedeutende Anstrengungen zugunsten des deutschen Steinkohlenabsatzes unternommen worden. Das gilt auch für den einst bedeutenden Wärmemarkt, wenn gleich er heute nur noch unter 5 % des Gesamtabsatzes ausmacht. Dieser Markt umfasst gemeinhin denjenigen Teil des Endenergieverbrauchs, in dem außerhalb der Stahlindustrie Energieträger zur Erzeugung von Raumwärme einschließlich Warmwasserbereitung und von Prozesswärme ge-

nutzt werden [14, S. 1040]. In der Regel ist damit der Energieverbrauch in den Sektoren „Haushalte und Kleinverbraucher“ sowie „übrige Industrie“ gemeint [15].

Innerhalb des Wärmemarktes war schon in den 1950er-Jahren die Wettbewerbsfähigkeit der Kohle weitgehend verloren gegangen. Diese Situation änderte sich vorübergehend zu Beginn der 1980er-Jahre infolge der Ölpreiserhöhung von 1979/80, was dann zur Vorlage eines „Aktionsprogramms Wärmemarkt“ des deutschen Steinkohlenbergbaus im Juni 1983 führte. Anlagentechnisch war der Wärmemarkt von Kesseln mit relativ kleiner Leistung bestimmt, wofür mit Heizautomaten, Schüttelrost- und Wanderrost sowie Wirbelschichtfeuerung vergleichsweise komfortable und umweltverträgliche Aggregate entwickelt werden konnten. Ein gewisses Problem blieb die Distribution von Nusskohlen und Brechkoks, die zum Teil direkt in den Wohnbe-

Abb. 1: Teerwagen der Teerdestillation der Zeche Pluto Wilhelm in Wanne-Eickel, undatiert, Foto: Hans Grempel (Quelle: Bergbau-Archiv Bochum [BBA] 169 – IV: Produkte der Kohle)



reich der Endverbraucher zu bringen waren. Hierfür wurden mit Kohletrimmern und Lkw-Kippern mit Schlauchförderung gleichwohl Lösungen gefunden, die der Lieferung von Heizöl nicht nachstanden. Als eigentliches Problem der Kohle im Wärmemarkt erwies sich die sogenannte Investitionshürde. Danach lagen und blieben die spezifischen Investitionen für vollautomatische kohlengefeuerte Wärmeerzeuger bei allen Technologien und Leistungen über den Vergleichswerten für Öl und Gas [16].

2.2 Verkokung

Nicht im selben Umfang wie im Wärmemarkt ist der Absatz deutscher Koks-kohle in den letzten Jahrzehnten zurückgegangen. Gleichwohl hat er sich deutlich verringert, sodass der Kokereisektor seit den 1960er-Jahren zwei Leitprinzipien zu verfolgen hatte: Einerseits die Produktivität zu steigern und andererseits wesentlich höhere Umweltschutzaufgaben zu erfüllen. Insbesondere die jeweils 1986 in Kraft getretene Gefahrstoffverordnung und die TA-Luft zwangen die Kokereien, eine Vielzahl technischer Maßnahmen zur Einhaltung der geforderten Grenzwerte vorzunehmen. Unter Rationalisierungs- wie Umweltgesichtspunkten sind erhebliche Fortschritte realisiert worden, die sich zum Teil gegenseitig bedingen.

Die Anfang des 20. Jahrhunderts eingeführte Basistechnologie der Horizontal-kammeröfen galt zu Beginn der 1960er-Jahre als kaum mehr entwicklungsfähig. Dennoch ist dieses System bis heute der Standard geblieben und dabei auch in den Kammerabmessungen erheblich gesteigert worden. Als Beispiele gelten hier die heute als letzte vom Bergbau selbst betriebene Kokerei Prosper in Bottrop oder die erst vor einigen Jahren in Dienst gestellte Kokerei Schwelgern in Duisburg mit Kammerhöhen von ca. 8 m. Innerhalb der konventionellen Verkokung wurden Rationalisierungspotenziale auf diversen Ebenen angestrebt. Das Ziel bestand dabei stets in der Erhöhung der spezifischen Ofenleistung. Aufgrund der gestiegenen Anforderungen für Koks im Hochofenprozess wurde ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Hochtemperaturverkokung entwickelt, das die Vorausberechnung von Ausbringen und Qualität des Kokes ermöglichte und damit Aussagen für die optimale Mischung der Einsatzkohlen lieferte. Neben der allgemeinen Automatisierung der Bedienungsvorgänge kam es zur Entwicklung einer pro-



Abb. 2: Steinkohle-Druckvergasungsanlage der Ruhrgas AG in Dorsten, undatiert (Quelle: Bergbau-Archiv Bochum [BBA] 169 – IV: Produkte der Kohle)

grammgesteuerten Beheizung des Koks-ofens, um eine adäquate Wärmezufuhr für die jeweiligen Verkokungsstadien sicherzustellen [17].

Neben der konventionellen Verkokungstechnik mit Horizontalkammer sind diverse alternative Verkokungsverfahren erprobt worden. Hierzu zählen insbesondere Formkoksverfahren mit dem Ziel einer Erweiterung der Koks-kohlenbasis. Weitere Versuche bezogen sich auf die Vorerhitzung der Einsatzkohle (Precarbon-Verfahren) sowie auf das sogenannte Einzelkammersystem [18]. Letzteres wurde im Rahmen des Europäischen Entwicklungszentrums für Kokereitechnik mit einer Versuchsanlage auf der Kokerei Prosper in den 1990er-Jahren getestet, bislang allerdings nicht großtechnisch umgesetzt.

2.3 Verstromung

Der größte Absatzbereich deutscher Steinkohle ist seit geraumer Zeit die Stromerzeugung. In Dampfkraftwerken findet dabei eine Umwandlung der in der Kohle gebundenen chemischen in elektrische Energie statt. Durch Verbrennung der Kohle wird überhitzter Wasserdampf mit Temperaturen von 450 °C und einem Druck von bis 240 bar erzeugt, der als Arbeitsmittel im anschließenden Dampfturbinenprozess fungiert. Durch Entspannung und Abkühlung wird dabei die Wärme- und Druckenergie des Wasserdampfes in mechanische Energie umgewandelt.

Auch in der Kraftwerkstechnologie sind in jüngerer Zeit erhebliche Fortschritte erzielt worden, die sich einerseits an der Steigerung des Wirkungsgrades und anderer-

seits an der Umweltverträglichkeit ablesen lassen. Der Wirkungsgrad, d. h. das Verhältnis von Nutzenergie zu eingesetzter Energie, erreicht im beschriebenen Verfahren bei etwa 40 % anlagentechnisch seine Grenze, sodass seit den 1970er-Jahren Versuche zur Kombination von Gas- und Turbinenprozessen (Kombiprozess) unternommen wurden [19]. Weitere Optimierungen richteten sich auf die Wirbelschichtfeuerung und verschiedene Kohlevergasungsverfahren. Technische Maßnahmen zur Umweltverträglichkeit bezogen sich erstens auf die Abscheidung staub- und gasförmiger Inhaltsstoffe der Rauchgase, wofür in modernen Kraftwerken durchweg Elektrofilter eingesetzt werden. Die Abscheidegrade erreichen mehr als 99,9 %. Zur Vermeidung des Schwefeldioxid-Ausstoßes wurden bis 1988 alle bestehenden Kraftwerke mit Rauchgasentschwefelungsanlagen ausgerüstet, bis 1991 erfolgte die Nachrüstung mit Katalysatoren zur Minderung der Stickoxidemissionen. Heute erfüllen Steinkohlenkraftwerke schließlich auch die Anforderungen an einen CO₂-armen Betrieb (Clean Coal Technology) [20].

2.4 Vergasung- und Verflüssigung

Die in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelte und betrieblich umgesetzte Kohleverflüssigung wurde in Deutschland während der 1950er-Jahre aufgrund des seinerzeit niedrigen Rohölpreises eingestellt. Erst im Anschluss an die erste Ölkrise gab die damalige Bundesregierung mit dem seinerzeitigen Rahmenprogramm Energieforschung den Anstoß zur Weiterentwicklung der vorhandenen Technologien. Besagtes Programm umfasste sowohl Kohlevergasungs- als auch Kohleverflüssigungsanlagen (Abb. 2).

Verfahrenstechnisch wurden bei letzteren die „direkte Hydrierung“ nach Bergius-Pier, die „extraktive Hydrierung“ nach Pott-Broche sowie die „indirekte Verflüssigung“ durch Kohlevergasung mit anschließender Fischer-Tropsch-Synthese unterschieden [21]. Seit 1975 wurden bei der Bergbau-Forschung GmbH, Essen, und bei der Saarbergwerke AG Labor- und Technikumsanlagen betrieben, die wesentliche verfahrenstechnische Fortschritte gegenüber den früheren Prozessen erzielten. Auf dieser Grundlage wurden Anfang der 1980er-Jahre in Völklingen-Fürstenhausen und in Bottrop zwei Pilotanlagen in Betrieb genommen. Die Kohleölanlage in Bottrop

war dabei für einen Kohlendurchsatz von 200 t/d ausgelegt, womit täglich 18 t Flüssiggas, 29 t Leichtöl (Benzin) und 69 t Mittelöl (Diesel) erzeugt wurden [22]. Eine großtechnische Umsetzung der Verfahren scheiterte allerdings Mitte der 1980er-Jahre am erneuten Verfall des Ölpreises. Bis heute verfügt Deutschland damit lediglich über ein weiterhin fortgeschrittenes Know-how zur Kohlenverflüssigung, dessen Sicherung in den letzten Jahren allerdings bedroht ist. 2004 ist die letzte deutsche Pilotanlage nach China verkauft worden. Andererseits erscheint eine Renaissance der Kohleverflüssigung angesichts der aktuellen Energiepreisentwicklung nicht ausgeschlossen.

3 | Zusammenfassung

● Die schon in vorchristlicher Zeit bekannte Verwendung von Steinkohle blieb bis zur Industrialisierung allein auf Heizzwecke beschränkt. Seit dem 18. Jahrhundert ermöglichte ihre Verkokung einen Einsatz in der Eisen- und Stahlindustrie, wobei dem Koks im Hochofen erstmals energetische, physikalische und chemische Aufgaben zukamen. Etwa ab 1850 entwickelte sich ein spezifisches Feld der Kohlenchemie, das sich auf der Basis kokereitechnischer Innovationen und der Gewinnung von Kohlenwertstoffen aus dem Kokereigas um 1900 wesentlich erweiterte. Mit der Kohlevergasung und der Kohleverflüssigung traten in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts neue Veredlungsverfahren für Steinkohle hinzu.

In der Geschichte der Bundesrepublik Deutschland sind trotz langfristiger schrumpfender Steinkohlenförderung und einer signifikanten Veränderung der Anteile im Absatzmarkt zahlreiche Fortschritte im Bereich der Kohlenveredlung erzielt worden. Dies ist mit dem Wärmemarkt, der Verkokung, der Verstromung sowie der Vergasung und Verflüssigung an den Kernbereichen der Kohlenutzung nachvollzogen worden.

Es bleibt anzumerken, dass der kohlechemische Sektor nicht umfassend gewürdigt werden konnte. Es sei darauf verwiesen, dass durch eine Kombination von physikalischen und chemischen Verfahrensschritten seit längerem kohlenstoffhaltige Adsorptionsmittel wie Aktivkohle, Aktivkokse und Kohlenstoffmolekularsiebe hergestellt werden. Diese Stoffe kommen in der Regel zu industriellen Reinigungszwecken mit hoher Effektivität zum Einsatz.

Literatur

- [1] M. Farrenkopf (Hrsg.), Koks. Die Geschichte eines Wertstoffes. Bd. 2. Deutsches Bergbau-Museum, Bochum 2003
- [2] M. Farrenkopf, „The Cradle of the Coke Blast Furnace“ – Abraham Darby's Ironworks in Coalbrookdale and the Consequences. *Cokemaking International* 9 (2), 75–77 (1997)
- [3] Ruhrkohlen-Handbuch. Inhaltszahlen, Erfahrungswerte und praktische Hinweise für industrielle Verbraucher. Essen, 6. Aufl. 1984
- [4] F. W. Wedding, Die Kohlen des Ruhrgebiets, ihre Gewinnung und Veredelung durch Aufbereitung, Brikettierung, Verkokung und Schmelzung. In: *Ruhrkohle und Technik*. Industrie-Verlag und Druckerei, Essen, 2. Aufl. 1930, S. 17–36
- [5] W.-P. Bethé und H. Kubitzka, Neue Aufbereitungsverfahren zur Erfüllung künftiger Marktanforderungen. *Glückauf* 124 (4/5), 240–246 (1988)
- [6] F. M. Ress, Geschichte der Kokereitechnik. Verlag Glückauf, Essen 1957
- [7] M. Farrenkopf (Hrsg.), Koks. Die Geschichte eines Wertstoffes. Bd. 1. Deutsches Bergbau-Museum, Bochum 2003
- [8] M. Farrenkopf, Im Netzwerk der Montanindustrie. Zur Technik- und Wirtschaftsgeschichte des Kokereiwesens. In: U. Hassler und N. Kohler, Das Verschwinden der Bauten. Lebenszyklen industrieller Baubestände und Methoden transdisziplinärer Forschung. Ernst Wasmuth Verlag, Tübingen u. a. 2004, S. 153–165
- [9] W. Gumz und R. Regul, Die Kohle. Entstehung, Eigenschaften, Gewinnung und Verwendung. Verlag Glückauf, Essen 1954
- [10] M. Rasch, Nebenproduktanlagen der Kokereien und Kohlechemie im rheinisch-westfälischen Industriegebiet bis zum Ende des Zweiten Weltkrieges. In: W. Buschmann (Hrsg.), Koks, Gas, Kohlechemie. Geschichte und gegenständliche Überlieferung der Kohleveredlung. Klartext-Verlag, Essen 1993, S. 31–51
- [11] G. Semrau, 50 Jahre Steinkohlenbergbau in Nordrhein-Westfalen im Bild der Statistik. *Glückauf* 132 (8), 486–492 (1996)
- [12] W. Abelshäuser, Der Ruhrkohlenbergbau seit 1945. Verlag C. H. Beck, München 1984
- [13] C. Nonn, Die Ruhrbergbaukrise. Verlag Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 2001
- [14] G. Dach, Wärmemarkt aus politischer Sicht. *Glückauf* 121 (13), 1040–1046 (1985)
- [15] H. Mareyen und J. Brinkmann, Der Wärmemarkt Westeuropas und die Rolle der Steinkohle. *Glückauf* 123 (1), 38–48 (1987)
- [16] H. Guder, Chancen der Kohle im Wärmemarkt. *Glückauf* 119 (24), 1230–1240 (1983)
- [17] K.-G. Beck, Fortschritte und Entwicklungsmöglichkeiten der Kokereitechnik. *Glückauf* 117 (10), 568–577 (1981)
- [18] H. Bertling, Innovationswege der Horizontalkammerverkokung. *Glückauf* 124 (4/5), 253–259 (1988)
- [19] K. Spindler, Entwicklung der Technik zur zukünftigen Steinkohlenverstromung. *Glückauf* 125 (1/2), 89–94 (1989)
- [20] J. Melchior, Neue Steinkohlekraftwerke – im Energiemix unverzichtbar. *Glückauf* 139 (12), 672–677 (2003)
- [21] R. Specks, Entwicklungsstand der neuen Technologien der Kohlenvergasung und Kohlenverflüssigung. *Glückauf* 119 (23), 1147–1159 (1983)
- [22] J. Fiedler, Umweltverträglichkeit der Kohlenhydrierung am Beispiel der Kohleölanlage Bottrop. *Glückauf* 121 (1), 48–53 (1985)

Anschrift des Verfassers

Dr. Michael Farrenkopf, Deutsches Bergbau-Museum Bochum, Am Bergbaumuseum 28, D 44791 Bochum, E-Mail: michael.farrenkopf@bergbaumuseum.de

Kohlevergasung

M. Kaiser

1 | Allgemeines

Gasförmige Brennstoffe sind aufgrund ihrer Umweltfreundlichkeit und Transportierbarkeit sowie ihrer vielseitigen Anwendbarkeit begehrte Energieträger. Neben Erdgas und Brenngasen aus der Verarbeitung von Erdöl sind Brenngase aus Kohle von Bedeutung. Kohlestämmige Brenngase entstehen zum einen durch Verkokung; dies ist die Erhitzung von Kohle unter Luftabschluss, das Gas ist hierbei nur ein Nebenprodukt ist. Zum anderen ist es die Vergasung, bei der die organischen Kohlebestandteile mit einem Reaktionspartner reagieren und das Gas das Hauptprodukt ist. Nur diese Vergasung ist Gegenstand dieses Beitrags.

Die Vergasung ist eine Reaktion der Kohle bei Temperaturen oberhalb von 800 °C mit einem gasförmigen Vergasungsmittel. Der organische Anteil der Kohle wird vollständig in Gas überführt; die mineralische Asche bleibt als Reststoff übrig. Als Vergasungsmittel kommen sauerstoffhaltige Stoffe infrage wie Sauerstoff, Luft, Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid, aber auch Wasserstoff. Das Produkt ist ein Synthesegas, das im Wesentlichen aus CO (Kohlenstoffmonooxid), H₂ (Wasserstoff) und CH₄ (Methan) besteht.

2 | Allgemeine Entwicklung

Die Vergasung von Braun- und Steinkohle hat eine lange Historie. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts war die Kohlevergasung die Basis für die Synthese von Ammoniak und Methanol und über die Fischer-Tropsch-Synthese für aliphatische Kohlenwasserstoffe. Bis in die 1950er Jahre war Kohle in Deutschland die wichtigste Rohstoffquelle für die organische Chemie. Durch die Entwicklung der Petrochemie hatte die Kohlevergasung zwischenzeitlich an Bedeutung verloren. Mit der Verteuerung von Erdöl in den 1970er und 1980er Jahren wurde die Technik wieder aufgegriffen [1]. Heute hat die Kohlevergasung in Ländern mit großen Kohlevorkommen wieder an Bedeutung gewonnen, und zwar sowohl zur Erzeugung von Synthesegas für die chemische Industrie wie auch die Erzeugung von Brenn-

Heterogene Wassergasreaktion	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	$\Delta H = 119 \text{ kJ/mol}$
Boudouard Reaktion	$C + CO_2 \rightarrow 2 CO$	$\Delta H = 162 \text{ kJ/mol}$
Hydrierende Vergasung	$C + 2 H_2 \rightarrow CH_4$	$\Delta H = -87 \text{ kJ/mol}$
Teilverbrennung	$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$	$\Delta H = -123 \text{ kJ/mol}$
Verbrennung	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$\Delta H = -406 \text{ kJ/mol}$
Homogene Wassergas-Reaktion	$CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$	$\Delta H = -42 \text{ kJ/mol}$
Methanisierung	$CO + 3 H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	$\Delta H = -206 \text{ kJ/mol}$

Tab. 1: Vergasungsreaktionen

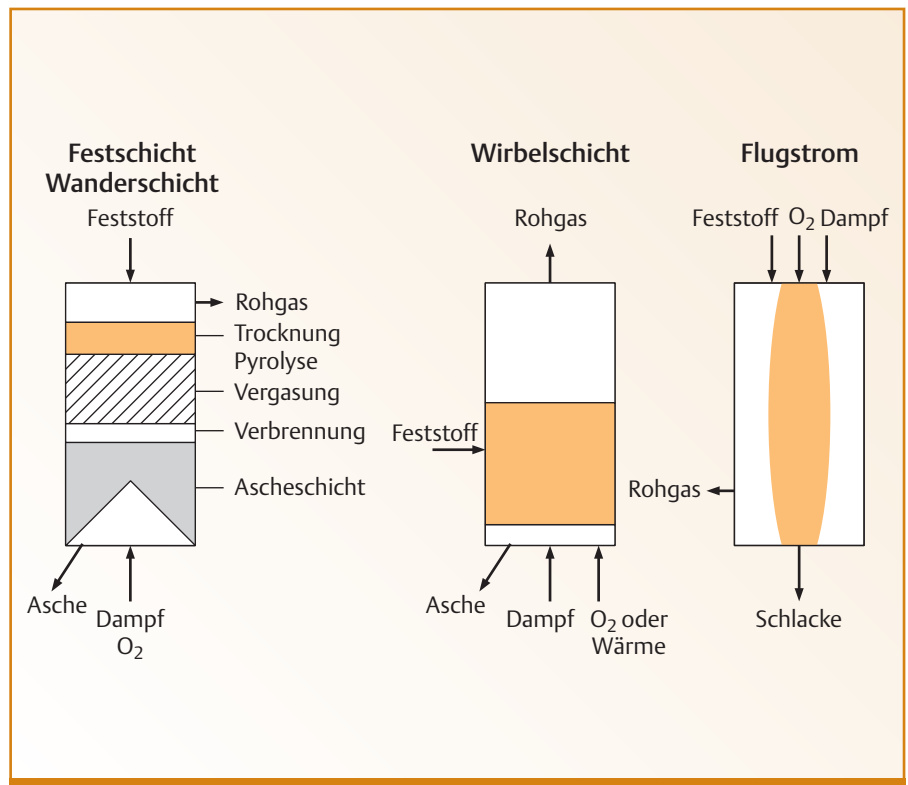


Abb. 1: Grundprinzipien der verschiedenen Vergaser

gasen in Kraftwerken mit integrierter Kohlevergasung (IGCC – Integrated Gasification Combined Cycle) zur Erhöhung des Wirkungsgrades [2].

