Zoltán Faragó, DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Raumfahrtantriebe
Fachhochschule Esslingen, Fachbereich VU – Versorgungstechnik und Umwelttechnik
Feuerungstechnik und Wärmewirtschaft ; Email: zoltan.farago@dlr.de

Brennstoffkunde

Entstehung fossiler Brennstoffe

Kohle

Erdöl

Erdgas und Flüssiggas

Brennstoffvorräte

Nachwachsende Brennstoffe

Brennstoffchemie

Tabelle 1 Zusammensetzung fester Brennstoffe (Holz, Braunkohle, Steinkohle)
Seite 4

Tabelle 12 Zusammensetzung der wichtigsten Brenngase
Seite 23

Tabelle 13 Elementaranalyse der wichtigsten flüssigen und gasförmigen Brennstoffe
Seite 23

Tabelle 14 Kennzahlen der wichtigsten flüssigen und gasförmigen Brennstoffe
Seite 23

Zoltán Faragó, DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Raumfahrtantriebe
Fachhochschule Esslingen, Fachbereich VU – Versorgungstechnik und Umwelttechnik
Feuerungstechnik und Wärmewirtschaft ; Email: zoltan.farago@dlr.de

Entstehung fossiler Brennstoffe

Steinkohle, Braunkohle, Ölsande, Ölschiefer, Lignit, Gashydrate, Erdgas, Erdöl, Torf etc. sind ***fossile Brennstoffe***. Sie sind aus der Biomasse früherer Zeiten entstanden. Die wichtigste chemische Reaktion bei der Entstehung von Biomasse ist die **Photosynthese**, eine chemische Reaktion, bei der aus Kohlendioxid und Wasserdampf mit Hilfe von Photonen (Lichtenergie) Zucker und Sauerstoff entstehen:

$$6\,CO_2 + 6\,H_2O + \text{Lichtenergie} \Rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \qquad (1)$$

Aus den Zuckermolekülen entstehen durch Polymerisation Stärke und Cellulose, die wiederum in andere biologische Stoffe umgewandelt werden können. Die heute von uns genutzten fossilen Energieträger haben sich durch geologisch bedingte Umwandlungen aus organischen Stoffen gebildet: Vor rund zwei Milliarden Jahren haben sich Lebewesen entwickelt, die mit Hilfe des Farbstoffes „Chlorophyll" die Reaktion nach Gl. (1) ermöglichen. Damals war die Erdatmosphäre sehr arm an Sauerstoff. Den Luftsauerstoff der Atmosphäre hat die Photosynthese aus Kohlendioxid und Wasser erzeugt, gleichzeitig wurde Biomasse produziert. In Kenntnis der Sauerstoffmasse der Atmosphäre kann aus Gl. (1) die gesamte Biomasse der Erde errechnet werden.

Würde man zur Deckung des weltweiten Energiebedarfes die als fossiler Brennstoff konservierte Biomasse verbrennen, wäre der Luftsauerstoff nach Gl. (2) restlos in Kohledioxid zurückgewandelt, da die Verbrennung eine Umkehrung der Photosynthese darstellt:

$$C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \Rightarrow 6\,CO_2 + 6\,H_2O + \text{Verbrennungswärme} \qquad (2)$$

Die Verbrennung fossiler Brennstoffe träg dazu bei, die heutige Erdatmosphäre der vor Milliarden Jahren ähnlich zu machen (Klimakatastrophe!), da zwischen Entstehung und Verbrennung dieser Brennstoffe Jahrmilliarden liegen. Die Verbrennung nachwachsender Brennstoffe ist wiederum CO_2-neutral, da zwischen der Entstehung und der Verbrennung in diesem Fall nur eine kurze Zeitspanne vorhanden ist.

Fossile Brennstoffe sind tote Biomasse, welche vor Jahrmillionen abgestorben ist und durch geologische Prozesse in ***Steinkohle***, ***Braunkohle***, ***Lignit***, ***Torf***, ***Erdö***l und ***Erdgas*** sowie verschiedene Mischprodukte wie ***Ölsande***, ***Ölschiefer***, ***Gashydrate*** etc umgewandelt wurde. In einer ersten Stufe werden Pflanzen und Tiere kurz nach ihrem Absterben durch Schlamm oder Wasser vom Luftsauerstoff abgetrennt - beispielsweise Vegetationsflächen, die überflutet werden, oder Tiere, die im Schlamm einsinken. Die darauf folgende anaerobe, also sauerstofflose Zersetzung durch entsprechende Mikroorganismen überführt die tote Biomasse in Kohlenstoff- und Kohlenwasserstoffverbindungen verschiedener Zusammensetzung sowie andere Verbindungen mit einer Konzentrierung des Kohlenstoffgehalts.

Aufgabe 1: Berechnen Sie anhand Gl. (1) den Kohlenstoffgehalt der gesamten Biomasse der Erde unter der Annahme, dass sowohl die organische Kohlenstoffmasse als auch die Sauerstoffmasse in der Atmosphäre durch die Photosynthese entstanden ist. Die Sauerstoffmasse der Atmosphäre beträgt ca. $1{,}2 \cdot 10^9$ Millionen Tonne. Vergleichen sie die errechnete Kohlenstoffmasse mit der Masse der Biosphäre in Abbildung 4 der Vorlesung „Feuerungen und Umwelt".

Aufgabe 2: Zeigen Sie anhand der Reaktionen nach den Gleichungen (1) und (2), dass die Verbrennung fossiler Brennstoffe die Umwandlung von der Sonnenenergie in Wärme bedeutet.

Zoltán Faragó, DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Raumfahrtantriebe
Fachhochschule Esslingen, Fachbereich VU – Versorgungstechnik und Umwelttechnik
Feuerungstechnik und Wärmewirtschaft ; Email: zoltan.farago@dlr.de

Kohle

Umrechnungen: Die durchschnittliche chemische Energie (Verbrennungswärme) der Steinkohle ist die Steinkohleneinheit, SKE. Eine Tonne Steinkohleneinheit (1 t SKE) entspricht der Verbrennungswärme von etwa 0,691t Erdöl, oder 850 Nm^3 Erdgas und ist $29 \cdot 10^9$ Joule. Nach den bekannten „sicheren Reserven" ist der weltweite Kohlebedarf etwa für 200 Jahre gedeckt.

Kohlenbildung oder Inkohlung bezeichnet den unter fast vollständigem Sauerstoffabschluss erfolgenden Umbildungsvorgang von pflanzlicher Substanz zu den verschiedenen Kohlenarten. Stein- und Braunkohle haben sich vor 350 – 270 Millionen Jahren im feuchtheißen Klima des Karbonzeitalters aus Sumpfmoorwäldern gebildet. Typische Pflanzen dieser Wälder waren große Farne, baumartige Schachtelhalme und Schuppenbäume. Zunächst entstand torfähnliches Material und dann durch Inkohlungsprozesse unter Druck Braunkohle. Erst durch größeren tektonischen Druck und höhere Temperatur bildete sich Steinkohle. Durch längerfristige Einwirkung von Auflastdruck und erhöhter Temperatur nimmt der relative Anteil an Kohlenstoff zu und der Anteil an flüchtigen Stoffen ab (CH_4, CO_2).

Nach Art der organischen Ausgangsstoffe unterscheidet man Humus- und Sapropel-Kohlen, zwischen denen aber Übergänge bestehen. Humus-Kohlen sind aus dem Lignin und der Cellulose von Pflanzen hervorgegangen, Sapropel-Kohlen (Bitumen-Kohlen) aus den Eiweiß- und Fettstoffen des Faulschlamms. Die Humus-Kohlen machen über 80% aller Kohlen aus. Nach dem Inkohlungsgrad und anderen damit in Zusammenhang stehenden Merkmalen teilt man die Kohlen in zwei Gruppen ein, Braunkohle und Steinkohle, diese wiederum in verschieden Arten (Tab. 1).

Bei der Weich-Braunkohle (von Baumstümpfen und Baumstämmen durchsetzt) unterscheidet man erdige (weiche) und stückige Sorten, bei der Hart-Braunkohle die schwarzbraune, dichte Matt-Braunkohle und die schwarze, harte, durch muscheligen und glänzenden Querbruch charakterisierte Glanz-Braunkohle (auch Pech-Kohle genannt). Die einzelnen Arten der Steinkohle (mit zunehmenden Inkohlungsgrad) sind: Flamm-Kohle, Gasflamm-Kohle, Gas-Kohle, Fett-Kohle, Ess-Kohle, Mager-Kohle und Anthrazit. Bei Braunkohle bestehen die organischen Bestandteile aus dem Bitumenanteil (vor allem Harze und Wachse) sowie aus Huminstoffen (humusbildende Stoffe). Daneben enthält jede Kohle anorganische, unverbrennbare Ballaststoffe (Aschebestandteile). Das in den Kohle-Flözen enthaltene Grubengas (hauptsächlich Methan) ist bei der Inkohlung frei geworden, die Kohlensäure größtenteils zugewandert (vulkanischen Ursprungs).

Die chemische **Zusammensetzung** der Kohle ist äußerst kompliziert. Bei der Steinkohle liegen nur 10% des Kohlenstoffs frei vor; der Rest ist in einem Verbindungsgemisch enthalten, das vor allem aus aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen besteht, in denen außer Sauerstoff zum Teil auch Schwefel und Stickstoff chemisch gebunden sind. Humuskohlen bestehen zu einem großen Teil aus aliphatischen Verbindungen, Sapropelkohlen enthalten viel Aromaten. Bei der Verbrennung aromatischer Kohlenwasserstoffe entsteht Russ. Schwefel verbrennt zu Schwefeldioxid und –Trioxid. Organisch gebundener Brennstoffsauerstoff neigt zu Formaldehydbildung bei der Verbrennung. Organisch gebundener Brennstoffstickstoff erhöht die Wahrscheinlichkeit der Stickoxidbildung bei der Verbrennung.

Zoltán Faragó, DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Raumfahrtantriebe
Fachhochschule Esslingen, Fachbereich VU – Versorgungstechnik und Umwelttechnik
Feuerungstechnik und Wärmewirtschaft ; Email: zoltan.farago@dlr.de

2 – Brennstoffkunde

Tabelle 1 zeigt die chemische Zusammensetzung fester Brennstoffe. In den Tabellen 2 und 3 sind die weltweit bekannten Steinkohlenreserven der Erde in den Jahren 1955 und 1986 zu sehen.

		Wasser-Gehalt %	Flüchtige Bestandteile %	**Brennbare Gase %**	**Kohlenstoff (wasser- u. aschefrei) %**	Wasserstoff (wasser- u. aschefrei) %	Sauerstoff (wasser- u. aschefrei) %	Heizwert kJ/kg
Holz		35 – 45	80 - 85	**40 - 45**	**45 – 50**	5 – 7	40 – 43	17000 – 20000
Braun-	Weichkohle	45 – 60	70 – 50	**10 - 25**	**65 – 70**	5 – 9	18 – 30	25100 – 26800
kohle	Hartkohle (Pechkohle)	10 – 30	64 – 45	**15 - 35**	**70 – 75**	5 – 6	12 – 18	26800 – 28500
	Flammkohle	4 – 7	40 – 45	**35 - 40**	**75 – 82**	5,8 - 6,0	> 9,8	bis 32850
Stein-	Gasflamm-kohle	3 – 6	35 – 40	**30 - 35**	**82 – 85**	5,6 - 5,8	9,8 - 7,3	bis 33900
	Gaskohle	3 – 5	28 – 35	**25 - 30**	**85 – 87**	5,0 - 5,6	7,3 - 4,5	bis 35000
kohle	Fettkohle	2 – 4	19 – 28	**17 - 24**	**87 – 89**	4,5 - 5,0	4,5 - 3,2	bis 35400
	Esskohle	2 – 4	14 – 19	**12 - 15**	**89 – 90**	4,0 - 4,5	3,2 - 2,8	35400
	Magerkohle	1 – 3	10 – 14	**9 - 12**	**90 - 91,5**	3,75 - 4,0	2,8 - 2,5	bis 35600
	Anthrazit	< 2	6 – 10	**5 - 9**	**> 91,5**	< 3,75	< 2,5	bis 36000

Tabelle 1: Zusammensetzung fester Brennstoffe. Torf und Lignit liegen ihrer Zusammensetzung nach zwischen Holz und Braunkohle. Mit zunehmender Inkohlung steigt der Heizwert, der Kohlenstoffgehalt und sinken Wasser- und Sauerstoffgehalt und flüchtige Bestandteilen.