3 | Grundreaktionen der Vergasung

Die Vergasung der Kohle lässt sich vereinfacht in fünf Grundreaktionen zusammenfassen, die in Tabelle 1 mit den zugehörigen Reaktionsenthalpien dargestellt sind.

Sie gehen von der Annahme aus, dass nur der Kohlenstoff der Kohle umgesetzt wird. Mithilfe dieser Gleichungen ist jedoch keine Aussage über die Zusammensetzung von Synthesegas zu treffen. Neben den dargestellten heterogenen Reaktionen der Kohle mit dem Vergasungsmittel sind die homogenen Reaktionen in der Gasphase zu berücksichtigen, bei denen die primären gasförmigen Reaktionsprodukte sowohl untereinander als auch mit dem Vergasungsmittel

tel reagieren. Zusätzlich sind thermodynamische und kinetische Gesetzmäßigkeiten zu berücksichtigen. Tendenziell gilt, dass mit steigender Vergasungstemperatur die Bildung von CO und H₂ begünstigt wird und die Bildung von CH₄ abnimmt. Hohe Drücke haben den umgekehrten Effekt.

Da die Kohle ein komplexer, natürlicher Rohstoff ist, bei dem es sich um einen inhomogenen, makromolekularen Kohlenwasserstoff handelt, der zudem Heteroatome wie Sauerstoff, Schwefel, und Stickstoff enthält, ist auch die Vergasungsreaktion komplex. Neben den angestrebten Produkten werden in Abhängigkeit von Vergasungsmittel und Reaktionsbedingungen weitere Gasbestandteile gebildet, wie Kohlenstoffdioxid, aber auch Schwefelwasserstoff, Ammoniak und höhere Kohlenwasserstoffe (Teer).

4 | Verfahrenstechnische Grundlagen

● Die Vergasung erfolgt bei Temperaturen von 800 bis 2000 °C in Reaktoren, die einerseits nach der Rohstoffzufuhr unterschieden werden in Festbett-, Wirbelschicht- und Flugstromvergaser, und andererseits nach der Art der Wärmezufuhr. Die autothermen Verfahren haben keine Wärmezufuhr von außen. Der Wärmeverbrauch der endothermen Reaktion der Kohle mit Wasserdampf wird durch die exotherme Reaktion der Kohle mit dem Sauerstoff aufgebracht. Bei den allother-

men Verfahren wird die Wärme von Außen, z. B. über Wärmetauscher in das System eingebracht. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist der Reaktionsdruck, der von Normaldruck bis 10 MPa betragen kann. Die Grundprinzipien der Vergaser sind in Abbildung 1 dargestellt.

Die älteste Form der Kohlevergaser sind Festbettvergaser, bei denen es sich in der einfachsten Form um ausgemauerte Schächte handeln kann. Bei den heutigen kommerziellen Festbettvergasern (z. B. Lurgi-Druckvergaser) wird stückige Kohle (3 bis 50 mm) eingesetzt. Die Kohle wird im Gegenstrom zum Vergasungsmedium geführt. Diese Verfahren zeichnen sich durch eine gute Wärmeausnutzung und geringen Verbrauch an Vergasungsmedien aus. Das Produktgas hat einen hohen Methananteil. Die Kohle hat im Reaktor eine Verweilzeit von ein bis zwei Stunden. Die Asche wird flüssig abgezogen und es können im Aschabzug Temperaturen von bis zu 2000 °C erreicht werden. Durch die relativ niedrigen Temperaturen im oberen Teil des Reaktors ist das Produktgas durch teerartige Komponenten verunreinigt.

Bei den Wirbelschichtvergasern (z. B. Hochtemperatur-Winkler-Vergaser) kommen feinkörnige Kohlen (0,5 bis 5 mm) zum Einsatz. Die Kohle wird vom Vergasungsmedium aufgewirbelt was durch die intensive Vermischung einen guten Stoff- und Wärmeaustausch bewirkt. Die Reaktion erfolgt bei Temperaturen von 800 bis 1100 °C.

Bei den Flugstromverfahren (z. B. Texaco-Verfahren) wird fein feinstkörnige Kohle (< 0,1 mm) mit dem Reaktionsmedium in den Reaktor geblasen. Bei Temperaturen von bis zu 2000 °C wird der Kohlenstoff in kürzester Zeit nahezu vollständig umgesetzt. Aufgrund der hohen Temperatur im gesamten Reaktionsraum wird ein Produktgas mit einem geringen Anteil an höhermolekularen Kohlenwasserstoffen (Teer) gebildet.

Die Auswahl des „richtigen“ Vergasungsverfahrens hängt ab von der Kohleart und den Anforderungen an das Produktgas bzw. dessen Weiterverwendung zur Stromerzeugung oder als Synthesegas. Neben dem Vergaser selbst bestehen Anlagen zur Kohlevergasung aus der Kohlenaufbereitung und einer Gasreinigung zur Abtrennung von Stör- und Schadstoffen, die bei der weiteren Gasnutzung unerwünscht sind.

Literatur

[1] H. Jüntgen und K. H. van Heek, Kohlevergasung, Grundlagen und technische Anwendung. Thieme-Taschenbücher 94 (1981)

[2] R. Dittmeyer, W. Keim, G. Kreysa, A. Oberholz (Hrsg.), Winnacker-Küchler, Chemische Technologie. 5. Aufl. Bd. 4, Wiley-VCH, Weinheim 2006, S. 665–725

Anschrift des Verfassers

Dr. Manfred Kaiser, Geschäftsfeldleiter Kokerei Technik, DMT GmbH & Co. KG, Am Technologiepark 1, 45307 Essen

Kohlehydrierung

Direkte Verflüssigung von Kohle

M. Kaiser

1 | Allgemeines

● Die Motivation zur Kohleverflüssigung besteht darin, den Feststoff Kohle in flüssige Kohlenwasserstoffe zu überführen, um damit Erdölprodukte durch Produkte aus Kohle zu ersetzen, die als Motortreibstoffe eingesetzt werden können. Hierbei muss grundsätzlich zwischen den indirekten und direkten Ver-

fahren unterschieden werden. Die indirekten Verfahren werden in zwei unabhängigen Prozessen ausgeführt, der Kohlevergasung zu Synthesegas und der anschließenden Synthese zu Treibstoffe. Bei dem direkten Verfahren der Kohlehydrierung wird die Kohle in einem Prozess primär zu hochmolekularen Stoffen zersetzt und durch sekundäre Reaktion zu den Endprodukten hydriert.

Bei der Umwandlung der Kohle in flüssige Produkte sind die im Vergleich zum Erdöl niedrigen Wasserstoffgehalte und der hohe Anteil an Ballaststoffen von Nachteil. Der Wasserstoffgehalt im Benzin ist etwa doppelt so hoch wie in der Kohle. Während die Produkte Benzin und Diesel reine Kohlenwasserstoffe sind, enthält die Kohle Heteroatome wie Schwefel, Stickstoff und

Sauerstoff und ferner Mineralstoffe. Bei der Kohlehydrierung muss daher an die von Mineralstoffen isolierte Kohle soviel Wasserstoff angelagert werden, dass das C/H-Verhältnis der Produkte erreicht wird und gleichzeitig die Heteroatome abgespalten werden.

2 | Allgemeine Entwicklung [1]

● Anfang des 20. Jahrhunderts bis zum Ende des 2. Weltkriegs wurden in Deutschland und Großbritannien Anlagen im technischen Maßstab betrieben. Einen weiteren Entwicklungsschub erlebte die Kohlehydrierung während und nach der sogenannten Ölkrise in den 1970er Jahre, als weltweit die bestehenden Verfahren weiterentwickelt und neue Ansätze gefunden wurden. Alle Entwicklungslinien endeten bestenfalls mit dem Bau und dem Betrieb von Pilotanlagen; Anlagen im kommerziellen Maßstab wurden nicht errichtet. Seit Mitte der 1990er Jahre wird in China intensiv an der Kohlehydrierung gearbeitet, 2002 wurde mit der Planung einer kommerziellen Anlage begonnen, die 2008 in Betrieb gehen soll. Obwohl Anlagen zur Kohlehydrierung sich in der Ausführung unterscheiden, weisen sie dennoch prinzipielle Übereinstimmungen auf (schematische Darstellung s. Abb. 1 in der Online-Ergänzung):

- Die Kohlevorbehandlung mit anschließender Hydrierung der in einem Rückführöl suspendierten Kohle.
- Die Trennung und Fraktionierung der Produkte, Nebenprodukte und Rückstände.
- Die Aufarbeitung der Produkte in marktfähige Erzeugnisse durch Raffinieren, Reformieren und Hydrocracken.

3 | Entwicklungen in Deutschland [1]

● In Deutschland begann die Weiterentwicklung der Kohlehydrierung auf den heutigen Stand mit der Verknappung des Erdöls zu Beginn der 1970er Jahre. Eine erste, kontinuierlich arbeitende Versuchsanlage mit einem Kohledurchsatz von 200 kg pro Tag wurde 1976 bei der Bergbau-Forschung GmbH, Essen (heute DMT GmbH & Co. KG) in Betrieb genommen. Ruhrkohle AG und Veba Oel AG begannen 1979 mit dem Bau der Kohleölanlage Bottrop. Ausgelegt war die Anlage für einen Kohledurchsatz von 200 t pro Tag. Sie wurde von 1981 bis 1987 mit Kohle betrieben und im Jahre 2000 de-

montiert. Aufbauend auf den Ergebnissen der Kohleölanlage wurden Planungen von Großanlagen mit Kohledurchsätzen von bis zu 20000 t pro Tag gemacht.

3.1 Das „Deutsche Technologie (DT)-Verfahren“ [2]

Bei dem als „Deutsche Technologie (DT-Verfahren)“ eingeführten Verfahren wird die Einsatzkohle in der Kohlevorbereitung auf < 0,1 mm gemahlen und auf eine Restfeuchte von < 0,5 % getrocknet. Die aufbereitete Kohle wird mit einem aus Eisenoxid bestehenden Katalysator in einem aus dem Prozess stammenden Rückführöl (vgl. Abb. 1 in der Online-Ergänzung) suspendiert. Die Suspension enthält etwa 40 % Kohle. Nach Zusatz von wasserstoffreichem Rückführgas (vgl. Abb. 1) und Wasserstoff wird diese Suspension auf etwa 425 °C vorgeheizt und in der *Sumpffphase* hydriert. Die exotherme Umsetzung findet kohleabhängig bei etwa 475 bis 485 °C statt; der Prozessdruck beträgt 30 MPa. In einem nachgeschalteten Heißabscheider wird bei etwa 450 °C unter Druck der Rückstand abgetrennt, der aus den Mineralstoffen der Kohle, dem Katalysator sowie geringen Mengen ungelöster Kohle besteht. Dieser Rückstand wird in einer Vakuum-Destillation in ein schweres Destillat und einem feststoffreichen Rückstand zerlegt, der unter Normalbedingungen fest ist. Dieser Rückstand kann der Wasserstofferzeugung durch Vergasung zugefügt werden. Die Kopfprodukte des Heißabscheiders werden einem Zwischenabscheider zugeführt, in dem bei etwa 300 °C das für die Suspendierung erforderliche Kreislauföl abgetrennt wird. In dem anschließenden Kaltabscheider werden das Produktöl, bestehend aus Leichtöl und Mittelöl mit dem Hydrierwasser abgetrennt. Das Produktgas wird nach einer Ölwäsche als wasserstoffreiches Hochdruck-Kreislaufgas zum Reaktor zurückgeführt.

Die auf die wasser- und aschefreie Kohle bezogene Ölausbeute beträgt bei Steinkohlen etwa 55 %. Das Produktöl hat einen Siedebereich von 25 bis 330 °C und weist noch einen hohen Anteil an Heteroatomen auf.

3.2 Die „integrierte Gesamtl-Raffination“ [2]

Eine entscheidende Verbesserung hat die Kohlehydrierung durch die Entwicklung der auf dem DT-Verfahren aufbauenden **Integrierten Gesamtl-Raffination (IGOR⁺)** erfahren (Abb. 2, siehe Online-Ergänzung).

Das Verfahren beinhaltet sämtliche Komponenten, um ohne petrochemische Infrastruktur arbeiten zu können.

Bei dieser Modifikation des DT-Verfahrens schließt sich an den Heißabscheider ein Reaktor mit einem Katalysator-Festbett an, der die dampfförmigen Sumpffasenprodukte unmittelbar weiterhydriert. Als Katalysator wird ein konventioneller Ni-Mo-Al₂O₃-Katalysator verwendet. Es folgt eine Teilkondensation, wobei der dampfförmig bleibende, leichtere Ölanteil als Produktöl abgezweigt wird. Der auskondensierte, schwerere Ölanteil wird über den Hochdruck-Zwischenabscheider abgetrennt und als Rückführöl zurückgeführt und dort zu niedermolekularen Kohlenwasserstoffen gespalten. Dieses Rückführöl hat im Vergleich zum DT-Verfahren eine geringere Dichte und Viskosität, wodurch der Feststoffgehalt in der Aufgabesuspension erhöht werden konnte, was gleichbedeutend mit einer Steigerung des spezifischen Kohledurchsatzes ist.

In der Endausbaustufe mit einem zweiten Katalysator-Festbett zur Hydrierung des Produktöls wird ein Produkt mit einem Anteil an störenden Heteroatomen (Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel) von weniger als 10 mg pro kg Öl erzeugt. Der Wasserstoffgehalt im Produktöl beträgt 13,7 %. Bei Steinkohle wird eine auf die wasser- und aschefreie Kohle bezogene Ölausbeute von 60 % erreicht, bei Braunkohlen sind es etwa 55 %.

Durch Destillation wird das Produktöl in eine Dieselfraktion sowie ein Benzinvorprodukt getrennt, das durch Reformierung zu Benzin weiterverarbeitet wird.

3.3 Umweltaspekte

Bei Einsatz heute zur Verfügung stehender Techniken zur Emissionsminderung, Abwasserreinigung und Abfallentsorgung können Kohlehydrieranlagen so gebaut und betrieben werden, dass keine schädliche Umwelteinwirkung durch Luftverunreinigung, Abwasser oder unvermeidbare Belästigung durch Lärm oder Gerüche auftreten. Bei den verbleibenden Einflüssen auf die Umwelt handelt es sich nicht um spezielle Risiken der Kohlehydrierung, sondern um Belastungen, die in ähnlicher Form von anderen Anlagen zur thermischen Umwandlung von Kohle und Erdöl ausgehen.

Da der thermische Wirkungsgrad einer Anlage der Quotient aus den Heizwerten der Edukte und Produkte ist, sind für eine Betrachtung neben der eigentlichen Hydrie-

rung auch die Wasserstofferzeugung und Stromerzeugung sowie andere Energieumwandlungen des Prozesses zu berücksichtigen. Die einzige Energie der Edukte ist die Kohle, bei optimaler Wasserstofferzeugung und Stromerzeugung in einem IGCC Kraftwerk lassen sich thermische Wirkungsgrade beim Einsatz von Steinkohle von bis zu 70 % darstellen. Unter ungünstigeren Randbedingungen, z. B. durch den Einsatz von Braunkohlen mit hoher innerer Feuchtigkeit und nicht aufeinander abgestimmter Nebenanlagen, sind zum Teil nur Wirkungsgrade von 50 % erreichbar [3].

3.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeit der Kohlehydrierung ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Bei den Edukten ist neben dem Preis der Kohle selbst besonders der Preis für den Wasserstoff von Bedeutung. Die Betriebskosten werden besonders von den Lohn-

kosten und dem Wartungsaufwand beeinflusst. Durch den hohen Investitionsaufwand von Anlagen sind weiterhin die Kapitalkosten eine wichtige Einflussgröße. Die Erlöse der Produkte und Nebenprodukte schließlich sind vom Preis des Weltmarktes abhängig, wodurch eine langfristige Prognose der Wirtschaftlichkeit von unsicheren Annahmen abhängt. Aus diesen Gründen ist auch ein Quervergleich zwischen Anlagen aus unterschiedlichen Wirtschaftssystemen nur bedingt möglich. Durch Subventionen für die Rohstoffe und Steuerbefreiungen für die Produkte und den Betrieb der Anlagen kann auf die Wirtschaftlichkeit Einfluss genommen werden.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen aus dem Jahre 1979 ergaben, dass in Deutschland die Produktionskosten für einen Liter Heizöl L aus Kohle bei 0,724 DM steuerfrei lagen (Vergleich Heizöl L aus Erdöl: 0,447 DM) und die Produktion von einem Liter Hy-

drierbenzin lag bei 0,858 DM steuerfrei (Vergleich: 0,426 DM). Die Studien zeigten weiter, dass die Produktion von Benzin durch Kohlehydrierung günstiger ist als durch die indirekten Verfahren [4].

Literatur

- [1] R. Dittmeyer, W. Keim, G. Kreysa, A. Oberholz (Hrsg.), Winnacker-Küchler: Chemische Technologie. 5. Aufl. Bd. 4, Wiley-VCH, Weinheim 2006, 726–750
 [2] E. Ahland, F. Friedrich, I. Romey, B. Strobel, H. Weber, Erdöl, Erdgas, Kohle. 102, 148–154 (1986)
 [3] Department of Trade and Technology, dti (UK), Coal Liquefaction. DTI/Pub URN 99/1120, 1999
 [4] H-D. Schilling, D. Wiegand, B. Strobel, Energiewirtschaft, 260–267 (1979)

Anschrift des Verfassers

Dr. Manfred Kaiser, Geschäftsfeldleiter Kokerei Technik, DMT GmbH & Co. KG, Am Technologiepark 1, 45307 Essen

Kohleverflüssigung

Chancen und Grenzen

D. Vallentin

1 | Einführung

Im Zuge einer rapide an Fahrt gewinnenden Debatte über die internationale Energieversorgungssicherheit erfährt eine altbekannte Technologie neue Beachtung: die Verflüssigung von Kohle, auch Coal-to-Liquids (CTL) genannt. Dieses Verfahren macht die langfristig verfügbare und im Vergleich zu Öl und Erdgas preisgünstige Kohle für den Transportsektor nutzbar. Diesel oder Benzin aus Kohle können als Substitut für konventionelle Treibstoffe dienen und in Ländern mit geringen Erdölvorkommen die Abhängigkeit von Ölimporten verringern – eine Möglichkeit, die derzeit insbesondere in China und den USA offensiv verfolgt wird.

2 | Kohleverflüssigungsrouten: Direkte und indirekte Verfahren

Grundsätzlich lassen sich direkte und indirekte Verfahrensvarianten zur Verflüssigung von Kohle unterscheiden.

2.1 Direkte Kohleverflüssigung

Bei der direkten Kohleverflüssigung wird die Kohle mit Katalysatoren und Wasserstoff in einem Reaktor auf etwa 450 °C erhitzt und unter einen Druck von ca. 130–300 Bar gesetzt. Die entstehende Flüssigkeit kann durch Destillation in Benzin und leichte Heizöle verarbeitet werden. Dieses Verfah-

ren wird auch als Kohlehydrierung bezeichnet und basiert auf Erkenntnissen des deutschen Chemikers *Friedrich Bergius* aus dem frühen 20. Jahrhundert. Sie wurde von den Nazis während des Zweiten Weltkrieges genutzt, um die Versorgung des Militärs mit einheimischen Treibstoffen zu sichern. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde die Techno-

Abb. 1: Modell von Shenhuas direkte Kohleverflüssigungsanlage in der Inner Mongolei, China



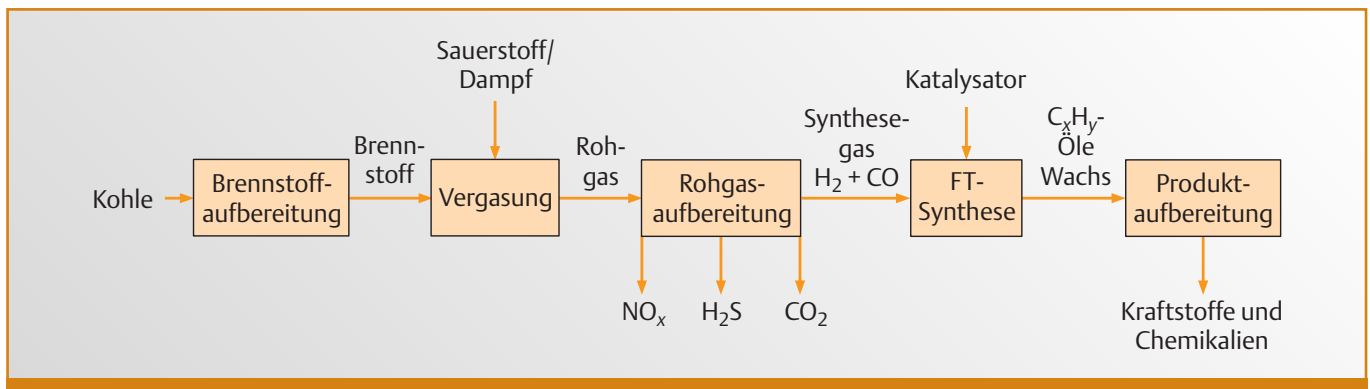


Abb. 2: Verfahrensskizze der indirekten Kohleverflüssigung

logie in einzelnen Demonstrationsanlagen in Deutschland, den USA und Japan getestet, konnte sich jedoch nicht auf dem Markt etablieren und wurde nie großtechnisch genutzt. Gegenwärtig verfolgt lediglich China eine Kommerzialisierung der direkten Kohleverflüssigung. Im September 2008 wurde in der Inneren Mongolei eine direkte Kohleverflüssigungsanlage mit einer Kapazität von zunächst 20000 Fass [1] pro Tag in Betrieb genommen (s. Abb. 1 [2]).

2.2 Indirekte Kohleverflüssigung

Im Mittelpunkt des neu erwachten internationalen Interesses an CTL steht jedoch die indirekte Kohleverflüssigung, die daher auch im Zentrum dieses Beitrags stehen soll. Bei der indirekten Kohleverflüssigung wird die Kohle durch Vergasung zunächst in ein Synthesegas umgewandelt (s. Abb. 2). Während des Vergasungsprozesses reagiert die Kohle unter hohen Temperaturen (teilweise über 1000 °C) und wahlweise erhöhtem oder atmosphärischem Druck mit einem Oxidationsmittel – Sauerstoff oder Luft – sowie Wasserdampf. Das generierte Gas besteht hauptsächlich aus Kohlenstoffmonoxid (CO), Wasserstoff (H_2) und Kohlenstoffdioxid (CO_2). Bei der Verwendung von Luft anstelle reinen Sauerstoffs ist es

überdies mit Stickoxiden (NOX) angereichert. Um die Zusammensetzung des Gases den Anforderungen der Fischer-Tropsch-Synthese anzupassen, sind verschiedene Aufbereitungsschritte erforderlich. Das Gas wird von unerwünschten Nebenprodukten wie Stickstoff- und Schwefelverbindungen oder Teer befreit. Anhand einer Wassergas-Shift (WGS)-Reaktion, bei der Kohlenstoffmonoxid mit Wasser reagiert, wird der Wasserstoffanteil durch die Zugabe von Katalysatoren erhöht. Hierbei entsteht außerdem CO_2 , das zu ca. 95 % abgetrennt werden muss, um den Fischer-Tropsch-Prozess nicht zu behindern.

Im Rahmen der Fischer-Tropsch-Synthese wird das aufbereitete Synthesegas bei hohen Temperaturen in ein Spektrum verschiedener Kohlenwasserstoffe umgewandelt. Es kann ein Mitteldestillatanteil von 75 % produziert werden, der zu 80 % aus Diesel und zu 20 % aus Kerosin besteht. Eine Anhebung des Dieselanteils auf 90 % wird grundsätzlich als möglich betrachtet. Eine Eingrenzung des gesamten Endprodukts auf Diesel ist nach dem aktuellen Stand der Technik allerdings nicht machbar.

Auch die indirekte Kohleverflüssigung wurde von deutschen Ingenieuren entwickelt und während des Zweiten Weltkrieges ein-

gesetzt. Um 1920 entwickelten *Franz Fischer* und *Hans Tropsch* am Kaiser-Wilhelm-Institut für Kohleforschung (heute: Max-Planck-Institut für Kohleforschung) in Mülheim an der Ruhr die nach ihnen benannte Fischer-Tropsch-Synthese. Der Prozess wurde im Jahre 1927 in Leuna in einer Anlage mit einer Kapazität von ca. 8000 Fass pro Tag erstmals großtechnisch eingesetzt. Vor und während des Zweiten Weltkrieges wurden weitere Fischer-Tropsch-Anlagen in Betrieb genommen, die zwischen 1939 und 1945 ca. 22 Millionen Fass Treibstoffe produzierten.

3 | Heutige Verbreitung und Perspektiven der indirekten Kohleverflüssigung

● Seit den 50er Jahren betreibt die südafrikanische Firma Sasol großtechnische CTL-Anlagen und produziert gegenwärtig ca. 160000 Fass flüssige Treibstoffe pro Tag. Dies entspricht etwa einem Drittel des südafrikanischen Treibstoffbedarfs. Aufgrund des langjährigen Betriebs der Sasol-Anlagen ist die indirekte Verflüssigungsrouten im Vergleich zur direkten Kohleverflüssigung technisch wesentlich ausgereifter und kommerziell einsetzbar. Dies ist einer der Gründe, warum sich die aktuelle CTL-Debatte vorrangig auf die indirekte Kohleverflüssigung fokussiert. Überdies ist der durch die Fischer-Tropsch-Synthese generierte Dieseltreibstoff von hoher Qualität, da er praktisch keine Schwefel- oder Stickstoffverbindungen enthält und keiner oder nur geringer Aufbereitung bedarf.

Aufgrund einer starken Dominanz von Rohöl-basierten Treibstoffen im Transportsektor zeigen mehrere Länder – insbesondere solche, die eine hohe Abhängigkeit von Rohölimporten, große nationale Kohlevorkommen sowie einen hohen bzw. steigenden Treibstoffbedarf aufweisen – großes Inte-

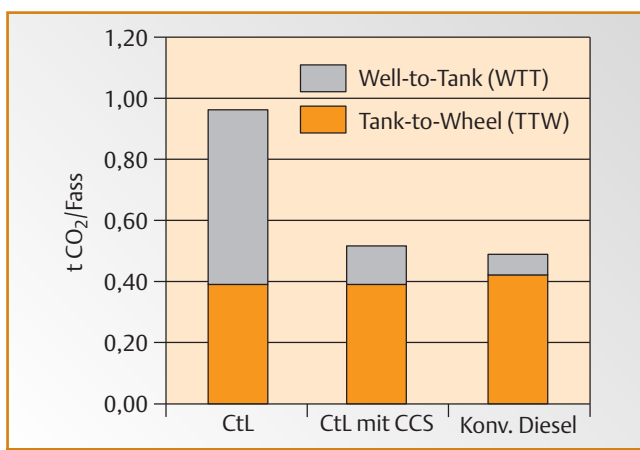


Abb. 3: CO₂-Bilanz der indirekten Kohleverflüssigung

resse an indirekten Kohleverflüssigungsverfahren. Derzeit sind weltweit 25 indirekte CTL-Anlagen mit einer Gesamtkapazität von ca. 900070 Fass pro Tag in Planung, wovon sich sieben Projekte in China (Gesamtkapazität: 290070 Fass pro Tag) und 13 Projekte in den USA (Gesamtkapazität: 332000 Fass pro Tag) befinden. Die Vorhaben sind mehrheitlich in einem frühen Entwicklungsstadium. Lediglich in China befinden sich zwei Demonstrationsanlagen (Gesamtkapazität: 7070 Fass pro Tag) der chinesischen Firma Synfuels China bereits im Bau und sollen noch in diesem Jahr in Betrieb gehen.

4 | Hürden für die Markteinführung der indirekten Kohleverflüssigung

● Die wichtigsten Hürden für die Verbreitung der indirekten Kohleverflüssigungstechnologie sind hohe Investitionskosten für den Bau der Anlagen sowie die hohe CO₂-Intensität des Prozesses.

4.1 Hohe CO₂-Intensität

Abbildung 3 zeigt dass, die Well-to-Wheel (WTW)-Emissionen von CTL – zusammengesetzt aus Well-to-Tank (WTT) und Tank-to-Wheel (TTW)-Emissionen [4] – etwa doppelt so hoch sind wie die WTW-Emissionen von konventionellem Diesel. Die WTT-Emissionen von CTL-Anlagen, welche die Prozesse zur Vergasung und Verflüssigung der Kohle umfassen, übertreffen die Werte konventioneller Raffinerieprozesse um ein Achtfaches. Die bei der Verbren-

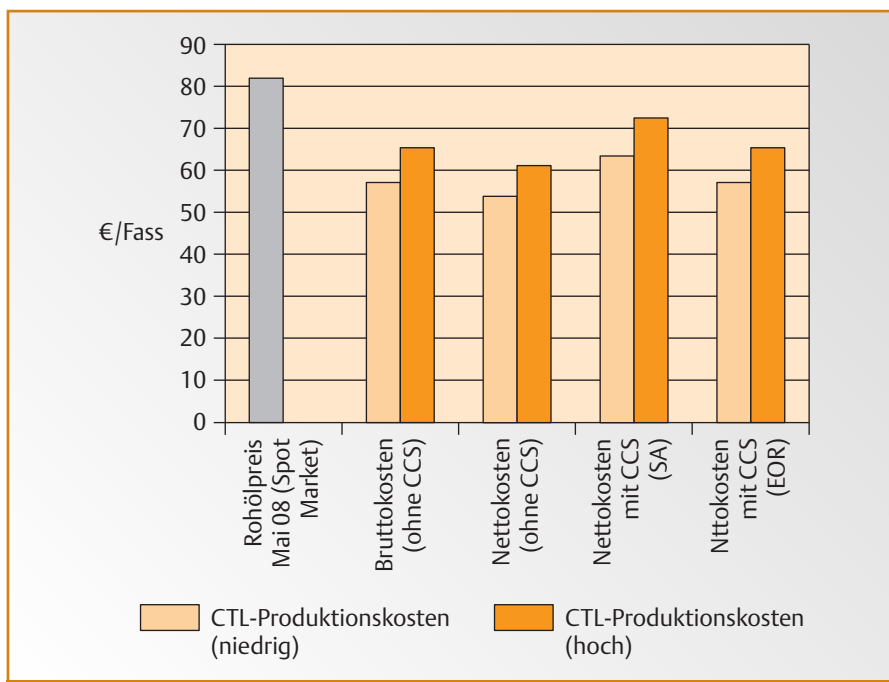
nung des Treibstoffes entstehenden Emissionen (Tank-to-Wheel) sind nahezu identisch. Die CO₂-Intensität des Kohleumwandlungsprozesses kann durch den Einsatz von Technologien zur Abscheidung und Speicherung von CO₂ (Carbon Capture and Storage/CCS) im Untergrund erheblich verringert werden. Hierbei wird das CO₂ nach der Vergasung durch Bindemittel abgetrennt, verdichtet und anschließend zu Lagerstätten abtransportiert. Das CO₂ kann in tiefen wasserführenden Schichten (saline Aquifere/SA) gespeichert oder in weitgehend ausgeförderte Ölfelder injiziert werden, um die Förderrate zu erhöhen. Diese Methode wird auch als Enhanced Oil Recovery (EOR) bezeichnet und generiert im Gegensatz zur Speicherung in einem Aquifer ökonomische Gewinne.

Selbst in Kombination mit CCS-Verfahren und einer Abtrennung von 90 % des während der Vergasung erzeugten CO₂ ist die CO₂-Bilanz von CTL-Verfahren jedoch schlechter als die von konventionellem Diesel. Dies ist dadurch begründet, dass die WTT-Emissionen von CTL trotz CCS immer noch höher sind als die konventioneller Raffinerieverfahren. Überdies erzeugt die Verbrennung von Fischer-Tropsch-Diesel praktisch genauso viel CO₂ wie die Verbrennung konventionellen Diesels, sodass ein Sockel an Tank-to-Wheel-Emissionen bestehen bleibt. Demnach generieren auch aufwendige technische Maßnahmen keine CO₂-Minderung gegenüber Rohöl basierten Treibstoffen.

4.2 Hohe Investitions- und Produktionskosten

Die Anwendung von CCS führt überdies zu einer Erhöhung der spezifischen Produktionskosten von CTL-Diesel, da die CO₂-Abscheidung und -Speicherung mit einem hohen Energie- und Kostenaufwand verbunden ist. Abbildung 4 [5] stellt die Brutto- und Nettokosten der Produktion von CTL-Treibstoff ohne und mit CCS (Aquifer und EOR) dar und vergleicht diese mit dem Ölpreis im Mai 2008 [6]. Die Nettokosten beinhalten Gewinne aus dem Verkauf von Nebenprodukten wie z. B. Schwefel. Die „niedrigen“ und „hohen“ Angaben bilden eine Bandbreite von 50 % ab und reflektieren aktuelle Schwankungen bei den Investitionskosten für großtechnische Anlagen, die v. a. durch einen hohen Stahlpreis sowie gestiegene Arbeitskosten begründet sind. Die Abbildung zeigt, dass die Produktionskosten in einem Bereich zwischen 57 und 71 Euro pro Barrel liegen. Demnach befinden sich alle untersuchten Fälle deutlich unterhalb des internationalen Ölpreises. Allerdings besteht aufgrund der starken Schwankungen des Ölpreises in den vergangenen Jahren nur eine begrenzte Investitionssicherheit. Diese ist von hoher Wichtigkeit, da CTL-Anlagen mit Investitionskosten von ca. drei bis vier Milliarden Euro extrem teuer sind. Potenzielle Investoren sind daher sehr zögerlich und fordern staatliche Unterstützung für den Bau derartiger Anlagen. Die dargestellte Entwicklung zeigt, dass die Marktverbreitung von CTL-Anlagen stark von ökonomischen und klimapolitischen Faktoren beeinflusst wird.

Abb. 4: CTL-Produktionskosten (basierend auf [1])



Literatur

- [1] Ein Fass entspricht 159 Litern.
 [2] Zhang, Yuzhuo (2006), Shenhua Coal Conversion Technology and Industry Development, Beijing
 [3] Sasol (2007), Aspects of the Clean Coal Technology Research and Development Program in Sasol
 [4] Well-to-Wheel-Emissionen: Beinhalten Emissionen von der Brennstoffförderung bis zur Treibstoffverbrennung im Antriebsmotor; Well-to-Tank-Emissionen: Beinhalten Emissionen von der Brennstoffförderung bis inkl. der Treibstoffherstellung; Tank-to-Wheel-Emissionen: Emissionen, die bei der Verbrennung des Treibstoffes entstehen.
 [5] Basierend auf: Southern States Energy Board (2006), American Energy Security Study. Building a Bridge to Energy Independence and to a Sustainable Energy Future.
 [6] Die untersuchte Anlage hat eine Kapazität von 60000 Fass pro Tag und verarbeitet 33640 Tonnen Steinkohle pro Tag zu einem Preis von 63 Euro pro Tonne.

Anschrift des Verfassers

Daniel Vallentin, Mainzer Str. 19, 42119 Wuppertal, E-Mail: daniel.vallentin@gmx.de

Trends der globalen Energie- und Rohstoffversorgung

R. Lübke und K. van de Loo

1 | Die erste Ölkrise

● Bis Anfang der 1970er Jahre herrschte in den Industrienationen weitgehend Sorglosigkeit in Bezug auf die Verfügbarkeit und Preisentwicklung der in letzter Konsequenz endlichen Rohstoffbasis, auf der ihr Wohlstand zu großen Teilen aufgebaut war. Spätestens seit der ersten Ölkrise in 1973/74 aber, in deren Rahmen die Ölpreise von 2 bis 3 US-Dollar pro Barrel (US-\$/bbl; 1 Barrel (dt. Fass) = 159 Liter) nach Verstaatlichung der Ölindustrie in den Golfstaaten und infolge eines Ölembargos der OPEC (Organisation Erdöl exportierender Länder) sprunghaft auf das vier- bis fünffache erhöht wurden, änderte sich diese Einstellung jedoch drastisch [1]. Bereits 1972 hatte der Club of Rome-Bericht „Die Grenzen des Wachstums“ vor den Folgen einer Rohstoffverknappung gewarnt. Dessen Prognosen hatten sich aber nicht bestätigt [2].

2 | Weichenstellung für die neuzeitliche Rohstoffmarktsituation

● In den Folgejahren stellten die Industrienationen ihre Rohstoffversorgung durch Diversifikation der Lieferländer auf eine breitere Basis, förderten neue Abbautechniken, erschlossen neue Vorkommen zu Lande (onshore) und zu Wasser (offshore), substituierten Öl durch andere Rohstoffe, opti-

mierten ihre Produktionsverfahren und Umwandlungstechniken und entwickelten Programme zur Einsparung von Energie und Rohstoffen.

In 1979/80 kam es zur zweiten Ölpreiskrise, die in vielen Industrieländern rezessive Tendenzen auslöste. Die hohen Öl- und Energiepreise führten jedoch zum Aufbau von Überkapazitäten, die ab Mitte der 1980er Jahre in einen Preisverfall und eine anhaltende Käufermarktsituation mündeten [1].

Im Laufe der Zeit nahmen Marktinstabilitäten zu, temporäre Angebotsengpässe, aber auch Kriege und andere politische Ereignisse erhöhten die Preisvolatilität und führten langsam aber stetig zu einem Preisanstieg, der sich in 2007/2008 enorm beschleunigt hat. Diese Entwicklung war auch bei den anderen energetischen (z. B. Kohle, Erdgas) und mineralischen Rohstoffen (z. B. Eisenerz, Kupfer) in unterschiedlicher Ausprägung zu beobachten. (Abb. 1, siehe Online-Ergänzung)

3 | Das neue Zeitalter im Zeichen knapper Rohstoffe

● Zum Beginn des neuen Jahrtausends zeichnen sich umfassende Änderungen der Rahmenbedingungen auf den internationalen Rohstoff- und Energiemärkten ab. Die Veränderungen sind derart radikal, dass einige Experten bereits von einer neuen Ener-

gie- und Rohstoffära, aber auch vom Ende des Ölzeitalters sowie vom „Kalten Krieg“ um Rohstoffe sprechen [4].

Auf der Angebotsseite werden die geologischen Bedingungen in Zukunft fast überall schwieriger: Tendenzen der Produktionsverlagerung von Tage- auf Tiefbau, größere Fördertiefen (Teufen), geringere Rohstoffdichten (Vorkommen, Flözmächtigkeit), abnehmende Qualitäten und längere Transportwege durch entlegene Abbaugelände. Kurz gesagt, es wird neben quantitativen Begrenzungen eine zunehmende Tendenz vom guten, günstigen (Energie-)Rohstoff zum qualitativ schlechteren, teureren Rohstoff geben. So rechnetete der BP-Statistical Review die schon vielen Jahrzehnten bekannten kanadischen Ölsande aufgrund der gestiegenen Ölpreise seit 2002 zu den sicher bestätigten und wirtschaftlich gewinnbaren Ölreserven [5]. Demgegenüber stehen zwar neue Funde von Lagerstätten wie z. B. die vor Kurzem vor Brasilien entdeckte Erdöl-Lagerstätte „Tupi“ (250 km vor der brasilianischen Atlantikküste gelegen), die jedoch erst in einigen Jahren marktreife erreichen kann.

Zunehmend beeinflussen staatliche Unternehmen und Aktivitäten (z. B. China) die Rohstoffproduktion anderer Länder. Ehemals privatwirtschaftliche Rohstoffunternehmen (z. B. Yukos in Russland, Ölindustrie in Venezuela) werden verstaatlicht, wodurch

Tab. 1: Weltenergieverbrauch – Anteile der Energieträger in Prozent (Quelle: BP Energy Review 2008/US-Department of Energy DOE, International Energy Outlook 2007)

Weltenergieverbrauch		Anteil der Energieträger in %					
Jahr	Gesamt Mrd. t SKE	Kohle	Erdöl	Erdgas	Kernenergie	Sonstige	Anteile fossiler Energieträger
Istwerte nach BP Energy Review 2008							
1970	7,87	28,9	41,5	16,9	0,4	12,3	87,3
1980	10,42	26,2	41,5	17,8	2,4	12,1	85,5
1990	12,64	25,4	35,4	20,0	5,8	13,4	80,8
2000	14,04	22,2	35,7	22,0	6,8	13,3	79,9
2005	16,57	25,3	33,1	21,3	6,2	14,1	79,7
2006	17,14	25,8	32,5	21,5	6,1	14,1	79,8
2007	17,49	26,0	32,3	21,6	5,9	14,2	79,9
Prognose des US-amerikanischen Energieministeriums DOE 2007							
2010	18,34	26,7	36,0	23,6	5,8	7,9	86,3
2015	20,08	27,1	35,3	24,0	5,8	7,8	86,4
2020	21,78	27,5	34,7	24,2	5,9	7,7	86,4
2025	23,46	28,0	34,3	24,3	5,8	7,6	86,6
2030	25,16	28,4	34,1	24,3	5,6	7,6	86,8

Produktivität und Investitionsaktivitäten dieser Unternehmen danach messbar abflachen. Rohstoffkonzerne verschmelzen zu Bergbaugiganten mit internationaler Marktmacht (z. B. Übernahmeversuch von Rio Tinto durch BHP-Biliton, – beide Australien) sowohl horizontal (d. h. die länderübergreifende Abdeckung mehrerer Rohstoffmärkte nebeneinander wie Öl, Kohle, Gas, Erze), als auch vertikal (d. h. mehrere aufeinander folgende Marktstufen wie Exploration, Förderung, Aufbereitung, Transport und Vermarktung an Endabnehmer gleichzeitig in einer Hand). Die Angebotskonzentration nimmt also deutlich zu. Gleichzeitig sind das Nachfragevolumen und die internationale Nachfragekonkurrenz so groß wie nie zuvor. Dies drückt sich auf der Nachfrageseite u. a. darin aus, dass sich große Stahlkonzerne wie Tata Steel (Indien) und Corus (Vereinigtes Königreich/Niederlande) ihre Rohstoffbasis durch Beteiligungen und komplette Übernahmen ihrer Rohstofflieferanten sichern. So greifen beispielsweise die beiden vorgenannten Konglomerate zu 100 % auf eigene Eisenerzvorräte zurück.