Steinkohlenreserven, Stand 1955		
	Reserve in Mio. T	Reserve in 10^{15} J
Europa	339188	9836452
Asien	547880	15888520
UdSSR	947000	27463000
Afrika	72370	2098730
Nordamerika	1608525	46647225
Südamerika	4523	131167
Australien	13650	395850
Total	**3591346**	**1.04149034**

Tabelle 2: Welt-Steinkohlereserven, Stand 1955, Quelle: Új Magyar Lexikon, 1962

Steinkohlenreserven, Angaben in 10^{15} J, Stand 1986			
	Reserve	Förderung	Reserve / Förderung [Jahr]
Nordamerika	3782335	22174	170
Lateinamerika	75552	758	99
Westeuropa	970291	8332	116
Naher Osten		29	
Afrika	1833213	4149	442
Asien u. Australien	1186733	9693	122
UdSSR	3036608	15818	192
VR China	4365124	22568	193
Osteuropa	897083	14793	61
Total	**1.8146939**	**98315**	**184**

Tabelle 3: Welt-Steinkohlereserven, Stand 1986, Quelle: The World Ressource Institute, 1988-89
Die Reserven haben sich trotz intensiver Förderung zwischen 1955 und 1985 beinahe verdoppelt, da mehr Kohle gefunden als verbraucht wurde.

Aufgabe 3: Welcher Anteil der gesamten Biomasse der Erde ist in Form von bekannten Welt-Steinkohlenreserven vorhanden? Entnehmen Sie die zu dieser Aufgabe benötigten Daten aus der Lösung der Aufgabe 1 und aus den Tabellen 2 und 3. Gehen Sie bei der Berechnung von einem Kohlenstoffgehalt der Steinkohle von 85 % aus (Mittelwert in Tabelle 1 für Steinkohle).

Aufgabe 4: Warum neigt die Kohlenverbrennung zu Russbildung?

Aufgabe 5: Warum neigt die Holzverbrennung zu Formaldehydbildung?

Erdöl

Umrechnungen: Der Energieinhalt von 1 t Erdöl entspricht etwa 1270 Nm^3 Erdgas oder 1,5 t SKE bzw. $44 \cdot 10^9$ J. Die Mengenangabe erfolgt gelegentlich in Gallone (ca. 3,8 l) oder Barrel (Fass, ca. 159 l). Nach den bekannten „sicheren Reserven" ist der weltweite Erdölbedarf etwa für 35 – 45 Jahre gedeckt. Die „Ressourcen„ d.h. geschätzten aber nicht nachgewiesenen Reserven liegen deutlich höher.

Auch Erdöl und Erdgas sind biogenen Ursprungs. Man vermutet, dass aus dem Meeresplankton und dem daraus entstandenen Faulschlamm unter Mithilfe von anaeroben Bakterien Kohlenwasserstoffverbindungen gebildet wurden. Unter dem Einfluss von hohem Druck und Erdwärme soll in Jahrmillionen Erdöl entstanden sein. Erdöl und Erdgas wurden schließlich in höhere Schichten verdrängt, bis sie an undurchlässige Ton- oder Salzschichten stießen.

Zusammensetzung: Erdöl (Petroleum, Rohöl, Steinöl, Bergöl) ist ein kompliziertes Gemisch von etwa 500 verschiedenen Kohlenwasserstoffen: Aliphaten, Naphthenen und Aromaten mit wechselnden Anteilen ungesättigter Kohlenwasserstoffe. Die Farbe ist wasserklar bis fast schwarz, grünlich fluoreszierend, sie sind viskos; Dichte zwischen 0,65 u. 1,02. Aufgrund neuerer Forschungen wird angenommen, dass sich das Erdöl in vorgeschichtlicher Zeit hauptsächlich aus tierischen Substanzen (Kohlenhydrate, Fette u. Eiweiße), z.B. aus dem Plankton (Faulschlamm), gebildet hat.

Die chemische Zusammensetzung schwankt je nach Fundort sehr stark: Vorkommen u.A. in Russland (Sibirien), USA (Pennsylvania), Saudi-Arabien, Mexiko, China, Großbritannien, Venezuela, Irak, Iran, Kuwait, Libyen, Norwegen, Rumänien, Kanada, Indonesien, Nigeria u. Ägypten; geringe deutsche Vorkommen in Niedersachsen (bei Hannover und im Emsland) und in Schleswig-Holstein. Aus dem Meeresboden und in Küstennähe erfolgt die Gewinnung von Bohrinseln aus. Das nach Anbohren der bis zu 6000 m tiefen erdölführenden Schichten entweder unter eigenem Druck an die Erdoberfläche tretende oder hochgepumpte Erdöl / Erdgas wird durch Pipelines zu den Raffinerien befördert und dort in oft vollautomatisch arbeitenden Anlagen einer fraktionierten Destillation unterworfen. Man destilliert dabei zunächst unter Normaldruck die bis etwa 200 °C siedenden Bestandteile ab, wobei Petrolether (Gasolin, Lösungsmittel) bei 40–70 °C, Leichtbenzin bei 70–90 °C, Petroleum (Schwerbenzin, für Düsenflugzeuge) bei 100–150 °C u. Ligroin (Lack-, Testbenzin) bei 100–180 °C gewonnen werden.

Der Rückstand wird im Vakuum destilliert, wobei man Leuchtpetroleum (Traktorentreibstoff) bei 200 bis 300 °C, Gasöle (Dieselöl, Haushaltsheizöl) bei 300–350 °C sowie Spindel-, Maschinen- u. Zylinderöle erhält. Die über 350 °C siedende Rückstände trennt man in Schmieröle, Vaseline, feste Paraffine u. Asphaltrückstände. Meist werden die höhersiedenden Öle durch einen gelenkten Crackprozess (katalytisches oder thermisches Cracken) in niedrigsiedende Bestandteile aufgespaltet, wodurch die Benzinausbeute größer wird.

Name der Fraktion	Siedebereich [°C]	Verwendung
Petrolether / Gasolin	40 - 70	Fleckenwasser / Lösungsmittel
Leichtbenzin	60 – 100	Vergaserkraftstoff
Schwerbenzin	100 – 150	Vergaserkraftstoff
Ligroin	120 – 150	Lösungsmittel/Waschbenzin
Petroleum/Kerosin	150 – 300	Beleuchtungsmittel
Gasöl	250 – 350	Dieselmotoren / Heizöl EL
Schmieröl	> 300	Maschinen-/Motorenöl
Bitumen	Rückstand	Straßenbau/Dachpappe

Tabelle 4: Die wichtigsten Erdölprodukte.

Man erkennt aus Tabelle 4, dass Dieselöl und Heizöl EL den gleichen Siedebereich aufweisen. Der unterschied zwischen diesen Brennstoffen besteht in einigen physikalischen (z.B. Viskosität, Stockpunkt) und chemischen Anforderungen (z.B. Schwefelgehalt).

Die Gefahren der Erdölproduktion und –Verbrauch sind:
a) 1 Liter Öl verseucht 1 Million Liter Wasser;
b) Ölschicht an der Wasseroberfläche ist luftundurchlässig;
c) Bodenverseuchung,
d) Feuer- und Explosionsgefahr.

Tabellen 5 und 6 zeigen die Welt-Rohölreserven und die Verfügbarkeit in den Jahren 1986 und 2000. In diesem Zeitraum stiegen die Reserven von $3{,}9 \cdot 10^{21}$ Joule auf $6{,}1 \cdot 10^{21}$ Joule und die Verfügbarkeit von 32 auf 39 Jahre. Zwar zeigen die Reserven und die Verfügbarkeit einen steigenden Charakter. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass ca. 80 % der Welt-Rohölreserven im Nahen Osten, d.h. in einer politisch unsicheren Region liegen.

Erdölrserven, Angaben in 10^{15} J, Stand 1986			
	Reserve	Förderung	Verfügbarkeit: Reserve / Förderung [Jahr]
Nordamerika	213537	23845	9
Lateinamerika	519188	13834	38
Westeuropa	100488	8299	12
Naher Osten	2294476	26772	86
Afrika	305651	10501	29
Asien u. Australien	104675	7449	14
UdSSR	334960	25666	13
VR China	100488	5468	19
Osteuropa	12561	963	13
Total	**3.986024**	**122796**	**32**

Tabelle 5 : Welt-Rohölreserven, Stand 1986, Quelle: The World Ressource Institute, 1988-89

Erdölreserven, Angaben in Mio. Tonnen, Stand 2000				
	Reserve [Mio. Tonnen]	Förderung [Mio. Tonnen]	Verfügbarkeit [Jahr]	Reserve [10^{15} J]
Nordamerika u. Mexiko	7.413	650,3	11	326172
Südamerika	10.750	346,6	31	473000
Europa (West)	2.272	332,9	7	99968
Naher Osten	90.369	1.112	81	3.976236
Afrika	8.113	360,7	22	356972
Frühere UdSSR	7.754	394,5	20	341176
VR China	3.288	160,8	20	144672
Sonstige Länder	9.748	213,2	46	428912
Total	**139.707**	**3.571**	**39**	**6.147108**

Tabelle 6: Welt-Rohölreserven, Stand 2000, Quelle: Mineralölwirtschaftsverband (http://www.vebaoel.de/oel-welt/oel_fakten/oelreserven.html)
Ähnlich wie bei Kohle sind in der Vergangenheit die Reserven mit der Zeit ständig gewachsen (siehe Abb. 5 und 6)

Aufgabe 6: 1 Liter Öl kann 1 Million Liter Wasser verseuchen. Wie ist es erklärbar, wenn das Öl in Wasser unlöslich ist?

Aufgabe 7: Was ist die Folge, dass die Ölschicht an der Wasseroberfläche luftundurchlässig ist?

Aufgabe 8: Was ist der wesentliche Unterschied zwischen Dieselöl und Heizöl?

Erdgas und Flüssiggas

Umrechnungen: Energieinhalt von 1000 Nm^3 Erdgas ≈ 0,79 t Öl ≈ 1,18 t SKE ≈ $34{,}6 \cdot 10^9$ J.
Nach den bekannten „sicheren Reserven" ist der weltweite Erdgasbedarf etwa für 60 – 70 Jahre gedeckt. Die „Ressourcen„ d.h. geschätzten aber nicht nachgewiesenen Reserven liegen deutlich höher.

Der Begriff Erdgas umfasst alle gasförmigen Kohlenwasserstoffverbindungen, die aus der Erde stammen und brennbar sind. Die **Zusammensetzung** von Erdgas kann variieren. Hauptbestandteile sind Methan (CH_4), chemisch gesehen also eine organische Verbindung aus den Elementen Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H) mit einem Volumenanteil von 80 – 99 % und Ethan (C_2H_6) mit einem Anteil von 1 – 10 %. Weitere häufige Erdgaskomponenten sind: Stickstoff, Kohlendioxid, Propan(C_3H_8) und Butan(C_4H_{10}). Propan und Butan sind bei Umgebungstemperatur und Umgebungsdruck gasförmig, bei erhöhtem Druck sind sie flüssig (Flüssiggas).