4 | Die Rolle der Schwellenländer

● Auf der Nachfrageseite drängen die so genannten Schwellenländer immer stärker auf die internationalen Energie- und Rohstoffmärkte. Unlängst prägte die US-amerikanische Investmentbank Goldman-Sachs den Namen „BRIC“ für die wichtigsten dieser Länder, entsprechend der Anfangsbuchstaben ihrer Ländernamen: Brasilien, Russland, Indien und China. Dabei zeichnen sich vor allem China und Indien durch hohes Bevölkerungswachstum bei gleichzeitig hohen Wirtschaftswachstumsraten aus. Beide Länder benötigen dringend ausreichende Rohstoffzufuhren, um ihre wirtschaftliche und technische Weiterentwicklung nicht zu gefährden. Sowohl China als auch Indien verfügen zwar über immense Vorkommen fossiler Energien, müssen aber derzeit auf den internationalen Märkten im großen Maßstab zukaufen. China – als größtes Kohleförderland der Welt – wandelte sich zwischenzeitlich vom Kohleexporteur zu Kohlenettoimporteur [6]. Auch für Indien ist diese Entwicklung in den nächsten Jahren absehbar. (Übersicht siehe Abb. 2, siehe Online-Ergänzung)

5 | Ende der „Schweinezyklen“?

● Die Vergangenheit hat immer wieder gezeigt, dass Rohstoffmärkte ausgeprägten zy-

klichen Schwankungen, so genannten Schweinezyklen, unterliegen. Regelmäßig wechseln sich Hochpreisphasen (Hausse) mit Tiefpreisperioden (Baisse) ab. Nachfrageüberhänge und temporäre Angebotsengpässe wurden über kurz oder lang durch Angebotsausweitungen oder konjunkturelle Einbrüche wieder ausgeglichen. Zu beobachten war aber auch, dass sich die Preisspirale in längerfristigen Abständen immer weiter nach oben drehte. Infolge dieser Erfahrungen erwarten viele Analysten, dass die aktuelle Hochpreisphase früher oder später ihr Ende finden wird, dann allerdings auf einem höheren Preisniveau als in früheren Zeiten. Andererseits ist die derzeitige Marktentwicklung einmalig in der Wirtschaftsgeschichte. Es ist anzunehmen, dass die aktuelle wirtschaftliche Aufholjagd der Schwellenländer nicht nur ein vorübergehendes Strohfeuer darstellt, sondern sich für die globale Rohstoff- und Energiewirtschaft zu einem so genannten Superzyklus auswachsen könnte, der viele Jahre oder gar Jahrzehnte anhält [8].

6 | Steigende Importabhängigkeit in Deutschland und Europa

● Vor diesem Hintergrund ist zu bedenken, dass Deutschland und Europa in zunehmendem Maße ihren Öl-, Gas- und Kohlebedarf zum Großteil durch Importe decken müssen. Die Öl- und Gasvorkommen in der EU werden in naher Zukunft zur Neige gehen. In ca. 20 Jahren wird Europa seinen Bedarf an Erdöl und Erdgas zu 70 bis 80 Prozent durch Importe decken müssen. Bereits heute (Stand: Ende 2007) beträgt die Abhängigkeit von Energieimporten in Europa rund 50 Prozent, jene Deutschlands liegt bei rund 75 Prozent [7, 9].

7 | Bedeutung der Kohle für die zukünftige Energieversorgung

● Während in Deutschland und in anderen Teilen Europas die zukünftige Kohlenutzung insbesondere bei der Stromerzeugung vorwiegend aus umweltpolitischen Erwägungen zum Teil kritisch gesehen wird, sagen mehrere internationale Prognosen der Kohle (Stein- und Braunkohle zusammen genommen) hohe Wachstumsraten in der globalen Energiewirtschaft voraus. So ist der Tabelle 1 zu entnehmen, dass die fossilen Energieträger insgesamt und weltweit auch in Zukunft schwer zu ersetzen sein werden. Beispielsweise geht das US-amerikanische Energieministerium im Referenz-Szenario

seiner aktuellen Prognose davon aus, dass der globale Kohleverbrauch im Projektionszeitraum 2004 bis 2030 um 74 % (d. h. +2,2 % pro Jahr) steigen wird. Der Anteil der Kohle am Weltenergieverbrauch des Jahres 2030 würde demnach rund 28 % (25 % in 2004) betragen, der Anteil an der Weltstromerzeugung rund 45 % (43 % in 2004) [11]. Kohle wäre damit die am stärksten steigende Energiequelle weltweit. Ähnliche Voraussagen macht die International Energy Agency (IEA). Sie erwartet zugleich, dass neben der Klimafrage schon bald die Sicherheit der Energieversorgung die politische Agenda der Industrieländer dominieren wird [12].

Literatur

- [1] G. Erdmann und P. Zweifel, Energieökonomik – Theorie und Anwendungen. Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2008, S. 186–198
- [2] D. Meadows, Die Grenzen des Wachstums – Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, Stuttgart 1972, S. 45–57
- [3] Mineralölwirtschaftsverband e. V.: Preisstatistiken, Download unter: http://www.mwv.de/cms/front_content.php?idcat=14
- [4] Gesamtverband Steinkohle (GVSt): Der neue kalte Krieg – Kampf um die Rohstoffe. FAA 28, 28. Mai 2006; <http://www.gvst.de/site/fakten/fakten.htm?step=10>
- [5] BP: BP Statistical Review of World Energy June 2008. <http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622>
- [6] Goldman-Sachs International: BRICs-Kompass. 3. Auflage, Februar 2008. http://www.goldman-sachs.de/default/kompass_magazin/
- [7] Gesamtverband Steinkohle (GVSt): „Jahresbericht 2007“ Download unter: <http://www.gvst.de/site/steinkohle/steinkohle.htm>
- [8] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2006. Erscheinungsdatum: 23.11.2007. http://www.bgr.bund.de/cln_011/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie_Kurzf_2006.html
- [9] Deutsches Nationales Komitee des Weltenergieerates (DNK): Energie für Deutschland 2007 – Schwerpunktthema: Transportinfrastrukturen für Energie. Berlin, Mai 2008, S. 11. <http://www.weltenergierrat.de/>
- [10] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Auswertungstabellen zu den Energiebilanzen. <http://www.ag-energiebilanzen.de/>
- [11] Energy Information Administration – U.S. Department of Energy (EIA-DOE): International Energy Outlook 2007. Mai 2007. <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html>
- [12] International Energy Agency (IEA): World Energy Outlook 2007: Fact Sheet – Global Energy Demand. Paris 2008; / IEA: World Energy Outlook 2005 – Deutsche Zusammenfassung. Paris 2006. http://www.iea.org/Textbase/publications/free_new_result.asp?title=weo&Submit=Submit

Anschrift der Verfasser

Diplom-Kaufmann Roland Lübke und
Dr. oec. Kai van de Loo, Gesamtverband Steinkohle
(GVSt), Rüttenscheider Str. 1–3, 45128 Essen,
E-Mail: roland.luebke@gvst.de

Energiepolitische Ziele

F.-J. Wodopia

1 | Energiepolitik in Deutschland

Die Energiepolitik in Deutschland verfolgt seit je und auch gegenwärtig drei zentrale Ziele: Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit und Umweltverträglichkeit. So betonen es jedenfalls alle bisherigen Energieprogramme, -konzepte und -berichte der Bundesregierung, ebenso der im Vorfeld des nationalen Energiegipfels 2006 von der Bundesregierung vorgelegte „Statusbericht zur Energieversorgung“ oder auch die aktuelle Darstellung der energiepolitischen Ziele durch das für die Energiepolitik der Bundesregierung federführende Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Gelegentlich wird der energiepolitische Zielkatalog auch um Ziele wie Ressourcenschonung, Förderung neuer Energietechnologien, gesellschaftliche Akzeptanz oder Sozialverträglichkeit erweitert, doch im Kern der Energiepolitik im engeren Sinne geht es stets um die vorgenannte Zieltrias.

Im Zeitablauf haben sich allerdings die Gewichte zwischen diesen Zielen verschoben und, solche Schwerpunktverlagerungen sind auch für die Zukunft zu erwarten. Nach den Weltölkrisen der 1970er Jahre stand die Versorgungssicherheit im Vordergrund. Später dominierte im Zuge der Liberalisierung und Globalisierung der Energiemärkte zeitweise das Wirtschaftlichkeitsziel. In jüngerer Zeit ist zunehmend die Umwelt-

verträglichkeit, insbesondere in der Gestalt der Klimavorsorge, in den Fokus gerückt. Das 2007 von der Bundesregierung verabschiedete und in weiteren Etappen 2008 umgesetzte „Integrierte Energie- und Klimaprogramm“ (IEKP) besagt zwar ausdrücklich, dass „Richtschnur der Energiepolitik der Bundesregierung ... das Zieldreieck aus Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit (bleibt)“ [1], aber es setzt den Akzent, wie der Name des Programms es schon zum Ausdruck bringt, auf den Klimaschutz oder genauer gesagt: auf die Formulierung ehrgeiziger nationaler Klimaschutzziele in diversen Teilbereichen, von der Stromerzeugung über den Wärmemarkt bis hin zum Verkehrssektor.

Wann immer aber eines der Ziele ein zu großes Übergewicht bekommt, droht das Zieldreieck der Energiepolitik wegen der vielfältigen Wechselwirkungen und Konkurrenzbeziehungen zwischen den Einzelzielen die Balance zu verlieren. Denn oft genug gilt: „Ein Mehr bei einem Ziel bewirkt ein Weniger bei den anderen Zielen ... Energiepolitik muss also den optimalen Bereich in diesem magischen Zieldreieck definieren und anstreben.“ [2]

Es ist daher nicht verwunderlich, dass der Vorrang der Klimaziele in jüngster Zeit die Besorgnisse über die Realisierbarkeit der Ziele Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit verstärkt hat. Unter Wirtschaftlichkeit wird dabei die Preis- bzw. Kosten-

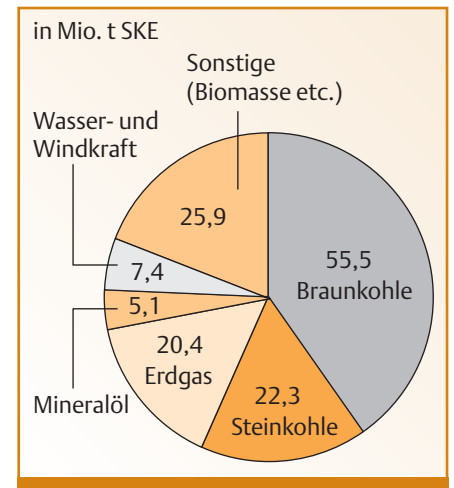


Abb. 2: Primärenergiegewinnung in Deutschland 2007

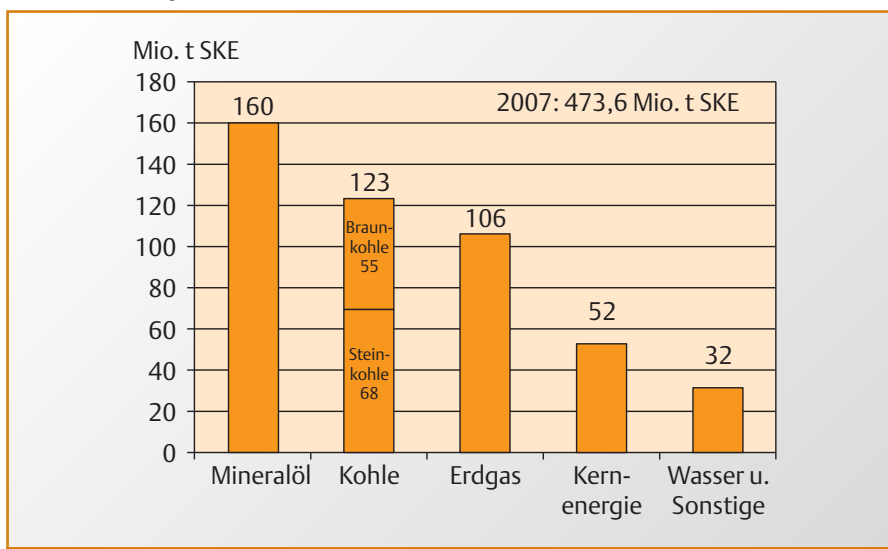
günstigkeit der Energieversorgung verstanden. Versorgungssicherheit bedeutet demgegenüber, dass jederzeit ein ausreichendes Energieangebot sichergestellt ist. Das Potenzial für Zielkonflikte ist dabei groß. Unstrittig ist allein, dass eine effizientere Energieumwandlung und -nutzung allen drei Zielen zugleich dienlich ist.

2 | Der Energieträger Kohle und seine Einordnung in die energiepolitischen Zielsetzungen

Wie ist nun der Energieträger Kohle in die energiepolitischen Zielsetzungen einzuordnen? Dazu erscheint zunächst einmal ein Blick auf die maßgeblichen Fakten angebracht: Mit einem Anteil von 25,8 % am Primärenergieverbrauch (PEV) war die Kohle im Jahr 2007 die zweitgrößte Primärenergiequelle der deutschen Volkswirtschaft, dies nach dem Mineralöl (33,8 %), aber vor dem Erdgas (22,6 %), der Kernenergie (11,1 %) und den erneuerbaren Energien (6,6 %). Dabei teilt sich der Kohleanteil auf die Steinkohle (14,1 %) und die Braunkohle (11,7 %) auf (Abb. 1).

Während bei der Braunkohle vollständig auf heimische Produktion zugegriffen wird, stammt die auf dem deutschen Energiemarkt nachgefragte Steinkohle inzwischen zu rd. zwei Dritteln aus Importen, noch zu einem Drittel (künftig weiter rückläufig) wird sie aus heimischer Gewinnung bereitgestellt. Der Kohlebedarf erstreckt sich dabei vor allem auf die Stromerzeugung, die in

Abb. 1: Primärenergieverbrauch in Deutschland 2007



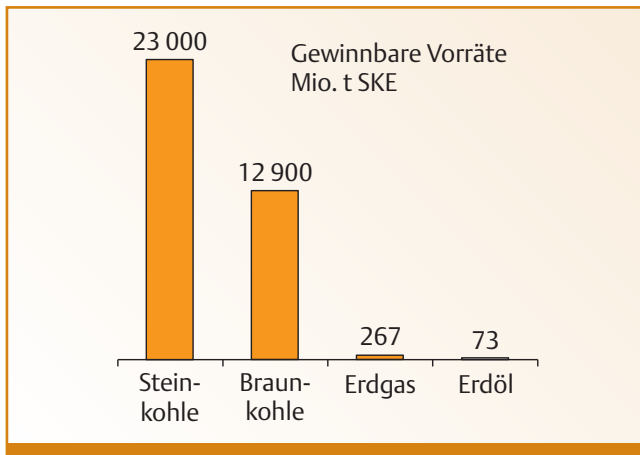


Abb. 3: Energie-Rohstoffvorräte in Deutschland

Deutschland zu fast 50 % auf Kohle basiert, und zu einem geringeren Teil auf den Einsatz von Koks, Einblaskohle und Koks in der Rohstahlproduktion. Im Wärmemarkt hat die Kohle heute nur noch eine Nischenfunktion, bei der Treibstoffversorgung des Verkehrssektors spielt sie in Deutschland – trotz der seit Langem entwickelten technologischen Möglichkeiten zur Erzeugung von Kohleöl und Treibstoffen auf Kohlebasis – bisher praktisch keine Rolle.

Bei der inländischen Primärenergiegewinnung, die allerdings heute weniger als 30 % des PEV deckt, ist das Gewicht der Kohle erheblich größer. Hier lag ihr Anteil in 2006 bei 57 %. Dies teilte sich auf in Braunkohle (41 %) und Steinkohle (16 %), womit der Anteil der letzteren noch immer vor der heimischen Erdgasgewinnung (15 %) und weit vor der Wasserkraft- und Windkraftgewinnung (5 %) lag (Abb. 2).

Was die inländischen Energierohstoffvorräte betrifft, ist Deutschland ohnehin ein absolutes Kohleland. 99 % der hierzulande gewinnbaren Energierohstoffe sind Kohlevorkommen (Steinkohle: 63 %, Braunkohle 36 %; Abb. 3).

Die heimischen Erdgas- und Erdölvorräte sind im Vergleich dazu sehr beschränkt und werden in wenigen Jahren völlig erschöpft sein. Die heimischen Kohlevorräte reichen dagegen theoretisch noch für Jahrhunderte. Auch weltweit sind die Kohlevorkommen erheblich größer als die Öl- und Gasvorkommen. Braunkohle und Importsteinkohle sind zudem gemessen an ihren Brennstoffpreisen bisher wesentlich kostengünstiger und preisstabiler gewesen als Erdöl und Erdgas und erst recht als die erneuerbaren Energien. aDem Vergleich mit dem größten Teil der Letzteren hält indessen auch die heimische Steinkohle stand. So hat eine wissenschaftliche Berechnung der FH Aachen in 2007 den Subventionsbedarf für eine

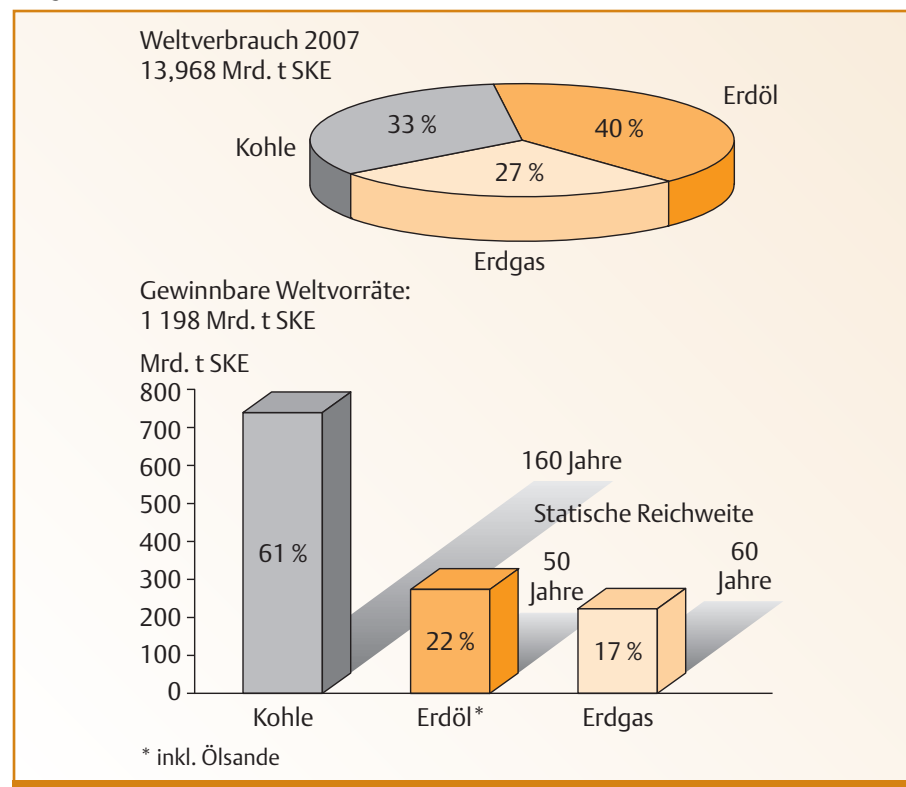
kWh Strom aus deutscher Steinkohle im Vergleich zu Importsteinkohle auf rd. 2,5 Ct veranschlagt. Der subventionsäquivalente Anteil in den durchschnittlichen Vergütungen für erneuerbare Energien betrug demgegenüber rund 5,4 Ct.

Vor diesem Hintergrund ist begründeterweise zu erwarten, dass die Kohle für die Energieversorgung in Deutschland noch lange eine wichtige Rolle spielt. Ihr Hauptproblem ist jedoch – als naturgemäß kohlenstoffreiche Energiequelle – die Vereinbarkeit mit den national und international immer ambitionierteren Klimaschutzzielen, die auf eine CO₂-arme oder langfristig sogar weitgehend CO₂-freie Energieversorgung abstellen. Um die Vereinbarkeit der Kohle

mit der Klimavorsorge zu erreichen, werden von Politik, Forschung und Unternehmen zwei strategische Wege verfolgt. Zum einen eine Effizienzstrategie, die durch technologische Fortschritte bei der Kohlenutzung insbesondere eine weitere Steigerung der Wirkungsgrade (bei neuen Steinkohlekraftwerken von heute etwa 46 % auf 50 % und mehr) sowie die Minimierung der Schadstoffemissionen der Kohleverstromung bezweckt (CCT – Clean Coal Technologies). Zum anderen die Forcierung der Entwicklung der sog. CCS-Technologien (Carbon Capture and Storage), bei denen das CO₂ abgetrennt und gespeichert werden soll. Beide Technologiepfade können sich ergänzen, aber es gibt auch Zielkonflikte, beispielsweise weil die CCS-Technologie nach heutigem Wissensstand zu beträchtlichen Wirkungsgradverlusten (mindestens 10–15 %) führt. Abzuwarten bleiben die Ergebnisse der weiteren FuE und deren kommerzielle Umsetzbarkeit in diesem Bereich.