Erdgas aus Kohle: Aus den Ablagerungen höherer Pflanzen entstanden Kohleflöze (Inkohlungsprozess). Vereinzelt sackten diese Kohleflöze in größere Erdschichten ab. Durch den Tiefendruck und die hohen Temperaturen kam es zu einer "Nachinkohlung", wobei sich Kohlenstoff anreicherte und andere Gase, wie z. B. Sauerstoff, Wasserstoff und Methan, verdrängt wurden. Diese Gase sammelten sich an und bildeten riesige Vorkommen.

Erdgas aus Ölschiefer: Durch hohe Temperaturen kann aus Ölschiefer in einer Art Crackprozess Erdgas entstehen. Heutzutage bleiben diese Vorkommen noch überwiegend unberücksichtigt, in der Zukunft können die Ölschiefervorkommen jedoch an Bedeutung gewinnen.

Erdgas aus Erdöl: Aus Erdöl entweicht nach der Druckentspannung Methan, Ethan, Propan und Butan. Dieses Gemisch wird auch als „Nassgas" bezeichnet, im Gegensatz zu der Mischung aus Methan und Ethan (Trockengas). Durch technologische Trennung gewinnt man aus dem Nassgas Trockengas und Flüssiggas (Propan, Butan oder eine Mischung aus Propan und Butan).

Erdgasreserven, Angaben in 10^{15} J, Stand 1986			
	Reserve	Förderung	Verfügbarkeit Reserve / Förderung [Jahr]
Nordamerika	310720	19654	16
Lateinamerika	213620	2835	72
Westeuropa	240808	6511	36
Naher Osten	1013724	2010	500
Afrika	221388	1792	130
Asien u. Australien	217504	3894	54
UdSSR	1705076	25851	66
China	31072	494	65
Osteuropa	15536	2629	6
Total	**3.969448**	**65669**	**60**

Tabelle 7a : Welt-Erdgasreserven, Stand 1986, Quelle: The World Ressource Institute, 1988-89

Erdgasreserven, Stand 1993		
	Reserve in Mrd. m³	Reserve in 10^{15} J
UdSSR	56500	1954900
USA	4700	162620
Kanada	2700	93420
Niederlande	1900	65740
GB	600	20760
Indonesien	1800	62280
Algerien	3600	124560
Saudi Arabien	5300	183380
Norwegen	2000	69200
Mexiko	2000	69200
Venezuela	3700	128020
Iran	20700	716220
Argentinien	800	27680
Deutschland	300	10380
China	1700	58820
Total	**142000**	**4.913200**

Tabelle 7b : Welt-Erdgasreserven, Stand 1993, Quelle: Brockhaus Enzyklopädie, 2001. Die Reserven sind ähnlich wie bei Kohle und Rohöl in der Vergangenheit ständig gewachsen.

Tabellen 7a und 7b zeigen die Entwicklung der Welt-Erdgasreserven. Energiebezogen sind die Welt-Erdgas und Welt-Erdölreserven in etwa gleich. Die Gasreserven sind jedoch territorial viel gleichmäßiger verteilt als die Ölreserven. Bezogen auf gleiche Kohlendioxidfreisetzung wird bei Erdgas mehr Energie freigestellt als bei allen anderen fossilen Brennstoffen.

Brennstoffvorräte

Die Tabellen 2, 3 und 5 – 7 zeigen, dass in der Vergangenheit die Energiereserven der Erde ständig zugenommen haben. Dies ist der Fall, wenn in einem Zeitraum mehr Lagerstätten gefunden als verbraucht werden. Bei den Lagerstätten fossiler Brennstoffe unterscheidet man zwischen **Reserven** (oft *sichere Reserven* genannt) und **Ressourcen** (*unsichere Reserven*)

Reserven: Die Brennstoffmenge der Reserven ist durch geologische Vermessungen genau bekannt. Nur solche Lagerstätten werden zu den Reserven gezählt, deren Abbau wirtschaftlich rentabel ist. Bei sinkenden Rohölpreisen sinkt die als Reserve definierte Brennstoffmenge, da durch die niedrigen Preise weniger Brennstoff wirtschaftlich abbaubar ist. Entsprechend steigt die Brennstoffmenge der Reserven bei steigenden Energiepreisen.

Ressourcen: Zu den Ressourcen zählen Lagerstätten, deren Abbau bei den aktuellen Brennstoffpreisen wirtschaftlich nicht rentabel ist, ferner solche, deren Brennstoffmenge nur geschätzt werden kann, weil zu einer genauen Mengenangabe noch nicht hinreichend viele Messbohrungen vorhanden sind. Bei allen fossilen Brennstoffen ist die als Ressource angegebene Brennstoffmenge ca. acht bis zehnmal höher als die der Reserven.

Verfügbarkeit [Reserve / (jährliche Förderung)]: In den vergangenen 100 Jahren haben sich sowohl die Reserven als auch die Ressourcen vervielfacht, da mehr Brennstoff gefunden als verbraucht wurde. Bei steigenden Reserven und steigender Förderung ergab sich im vorigen Jahrhundert eine etwa konstante oder langsam zunehmende Verfügbarkeit. Die auf die Weltreserven bezogene Verfügbarkeit beträgt für Rohöl gegenwärtig ca. 30 – 40 Jahre, für Erdgas ca. 80 Jahre und für Steinkohle ca. 200 Jahre. Da die Vermessung der Lagerstätten kostspielig ist, bleibt der Zeitraum der gesicherten Verfügbarkeit der fossilen Brennstoffe auf wenige Jahrzehnte beschränkt. Die Verknappung fossiler Brennstoffe ist weniger darin zu sehen, dass keine Lagerstätten mehr gefunden werden, sondern darin, dass Neufunde oft an geographisch schwer zugängigen Orten (z.B. Tiefsee, Polargebiet) oder an politisch unstabilen Regionen (z.B. Naher Osten) liegen.

Aufgabe 9: Warum sind die Welt-Rohölreserven während des Zweiten Weltkrieges gesunken und während des Arabisch-Israelischen-Krieges 1973 gestiegen?

Der Trend, dass immer mehr Reserven an fossilen Brennstoffen gefunden als verbraucht werden, ist in den vergangenen Jahrzehnten umgekippt. Die globale Versorgung ist zwar für Jahrzehnte gesichert, die neuen Funde sind jedoch zunehmend schwer abbaubar.

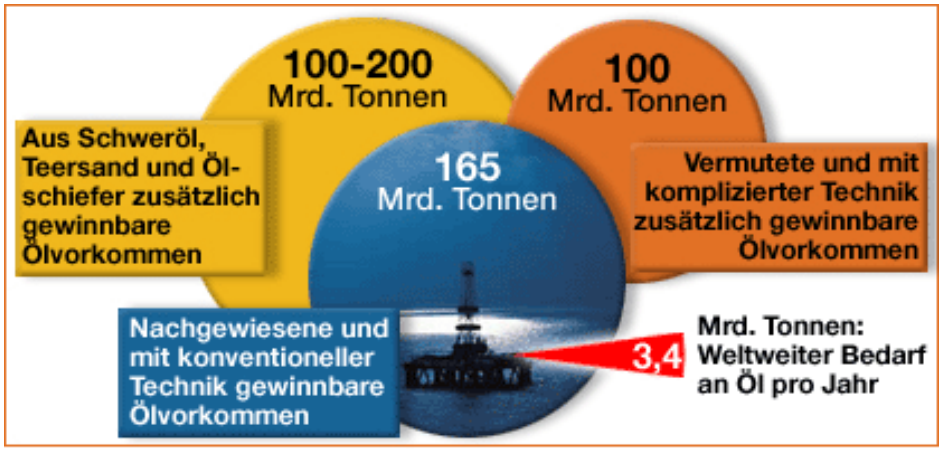


Abbildung 1: Weltweite Ölreserven und –verbrauch; Quelle: Oil & Gas J., Stand 2001

Aus heutigem Stand können in den kommenden Jahrzehnten die weltweiten Ölreserven knapp werden. Die Gasversorgung scheint etwas längerfristig gesichert zu sein. Der sicherste fossile Energieträger bleibt jedoch die Kohle. (Abb. 2.)

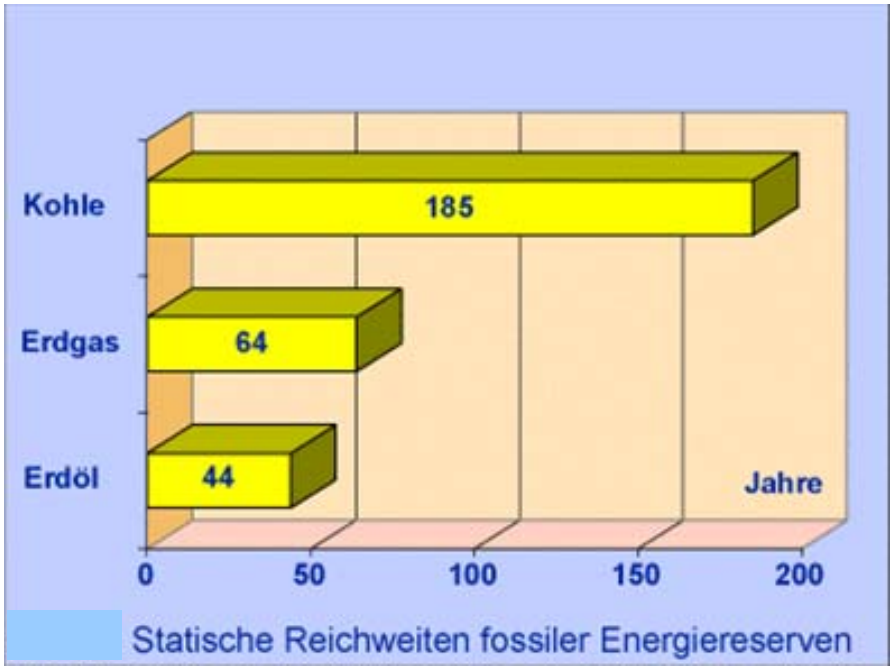
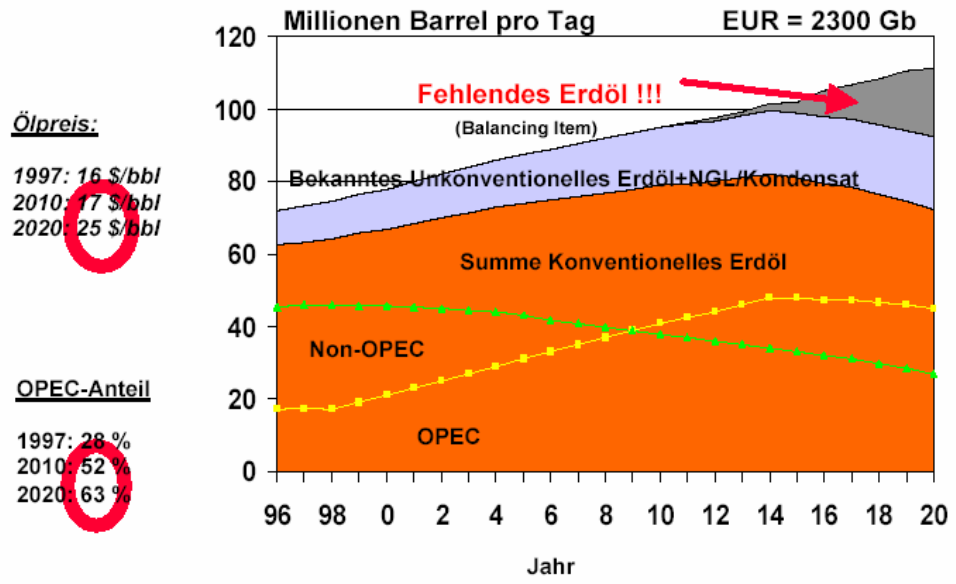
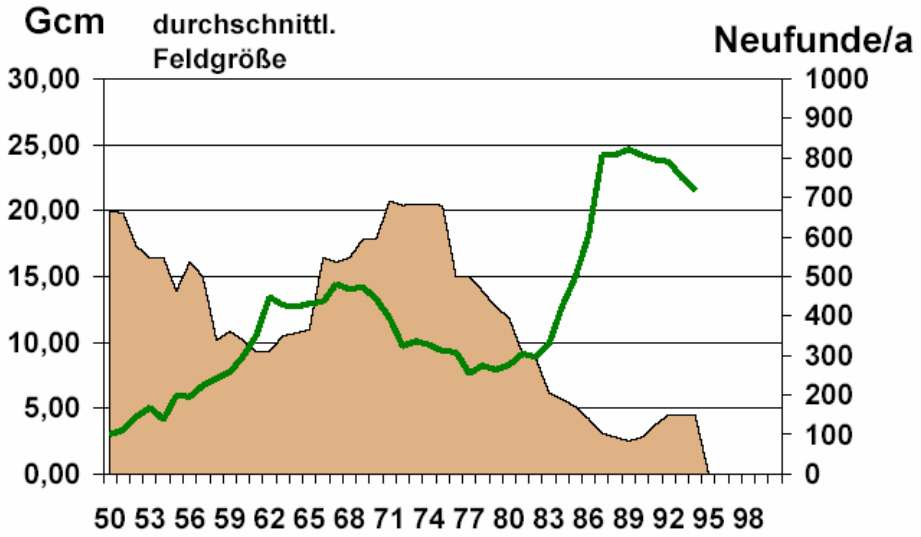


Abbildung 2: Fossile Energiereserven; Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 1963



IEA World Energy Outlook 1998; Trendszenario; Der OPEC-Anteil nimmt von heute 27 % auf über 60 % im Jahr 2020 stetig zu. Im Jahr 2020 wird eine Unterversorgung an flüssigen Kohlenwasserstoffen von etwa 17 % erwartet bzw. einem Viertel der heutigen Weltölproduktion erwartet. [57]

Abbildung 3: Warnung von einer Unterversorgung an flüssigen Kohlenwasserstoffen aus europäischer Sicht; *Quelle: Endbericht Vorstudie im Auftrag des Deutschen Bundestages, Büro für Technikfolgenabschätzung (TAB); D-85521 Ottobrunn, Jörg Schindler, Werner Zittel, 2001*



Durchschnittliche Größe der Gasneufunde (eigene Berechnung nach Daten aus [23, 24]); Daten nur bis 1995 berücksichtigt

Abbildung 4: Zunehmende Anstrengungen für Aufrechterhaltung der Energieversorgung; *Quelle: siehe Abbildung 3.*

Für die kommenden Jahrzehnte scheint die Versorgung an fossilen Brennstoffen gesichert zu sein. Eine eventuelle Verknappung kann eher bei flüssigen Brennstoffen auftreten. Als größte Unsicherheit wird durch die politische Unstabilität der Förderländer angesehen (Abb. 5)

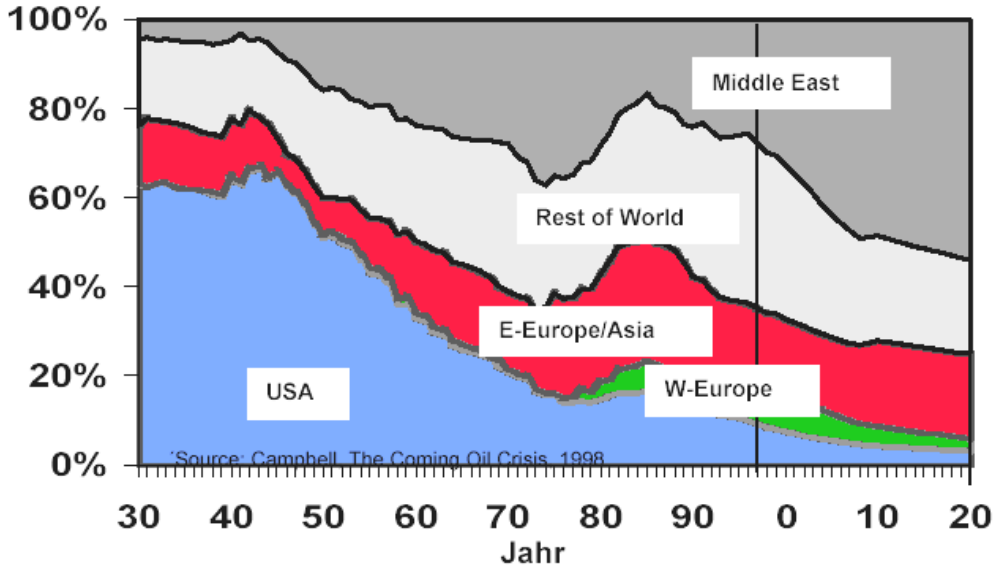


Abbildung 5 Regionaler Anteil an der Weltölförderung von 1930 – 2020 [10]
Quelle siehe Abbildung 3.

Aufgabe 10: Zeigen Sie anhand der Abbildungen dieses Kapitels, dass für die Kommende Generation eine Verknappung fossiler Brennstoffreserven zu befürchten ist.

Nachwachsende Brennstoffe

Die Anwendung erneuerbaren oder regenerativen Energien belastet nicht die Atmosphäre mit Treibhausgasen. Als erneuerbare Energien werden a) Geothermische Energie, b) Windenergie, c) Sonnenenergie, d) Wasserkraft und e) Bioenergie bezeichnet. Die zukünftige Bedeutung der Bioenergie steigt eher aus umweltpolitischen Gründen als wegen der tatsächlichen Erschöpfung der Vorräte steigen. Nachwachsende Brennstoffe belasten deutlich geringer die Umwelt mit Kohlendioxid als fossile Brennstoffe.

Schon heute könnte der gesamte Energiebedarf durch regenerative Energien gedeckt werden. Wie Tabelle 8 zeigt, hat die Sonnenenergie hierbei das höchste Potential.

Energieform	mögliche Deckung	heute technisch nutzbar
	Die Zahlen geben das x-Fache des Weltenergiebedarfs an.	
direkte Sonnenenergie	2.850	3,8
Windenergie	200	0,5
Biomasse	20	0,4
Erdwärme	5	1,0
Meeresenergie	2	0,05
Wasserkraft	1	0,15
Gesamt:	**3.078**	**5,9**

Tabelle 8: Mögliche Deckung des Weltenergiebedarfs durch erneuerbare Energien.
Quelle: Forschungsverbund Sonnenenergie (FVS/Berlin)

Aus Tabelle 8 ist zu entnehmen, dass der gesamte Weltenergiebedarf 3.078 Mal durch regenerative Energiequellen gedeckt werden kann. In Deutschland wurde 1999 neun Prozent des Strombedarfs erneuerbare Energie abgedeckt.

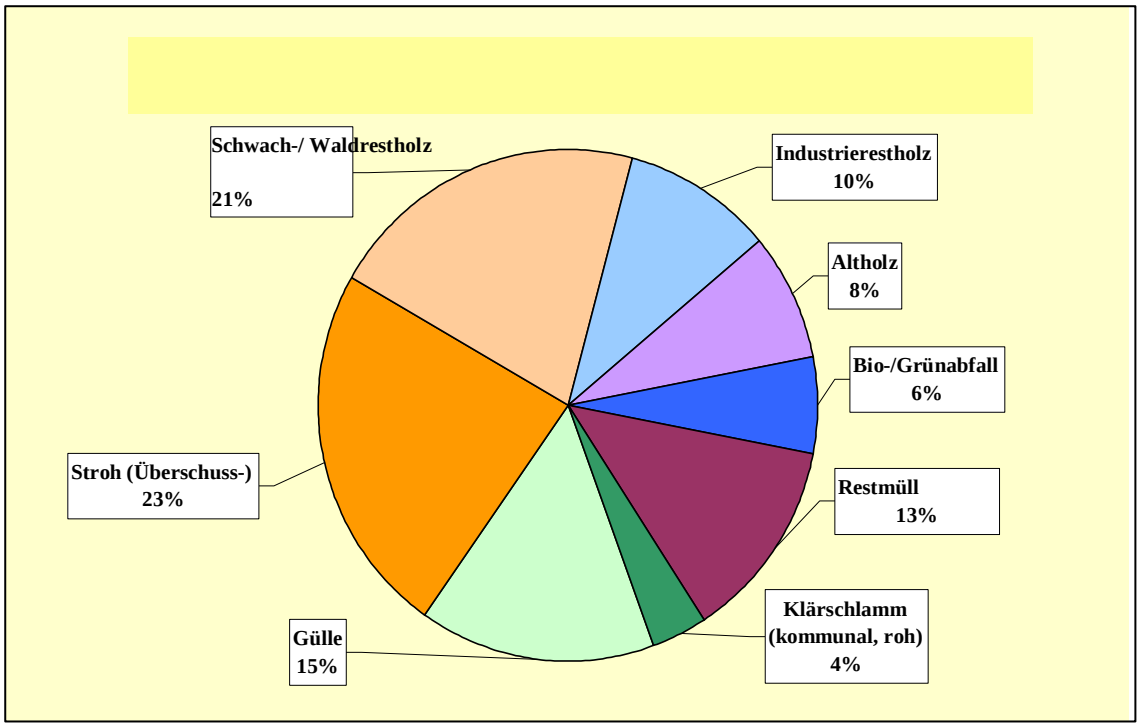


Abbildung 6: Aufkommen biogener Rest- und Abfallstoffe in Deutschland im Jahr 1999;
Quelle: L. Lieble, Biomasse als Energieträger, BWK 11/2003

Abbildung 6 zeigt Aufteilung des Bioenergieaufkommens in Deutschland im Jahr 1999. Etwa ein Fünftel dieser Energiequelle ist der Brennholz.

Für den Einsatz von **Brennholz** als Energieträger liegen mangels ausreichender statistischer Grundlage keine zuverlässigen Mengenangaben vor. Die EU-Kommission kündigt an, den Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch in der EU von derzeit etwa 6 % (davon Biomasse ca. 3 %) bis zum Jahr 2010 zu verdoppeln. In Deutschland soll bis zum Jahr 2010 der Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch von heute 2 % auf 4 % verdoppelt werden. Bis zum Jahr 2050 sollen 50 % der Primärenergie regenerativ erzeugt werden.

Eine Prognose über das potentielle Rohholzaufkommen in Deutschland bis zum Jahr 2020 der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH) hat gezeigt:
In unseren Wäldern sind genügend Ressourcen vorhanden, um nachhaltig Rohholz in steigendem Umfang bereitzustellen. Die Gesamtmenge des nachhaltig verfügbaren Rohholzaufkommens wird auf jährlich ca. 58 Mio. m^3 geschätzt. Bisher wurden davon nur rund 70 % eingeschlagen. Selbst bei Ausschöpfung des errechneten nachhaltigen Gesamtaufkommens ergäbe sich wegen der Einhaltung eines Sicherheitsabstands zur maximalen Holzproduktion in den Wäldern noch eine Vorratsanreicherung von durchschnittlich ca. 1,5 m^3 pro ha und Jahr. Der gegenwärtige Holzverbrauch beträgt etwa 1,1 m^3 Pro ha und Jahr. (*Quelle: Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, BML 532*)

Maßeinheiten für Brennholz

1 Festmeter (fm) = 1 m³ feste Holzmasse
1 Raummeter (rm) = 1 m³ geschichtete Holzteile inkl. Luftzwischenräume
1 Schüttraummeter (Srm) =1 m³ geschüttete Holzteile (Stückholz, Hackgut, usw.)