Etwas anders gelagert ist die spezifische Problematik der deutschen Steinkohle. Zwar gilt für diese in Bezug auf die Klimaziele das Gleiche wie für die Steinkohle insgesamt, wobei zu berücksichtigen ist, dass die CO₂-Emissionen aus deutscher Steinkohle infolge des bisherigen und weiteren Anpassungsprozesses weit überproportional zurückgegangen sind und sich weiter

Abb. 4: Gewinnbare Weltvorräte und Verbrauch an Kohle, Erdöl und Erdgas – Missverhältnis zwischen Energievorräten und Verbrauchsstruktur



verringern werden. Wegen der seit Jahrzehnten fehlenden Wettbewerbsfähigkeit und des anhaltenden Subventionsbedarfs des Steinkohlenbergbaus ist in 2007 der politische Beschluss gefasst worden, die subventionierte Förderung deutscher Steinkohle weiter sozialverträglich zurückzuführen und in 2018 zu beenden. Allerdings soll der Deutsche Bundestag gemäß § 1 Abs. 2 des Steinkohlefinanzierungsgesetzes im Jahr 2012 „unter Beachtung der Gesichtspunkte der Wirtschaftlichkeit, der Sicherung der Energieversorgung und der übrigen energiepolitischen Ziele (prüfen), ob der Steinkohlenbergbau weiter gefördert wird“ (sog. Revisionsklausel; siehe [www](#) Online-Ergänzung: Abb. über Finanzierungshilfen für die Deutsche Steinkohle).

Hier werden die energiepolitischen Ziele also ganz konkret zum Kriterium für die Existenzberechtigung. Was die Wirtschaftlichkeit der deutschen Steinkohle betrifft, bleibt abzuwarten, ob sich die Schere zwischen heimischen Förderkosten und Weltmarktpreisen nachhaltig zu schließen beginnt. Bei der Kraftwerkskohle sind die internationalen Preise seit 2006 in einem Aufwärtstrend, der mittlerweile wiederholt zu einem neuen Allzeithoch geführt hat. Zudem gehören zu den Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit auch die regionalökonomische Bedeutung des Steinkohlenbergbaus als Wirtschafts- und Beschäftigungsfaktor, seine enge Verflechtung mit den vor- und nachgelagerten Sektoren (wie insbesondere dem deutschen Bergbaumaschinenbau) so-

wie die fiskalischen Folgekosten, die sich aus Stilllegungen und Arbeitsplatzverlusten im Bergbau und seiner Mantelwirtschaft ergeben. Was die Versorgungssicherheit betrifft, ist die vollständige Preisgabe der größten heimischen Rohstoffreserve ein irreversibler Schritt, der bei langfristiger energiepolitischer Sicht nur zu bedauern ist (Abb. 4).

Literatur

- [1] BMU, Das Integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung vom 5.12.2007
 [2] BMWi, Energiebericht 2001: Nachhaltige Energiepolitik für eine zukunftsfähige Energieversorgung, S. 6

Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Franz-Josef Wodopia, geschäftsführendes Vorstandsmitglied des Gesamtverbandes Steinkohle (GVSt), Rüttenscheider Str. 1–3, 45128 Essen

Deutsche Bergbautechnik

Ein Exportschlager

K. Stöckmann

Der Bergbau hat nach der Jahrtausendwende weltweit einen unglaublichen Aufschwung erlebt. Das Wachstum im Allgemeinen und in den sogenannten BRIC-Ländern (Brasilien, Russland, Indien und China) im Besonderen hat zu einer stark gestiegenen Nachfrage nach Rohstoffen aller Art geführt, ohne die ein Aufbau von Infrastruktur, Produktionsanlagen oder die Herstellung von Konsumgütern nicht möglich ist. Diese Nachfrage hat zu erheblichen Preissteigerungen bei Kohle, Erzen und Mineralien geführt. Die gestiegenen Einnahmen der Bergbaugesellschaften versetzen sie in die Lage, in neueste Abbau- und Aufbereitungstechnik zu investieren, wovon die deutsche Bergbauzulieferindustrie profitiert. Sie hat diese Chancen auch genutzt und konnte die Produktion von 1,78 Mrd. Euro im Jahr 2002 auf 3,41 Mrd. Euro in 2007 nahezu verdoppeln. Der Exportanteil stieg in diesem Zeitraum von 70 % auf 86 % (s. Abb. 1).

1 | Nachfrageboom bei Rohstoffen durch Bevölkerungswachstum

- Basis der steigenden Nachfrage nach Rohstoffen ist der lang andauernde welt-

weite Aufschwung, insbesondere in den sogenannten BRIC-Ländern Brasilien, Russland, China und Indien. Der Run auf Rohstoffe könnte solange anhalten, bis das chinesische oder indische Volk (fast 40 % der Weltbevölkerung) einen ähnlichen Lebensstandard wie Europa erreicht hat. China ist zum Beispiel der weltgrößte Abnehmer von Kohle, Kupfer, Aluminium oder Eisenerz geworden. Mit diesen Rohstoffen baut das Land die Infrastruktur auf oder produziert Investitionsgüter (Maschinen und Anlagen) und Konsumgüter (Kraftfahrzeuge, Mobiltelefone, Kleidung, Wohnungseinrichtung). Wegen dieser starken Nachfrage, nicht nur aus China, sondern auch aus Indien, haben sich zum Beispiel die Erzpreise in den letzten fünf Jahren verdoppelt. Mit dieser Entwicklung geht ein stark gesteigener Energiebedarf einher, der in Russland, China oder Indien ganz überwiegend mit Kraftwerken auf Kohlebasis bedient wird.

2 | Bergbautechnik „Made in Germany“ ist weltweit führend

- Diese Entwicklung beinhaltet große Chancen, das in Deutschland vorhandene Know-how beim Rohstoffabbau in diesen Ländern

zu vermarkten. Die Erfahrung aus mehreren Jahrhunderten Bergbau in Deutschland hat den guten Ruf der Branche als Technologieführer begründet, der sich mit dem Qualitätsbegriff „Made in Germany“ im Allgemeinen verbindet. Dabei macht sich auch die lange Zusammenarbeit der Unternehmen mit den Bergbaufakultäten der Universitäten Aachen, Clausthal und Freiberg positiv bemerkbar. Die Technologieführerschaft beschränkt sich nicht nur auf den untertägigen Bergbau. Auch bei der Gewinnung von Rohstoffen im Tagebau spielen die Erfahrungen der Ausrüster nicht zuletzt in den deutschen Braunkohlerevieren eine tragende Rolle. Immerhin steht Deutschland bei der Braunkohlenförderung mit einer Jahresproduktion von 180 Mio. Tonnen (2007) weltweit unangefochten an der Spitze.

2.1 Steinkohlebergbau

Die Re-Industrialisierung Deutschlands war nach 1945 von der Entwicklung der Stahl- und Montanindustrie geprägt. Die Kohle „befeuerte“ sowohl die industrielle Produktion im Allgemeinen als auch die Stahlindustrie im Besonderen. Der Bedarf an Kohle und die zunehmend komplizierter werdenden geologischen Bedingungen

fürten zu einer ständigen Verbesserung der Gewinnungs- und Aufbereitungstechnik für die deutschen Gruben, die auch in anderen Kohle produzierenden Ländern Anwendung fand. Der Export dieser Ausrüstungen bildet, in Verbindung mit dem vorhandenen Know-how, die Grundlage für die weltweiten Markterfolge in der Gegenwart. Nach den kohlepolitischen Beschlüssen der letzten Jahre steht heute die Erhöhung der Produktivität und der Sicherheit im Bergbau im Vordergrund der weiteren Entwicklung der Bergbautechnik. Beide Aspekte haben heute in den größten Märkten (USA, Russland, China) herausragende Bedeutung und eine entsprechende Nachfrage nach deutscher Technik zur Folge. Hinzu kommt die Weiterentwicklung der Prozessautomatisierung beim Steinkohleabbau, was zum Beispiel in Polen und China auf großes Interesse trifft (Abb. 2 siehe [www](#) Online-Ergänzung).

2.2 Braunkohleabbau

Die Braunkohlegewinnung im Rheinischen Revier und in den Revieren der Lausitz und Mitteldeutschlands dient der Energieerzeugung vor Ort. Die heutigen Herausforderungen für die Anbieter von Tagebautechnik liegen in der Reduzierung von Geräuschemissionen, in der Verbesserung der Abbaugenauigkeit durch Einsatz von Satellitennavigation sowie in der weiteren Automatisierung der Produktionsprozesse. Die bei der Braunkohle verwendeten Abbaumethoden werden auch zunehmend für den Abbau von nicht-energetischen Rohstoffen verwendet. Die bei der Braunkohlegewinnung verwendete Fördertechnik wird zum Beispiel für den Abbau von Kalkstein verwendet, in Kombination mit großen, semi-mobilen Aufbereitungsanlagen. Ebenfalls Verwendung findet die Technik in modifizierter Form beim Abbau von Ölsänden in Kanada (Abb. 3 siehe [www](#) Online-Ergänzung).

2.3 Abbau von Industriemineralien – Erzbergbau

Für den Abbau von Mineralien werden auch Geräte verwendet, die ursprünglich aus dem Bereich der Bau- und Baustoffmaschinen kommen. Großbagger, Großlkw oder Aufbereitungsanlagen werden je nach Anforderung angepasst und in der Baustoffindustrie oder im Tagebau von Erzen und anderen Mineralien eingesetzt. Gleiches gilt für den untertägigen Abbau zum Beispiel von Kali.

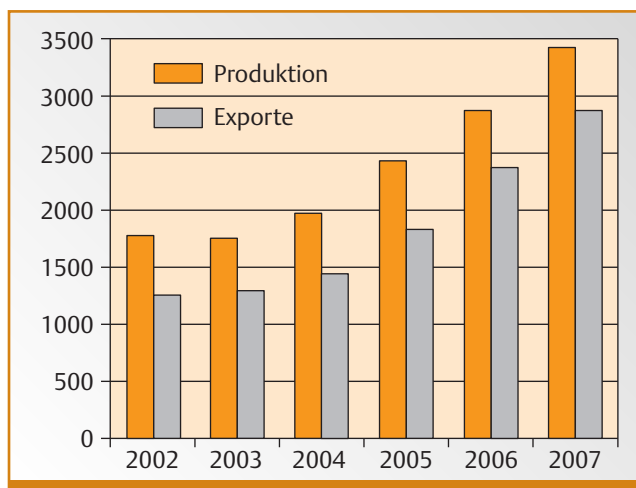


Abb. 1: Produktion und Export von Bergbautechnik [in Mio €]

2.4 Aufbereitungstechnik

Im Bereich der Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen haben deutsche Hersteller eine Vielzahl von hoch effizienten Maschinen für das Mahlen, Klassifizieren, Separieren, Mischen, Trocknen und Formen entwickelt, die weltweit sowohl für Kohle als auch für Erze oder andere Mineralien verwendet werden (Abb. 4 siehe [www](#) Online-Ergänzung).

3 | Deutsche Exporte in ausgewählte Märkte für Bergbautechnik

● Die Angaben für die wichtigsten Länder sind in der [www](#) Online-Ergänzung aufgeführt.

4 | Chancen genutzt – künftige Herausforderungen

● Die deutschen Hersteller von Bergbautechnik haben sich, mit Ausnahme Chinas, gut auf den Weltmärkten behauptet: Russland und die USA sind 2007 die größten Märkte mit einem stabilen Wachstum. Bergbaumessen in beiden Ländern werden regelmäßig besucht, um die erreichte Position zu halten und auszubauen. Bei China steht nach dem starken Rückgang im letzten Jahr zurzeit ein Fragezeichen für 2008. Positiv auf die weitere Entwicklung auswirken sollten sich die guten Kontakte sowohl zu den großen Bergwerksgesellschaften als auch zur China National Coal Association (CNCA). Außerdem bietet der non-coal-Bereich (Erze, Gold) weitere Exportchancen. In Australien ist die Branche, über deutsche Kontraktoren, gut vertreten; Investitionen in Bergwerke erfolgten aber zuletzt vor allem durch Firmen aus Japan und den BRIC-Staaten. Indien wächst schubweise, ist aber weiterhin sehr potenter Zielmarkt. Die

Impulse kommen aus der stark steigenden Nachfrage nach Elektrizität und Infrastrukturprojekten. Außerdem ist der Mechanisierungsgrad in den Bergwerken noch relativ gering. In Kanada entwickeln sich neue Chancen, nachdem in den letzten Jahren hohen Investitionen in Explorationsvorhaben erfolgt sind. Ein stärkeres Engagement auf kanadischen Messen wird neue Impulse für den deutschen Export geben.

Permanente Aufgabe der überwiegend klein und mittelständisch geprägten Hersteller ist es, ihren Kunden mit fortschrittlicher Technik einen wirtschaftlichen, effizienten Rohstoffabbau zu ermöglichen. Potenzial ist in aller Welt vorhanden. Vom Inlandsmarkt gehen keine wesentlichen Impulse aus, solange das Schicksal des Steinkohlenbergbaus in Deutschland offen ist. Somit hat sich die Branche darauf eingerichtet, ihre Zukunft in aller Welt zu suchen. Neben den erwähnten Märkten entwickelt sich allmählich auch ein bedeutsamer Bergbau im Subsahara-Afrika (Kongo, Namibia, Sambia), im fernen Osten der GUS (Jakutien) oder in der Mongolei. Aber die weltweite Bearbeitung der Märkte – also eine globale Präsenz – wird zunehmend durch personelle Engpässe schwieriger. Schließlich tritt in jüngerer Zeit die Frage auf, wie sich die Branche auf der Anbieterseite gegenüber großen Konzernen auf der Abnehmerseite behaupten kann.

Anschrift des Verfassers

Klaus Stöckmann, stellvertretender Geschäftsführer, VDMA Fachverband Bergbaumaschinen, Lyoner Straße 18, 60528 Frankfurt/M.

Koks und Kohlenwertstoffe

J. Strunk und C. Bremhorst

1 | Rohstahlerzeugung

Die Kohlenveredelung durch Erzeugung von Steinkohlenkoks geschieht heute vorwiegend (> 90 %) für die Roheisenerzeugung im Hochofen. Im Hochofen wird im Wesentlichen aus Eisenerz, Koks, Kalkstein und weiteren Stoffen das heiße, flüssige Roheisen ($T \sim 1500 \text{ }^\circ\text{C}$) erzeugt. Im Stahlwerk wird aus dem flüssigen Roheisen (ca. 65 %) und Schrott (ca. 35 %) Rohstahl erzeugt. Durch Zugabe weiterer Legierungsbestandteile, z. B.: Chrom, Vanadium, Nickel, u. a., wird jeweils eine von heute ca. zweitausend verschiedenen Stahlsorten hergestellt. Stahl ist allgegenwärtig, und die Erzeugungsrouten über Hochofen und Stahlwerk ist auf der Welt dominant und wird es vermutlich auch noch für Jahrzehnte bleiben.

Von den in 2007 auf der Welt hergestellten ca. 530 Mio t Koks sind mehr als 90 % für die Roheisenherstellung verwendet worden. Die übrigen Mengen wurden verbraucht in

- Gießereien
- Kalkwerken
- Nichteisen-Metall-Herstellung
- Chemische Industrie
- Hausbrand und Kleinverbrauch u. a.

Seit 1709 wird Steinkohlenkoks für die Roheisenerzeugung im Hochofen eingesetzt. *Abraham Darby* hat in Coalbrookdale in England die ersten erfolgreichen Versuche für dieses Verfahren durchgeführt. Das Verfahren hat sich nur langsam in England durchgesetzt. Etwa 50 Jahre brauchte es, um anerkannte Alternative zu werden. In Deutschland hat 1796 in Gleiwitz (heute Gliwice/Polen) der erste Hochofen Steinkohlenkoks gesehen. Im Ruhrgebiet war es 1848 ein Hochofen der Friedrich-Wilhelm-Hütte in Mühlheim/Ruhr (Teile der Hütte sind noch als Industriedenkmal erhalten), der wohl auch das Initial für die explosionsartige Entwicklung des Ruhrgebietes zur Montanzentrale Europas wurde.

Vor dieser Entwicklung hatte man Roheisen mit Holzkohle erschmolzen, und man brauchte etwa 30 t Holz für eine Tonne Roheisen. Diese Zahl macht deutlich, wie wichtig der durch *Darby* entwickelte Wechsel zum Steinkohlenkoks war. An Steinkohlenkoks braucht man heute noch ca. 0,5 t, wenn man nur Koks einsetzt im Hochofen.



Abb. 1: Fast 40 Tonnen glühender Koks im Löschwagen – rechts im Bild die Absaughaube der Koksüberleitmaschine

Der durchschnittliche Verbrauch der deutschen Hochöfen betrug im Jahr 2007 rund 320 kg/t Roheisen; zusätzlich wurden etwa 180 kg/tRE Ersatzreduktionsmittel, z. B. Einblaskohle oder Öl oder Restkunststoffe, als Ölersatz eingesetzt. Koks ist für den Hochöfner ein relativ teurer Einsatzstoff, sodass immer versucht wird, die Koks menge zu reduzieren zugunsten von billigeren Ersatzreduktionsmitteln.

Bei der folgenden Beschreibung der Aufgaben des Kokes im Hochofen, gehen wir zur Vereinfachung von reinem Koks einsetz aus. Im realistischen Mischbetrieb werden Teile der Aufgaben des Kokes von den Ersatzreduktionsmitteln übernommen.

2 | Aufgaben des Kokes im Hochofen

Der Koks hat im Hochofen mehrere Aufgaben zu erfüllen. Einerseits ist der Hochofen ein Hochtemperaturaggregat, es muss Energie eingebracht werden. Eisenerz ist Eisenoxid und muss reduziert werden, um elementares Eisen zu erhalten. Als Reduktionsmittel im Hochofen dient Kohlenstoffmonooxid (CO) aus der unvollständigen Verbrennung von Kohlenstoff (C).

Ein gewisser Teil des Kohlenstoffs löst sich im flüssigen Roheisen und bewirkt dabei eine eutektische Schmelzpunktsreduktion; der Hochofenprozess kann dadurch bei niedrigeren Temperaturen betrieben werden. Das Zuviel an Kohlenstoff im Eisen für die Stahlerzeugung wird übrigens im Konverter des Stahlwerkes mit Sauerstoff wieder herausgebrannt!

Die wichtigste Aufgabe des Kokes im Hochofen, die auch nicht von den Ersatzreduktionsmitteln übernommen werden kann, ist die Ausbildung eines feuerfesten Stützgerüsts, um sowohl das Einblasen von Luft in den Hochofen und das Durchströmen zu ermöglichen, als auch genügend Lückenvolumen für die Drainage des flüssigen Roheisens und der flüssigen Schlacke zu bieten.

Der Koks muss also auch bei hohen Temperaturen hart und fest sein, um als Stützgerüst zu wirken, soll sich aber beim Gang durch den Hochofen nach unten verbrauchen, sodass nur noch flüssiges Eisen und Schlacke aus dem Hochofen abgezogen werden.

Dass der Koks viele andere Qualitätsparameter wie H_2O -, Asche-, Schwefel- und Phosphorgehalt, Reaktivität, Kalt- und Heißfestigkeit, restliche flüchtige Bestandteile, mittlerer Korndurchmesser, usw. erfüllen muss, sei nur am Rande erwähnt.

3 | Der Herstellungsprozess von Koks

3.1 Einsatzkohle

Koks wird erzeugt durch „Trockene Destillation“ (Pyrolyse) von Steinkohlen in Horizontalkammeröfen im Schüttbetrieb. Dies ist das weltweit häufigste Verfahren; deshalb wird es hier beispielhaft beschrieben. „Stampfbetrieb“ und „Heat-Recovery“-Kokereien sollen nur als Stichworte (für evtl. Internetrecherchen) erwähnt werden.

Destillieren kann man jede Kohle (übrigens auch Braunkohle; das macht man in Herd-

öfen, z. B. in einer Raffinerie in Wesseling in der Nähe von Köln), allerdings kommt nur bei bestimmten Kohlen ein für den Hochofenprozess brauchbarer Koks heraus. In modernen Großkokereien werden vor allem die sog. Fettkohlen mit flüchtigen (abdestillierbaren) Bestandteilen (wasserfrei) von ca. 22 % bis 29 % eingesetzt, ergänzt häufig um magere Kohlen oder Petrolkoks oder auch Koksstaub.

Neben heimischen Kohlen werden in Deutschland überwiegend Kokskohlen aus Australien, USA und Kanada eingesetzt. Sonstige Herkunftsländer spielen nur eine untergeordnete Rolle. Niedrige Asche-, Schwefel-, Alkalien- und Phosphorgehalte sind erwünscht. Der Wassergehalt der angelieferten Kohlen liegt in der Regel zwischen 8 % und 12 %. Die Körnung der Einsatzkohle ist kleiner als 10 mm Durchmesser, rd. 30 % bis 40 % sind kleiner als 0,5 mm. Da die angelieferten Kohlen regelmäßig zu grob sind, muss die Kohle fast immer gemahlen werden, um die Zielkörnung zu erreichen. Die Kokereien in Deutschland setzen zwischen vier und zwölf verschiedene Kohlekomponenten ein, die zur Einsatzkohle zusammengemischt werden. Gemischt wird entweder über Sortenbunker oder in Mischbetten (Chevron-Methode).