Maßeinheit	fm	rm	rm	Srm	Srm	Srm
			Stückholz		Hackgut	
Sortiment	Rundholz	Scheitholz	geschichtet	geschüttet	G 30 „fein“	G 50 „mittel“
1 fm Rundholz	1	1,40	1,20	2,00	2,50	3,00
1 rm Scheitholz, 1 m lang, geschichtet	0,70	1	0,80	1,40	(1,75)	(2,10)
1 rm Stückholz ofenfertig, geschichtet	0,85	1,20	1	1,70		
1 Srm Stückholz ofenfertig, geschüttet	0,50	0,70	0,60	1		
1 Srm (Wald)-Hackgut G 30 „fein“	0,40	(0,55)			1	1,20
1 Srm (Wald)-Hackgut G 50 „mittel“	0,33	(0,50)			0,80	1
1 Tonne Hackgut (G 30) bei w = 25 %		**entspricht rd.**	**4 Srm Weichholz (Fichte) 3 Srm Hartholz (Buche)**			

Tabelle 9: Umrechnung der Maßeinheiten für Brennholz. *Quelle: Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, BML 532*

Feuchte [%]	Fichte	Laubholz	Schlagbaum
100	450 - 550 kWh/Sm3	800 - 900 kWh/Sm3	350 - 500 kWh/Sm3
75	500 - 600 kWh/Sm3	850 - 950 kWh/Sm3	400 - 550 kWh/Sm3
50	550 - 650 kWh/Sm3	900 - 1'000 kWh/Sm3	450 - 600 kWh/Sm3
25	600 - 700 kWh/Sm3	950 - 1'050 kWh/Sm3	500 - 650 kWh/Sm3
Sm3 = Schnitzelkubikmeter (Schüttraummeter);			
100 % Feuchte entspricht dem „waldfrischen" Holzschlag			

Tabelle 10: Heizwert von Brennholz. *Quelle: Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, BML 532*

Aufgabe 11: Die Gesamtmenge des nachhaltig verfügbaren Rohholzaufkommens wird auf jährlich ca. 58 Mio. m3 (Festmeter) geschätzt. Bisher wurden davon nur rund 70 % eingeschlagen. Rund 38 Millionen Tonnen leichtes Heizöl sind 1996 in Deutschland verbraucht worden. Wie viel von diesem Heizöl könnte durch Brennholz ersetzt werden, wenn man das ganze verfügbare Holzaufkommen einschlägt und die Hälfte davon als Brennholz verbraucht? Gehen Sie aus einem Mix von 1/3 Fichte, 1/3 Laubholz und 1/3 Schlagbaum bei je 50 % Feuchte aus. Gehen Sie bei den Umrechnungen aus
Festmeter – Schüttraummeter bei Stückholz,
Heizwert von Heizöl 10 kWh/Liter und
Heizöldichte von 830 kg/m^3 aus.

Aufgabe 12: Stellen sie die Reihefolge auf, welche Heizung den Treibhauseffekt mehr verstärkt bei einem Stromverbrauch mit Heizstrom-Mix gemäß Tabelle 11.

A) Wärmepumpe mit Umgebungsluft als Wärmequelle, Jahresleistungszahl 2,5;
B) Wärmepumpe mit Grundwasser als Wärmequelle, Jahresleistungszahl 5,0;
C) Ölzentralheizung, Jahresnutzung 0,7, Stromverbrauch 3 % der Heizwärme;
D) Ölbrennwertnutzung, Jahresnutzung 0,95, Stromverbrauch 7 % der Heizwärme;
E) Gasheizung (Erdgas H), Jahresnutzung 0,7, Stromverbrauch 2 % der Heizwärme;
F) Gasbrennwertnutzung, Jahresnutzung 0,95, Stromverbrauch 7 % d. Heizwärme;
G) Holzpelletsheizung, Jahresnutzung 0,7, Stromverbrauch 5 % der Heizwärme;
H) Brennholzheizung, Jahresnutzung 0,6, kein Stromverbrauch.

Kumulierter Energieaufwand (KEA) verschiedener Energieträger und Energieversorgungen Ergebnisse berechnet mit GEMIS Version 4.13					
Energieart	Prozeß [1)]	Kumulierter Energieaufwand (KEA) [kWh_{Prim}/kWh_{End}]			Treibhausgase
		Gesamt	nicht regenerativer Anteil	regenerativer Anteil [4)]	CO_2-Äquivalent [g/kWhEnd]
Brennstoffe [2)]	Heizöl EL	1,13	1,13	0,00	311
	Erdgas H	1,14	1,14	0,00	247
	Flüssiggas	1,13	1,13	0,00	272
	Steinkohle	1,08	1,08	0,00	439
	Braunkohle	1,21	1,21	0,00	452
	Holzhackschnitzel	1,07	0,06	1,01	35
	Brennholz	1,01	0,01	1,00	6
	Holz-Pellets	1,16	0,14	1,02	43
Strom	Strom-mix	2,98	2,68	0,30	683
	Heizstrom-mix	2,91	2,91	0,00	930
	Heizstrom-Steinkohle	2,69	2,69	0,00	1034
	PV-Strom (erzeugernah)	0,72	0,71	0,01	265
	Wind (Park Küste+Verteilung)	1,04	0,04	1,00	20
Fernwärme [3)]	Fernwärme 70 % KWK	0,78	0,77	0,01	241
	Fernwärme 35 % KWK	1,13	1,12	0,01	323
	Fernwärme 0 % KWK	1,49	1,48	0,01	406
Nahwärme [3)]	Nahwärme 70 % KWK	0,73	0,72	0,01	-70
	Nahwärme 35 % KWK	1,11	1,10	0,01	127
	Nahwärme 0 % KWK	1,48	1,47	0,01	323

1) Vorgelagerte Kette für die Endenergie bis Übergabe im Gebäude inkl. Materialaufwand für Wärmeerzeuger, ohne Hilfsenergie im Haus 2) Bezugsgröße: unterer Heizwert Hu 3) Stromgutschrift für Kohlestrom 4) Der regenerative Anteil beinhaltet auch sekundäre Ressourcen, z.B. Restholz und Müll; Fernwärmeversorgung durch Steinkohle-Kondensationskraftwerk(=Anteil KWK) + Heizöl-Spitzenkessel; Nahwärmeversorgung durch Erdgas-BHKW (=Anteil KWK) + Erdgas-Spitzenkessel

Tabelle 11: Vergleich des kumulativen Energieaufwands verschiedener Energieträger. *Quelle: IWU Institut Wohnen und Umwelt, Marc Großklos*

Aufgabe 13: Folgende Tabelle zeigt die Kohlendioxid-Emission für Brennholz- und Heizölfeuerung. Berechnen Sie die fehlenden Angaben in der Tabelle unter der Voraussetzung, dass der Wärmebedarf wahlweise mit Holz und/oder mit Heizöl abgedeckt wird. Der Bezugswert für den Wärmebedarf ist die Energie, die bei der Verbrennung von 1000 kg Holz verwertet werden kann. Der Kohlenstoffgehalt des Heizöls ist 86 %. Die CO_2-Emission der Brennstoffaufbereitung beider Brennstoffe beträgt 1 kg CO_2 je kWh Energiebedarf. Die anzuwendenden Atom- und Molekulargewichte sind: C = 12, O_2 = 32.

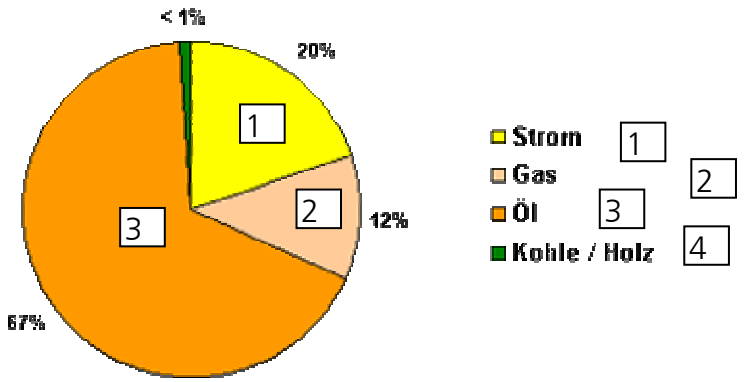
2 – Brennstoffkunde

Material	Holz	Heizöl
vergleichbare Brennstoffmenge	1000 kg	***a*** kg
Heizwert	11,9 MJ / kg	42,7 MJ / kg
Wirkungsgrad: η	70 %	85 %
Energiebedarf der Aufbereitung	0,34 MJ / kg Holz	10,9 MJ / kg Heizöl
CO_2-Emission je kg Brennstoff ohne Aufbereitung	0 kg CO_2 aus Holz (regenerative Energie!!)	***b*** kg CO_2 aus Heizöl
CO_2-Emission der Aufbereitung	***c*** kg CO_2 / kg Holz	***d*** kg CO_2 / kg Heizöl
CO_2-Emission je kg Brennstoff incl. Aufbereitung	***e*** kg CO_2 / kg Holz	***f*** kg CO_2 / kg Heizöl
CO_2-Emission je MJ Nutzenergie incl. Aufbereitung	***g*** kg CO_2 / MJ Nutzenergie	***h*** kg CO_2 / MJ Nutzenergie
CO_2-Emission äquivalent zu 1000 kg Brennholz, incl. Aufbereitung	***j*** kg CO_2	***k*** kg CO_2

Aufgabe 14: Berechnen Sie aus folgender Abbildung den Brennstoffanteil für Heizung und Warmwasserbereitung unter der Annahme, dass der 1-%-Anteil für (Kohle/Holz) sich

a) lediglich auf Kohlenfeuerungen (Steinkohle nach Tabelle 11), und
b) lediglich auf Holzfeuerungen (Brennholz nach Tabelle 11) bezieht.

Kohlendioxid-Emissionen aus Heizung und Warmwasserbereitung



Quelle: Stadt Gütersloh, FB Umweltschutz; Bearbeitet durch ©UMBLICK, September 2000

Aufgabe 15 Die Rohstoffreserven sind eine variable Größe. Weshalb?

Aufgabe 16 Die Primärenergieversorgung der Welt wird heute zu etwa 80% von 3 Energieträgern getragen. Diese sind
1. ..... 2. ..... 3. .....

Aufgabe 17 Erdgas bildet sich oft zusammen mit Erdöl, es kann aber auch durch die Entgasung von .....-lagerstätten entstehen.

Aufgabe 18 Voraussetzungen die erfüllt sein müssen, damit Kohlenlagerstätten entstehen können.
1. .....
2. .....
3. .....

Aufgabe 19 Steinkohlen sind in der Regel jünger, härter, energiereicher, wasserhaltiger als Braunkohlen. (Streichen Sie die falschen Angaben!)

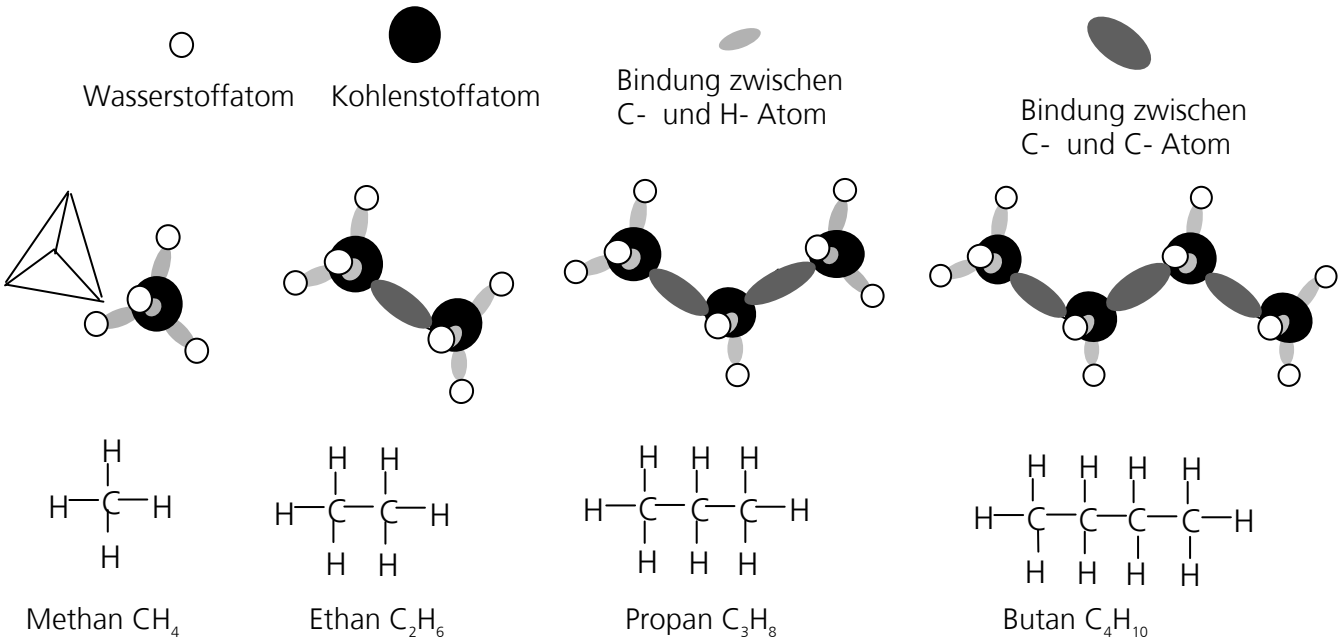
Brennstoffchemie

Aliphatische Verbindungen (aliphos = fett) sind kettenförmige Kohlenwasserstoffe. **Alkane oder Paraffine** (parum affine = geringe Affinität) sind gesättigte Aliphaten. Der Paraffingehalt von Heizöl liegt bei ca. 60 – 80 %. **Olefine** (**Alkene, Alkine**) sind hingegen ungesättigte aliphatische Verbindungen. Der Olefingehalt von Heizöl liegt in der Regel unter 5 %.

Naphtene oder **alizyklische Kohlenwasserstoffe** sind ringförmige Kohlenwasserstoffe. Der Naphtengehalt vom Rohöl liegt in der Regel bei 5 %, beim russischen Öl liegt er häufig darüber, bei amerikanischem darunter. Naphtene haben in der Molekularstructur eine höhere Bindungsspannung als Paraffine und besitzen daher einen höheren Heizwert.

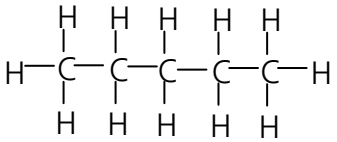
Aromaten oder Zyklische Kohlenwasserstoffe sind Verbindungen, deren Molekülstruktur sich vom Benzol ableitet. Der Aromatengehalt von Heizöl liegt in der Regel unter 30 %. **Polyaromatische Kohlenwasserstoffe** (**PAK**) zählen ebenfalls zu den Aromaten. Der PAK-Gehalt von Rohöl liegt in der Regel unter 10 %. Die angegebenen Gehalte schwanken von Lagerstätte zu Lagerstätte. Der Aromaten- und PAK -Gehalt von Steinkohle, insbesondere der von Sapropelkohle, liegt deutlich höher als der von Rohöl.

Alkane (Methan, Ethan, Propan, Butan, Pentan, Hexan, Oktan, etc.); Summenformel: C_nH_{2n+2} Die gesättigten Aliphaten sind die Hauptkomponente von Erdöl und Erdgas. Sie haben eine hohe Zündtemperatur, niedrige Flammengeschwindigkeit, bei guter Aufbereitung und richtigem Temperaturmanagement ermöglichen sie eine sehr gute Verbrennung. Die C – C – C –Bindung der Alkane weist einen Tetraederwinkel von 109,5 ° auf. Dieser „ideale Tetraederwinkel" hat eine Auswirkung auf die physikalischen und chemischen Stoffdaten wie Verbrennungswärme, Schmelzpunkt, Wärmeausdehnungskoeffizient, etc.

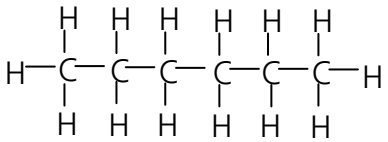


Zoltán Faragó, DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Raumfahrtantriebe
Fachhochschule Esslingen, Fachbereich VU – Versorgungstechnik und Umwelttechnik
Feuerungstechnik und Wärmewirtschaft ; Email: zoltan.farago@dlr.de

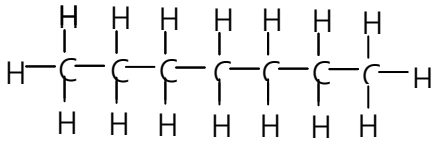
2 – Brennstoffkunde



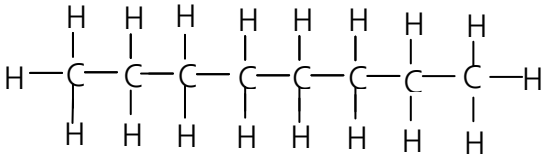
Pentan C_5H_{12}



Hexan C_5H_{12}



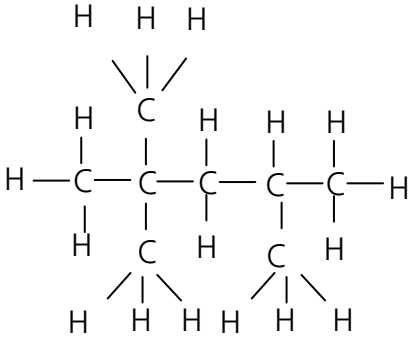
Heptan C_6H_{14}

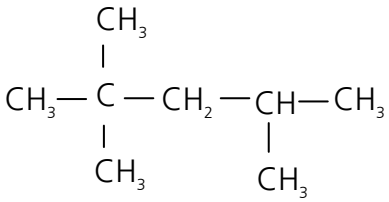


$CH_3—CH_2—CH_2—CH_2—CH_2—CH_2—CH_2—CH_3$

$CH_3—(CH_2)_6—CH_3$

Oktan (Noramal-Oktan) C_8H_{18}





Isooktan (2,2,4 Trimetilpentan) C_8H_{18}

Das Isooktan-Molekül ist viel kompakter als das Oktanmolekül, daher kann es schwerer aufgespaltet und gezündet werden. Dies führt zur Erhöhung der Zündtemperatur:
Noramal-Oktan = 206 °C, Isooktan = 417 °C,
Normal-Heptan = 285 °C, Benzol = 498 °C.

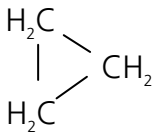
Alkene sind Olefine, die eine ungesättigte Verbindung, eine Doppelbildung aufweisen. In der Regel senkt eine Doppelbildung die Zündtemperatur, hebt die Flammengeschwindigkeit und erhöht die Neigung zur Russbildung. (Ethen, Propen, Buten, Penten, Hexen, Okten, etc.); Summenformel: C_nH_{2n} Alkene sind in geringer Konzentration im Rohöl vorhanden. Alkene entstehen bei Krackprozessen und bei der Pyrolyse; Alkene haben einen niedrigeren Zündpunkt als Paraffine. Bei der Verbrennung neigen sie zu Polymerisation und dadurch zu Russbildung. Alkene (Olefine) haben eine C=C- Doppelbildung, welche bei der Verbrennung die Russbildung fördert. Die C=C- Doppelbildung ist sehr reaktionsfreudig, daher haben Alkene eine niedrigere Zündtemperatur als Alkane. Die Reaktionsfreudigkeit bedeutet jedoch nicht automatisch eine gute Verbrennung: An die Stelle mit Doppelbildung können sich andere Kohlenwasserstoffketten anlagern (Polymerisation). Die so gebildeten Riesenmoleküle können äußerst stabil sein (z.B. Russ) und die Feuerungsanlage als unverbrannte Kohlenwasserstoffe verlassen.

C_2H_4	$CH_2{=}CH_2$	Ethen (Ethylen)
C_3H_6	$CH_2{=}CH—CH_3$	Propen (Propylen)
C_4H_8	$CH_2{=}CH—CH_2—CH_3$	Buten (Butylen)
C_5H_{10}	$CH_2{=}CH—(CH_2)_2—CH_3$	Penten
C_6H_{12}	$CH_2{=}CH—(CH_2)_3—CH_3$	Hexen

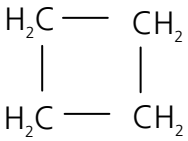
Alkine sind Olefine, die eine so genannte Dreifachbildung aufweisen. In der Regel senkt eine Dreifachbildung die Zündtemperatur, hebt die Flammengeschwindigkeit und erhöht die Neigung zur Russbildung noch stärker als eine Doppelbildung. (Ethin [Acetylen], Propin, Butin, Pentin, Hexin, Oktin, etc.) Summenformel: C_nH_{2n-2} Alkine sind gelegentlich in geringer Konzentration im Rohöl vorhanden. Alkine entstehen bei Krackprozessen und bei der Pyrolyse; Sie haben einen hohen Heizwert, sehr niedriger Zündpunkt und weisen eine sehr starke Neigung zur Russbildung auf. Alkine haben eine C≡C- Dreifachbildung. Die C≡C-Bindung ist noch reaktionsfreudiger als die C=C- Doppelbildung. Daher haben Alkine eine besonders niedrige Zündtemperatur und neigen extrem stark zur Russbildung.

C_2H_2	$CH{\equiv}CH$	Ethin (Azetylen)	**Russbaustein !**
C_3H_4	$CH{\equiv}C\text{-}CH_3$	Propin (Ethylazetylen)	
C_4H_6	$CH{\equiv}C\text{-}CH_2\text{-}CH_3$	Butin (Propylazetylen)	
C_5H_8	$CH{\equiv}C\text{-}(CH_2)_2\text{-}CH_3$	Pentin (Butylazetylen)	
C_6H_{10}	$CH{\equiv}C\text{-}(CH_2)_3\text{-}CH_3$	Hexin (Pentylazetylen)	

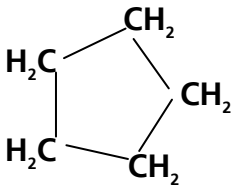
Alizyklische Verbindungen (zyklisierte aliphatische Verbindungen, **Naphtene**); Summenformel: C_nH_{2n}. Cycloparaffine oder Cycloalkane sind in ihren Verbrennungseigenschaften den aliphatischen Paraffinen sehr ähnlich. Im Erdöl kommen Fünf- und Sechsringe sehr häufig vor, insbesondere im irakischen, iranischen und kaukasischen Erdöl. Alizyklische Verbindungen besitzen die gleiche Summenformel wie Alkene (C_nH_{2n}). Ihre chemischen Eigenschaften und damit ihre Verbrennungseigenschaften gleichen jedoch denen der Alkane mit der Summenformel (C_nH_{2n+2}). Bei der Bildung der alizyklischen Moleküle treten Spannungen auf. Diese Spannung ist am geringsten bei den Molekülen mit 5 – 8 Kohlenatomen. In der Natur kommen nur die 5 – 8-kettigen Moleküle vor. Die Bindungsspannung erhöht den Brennwert. Die Brennwerterhöhung kann je nach der Bindungsspannung 10 % erreichen.



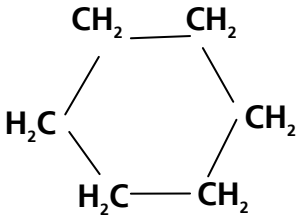
Cyklopropan kommt in der Natur kaum vor.



Cyklobutan kommt in der Natur kaum vor.



Cyklopentan häufiger Bestandteil von Rohöl.