Die Kokerei Prosper als Beispiel für detaillierte Beschreibungen des Prozesses soll die Kokerei Prosper der RAG Aktiengesellschaft in Bottrop dienen. Sie ist mit einer Jahresproduktion von 2 Mio. t Koks die zweitgrößte Kokerei in Deutschland. Insgesamt produzieren in Deutschland noch fünf Kokereien mit einer Jahreskapazität von ca. 8,5 Mio. t. Da Deutschland aber mehr als 13 Mio. t Koks/a verbraucht, müssen erhebliche Mengen importiert werden (z. Zt. überwiegend aus Polen, China, Spanien; Tab. 1).

Beim Aufbau eines Mischbettes wird auf der Kokerei Prosper der Verbrauch einer Produktionswoche (= 7 Tage, da eine Kokerei kontinuierlich produziert) aufgehaldet, indem ein gleisgebundenes Absetzgerät hin- und herfährt, dabei von seinem Ausleger Kohle herunterrieseln lässt und nach und nach die einzelnen Kohlekomponenten in einem ca. 300 m langen Mischbett übereinander schichtet. Das volle Mischbett enthält ca. 54000 t. Wenn das Mischbett II voll ist, ist Mischbett I gerade leer geräumt, sodass nun ein Rückladegerät am Mischbett II heranfährt und quer zur Ablegerichtung des Ablegers die Kohle abhaldet und einem Transportband zuführt. Die Kohlekomponenten sind so genügend gut miteinander vermischt und werden den Kohlentürmen, großen Vorratsbehältern, zugeführt. Mischbett I wird nun wieder aufgehaldet, usw. usw.

Auf dem Weg zu den Kohletürmen, kann noch ein Pflugscharmischer durchfahren werden, um dem Einsatzkohlenstrom leichtes Heizöl, ggf. auch Koksstaub aus Entstaubungsanlagen, zuzusetzen. Das Heizöl wird zugesetzt, um die Schüttdichte der fein gemahlene Kohle im Koksofen zu erhöhen. Der zugesetzte Masseanteil beträgt ca. 0,01 % bis 0,05 %.

Natürlich wird für die Einsatzkohle ein umfangreiches Qualitätssicherungssystem betrieben. Das beginnt mit Probenahmen bei der Verladung der Komponenten im Erzeugerland (die Proben werden per Flugzeug nach Deutschland geschickt), geht über Proben bei der Entladung der Seeschiffe, bis zur Probenahme bei der Entladung der Züge oder Fluss-/Kanalschiffe bei der Kokerei. Auch die fertig gemischte Einsatzkohle wird beim Einfüllen in die Kohlentürme durch automatische Probenahmegeräte überwacht. Ca. 10 Qualitäts-Para-

Heimische Kohlen:	62 %
Australische Kohlen:	25,2 %
US-Kohlen:	8,6 %
Kanadische Kohlen:	2,2 %
Petrolkoks:	2 %
in 10–12 Komponenten	100 %

Tab. 1: Die Einsatzmischung der Kokerei Prosper des Jahres 2007

meter werden überwacht, einerseits die chemischen Bestandteile wie Wasser, Asche, Schwefel, Phosphor, Alkalien, aber auch flüchtige Bestandteile, Dilatation, Fluidität, Körnungsaufbau und weitere. Ähnlich intensive Qualitätsüberwachungen werden auch für Koks und die anderen Produkte der Kokerei, aber auch für andere Hilfs- und Einsatzstoffe durchgeführt.

Die heimischen Kohlenkomponenten werden meist just-in-time der Kokerei zugeführt, für die Importkohlenkomponenten verfügt die Anlage über Lagerplätze, auf denen im Mittel ein Vorrat für 6 bis 8 Wochen liegt.

3.2 Koksherstellung

Die Herstellung des Kokes findet in Verkoksreaktoren, den sog. Koksöfen, bezogene auf den einzelnen Reaktor diskontinuierlich statt. Die Kohle wird durch den Füllwagen über Fülllöcher in der Ofendecke volumetrisch eingefüllt („gefüllt bis zum Eichstrich“; die Kohlemasse wird durch Wägung aber auch bestimmt), indirekt erhitzt, bis – auf der Kokerei Prosper nach etwa 24 h und 15 min. – der Koks „gar“ ist und aus der Ofenkammer gedrückt wird. Nach einigen Reinigungsschritten und Schließen des Ofens, wird der Ofen wieder gefüllt und der Garungsvorgang beginnt aufs Neue.

Setzt man mehrere Öfen bautechnisch und beheizungstechnisch auf einem gemeinsamen Fundament zusammen, so spricht man von einer Koksofenbatterie. Hierbei folgt immer auf eine Ofenkammer eine Ofenwand, dann wieder eine Kammer bis zur Endwand. Die Ofenzahl kann sehr unterschiedlich sein: 20, 30, 50 oder mehr Koksöfen in einer Koksofenbatterie. Die einzelnen Batterien sind verbunden mittels Zwischenbühnen, um eine durchgehende „Ofendecke“ zu erhalten. Ausfahrbühnen am Anfang und Ende der Reihe der Ofenbatterien komplettieren die Anlage.

Für das Leeren der Ofenkammer fährt auf der einen Seite des Ofens (Maschinenseite)



Abb. 2: Blick auf die Kokerei Prosper in Bottrop

Länge:	16,6 m
Höhe:	7,1 m
Breite:	0,59 m

Tab. 2: Ofenmaße der Prosper-Öfen

Koks	ca. 2 Mio. t/a
Teer	ca. 60000 t/a
Rohbenzol	ca. 16500 t/a
Ammonium-sulfat	ca. 26000 t/a
Überschussgas	ca. 560–600 Mio m ³ /a

Tab. 3: Produkte der Kokerei Prosper

Benzol	70 %
Toluol	18 %
Xylol	8 %
Naphthalin	4 %

Tab. 4: Typische Zusammensetzung von Rohbenzol

die Druckmaschine (KAM) vor, zieht die Ofentür ab und schwenkt sie zur Seite in eine Türreinigungsanlage.

Auf der anderen Seite (Koksseite) fährt die Koksüberleitmaschine (KÜM) ebenfalls vor dem nach Druckplan nun zu bedienenden Ofen, öffnet ebenfalls die Tür, schwenkt sie zur Seite in eine Reinigungsstellung, fährt eine so genannte Führungswanne vor das Kammervolumen (verlängert den Ofen mit dieser Blechkonstruktion bis zum Löschgleis, in dem der Löschwagen steht, bereit zur Aufnahme des glühenden Kokes.)

Nun kann die Druckstange mit Druckkopf in den Ofen vor der KAM eingefahren werden, um den fertigen Koks durch den ganzen Ofen, die Blechführungswanne der KÜM in den Löschwagen zu drücken.

Während der Löschwagen mit dem glühenden Koks (ca. 39 t – alle Daten bezogen auf die Kokerei Prosper) nun zum Löschturm fährt, um den Koks durch Aufgabe von ca. 85 t Wasser abzukühlen (von ca. 1100 °C auf ca. 200 °C), reinigen KAM und KÜM den jeweiligen Türrahmen und setzen die Ofentüren wieder ein. Der Ofen kann nun vom Füllwagen, der auf der Ofendecke vorfährt, durch die Fülllöcher in der Ofendecke, wieder mit frischer Einsatzkohle (ca. 52 t bis 53 t) gefüllt werden.

Der Garungsvorgang in diesem Ofen (Tab. 2) beginnt nun wieder von Neuem.

Der nächste gare Ofen ist nun an der Reihe, der gleichen Prozedur, wie oben beschrieben, unterworfen zu werden. Die Druckreihenfolge ist bei modernen Großkokeereien üblicherweise der 2/1 Rhythmus, d. h. es werden nacheinander bedient die Öfen 1, 3, 5, 7 usw. Bis 145, anschließend 2, 4, 6, 8 usw. bis 146.

Der abgekühlte Koks wird vom Löschwagen auf einer schrägen Koksrampe abgelegt, um dort noch ca. 20 Minuten auszuschwaden. Dabei kühlt der Koks weiter ab. Er wird anschließend in der KoksSieberei klassiert auf ein Körnungsband von 20 mm bis 100 mm (HochofenkoksKörnung), grobe Stücke werden in einem Brecher zerkleinert, der Anteil unter 20 mm wird abgesiebt. Der Hochofenkoks wird in Eisenbahnwaggons verladen und zum Kunden transportiert.

Der Anteil < 20 mm geht zu einer Weiterbehandlung. Typische Qualitätsparameter des Kokes sind Wasser, Asche, Schwefel, Phosphor, Alkalien, Kaltfestigkeit, Heißfestigkeit, Reaktivität, Körnungsaufbau, usw. Während der Destillation der Kohle im Koksofen werden die sog. flüchtigen Bestandteile der Kohle abgetrieben, das sind etwa 25 Masse-%. Dies bedeutet, dass aus einer Tonne Kohle ca. 750 kg Koks entstehen, der Rest verlässt den Ofen über das Steigrohr in der Ofendecke gasförmig mit ca. 750 °C bis 900 °C Temperatur, wird im anschließenden Steigrohrkrümmer durch Einspülen von Wasser auf ca. 85 °C abgekühlt und durch weitere Rohrleitungen zur sog. „weißen Seite der Kokerei“ geleitet.

Der Vorgang lässt sich noch etwas detaillierter beschreiben: zuerst wird die Kohle getrocknet, bei 350 °C wird die Kohle weich, teigig, backt zusammen, wird bis ca. 500 °C wieder fest und formt so aus feinen Kohlepartikeln große Koksstücke. Die Destillation ist erst abgeschlossen bei einer Temperatur von 1050 °C bis 1100 °C.

4 | Weiße Seite der Kokerei

● Die oben erwähnten 25 % der Kohle, die den Koksofen gasförmig verlassen, werden auf der sog. „weißen Seite der Kokerei“ weiter abgekühlt und gereinigt. Dabei werden weitere Produkte hergestellt.

Das Gas wird in mehreren Stufen gewaschen, und die Stoffe Schwefel, Ammoniak und die sog. BTX-Aromate (Benzol-Toluol-Xylol) werden aus dem Gas abgeschieden. Die Waschflüssigkeiten müssen abdestilliert werden, um die oben genannten Stoffe in konzentrierter Form zu erhalten. Aus

dem Schwefel im Rohgas (liegt als H₂S vor) wird Schwefelsäure erzeugt. Aus dieser Schwefelsäure und dem Ammoniak wird Ammoniumsulfat (NH₄)₂SO₄ produziert, ein weißes Düngesalz, welches auch überwiegend als Düngemittel (oft in Mischdüngern) verwendet wird. Es wird aber auch verwendet in Gerbereien und für die Herstellung von Feuerlöschpulvern.

Teer ist eine schwarze Flüssigkeit mit einigen tausend verschiedenen organischen Substanzen. 50–55 % werden als Pech gewonnen, um überwiegend für die Herstellung von Elektroden für die Aluminiumindustrie und Elektrostahlwerke verwendet zu werden (Tab. 3).

Etwa 10 % sind Naphthalin, ein wichtiger chemischer Grundstoff, der z. B. zur Herstellung von Plastifizierern für die Betonherstellung genutzt wird.

Aus dem Teer werden viele weitere Substanzen destillativ in reiner Form gewonnen, außerdem werden bestimmte Siedeschnitte hergestellt. Einer davon wird als Rußöl bezeichnet und für die Herstellung von Industrierußen verwendet. Diese werden dann zu Druckfarben, Tonern für Kopierer, Drucker und Faxgeräte, aber auch zu Autoreifenschwarz usw. weiter verarbeitet. Aus Teer hat man auch den ersten duroplastischen Kunststoff „Bakelite“ hergestellt, der z. B. als schwarzer Griff der Bratpfanne bekannt ist.

Viele weitere Substanzen nehmen ihren Weg zur Erzeugung von Farben und Lacken, von pharmazeutischen Produkten und anderen Kunststoffen. Hier sollen nur beispielhaft genannt werden, das „Jeans-Blau“, der Wirkstoff in Anti-Schuppen-Shampoos und Phenolharzkunststoffe für z. B. die Herstellung von Leiterplatten für Computer, Handys usw. Die sog. BTX-Aromaten, Benzol, Toluol und Xylol, werde auf der Kokerei auch als Rohbenzol bezeichnet (Tab. 4).

Bei der Arsol-Aromatics GmbH in Gelsenkirchen, werden sie destillativ aufgetrennt und als Reinprodukte verkauft.

Literatur

Weitergehende Informationen im Internet unter: www.rag.de; www.ruetgers-chemicals.de; www.arsol-aromatics.de; www.eon-ruhrgas.com

Anschrift der Verfasser

Dr.-Ing. Joachim Strunk und Clemens Bremhorst,
RAG Aktiengesellschaft, Shamrockring 1,
44623 Herne

Ist Kohlen(stoff)dioxid gefährlich?

R. Demuth und G. Stein

Es sind nicht die verschiedenen Modifikationen des Kohlenstoffs, auf die das primäre Interesse der Schülerinnen und Schüler in der Oberstufe gerichtet ist, und auch nicht das für Redox-Vorgänge beim Kohlenstoff so zentrale Boudouard-Gleichgewicht. Viel bedeutsamer sind der vom Kohlendioxid verursachte Klimawandel und das Problem der Energiesicherheit. Im Folgenden soll dargestellt werden, wie im Chemieunterricht diesen Interessen entsprochen werden kann und auf welche Weise aktuelle Fragestellungen, die Jugendliche unmittelbar berühren, im Unterricht geklärt werden können.

1 | Kohlenstoffdioxid – ein Gas mit verschiedenen Gesichtern

Allen Schülerinnen und Schülern ist das Gas Kohlenstoffdioxid einerseits aus dem Unterricht in der Sekundarstufe I und andererseits aus aktuellen Pressemeldungen bekannt. Nicht allen ist klar, dass es sich dabei um dasselbe Gas handelt – daher ist die ausführliche Erörterung der verschiedenen „Gesichter“ dieses Stoffes auch im Unterricht der Oberstufe notwendig und wichtig.

1.1 Die Bildung von Kohlenstoffdioxid: Quellen

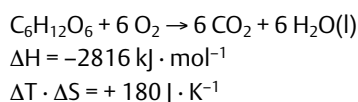
Bei der Oxidation (Verbrennung) aller Stoffe, die Kohlenstoff enthalten, entsteht – sofern die Oxidation vollständig abläuft – Kohlenstoffdioxid, CO_2 . Dies gilt für die Verbrennung von Holz, Kohle, Heizöl und Erdgas, aber auch für die Oxidation kohlenstoffhaltiger Nährstoffe in tierischen (und menschlichen) Organismen.

Die Voraussetzung für diese CO_2 -Quelle liegt in der besonderen Eigenschaft des Elements Kohlenstoff begründet: Unter den „milden“ Temperatur- und Druckbedingungen, wie sie auf der Erde gegeben sind, konnte sich eine vielseitige Chemie ausbilden, deren Grundlage Kohlenstoff-Atome sind. Mithilfe starker C–C-Bindungen bilden sich Ketten, die das Gerüst unzähliger Verbindungen bilden, und neben Kohlenstoff-Atomen noch Wasserstoff-, Sauerstoff-, Stickstoff-, Phosphor- und Schwefel-Atome beinhalten. In den verschiedenen Organis-

men auf der Erde haben sich hochgradig geordnete Systeme von chemischen Reaktionen herausgebildet, die von der Umgebung durch semipermeable Membrane getrennt sind. Diese lebenden Einheiten zeichnen sich durch einen sehr hohen Ordnungsgrad und damit durch einen Zustand sehr niedriger Entropie aus. Die Synthese der Stoffe, die diese lebenden Einheiten kennzeichnen, verläuft – thermodynamisch betrachtet – nicht freiwillig. Die freie Enthalpie (Energie), die dazu erforderlich ist, muss aus der Umgebung kommen und stammt zum größten Teil aus der Oxidation kohlenstoffhaltiger Materie zu dem sehr energiearmen CO_2 . Die organisierten Einheiten, die für alles Lebendige kennzeichnend sind, können den Zustand niedriger Entropie nur dadurch aufrecht erhalten, in dem mehr Entropie in der Umgebung erzeugt wird, als sie selbst „vernichten“. Insofern ist der Energie- und Entropiegewinn bei der Oxidation kohlenstoffhaltiger Materie eine wichtige Voraussetzung dafür, dass Leben auf der Erde möglich ist. Oder anders ausgedrückt: Leben ist an die Produktion von Kohlenstoffdioxid auf der Erde gebunden, für Leben auf der Erde ist dieses Gas unverzichtbar.

Betrachten wir den Abbau einer zentralen Verbindung im Stoffwechsel.

Bei der vollständigen Oxidation von z. B. Glucose zu CO_2 und H_2O wird sehr viel Energie und Entropie frei:



Die freie Enthalpie errechnet sich daraus zu $\Delta G = -2870 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$; d. h. aus dem an Energie reichen und an Entropie armen Ausgangsstoff Glucose entstehen die Reaktionsprodukte, die insgesamt gesehen deutlich energieärmer und entropiereicher sind als die Ausgangsstoffe zusammen genommen. Die gebildete freie Energie steht für andere Reaktionen zur Verfügung, die unter Energieverbrauch energiereiche Verbindungen aufbauen.

Kein Organismus könnte diese vergleichsweise große Energiemenge von

$2870 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ so auffangen, dass sie direkt zur (Energie verbrauchenden) Synthese von Verbindungen verwendet werden kann. Große Teile dieser Energie würden in die Umgebung abgegeben werden und damit für den Organismus nutzlos sein. Die Lebewesen haben jedoch eine Lösung für dieses Problem gefunden: Die Glucose wird nicht in einem Schritt unter einmaliger Freisetzung einer großen Energiemenge zu CO_2 und H_2O abgebaut, sondern in mehreren Schritten unter Freisetzung von jeweils relativ kleinen Energiebeiträgen, die vom Organismus unmittelbar genutzt werden können.

Dieser Abbaumechanismus – als *Citronensäurecyclus* bekannt – hat sich als so günstig für die Organismen erwiesen, dass er im Laufe der Evolution nicht mehr verändert wurde und bei allen Lebewesen anzutreffen ist, die Sauerstoff zu Oxidation ihrer Energieträger verwenden. Man geht heute davon aus, dass dieser Prozess bereits vor etwa 2 Milliarden Jahren in Eukaryonten genutzt wurde und sich bis heute unverändert erhalten hat.

1.2 Der Verbrauch von Kohlenstoffdioxid: Senken

Wohin geht Kohlenstoffdioxid, das in die Atmosphäre emittiert wird? Hier sind vor allem zwei Senken zu erwähnen:

1.2.1 Lösen von CO_2 in Wasser

Kohlenstoffdioxid löst sich sehr gut in Wasser: Bei 0°C sind es $3,35 \text{ g/L}$, bei höherer Temperatur erwartungsgemäß weniger, z. B. $1,69 \text{ g/L}$ bei 20°C . Sehr eindrucksvoll und hilfreich zur Verankerung dieses Sachverhalts sind Schülerversuche, die das quantitative Auffangen der CO_2 -Menge zum Ziel haben, die von einer bzw. zwei Brausetabletten entwickelt werden [1].

CO_2 wird – wenn man die Reaktion mit Wasser zu H_3O^+ - und HCO_3^- -Ionen einmal vernachlässigt – in einem langsamen Prozess in Carbonate überführt und damit der Verfügbarkeit entzogen. Diese Menge ist allerdings gering: Sie liegt deutlich unter 1 % des umgesetzten CO_2 .

Im Meer wird CO_2 durch das Phytoplankton assimiliert. Aufnahme und Abgabe halten

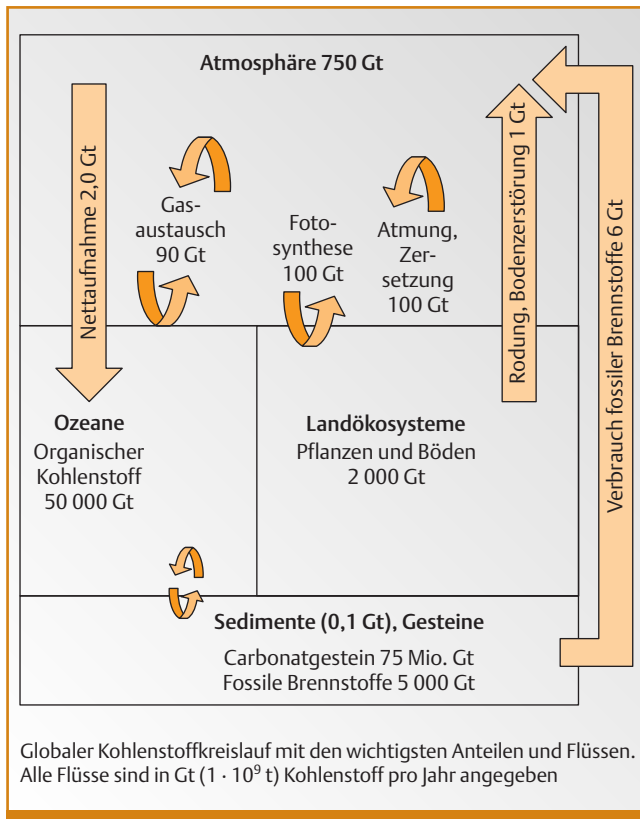


Abb. 1: Der globale Kohlenstoffkreislauf

Jährlich werden der Atmosphäre aber ca. 7 Gt Kohlenstoff zusätzlich zugeführt, von denen nur etwa 2 Gt im Meerwasser aufgenommen und gespeichert werden können, d. h. der Gehalt an Kohlenstoff in der Atmosphäre wächst pro Jahr um ca. 5 Gt.