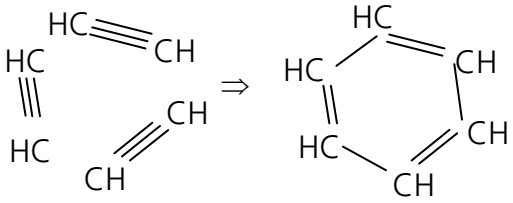


Cyklohexan häufiger Bestandteil von Rohöl.

Die alizyklischen C-C-Bindungen haben einen kleineren Bindungswinkel als die Alkane. Die Verkleinerung der Bindungswinkel erzeugt eine Spannung, die Spannungsenergie erhöht die Verbrennungswärme und verändert einige physikalische Eigenschaften. So ist z.B. die massebezogene Verbrennungswärme von Cyklopropan um ca. 10 % höher als die von Propen, bzw. um ca. 6 % höher als die von Cyklohexan.

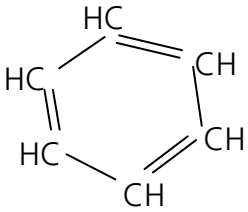
Aromatische Verbindungen Summenformel: C_nH_m mit $m \leq n$. Beispiele: Benzol und Benzolderivate**,** Aromatische Verbindungen sind Bestandteile von Rohöl und Sparopel-Kohle. (Sapropelkohlen entstanden durch Verkohlung von Faulschlamm, sie bilden meist Einlagerungen von Humuskohlen). Die Aromaten neigen bei der Verbrennung besonders stark zur Russbildung.

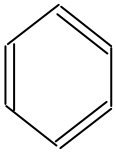
Die Umwandlung von Ethin in Benzol:
3 Ethin = 1 Benzol
3 (C_2H_2) $\Rightarrow$ C_6H_6

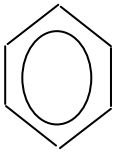


Die häufigsten Schreibweisen für Benzol sind:

Benzol C_6H_6



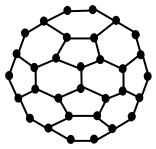




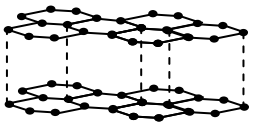
Aus Benzol entstehen durch Polymerisation polyzyklische Verbindungen, die bei der Verbrennung noch stärker zur Russbildung neigen als einfache Aromaten. Benzolmoleküle sind **Russbausteine:**

Russ

Fulleren (Fußballmolekül) sind reine Kohlenstoffmoleküle, die die Form einer Kugel, Röhre oder eines Ringes aufweisen. Ähnliche Strukturen können Russmoleküle annehmen. Sie beinhalten einige hundert bis tausend Kohlenstoffatome und wenige Wasserstoffatome.



Graphitkristall. Ähnliche Struktur weisen Russmoleküle auf.



Russmoleküle sind Riesenmoleküle mit der Summenformel C_nH_m mit $m << n$.
Sie entstehen durch Polymerisation von Alkenen, Alkinen und Aromaten.
Entstehung von Ethylradikalen bei Kracken, Pyrolyse und Luftmangelverbrennung:
$- [CH_2 - CH_2]_n -$ $\Rightarrow$ $n\,(CH_2 = CH_2)$ $\Rightarrow$ $n\,H_2 + n\,(CH \equiv CH)$

Russbildung und Russabbau: Zyklische Verbindungen sind Bausteine für Polyzyklische Verbindungen. Russmoleküle sind in der Regel polyzyklische Moleküle. Bei Pyrolyse und bei Luftmangelverbrennung von zyklischen Verbindungen verläuft die Russbildung oft schneller als die Oxidation selber. Hat sich einmal bei der Verbrennung Russ gebildet, wird für den Russabbau in der Flamme bei hoher Flammentemperatur und Verweilzeit ein hoher Luftüberschuss benötigt. Bei Ethinverbrennung (Schweißflamme) ist die Russbildung gewollt, um den Karbongehalt der Schweißnaht zu steigern. Zur Vermeidung der Russbildung müssen in der Flamme auch lokale Luftmangelbereiche vermieden werden. Daher fördert die Stufenverbrennung (z.B. zur Vermeidung der NO-Bildung) aromathaltiger Brennstoffe die Russbildung.

Heterozyklische Verbindungen
Eine oder einige C-Atome sind in den Kohlenstoffringen durch andere Atome wie Stickstoff (**N**), Sauerstoff (**O**), Phosphor (**P**) oder Schwefel (**S**) ersetzt. Diese werden „organisch gebundener" Stickstoff, Sauerstoff etc. genannt. Brennstoffstickstoff erhöht die Neigung der Stickoxidbildung bei der Verbrennung. Chemisch gebundener Sauerstoff erhöht die Neigung zur Formaldehydbildung, insbesondere bei der Verbrennung mit hohem Luftüberschuss. Brennstoffschwefel führt bei der Verbrennung zu Schwefeldioxidbildung. Stickoxide und Schwefeloxide tragen zu Versauerung von Niederschlägen und Böden bei. Die organischen Naturstoffe sind heterolzyklische Verbindungen.

Organische Naturstoffe sind heterozyklische Verbindungen
Die organischen Naturstoffe sind Kohlenhydrate (Zucker, Stärke, Cellulose), Lignin (Holz ist eine Mischung aus Zellulose, Lignin u.A.), Alkohole, Öle, Fette, organische Säuren, Eiweiß, etc. Sie bestehen aus Aliphaten, Aromaten, azyklischen und heterozyklischen Verbindungen. Die biologische Masse ist die Summe der organischen Naturstoffe, während die fossilen Brennstoffe die Umwandlungsprodukte früherer biologischer Massen darstellen. **Alkohole** sind gesättigte oder ungesättigte organische Verbindungen mit vergleichsweise niedriger Viskosität, die wenigstens eine OH-Gruppe aufweisen. Bei der Verbrennung mit hohem Luftüberschuss neigen sie zu Formaldehydbildung. **Fette** sind organische Verbindungen, die wenigstens eine COOH-Gruppe aufweisen, und derer Schmelzpunkt unterhalb der Raumtemperatur liegt. Bei der Verbrennung neigen sie zur Russbildung. **Organische Öle** unterscheiden sich von den Fetten lediglich in ihrem niedrigeren Schmelzpunkt, daher sind sie als Flüssigbrennstoff besser geeignet als Fette. Wegen hohem Anteil an ungesättigten Bestandteilen neigen Pflanzenöle bei der Verbrennung zur Russbildung. Pflanzenöle haben eine höhere Viskosität als Heizöl EL. Dies führt zu Schwierigkeiten bei der Zerstäubung, was die höhere Neigung zur Russbildung zusätzlich verstärkt. **Kohlenhydrate** (Zucker, Stärke, Cellulose, Lignin, etc.) Bei kleineren Molekülen (z.B. Zucker) neigen sie zur Formaldehydbildung, bei größeren Molekülen (z.B. Cellulose und Lignin) zur Russbildung. Zucker und Stärke werden meist in Alkohole umgewandelt für die Verbrennung.

Metallanteil von Brennstoffen und **Öladditive**
Bei festen Brennstoffen können die mineralischen Bestandteile, darunter auch Metalloxide, die Zehnprozentgrenze übertreffen. Bei der Verbrennung bilden sie Asche. Der Aschengehalt der flüssigen Brennstoffe ist im Bereich 0,1 – 0,5 %. Die metallischen Bestandteile beeinflussen die Verbrennung wie folgt: Einige Metalle (z.B. Vanadium) dienen als Katalysator und beschleunigen die Oxidation. Dadurch können sie die Russbildung reduzieren und die Stickoxidbildung fördern. Sie bewirken ferner, dass ein erhöhter Anteil des Brennstoffschwefels zu Schwefeltrioxid (anstatt zu –Dioxid) verbrennt. Die gleiche Wirkung zeigen Additive, die zwar die Russbildung reduzieren, dafür aber als Nebenwirkung die Anlagenkorrosion beschleunigen.

Tabelle 1 zeigt die Zusammensetzung der wichtigsten festen Brennstoffe. Aus Tabelle 12 ist die Zusammensetzung der im Verbundnetz am häufigsten zum Einsatz kommenden Gase zu entnehmen. Die Tabellen 13 und 14 zeigen die Zusammensetzung und Kennzahlen der wichtigsten flüssigen und gasförmigen Brennstoffe.

		Verbund-Erdgas Nord ~ Erdgas H	Russisches Erdgas ~ Erdgas H	Erdgas L
Methan CH_4	Vol.-%	90,02	97,25	81,8
Ethan C_2H_6	Vol.-%	4,80	1,25	2,8
Propan C_3H_8	Vol.-%	0,74	0,48	0,4
Butan C_4H_{10}	Vol.-%	0,21	0,09	0,2
Kohlendioxid CO_2	Vol.-%	1,03	0,06	0,8
Stickstoff N_2	Vol.-%	3,13	0,85	14
Brennwert $H_{s,n}$	kWh/m³	11,21	11,18	10,3
Heizwert $H_{i,n}$	kWh/m³	10,12	10,08	9,3
Dichteverhältnis	-	0,61	0,57	0,638
oberer Wobbeindex	kWh/m³	14,32	14,78	12,9

Tabelle 12 Zusammensetzung der am häufigsten zum Einsatz kommenden Brenngase

Zusammensetzung	Heizöl	Erdgas L	Erdgas H
	Gew.-%	Vol.-%	Vol.-%
Kohlenstoff (C)	86		
Wasserstoff (H)	13		
Stickstoff (N)	0,5	14	1
Schwefel (S)	0,3		
Methan (CH4)		82	93
Kohlenwasserstoffe (C_xH_y)		3	5

Tabelle 13 Elementaranalyse der wichtigsten flüssigen und gasförmigen Brennstoffe

	Heizöl	Erdgas L	Erdgas H
Brennwert kWh/kg (Heizöl) kWh/m³ (Erdgas)	12,6	 9,8	 11,5
Heizwert kWh/kg (Heizöl) kWh/m³ (Erdgas)	11,9	 8,8	 10,4
Kondenswassermenge maximal kWh/kg (Heizöl) kWh/m³ (Erdgas)	 1,1	 1,4	 1,7
Brennwert/Heizwert	1,063	1,107	1,107
Wasserdampftaupunkt °C $\lambda = 1{,}3$	46	56	56
Wasserdampftaupunkt °C $\lambda = 1{,}0$	51	61	61
Luftbedarf $\lambda = 1{,}0$ m³ /kg (Heizöl) m³ / m³ (Erdgas)	11,2	8,6	9,6

Tabelle 14 Kennzahlen der wichtigsten flüssigen und gasförmigen Brennstoffe

Aufgabe 20: Warum hat das aus russischem Rohöl gewonnene Heizöl einen überdurchschnittlich hohen Heizwert?

Aufgabe 21: Warum erhöht sich beim Ottomotor die Klopffestigkeit mit der Erhöhung der Oktanzahl?

Aufgabe 22: Warum erhöht sich die Neigung zur Russbildung mit Zunahme des Olefingehalts des Heizöls?

Aufgabe 23: Warum muss bei der Alkoholverbrennung hoher Luftüberschuss gemieden werden?

Aufgabe 24: Was ist der Nachteil von russunterdrückenden Additiven?

Aufgabe 25: Warum bevorzugt man Ethin (Azetylen) beim Schweißen?

Aufgabe 26: Warum ist die Neigung zur Russbildung einer Brennstoffkomponente verbunden mit einem Anstieg der NO-Konzentration im Abgas?