1.3 Kohlenstoffdioxid – ein wichtiges Treibhausgas

Der Begriff „Treibhauseffekt“ hat sich für das bemerkenswerte Phänomen eingebürgert, das in Abbildung 2 skizziert ist und verdeutlichen soll, warum sich unsere Erde aufheizt. Ursache für diese „globale Erwärmung“ ist zum einen die Sonne und zum anderen Gasteilchen in der Lufthülle. Von der eingestrahelten Sonnenenergie werden etwa 30 % reflektiert und etwa 19 % von Luft und Wolken absorbiert. Das heißt nur etwa 51 % der Lichtstrahlung werden von der Erde aufgenommen und in Wärme umgewandelt. Sie bleibt allerdings nicht dauerhaft dort, sondern regt die nächsten sie umgebenden Gasteilchen der Luft zu Schwingungen an, diese ihre Nachbarn und so fort, bis die so transportierte Energie letztlich im Welt- raum „verklingt“. Anders ausgedrückt wird die Wärmeenergie von den Gasteilchen der Lufthülle eine gewisse Zeit „festgehalten“, besonders nachhaltig von den „Treibhausgasen“, deren bedeutendstes das Kohlen- dioxide ist. Da es mengenmäßig in den ver- gangenen Jahrzehnten stark zugenommen hat und immer weiter zunimmt, braucht die Wärmeenergie entsprechend länger zum Verlassen der Lufthülle. Folglich heizt sich die Atmosphäre immer mehr auf, es kommt zum Treibhauseffekt.

Physiker haben errechnet, dass auf der Erde eine mittlere Temperatur von -18°C herrschen müsste, wenn die Erde die ein- gefallene Strahlung direkt wieder abstrah- len würde. Auf der Erde herrschen jedoch keine -18°C , sondern im Mittel angeneh- mere $+15^\circ\text{C}$.

Stellt man sich vor, man lebte auf der mit durchschnittlich -18°C unwirtlich kalten Erde und diese würde von heute auf mor- gen eine Atmosphäre erhalten, könnte man feststellen, dass mehr Energie aufgenom- men als abgegeben würde und die Erde sich folglich erwärmte. Nach und nach stellte sich ein Gleichgewicht zwischen Einstrah- lung und Abstrahlung ein, sodass im Mittel eine konstante Temperatur herrschte. Das ist, wie wir heute wissen, auf der Erde seit Jahrtausenden der Fall.

Das Niveau des Gleichgewichtes – und da- mit die auf der Erde herrschende Tempera-

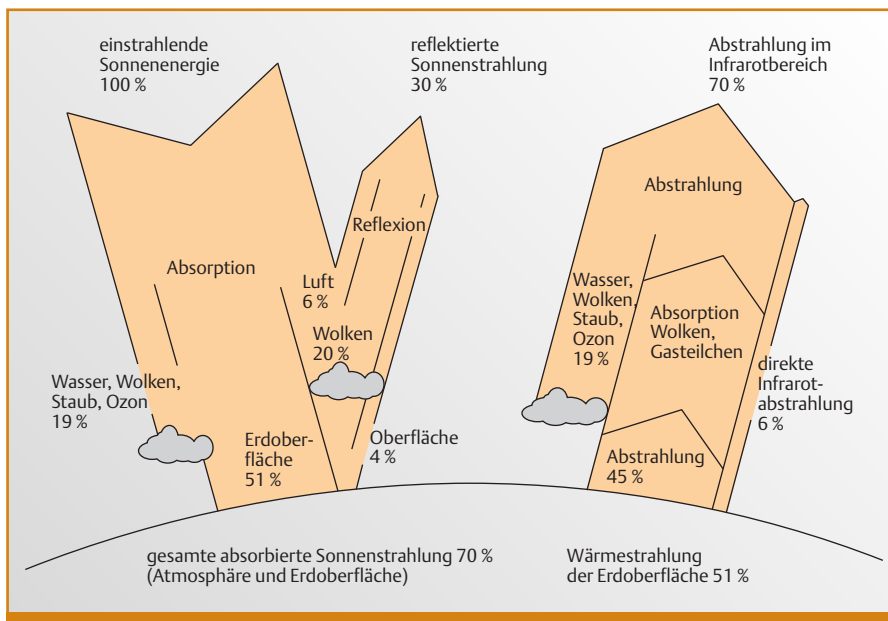


Abb. 2: Strahlungshaushalt der Erde [nach 1]

sich mit je ca. 90 Gt die Waage. Einen Über- blick über die geschätzten Stoffflüsse im globalen Kohlenstoffkreislauf zwischen der Atmosphäre und den Ozeanen bzw. dem Land gibt Abbildung 1 (nach [2]).

1.2.2 Aufnahme durch Pflanzen im Zuge der Fotosynthese

In Abbildung 1 sind die im Zuge der Foto- synthese der grünen Pflanzen umgesetzten Mengen mit ca. 100 Gt Kohlenstoff pro Jahr

angeben. Davon wird nur ein ganz kleiner Teil (0,1 Gt) in den Sedimenten festgelegt. Oder anders ausgedrückt: Praktisch die gesamte der Atmosphäre entnommene Menge an Kohlenstoffdioxid wird ihr ent- weder über die Re-Oxidation der Energie- träger (s. 1.1) oder über die Abbau- und Verwesungsprozesse wieder zugeführt. Man kann daher davon ausgehen, dass un- ter „natürlichen“ Bedingungen der Gehalt an CO_2 in der Atmosphäre konstant bleibt.

tur – ist abhängig von der Art und der Menge der Gasteilchen, die in der Lage sind, die von der Erde abgestrahlte Wärmestrahlung aufzunehmen. Die Gasteilchen der Atmosphäre sind damit „klimawirksam“, d. h. für die Einstellung eines bestimmten Temperaturniveaus verantwortlich.

1.4 Der anthropogene Treibhauseffekt

Die Klimatologen und Atmosphärenchemiker können heute sicher feststellen, dass der Gehalt der Treibhausgase in der Atmosphäre seit einiger Zeit wächst und menschliche Aktivitäten diese Zunahme verursachen. Aus dieser sicheren Feststellung kommen sie zur Annahme, dass diese Erhöhung der Gehalte an Treibhausgasen zu einer Erwärmung der unteren Luftschichten führen wird. Eine Erwärmung dieser Luftschichten ist zwar heute schon messbar, doch beträgt sie nur etwa 0,8 °C und verlässt damit gerade den Bereich der natürlichen Schwankungen. Solche Messungen, die über die ganze Erde hinweg eine Durchschnittstemperatur ermitteln sollen, sind außerordentlich schwierig und daher auch immer mit einer Reihe von Unsicherheitsfaktoren behaftet. Entsprechendes gilt für theoretische Berechnungen der möglichen Klimaentwicklung auf der Grundlage der heute bekannten Größen.

Weiter wissen wir, dass eine Temperaturerhöhung um mehr als 1 °C zu einer Verschiebung von Klimazonen führen würde mit unkalkulierbaren Auswirkungen auf die Lebensbedingungen der Lebewesen in vielen Regionen der Erde.

Alle uns heute möglichen Prognosen können die Realität nur grob und mit Mängeln abbilden – damit müssen wir leben, auf dieser Basis müssen wir urteilen und Entscheidungen treffen. Einen sicheren Beweis dafür, dass die anthropogenen Emissionen von klimawirksamen Gasen zu den oben beschriebenen Veränderungen des Klimas auf der Erde führt, lässt sich wohl erst in einem Jahrzehnt erbringen, wenn die Temperaturerhöhung den Bereich der natürlichen Schwankungen deutlich überschritten hat. Für vorsorgende Maßnahmen und eine Schadensbegrenzung dürfte es dann aber mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit zu spät sein.

Was kann man tun? Die Lösung des Problems bestünde darin, dass man sämtliche anthropogen bedingten Treibhausgase auf den „natürlich gegebenen Stand“ herunterfährt. Geht dies? Und wenn ja, unter welchen Bedingungen? Wir betrachten im Folgenden nur die auf CO₂ bezogenen Aspekte.

2 | Reduktion der Emissionen von Kohlenstoffdioxid

● In der Atmosphäre hat sich bis 1850 ein seit etwa 10000 Jahren konstanter Gehalt an CO₂ von ca. 280 ppm eingestellt. Seit dem Beginn der Industrialisierung und der damit verbundenen vermehrten Verbrennung von fossilen Brennstoffen zur Energiegewinnung sind die CO₂-Emissionen so stark angestiegen, dass sie nicht mehr durch ein – denkbare – besseres Wachstum von Pflanzen kompensiert werden können. Dieser durch Aktivitäten des Menschen erzeugte Überschuss an CO₂ verbleibt zu einem großen Teil in der Atmosphäre und verursacht globale Erwärmung mit unabsehbaren Folgen für die klimatischen Bedingungen auf der Erde. Deshalb ist es eine vordringliche Aufgabe, die CO₂-Emissionen zu reduzieren. Welche Maßnahmen könnten dazu ergriffen werden?

2.1 Sparsamer Umgang mit Energie

Was kann man tun, um die begrenzten Energievorräte möglichst optimal zu nutzen und die CO₂-Emission zu begrenzen? Entscheidend sind die folgenden Punkte:

1. Möglichkeiten der Einsparung von Energie realisieren,
2. Energieverbraucher mit einem möglichst hohen Wirkungsgrad einsetzen,
3. nicht-fossile Energieträger zur Energieerzeugung einsetzen;
4. den persönlichen Lebensstil überprüfen und ggfs. korrigieren.

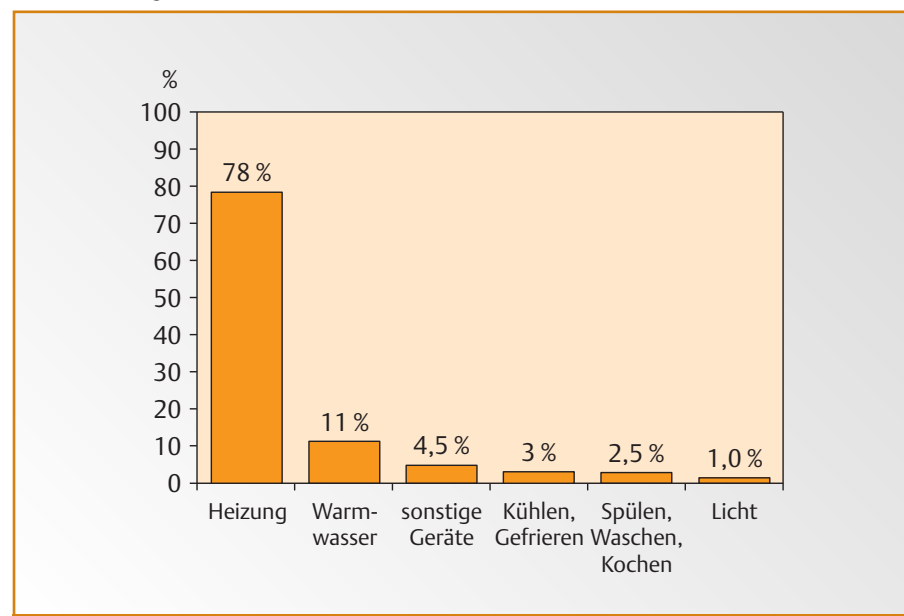
Die Abbildung 3 gibt einen Überblick über den Energieverbrauch im Privathaushalt. Die Daten zeigen, dass beim privaten Verbrauch die Heizung die meiste Energie „schluckt“ und daher die höchsten Potenziale der Einsparung birgt.

So liegt die Energieeinsparung beim Austausch eines alten Heizkessels durch einen modernen (Erdgas-)Brennwertkessel bei

Tab. 1: Überblick über Spurengase der Atmosphäre und ihre Klimawirksamkeit

Spurengas	derzeitige atmosphärische Konzentration / ppm	derzeitiger Erwärmungseffekt / °C
Wasserdampf (H ₂ O)	2 ppm	20,6
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	350	7,2
Ozon, bodennah (O ₃)	0,03	2,4
Distickstoffoxid (N ₂ O)	0,3	1,4
Methan (CH ₄)	1,7	0,8
weitere		ca. 0,6
Summe		ca. 33

Abb. 3: Der Energieverbrauch im Privathaushalt



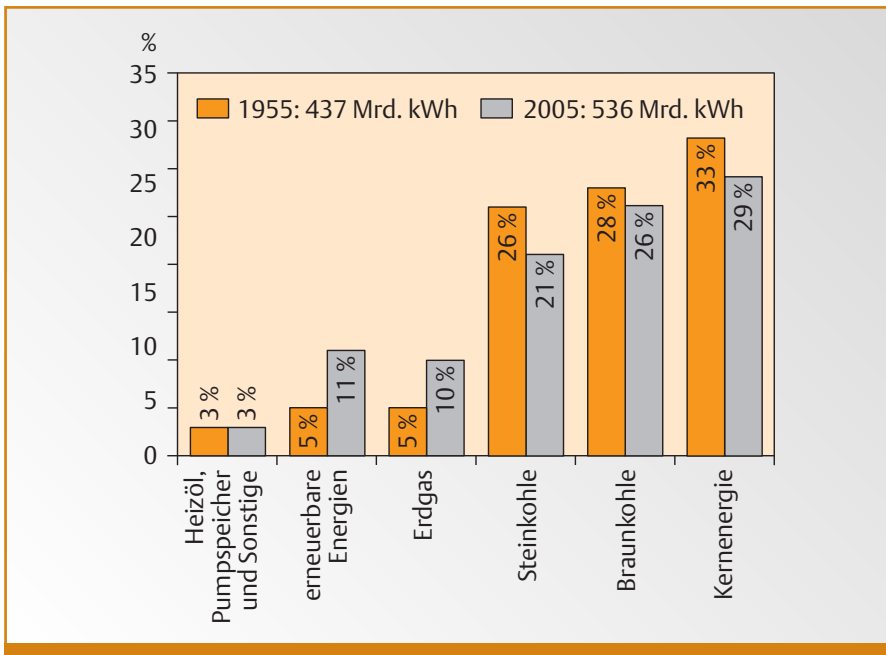


Abb. 4: Anteile der Energieträger an der Nettostromerzeugung in Deutschland in Prozent

Energieträger	Energie / eingesetzte Menge Energieträger	CO ₂ -Emission	CO ₂ -Bilanz
Kohle	10 kWh / 1,2 kg	4,5 kg	0,45 kg CO ₂ / kWh
Erdgas	10 kWh / 1 m ³	2,0 kg	0,20 kg CO ₂ / kWh
Diesel / Heizöl	10 kWh / 1 L	2,4 kg	0,24 kg CO ₂ / kWh
Benzin	10 kWh / 1,1 L	2,2 kg	0,22 kg CO ₂ / kWh

Tab. 2

25 % und höher. Der Handlungsbedarf zeichnet sich unmittelbar ab.

Wie es um den Einsatz von Wind, Sonne oder Biomasse, den so genannten „erneuerbaren“ Energien bestellt ist, zeigt die Übersicht in Abbildung 4 über die Energieträger, die zur Stromerzeugung eingesetzt werden.

Die wichtigsten Energieträger für die Stromerzeugung in Deutschland sind Kernenergie, Braunkohle und Steinkohle. Der Anteil aus erneuerbaren Energien (Wasser, Wind, Biomasse, Müll und Sonne) deckte im Jahr 2006 fast zwölf Prozent des jährlichen deutschen Stromverbrauchs. Der größte Anteil wurde aus Wasser- und Windkraft gewonnen. Spitzenreiter ist die Windenergie mit 30,5 Milliarden Kilowattstunden. Die mittel- und langfristigen Ziele der Bundesregierung für den Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Energieverbrauch sind 4,2 % im Jahr 2010 und 10 % bis 2020.

Ob dieses Ziel erreicht oder gar überschritten werden kann, wird zurzeit kontrovers diskutiert. Selbst wenn sich eine deutliche

Steigerung der Nutzung regenerativer Energieträger – evtl. in Kombination mit hydrothormaler Carbonisierung [4] – realisieren ließe, wäre die Option die Reduktion der CO₂-Emissionen vor allen über die Einsparung von Energie und den sparsamen Umgang mit ihr zu erreichen, immer noch sinnvoll und richtig.

Hier ist heute im Bereich der Raumheizung bereits sehr viel möglich: Nicht frieren im Winter bei einer Raumtemperatur von 15 °C ist angesagt, sondern die effektive Dämmung eines Hauses: Mit einer nachträglichen Dämmung der Gebäudehülle und mit Fenstern mit Dreifachverglasung ist auch bei bestehenden Häusern der Neubaustandard eines KfW-60-Hauses zu realisieren. Dieses Haus verbraucht für die Heizung nur 60 Liter pro m² im Jahr – das entspricht einer Einsparung von mehr als der Hälfte gegenüber dem Zustand vor der Modernisierung. Die Mehrkosten für die Dämmung werden durch die eingesparten Energiekosten in etwa 15 Jahren amortisiert.

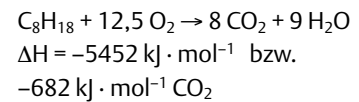
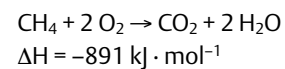
Als weiteres Beispiel soll der private Stromverbrauch angeführt werden: Elektrogeräte

mit den höchsten Energieeffizienzklassen verbrauchen bis zu 50 % weniger Energie als normale (billige) Geräte.

2.2 Nutzung möglichst kohlenstoffarmer Energieträger

Kohlenstoffhaltige Energieträger wie Erdgas, Erdöl, Steinkohle oder Braunkohle verursachen bei identischen Mengen an erzeugter Energie unterschiedliche Mengen CO₂ (Tab. 2) [5].

Erdgas zeigt dabei die weitaus beste CO₂-Bilanz, da es – relativ gesehen – der Energieträger mit dem höchsten Wasserstoffanteil ist. Verbrennt man Methan bzw. Benzin (Octan), ergeben sich folgende Werte:



Die Betrachtung der experimentell ermittelten Verbrennungsenthalpien [6] bestätigt die in der Tabelle 2 aufgeführten Werte und weist aus, dass zur Erzeugung gleicher Energiemengen bei Benzin mehr CO₂ freigesetzt wird als bei Methan.

Was ist die Konsequenz aus diesen Zahlen? Am besten ist es, man nutzt die Energieträger Erdgas und Erdöl an möglichst vielen Stellen. Leider sind Erdgas und Erdöl aber die Energieträger, deren Vorräte weltweit sehr viel geringer sind als die an Kohle.

2.3 Abscheidung von CO₂ aus Verbrennungsprozessen

Aus der obigen Darstellung ergibt sich unmittelbar die Problematik, wie sich über längere Zeiträume die Energieversorgung sichern lässt. Lässt man einmal die Frage der Nutzung der Kernenergie außer Betracht und bezieht die begrenzte Verfügbarkeit „erneuerbarer Energieträger“ in die Überlegungen mit ein, bleibt in heutiger Sicht nur die Kohle als wichtiger Energieträger der Zukunft übrig.

Dies ist der Grund dafür, dass zunehmend die Abscheidung von CO₂ aus den Abgasen von Kohlekraftwerken und seine anschließende Speicherung (sog. CCS-Technologie) in unterirdischen Speichern diskutiert und seit Kurzem auch in einer Pilotanlage realisiert wird. Technische Lösungen, die auf Großkraftwerke übertragbar waren, gibt es bislang noch nicht. Ob die CCS-Technologie jemals realisiert werden

wird, ist noch offen – ob sie sinnvoll ist, oder besser alternative Wege beschritten werden sollten, wird zurzeit durchaus strittig diskutiert.

2.4 Hydrothermale Carbonisierung

Zur „Abscheidung“ von CO₂ aus der Atmosphäre findet in letzter Zeit vermehrt eine altbekannte Reaktion Beachtung: die hydrothermale Carbonisierung. Mithilfe von Autoklaven (d. h. unter Druck und Hitze) können organische Abfälle in Tagen kostengünstig zu Torf-ähnlichen Stoffen umgesetzt werden. Im Prinzip handelt es sich hier um den sehr beschleunigten Prozess der natürlichen „Inkohlung“, der zur Bildung unserer heutigen fossilen Energieträger geführt hat. Der gebildete Torf ließe sich entweder dem Boden (zur Bodenverbesserung) zuführen oder aber energetisch (zu Heizzwecken) nutzen. Im ersten Fall wäre der Kohlenstoff auf viele hundert Jahre dem Kohlenstoffkreislauf entzogen. Prof. *Antonietti* und Mitarbeiter vom MPI für Polymerforschung in Potsdam haben abgeschätzt, dass mit diesem Prozess in Deutschland eine Reduktion der CO₂ – Emission um über 25 % möglich ist,

wenn dieser Prozess auf die gegebenen Mengen an organischen Abfällen angewendet wird [4].

3 | Ist Kohlenstoffdioxid gefährlich?

● Wir haben verschiedene Gesichter von Kohlenstoffdioxid, CO₂, kennengelernt. Man kann dieses Gas als *die* Grundlage für das Leben auf der Erde bezeichnen. In der aktuellen Diskussion tritt dieser Aspekt jedoch zunehmend in den Hintergrund: Die Diskussion wird dominiert von den problematischen Mengen an CO₂, die von den Menschen weltweit bei der Verbrennung fossiler Energieträger erzeugt und in die Atmosphäre emittiert werden. Noch geben uns Modellrechnungen keine genaue Auskunft über die Größe und die lokalen Auswirkungen, die bei der globalen Erwärmung auftreten werden. Die Konsequenzen, die sich bereits heute abzeichnen, sollten alarmierend genug sein, dass alle Menschen das ihnen Mögliche tun, die Emission an CO₂ zu begrenzen und zu reduzieren.

Die Einsicht in die Gefährdungspotenziale, die von den aktuellen CO₂-Emissionen ausgehen, machen aber auch deutlich, wie

wichtig es ist, *schon jetzt* die Vorbereitungen für eine Umstellung unserer Energieversorgung zu treffen. Man muss davon ausgehen, dass für die Entwicklung und Etablierung eines solchen neuen Energiesystems mindestens 30 Jahre benötigt werden. Fazit: Es ist höchste Zeit, zielgerichtet neue Energieoptionen zu erforschen und zu etablieren.

Literatur

- [1] W. van der Veer und P. de Rijke, Die Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser. CHEMKON 1(2), 83 (1994)
 [2] R. Demuth, I. Parchmann und B. Ralle (Hrsg.), Chemie im Kontext – Sek II. Cornelsen, Berlin 2006
 [3] C. D. Schönwiese und B. Dieckmann, Der Treibhauseffekt. DVA, Stuttgart 1988
 [4] M. M. Titirici, A. T. Thomas und M. Antonietti, Back in the black: hydrothermal carbonization of plant materials as an efficient chemical process to treat the CO₂ problem? New J. Chem. 31(6), 787 (2007)
 [5] C. Buchal, Energie. Forschungszentrum Jülich, 2007
 [6] R. E. Dickerson und I. Geis, Chemie – eine lebendige und anschauliche Einführung. Verlag Chemie, Weinheim 1983

Anschrift der Verfasser

Prof. Dr. *Reinhard Demuth* und *Gerd Stein* Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) an der Universität Kiel, Didaktik der Chemie, Olshausenstr. 62, 24098 Kiel, E-Mail: demuth@ipn.uni-kiel.de

Braunkohle, Steinkohle & Co.

Wissenswertes in Rätselform

H. Rössel

Das Rätsel hat Wiederholungscharakter, fächerübergreifende Bezüge sind erkennbar. Es eignet sich, sobald in SI/SII im Rahmen der Einführung in die organische Chemie die fossilen Brennstoffe, in Sonderheit die Kohlen, zur Sprache gekommen sind: ihre **Entstehung** und **Arten**, ihre **Gewinnung** und **Verwendung** (Lösungswörter „Brennstoffe“, „Rohstoffe“). Das Rätsel bietet eine Zusammenschau der genannten Aspekte, auch Anknüpfungsmöglichkeiten beispielsweise zur Umweltproblematik fossiler Brennstoffe (Nr. 10) sowie Fragen mit eher historischer (Nr. 8) oder technischer Ausrichtung (Nr. 20). Bei den drei Fragen zur Kohleveredelung (thermische Nr. 13, chemische Nr. 12 und Nr. 14) wird der Lehrer vermutlich erläuternd mithelfen müssen. Abbildung 1 zeigt die Lösung des Rätsels.

Die vier kleinen Skizzen weisen auf wesentliche Rätselinhalte hin, man geht kurz auf die Darstellungen ein: • Sumpfwald der Karbonzeit (gut erkennbar die Schachtelhalm), • Längsschnitt durch einen Meiler, • Schema eines Kohlekraftwerks (H Heizkessel, T Turbine, G Generator, K Kühlturm),

• Versuch zur Entgasung von Steinkohle (Bildung von Koks, Steinkohlenteer, Steinkohlengas).

Anschrift der Verfasserin

OStRätin *Hannelore Rössel*, Mühlweg 25, 61462 Königstein/Taunus

Abb. 1: Lösung und Lösungswörter

1								B	R	A	U	K	O	H	L	E																				
2								B	R	I	K	E	T	T																						
3	S	T	E	I	N	K	O	H	L	E	N	E	I	N	H	E	I	T																		
4								S	T	E	I	N	K	O	H	L	E																			
5								I	N	K	O	H	L	U	N	G																				
6								F	A	U	L	S	C	H	L	A	M	M																		
7	R	A	U	C	H	G	A	S	E	N	T	S	C	H	W	E	F	E	L	U	N	G														
8								H	O	L	Z	K	O	H	L	E																				
9																																				
10								K	O	H	L	E	N	S	T	O	F	D	I	O	X	I	D													
11								K	O	H	L	E	N	W	A	S	S	E	R	S	T	O	F	F	E											
12								K	O	H	L	E	H	Y	D	R	I	E	R	U	N	G														
13													V	E	R	K	O	K	U	N	G															
14													K	O	H	L	E	V	E	R	G	A	S	U	N	G										
15																					A	S	C	H	E											
16																					A	N	T	H	R	A	Z	I	T							
17																					A	K	T	I	V	K	O	H	L	E						
18																					T	O	R	F												
19																					W	A	E	R	M	E	K	R	A	F	T	W	E	R	K	E
20																					T	A	G	E	B	A	U									

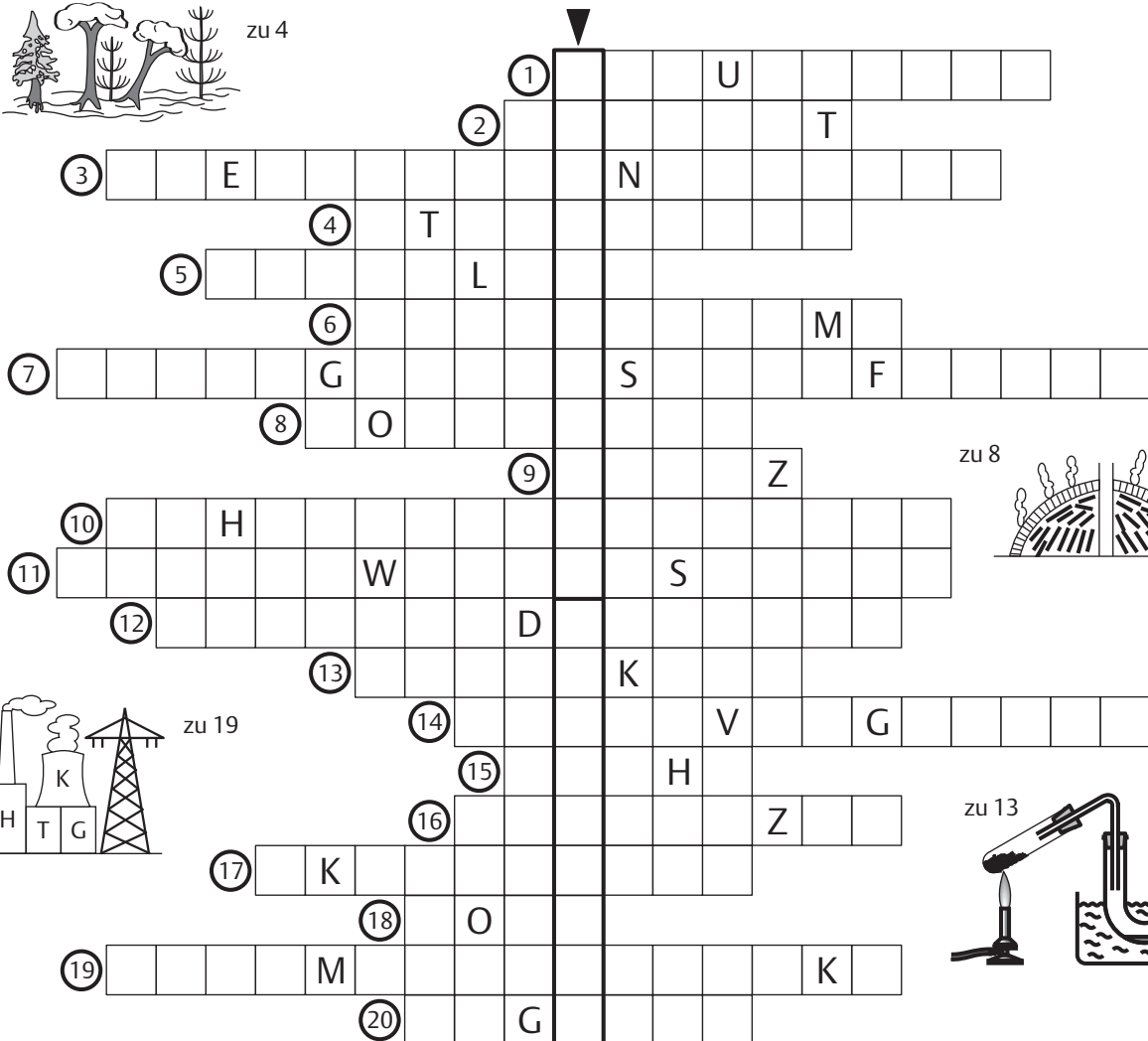
BRENNSTOFFE, ROHSTOFFE

**Kopiervorlage_Braunkohle, Steinkohle & Co.
Wissenswertes in Rätselform**

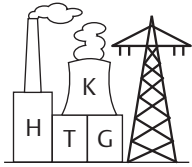
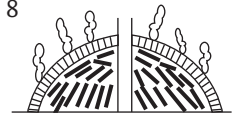
Vor Millionen von Jahren nahm die Entstehung der Kohlen ihren Anfang. Sobald alle Antworten eingetragen sind (Ä = AE, Ö = OE), kann man senkrecht als Lösung des Rätsels die **doppelte Bedeutung** dieser Bodenschätze ablesen.



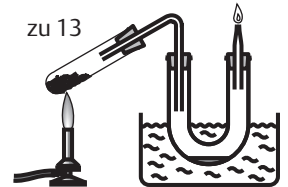
zu 4



zu 8



zu 19




zu 13

1. Kohleart mit einem Kohlenstoffgehalt von 65 – 75 %, entstand hauptsächlich im Tertiär
2. in Form gepresstes Braun- oder Steinkohlenpulver
3. technische Maßeinheit für den Heizwert von Brennstoffen, Abkürzung SKE
4. hochwertige Kohleart, im Karbon aus abgestorbenen Sumpfwäldern entstanden, Kohlenstoffgehalt 75 – 92 %
5. Vorgang der Kohlenbildung aus pflanzlichen Resten unter Luftabschluss und hohem Druck
6. organische Ablagerung in nährstoffreichen Seen, aus dem sich bitumenreiche Kohlen bilden konnten
7. seit 1983 für Großfeuerungsanlagen vorgeschriebenes Verfahren zum Schutz der Umwelt
8. Kohle, die früher statt Koks zur Eisenerzverhüttung eingesetzt wurde, klassische Herstellung in Meilern
9. abbaubare Schicht von Kohle oder anderen nutzbaren Bodenschätzen (bergmännischer Ausdruck)
10. Verbrennungsprodukt von Kohlenstoff, Treibhausgas
11. in allen Kohlen enthaltene organische Verbindungen, auch aromatische, werden bei Nr. 13 frei
12. Kohleveredelung, bei der aus Kohle und Wasserstoff Benzin und Dieselkraftstoff synthetisiert werden
13. Entgasung von Steinkohle bei hohen Temperaturen („trockene Destillation“), wobei außer Koks Steinkohlengas und Steinkohlenteer gewonnen werden
14. Kohleveredelung, Umsetzung von glühender Kohle mit Wasserdampf und eventuell Sauerstoff zu Synthesegas (Gemisch aus Wasserstoff und Kohlenstoffmonooxid)
15. anorganischer Rückstand, der bei vollständiger Verbrennung organischer Stoffe, z. B. Kohlen, anfällt
16. höchstwertige Kohle, Kohlenstoffgehalt 92 – 98 %, entstand aus Nr. 4, Endstadium von Nr. 5
17. Adsorptionsmittel, z. B. in Dunstabzugshauben, zur Trinkwasseraufbereitung, bei Magen-Darm-Infekten
18. in Mooren unter Luftabschluss gebildetes Zersetzungsprodukt von Pflanzen, Vorstufe der Braunkohle
19. Kraftwerke, die mit fossilen Brennstoffen oder mit Kernbrennstoff betrieben werden
20. häufigste Abbaumethode für Braunkohle, weithin erkennbar an riesigen Schaufelradbaggern

Kompetenzen und Kontexte

Schwarze Kohle – leuchtendes Gas

H. Nickel

Schwerpunkt dieses Aufgabenvorschlages ist der *Kompetenzbereich Kommunikation / Textverständnis*. Die Schüler sollen einen historischen Text in Bilder umsetzen, diesen mithilfe von modernen Lexikatexten ergänzen und dessen Bedeutung für das tägliche Leben verstehen. Sämtliche Texte, Bilder sowie die Lösungen zu den Aufgaben sind in der  Online-Ergänzung zu diesem Artikel enthalten.

1 | Informationen zu den Texten

● Der vorliegende Vorschlag beginnt mit einer Textpassage der Koksgewinnung im 19. Jh. aus dem Roman „Anilin“ [1], des (laut Wikipedia [2]) mit 3 Millionen Exemplaren meistverkauften Buches im Dritten Reich. Die „Datenbank Schrift und Bild“ [3] schreibt dazu: „Anilin erreicht unglaubliche Auflagenhöhen bis in die Nachkriegszeit. ... Bis 1973 folgten mindestens weitere sieben Auflagen in unbekannter Höhe. Der Erfolg hat sicher auch mit der Förderung des Buches, das den Untertitel ‚Roman der deutschen Farben-Industrie‘ trägt, durch den NS-Staat zu tun. ... Aber Propaganda allein kann das Interesse für Anilin nicht erklären. Es war eine Zeit ungebremster Fortschrittsgläubigkeit, voller Vertrauen in die Wissenschaft und in ‚starke Männer‘ und der Hoffnungen auf ein leichteres Leben. Diesen Zeitgeist befriedigt Schenzinger mit sicherem Gespür“ [4]. Der Hintergrund des Buches ermöglicht ein Eingehen auf diese Fortschrittsgläubigkeit oder eine Zusammenarbeit mit dem Fach Deutsch, darauf soll in diesem Artikel aber nicht weiter eingegangen werden. Die Lexikatexte 2 und 3 sind dem Römpp-Onlinelexikon [5] entnommen. Diese sind kaum verändert und bereiten den Schülern aufgrund der vielen Abkürzungen und nüchternen, schülerfernen Ausdruckweise zunächst Schwierigkeiten beim Lesen. Sie stellen aber eine gute Möglichkeit dar, die Schüler mit wissenschaftlichen Texten vertraut zu machen und konzentriertes Lesen zu üben. Man kann die Texte aber auch bei

Bedarf altersgemäß und dem Vorwissen der Schüler angepasst abändern. Text 5 stammt von *Dolf Sternberger* 1938. *Sternberger* war ein deutscher Politikwissenschaftler und Journalist. Er feierte er in seinem „Panorama oder Ansichten vom 19. Jahrhundert“ die Erfindung dieser neuen Beleuchtungsart [7]. In dieser Quelle sind auch Abbildungen von Glasfenstern zu sehen, anhand derer man die einzelnen Stufen der Koksgewinnung (mystisch) nachvollziehen kann.

2 | Vorschlag zur Vorgehensweise

● Die Schüler erhalten zunächst Text und Aufgabe 1. Es bietet sich an, Aufgabe 1 (aus Zeitgründen evtl. auch 2a), b) als Hausaufgabe durchführen zu lassen, da im Unterricht erfahrungsgemäß keine entsprechen-

de Recherche durchgeführt werden kann. Erst wenn Aufgabe 1 bearbeitet ist, erhalten die Schüler ein zweites Arbeitsblatt mit den entsprechenden Arbeitsaufträgen und Lexikatexten. Nachdem die Schüler untereinander ihre Ergebnisse verglichen haben, kann im Unterrichtsgespräch eine individuelle Schwerpunktsetzung erfolgen. Im Nachfolgenden sind einige Vorschläge für Arbeitsaufträge formuliert. Diese kann man je nach Zeitanatz und Vorwissen der Schüler auswählen, modifizieren, kombinieren und ergänzen.

3 | Aufgabenvorschläge

- 1a) Lies Text 1! Kläre zunächst unbekannte Begriffe, markiere Wichtiges und finde Überschriften für die einzelnen Absätze!
- b) Stelle Text 1 grafisch dar!

Tab. 1

Lies die Texte 1–4, keuze an und stelle falsche Aussagen richtig!	richtig	falsch	dazu geben die Texte keine Auskunft
Koks und Kohle sind synonyme Begriffe.			
Leuchtgas und Stadtgas sind synonyme Begriffe.			
Leuchtgas verwendete man seit dem Mittelalter als Straßenbeleuchtung, es ersetzte den Kienspan.			
Neben einer Kokerei war immer eine Hochofenanlage zur Eisengewinnung.			
Kokereigas ist für die gefürchteten schlagenden Wetter verantwortlich.			
Koks enthält viel Luft.			
Heute verwendet man Leuchtgas nur noch als Ersatz für Erdgas.			
Die Haupteinnahmequelle einer Kokerei lag im Verkauf von Leuchtgas.			
Koks hat die Holzkohle als Oxidationsmittel bei der Eisenherstellung ersetzt.			

- 2a) Erstelle ein Kurzreferat zur Kohleentstehung!
- b) Lies Text 5 und erkläre, was mit folgenden Passagen gemeint sein könnte!
- Licht aus dem Dunkel
 - der Nacht abgewonnen
 - Gesetz von der Erhaltung der Kraft
 - Pflanzen der Urwelt
 - ins Erdinnere niedergestürztes Himmelslicht
- c) Stelle die Zusammensetzung von Braunkohlenkoks und Braunkohlengas mithilfe eines Diagramms dar! Begründe, weshalb du diese Diagrammform gewählt hast!
- 3) Lies die Texte 1–4, kreuze in Tab. 1 an und stelle falsche Aussagen richtig!
- 4) Berechne, wie viele Schüler deiner Klasse der gleichen Masse wie dem Koks, den man aus einer Tonne Braunkohle gewinnt, entsprechen würden! Berechne mithilfe der Schüttdichte / Dichte, ob das Volumen des Kokes in den Chemiesaal passen würde!
- 5) Das Leuchtgas war ein Abfallprodukt der Kokereien. Es wurde in den Gaslaternen verbrannt und erzeugte so das Licht.
- a) Erstelle die Reaktionsschemata für diese Reaktion(en) und bewerte die Verbrennungsprodukte hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit!
- b) Erkläre, wozu man Koks hauptsächlich benötigt (mit Reaktionsschema) und weshalb man nicht direkt die Kohle dazu nimmt!
- c) Nenne weitere Abfallprodukte der Koksherstellung und recherchiere deren mögliche Verwendung!
- 6) Allerlei
- a) Erkläre, weshalb die Ofenkammern, wie in Text 3 beschrieben, luftdicht sein müssen!
- b) Stelle dir vor, ein Glas Nutella wäre nicht mit 400 g Nutella, sondern mit 400 g Koks gefüllt. Berechne nun, wie viel Nutella man essen dürfte/müsste, um die gleiche Energiemenge zu erhalten, wie in den 400 g Koks gespeichert sind!
- c) Beschreibe, was sich auf der Welt verändern würde, wenn alle Kohlevorkommen erschöpft wären!
- Literatur**
 [1] K. A. Schenzinger, Anilin. Wilhelm Andermann Verlag 1949, S. 61 u. 81

- [2] http://de.wikipedia.org/wiki/Karl_Aloys_Schenzinger
- [3] <http://www.polunbi.de/>
- [4] <http://www.polunbi.de/pers/schenzinger-01.html>
- [5a] U. Bornscheuer, B. Dill, G. Eisenbrand, B. Fugmann, T. Gamse, F. R. Heiker, H. Hulpke, A. Kirschning, G. Pohnert, A. Pühler, P. Schreier (Hrsg.), RÖMPP Online [Online]. Version 3.1. Thieme Verlag, Stuttgart, 2007
- [5b] siehe 5a Stichwort Koks
- [6] <http://de.wikipedia.org/wiki/Koks>
- [7] Die Gewinnung und Segnung des Gaslichts <http://www.sgjpt.org/kunst/meisterw/gasl/gaslicht> hier findet man gute Hintergrundinformationen und Bilder historischer Glasfenster mit Motiven zur Leuchtgasproduktion
- [8] Kohle: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/2a/Mineral_Lignito_GDFL028.jpg/800px-Mineral_Lignito_GDFL028.jpg
- [9] Gaslaternen: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/73/August-Fuhrmann-Installation-einer-Gaslaterne-1890.jpg>
- [10] Glasfenster: http://www.karlsruhe.de/kultur/stadtgeschichte/stadtmuseum/objekt_monat/gaslaterne/HF_sections/content/ZZi3cOilUmP0u/Laterne.jpg

Anschrift der Verfasserin

Heike Nickel, Kurfürst-Ruprecht-Gymnasium,
 Landwehrstr. 22, 67433 Neustadt;
 E-Mail: heikenickel@t-online.de
 URL: <http://www.chemieunterricht.info>