Zoltán Faragó, DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Raumfahrtantriebe
Fachhochschule Esslingen, Fachbereich VU – Versorgungstechnik und Umwelttechnik
Feuerungstechnik und Wärmewirtschaft ; Email: zoltan.farago@dlr.de

2 – Brennstoffkunde

Lösung der Aufgaben

Aufgabe 1: Berechnen Sie anhand Gl. (1) den Kohlenstoffgehalt der gesamten Biomasse der Erde unter der Annahme, dass sowohl die organische Kohlenstoffmasse als auch die Sauerstoffmasse in der Atmosphäre durch die Photosynthese entstanden ist. Die Sauerstoffmasse der Atmosphäre beträgt ca. $1{,}2 \cdot 10^9$ Millionen Tonne. Vergleichen sie die errechnete Kohlenstoffmasse mit der Masse der Biosphäre in Abbildung 4 der Vorlesung „Feuerungen und Umwelt".

$$6\,CO_2 + 6\,H_2O + \text{Lichtenergie} \Rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2$$

$$C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \Rightarrow 6\,C + 6\,O_2$$

$$6 \cdot 12\text{ kg} + 6 \cdot 32\text{ kg}$$

$$12 / 32 = X / (1{,}2 \cdot 10^9\text{ Mio.t}) \Rightarrow X = 4{,}5 \cdot 10^8\text{ Mio. t} = 4{,}5 \cdot 10^{14}\text{ t C}$$

Manuskript Feuerungen u. Umwelt, Abbildung 4: Biomasse 2000 Gt C = $2 \cdot 10^{12}$ t C; d.h. die gesamte Biomasse der Erde ist ca. Kohlenstoffmasse der Biosphäre.

Aufgabe 2: Zeigen Sie anhand der Reaktionen nach den Gleichungen (1) und (2), dass die Verbrennung fossiler Brennstoffe die Umwandlung von der Sonnenenergie in Wärme bedeutet.

$$6\,CO_2 + 6\,H_2O + \text{Lichtenergie} = C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2$$
$$+\quad C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 = 6\,CO_2 + 6\,H_2O + \text{Verbrennungswärme}$$

$$6CO_2 + 6H_2O + C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + \text{Lichtenergie} = C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6CO_2 + 6H_2O + \text{Verbrennungswärme}$$
$$\text{Lichtenergie} = \text{Verbrennungswärme}$$

Aufgabe 3: Welcher Anteil der gesamten Biomasse der Erde ist in Form von bekannten Welt-Steinkohlenreserven vorhanden? Entnehmen Sie die zu dieser Aufgabe benötigten Daten aus der Lösung der Aufgabe 1 und aus den Tabellen 2 und 3.

Kohlenstoffmasse: $4{,}5 * 10^{14}$ t C
Steinkohle: $4{,}5 * 10^{14}$ (tC) / 0,85 (tC/t Steinkohle) = $5{,}3 * 10^{14}$ t Steinkohle
Tab. 2,1955: $3{,}59 * 10^{12} / (5{,}3 * 10^{14}) = 0{,}0068 = 0{,}68$ %
Tab. 3,1986: $3{,}59 * 10^{12} * (1{,}815/1{,}041) / (5{,}3 * 10^{14}) = 0{,}0118 = 1{,}18$ %

Aufgabe 4: Warum neigt die Kohlenverbrennung zu Russbildung?
Bei der Steinkohle liegen nur 10% des Kohlenstoffs frei vor; der Rest ist in einem Verbindungsgemisch enthalten, das vor allem aus aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen besteht. Bei der Verbrennung aromatischer Kohlenwasserstoffe entsteht Russ.

Aufgabe 5: Warum neigt die Holzverbrennung zu Formaldehydbildung?

Organisch gebundener Brennstoffsauerstoff neigt zu Formaldehydbildung bei der Verbrennung. Brennholz enthält sehr viel chemisch gebundenen Sauerstoff (Tab. 1)

Aufgabe 6: 1 Liter Öl kann 1 Million Liter Wasser verseuchen. Wie ist es erklärbar, wenn das Öl in Wasser unlöslich ist?

Öl und Wasser bildet ein Zweiphasengemisch (Suspension) mit einer sehr großen Phasen-Grenzfläche. Die zwei Stoffe des Zweiphasensystems sind sehr schwer voneinander zu trennen.

Aufgabe 7: Was ist die Folge, dass die Ölschicht an der Wasseroberfläche luftundurchlässig ist?

Wenn die Wasseroberfläche mit einem Ölteppich bedeckt wird, kann kein Sauerstoff ins Wasser diffundieren; Lebwesen ersticken unter dem Ölteppich.

Aufgabe 8: Was ist der wesentliche Unterschied zwischen Dieselöl und Heizöl?

Dieselöl und Heizöl sind sich chemisch und physikalisch sehr ähnlich, sie haben die gleiche Dichte, den gleichen Siedebereich u.A. Schwefelgehalt im Dieselöl ist oft niedriger als im Heizöl. Viskosität und Stockpunkt des Dieselöls sind niedriger.

Aufgabe 9: Warum sind die Welt-Rohölreserven während des Zweiten Weltkrieges gesunken und während des Arabisch-Israelischen-Krieges 1973 gestiegen?

1) Während des Zweiten Weltkrieges wurden viel Öl und Ölprodukte verbraucht aber nur wenig Lagerstätten entdeckt worden. 2) Während des Arabisch-Israelischen-Krieges 1973 stiegen drastisch die Ölpreise, d.h. viele Ressourcen wurden zu Reserven erklärt.

Aufgabe 10: Zeigen Sie anhand der Abbildungen dieses Kapitels, dass für die Kommende Generation eine Verknappung fossiler Brennstoffreserven zu befürchten ist.
Abbildung 3: Unterversorgung an flüssigen Kohlenwasserstoffen im Jahr 2020
Abbildung 4: Die durchschnittliche Größe der Gasneufunde nimmt ab
Abbildung 5: Die Abhängigkeit vom Mittleren Osten wird größer

Aufgabe 11: Die Gesamtmenge des nachhaltig verfügbaren Rohholzaufkommens wird auf jährlich ca. 58 Mio. m3 (Festmeter) geschätzt. Bisher wurden davon nur rund 70 % eingeschlagen. Rund 38 Millionen Tonnen leichtes Heizöl sind 1996 in Deutschland verbraucht worden. Wie viel Prozent von diesem Heizöl könnte durch Brennholz ersetzt werden, wenn man das ganze verfügbare Holzaufkommen einschlägt und die hälfte davon als Brennholz verbraucht? Gehen Sie aus einem Mix von 1/3 Fichte, 1/3 Laubholz und 1/3 Schlagbaum bei je 50 % Feuchte aus. Gehen Sie bei den Umrechnungen aus Festmeter – Schüttraummeter bei Stückholz; Heizwert von Heizöl 1Liter = 10 kWh und Heizöldichte von 830 kg/m^3 aus.

0.5*58 Mio. fm=2,9*10^7 fm = 5,8*10^7 Sm (Tab. 9)
((550+650)/2+(900+1000)/2+(450+600)/2)/3 = 692 kWh/Sm (Tab. 10)
5,8*10^7 Sm * 692 kWh/Sm = 4,012*10^{10} kWh = 4,012*10^9 l Heizöl =
4,012*10^9 l Heizöl = 3,33*10^9 kg Heizöl = 3,33 Millionen Tonne Heizöl
3,33 / 38 = 0,0876 = 8,76 %

Aufgabe 12: Stellen sie die Reihefolge auf, welche Heizung den Treibhauseffekt mehr verstärkt bei einem Stromverbrauch mit Heizstrom-Mix gemäß Tabelle 11.

A) Wärmepumpe mit Umgebungsluft als Wärmequelle, Jahresleistungszahl 2,5;
B) Wärmepumpe mit Grundwasser als Wärmequelle, Jahresleistungszahl 5,0;
C) Ölzentralheizung, Jahresnutzung 0,7, Stromverbrauch 3 % der Heizwärme;
D) Ölbrennwertnutzung, Jahresnutzung 0,95, Stromverbrauch 7 % der Heizwärme;
E) Gasheizung (Erdgas H), Jahresnutzung 0,7, Stromverbrauch 2 % der Heizwärme;
F) Gasbrennwertnutzung, Jahresnutzung 0,95, Stromverbrauch 7 % d. Heizwärme;
G) Holzpelletsheizung, Jahresnutzung 0,7, Stromverbrauch 5 % der Heizwärme;
H) Brennholzheizung, Jahresnutzung 0,6, kein Stromverbrauch.

Aus Tabelle 11 930 g CO_2 /kWh

A	930 / 2,5	=	372	g CO_2 /kWh Wärmeenergie
B	930 / 5	=	186	
C	(311 / 0,7) + 0,03*930	=	472	
D	(311 / 0,95) + 0,07*930	=	392	
E	(247 / 0,7) + 0,02*930	=	371	
F	(247 / 0,95) + 0,07*930	=	325	
G	(43 / 0,7) + 0,05*930	=	108	
E	6 / 0,6	=	10	

- Die höchste CO_2-Belastung wird von der Ölheizung verursacht.
- Ölbrennwertnutzung ist etwa gleichwertig mit einer normalen Gasheizung und einer schlechten Wärmepumpe (ca. 25 % günstiger als Ölheizung).
- Die Gasbrennwertnutzung ist ca. 10 % günstiger als Ölbrennwertnutzung.
- Eine gute Wärmepumpe liegt ca. 50 % günstiger als die Gasbrennwertnutzung.
- Bei Holzpelletsheizung liegt die CO_2-Belastung 50 % günstiger als bei einer guten Wärmepumpe.
- Die einfache Holzheizung ist bezogen auf die CO_2-Belastung ca. 90 % günstiger als die Holzpelletsheizung.

Aufgabe 13: Folgende Tabelle zeigt die Kohlendioxid-Emission für Brennholz- und Heizölfeuerung. Berechnen Sie die fehlenden Angaben in der Tabelle unter der Voraussetzung, dass der Wärmebedarf wahlweise mit Holz und/oder mit Heizöl abgedeckt wird. Der Bezugswert für den Wärmebedarf ist die Energie, die bei der Verbrennung von 1000 kg Holz verwertet werden kann. Der Kohlenstoffgehalt des Heizöls ist 86 %. Die CO_2-Emission der Brennstoffaufbereitung beider Brennstoffe beträgt 1 kg CO_2 je kWh Energiebedarf. Die anzuwendenden Atom- und Molekulargewichte sind: C = 12, O_2 = 32.

	Material	Holz	Heizöl
1	vergleichbare Brennstoffmenge	1000 kg	***a*** kg
2	Heizwert	11,9 MJ / kg	42,7 MJ / kg
3	Wirkungsgrad: η	70 %	85 %
4	Energiebedarf der Aufbereitung	0,34 MJ / kg Holz	10,9 MJ / kg Heizöl
5	CO_2-Emission je kg Brennstoff ohne Aufbereitung	0 kg CO_2 aus Holz (regenerative Energie!!)	***b*** kg CO_2 aus Heizöl
6	CO_2-Emission der Aufbereitung	***c*** kg CO_2 / kg Holz	***d*** kg CO_2 / kg Heizöl
7	CO_2-Emission je kg Brennstoff incl. Aufbereitung	***e*** kg CO_2 / kg Holz	***f*** kg CO_2 / kg Heizöl
8	CO_2-Emission je MJ Nutzenergie incl. Aufbereitung	***g*** kg CO_2 / MJ Nutzenergie	***h*** kg CO_2 / MJ Nutzenergie
9	CO_2-Emission äquivalent zu 1000 kg Brennholz, incl. Aufbereitung	***j*** kg CO_2	***k*** kg CO_2

CO_2-Emission der Brennstoffaufbereitung

1 kg CO_2 / kWh → 1 kg CO_2 / 3600 kJ → 0,278 kg CO_2 / MJ

0,86 kg C / kg Heizöl → 0,86·(12+32) /12 = 3,15 kg CO_2 / kg Heizöl

a Holzheizung
(1000 kg Holz) (11,9 MJ/kg Holz) = 11900 MJ wird frei.
Wirkungsgrad 70 % → in der Wohnung bleibt 0,7 · 11900 MJ = 8330 MJ
Ölheizung
In der Wohnung bleibt 8330 MJ
Wirkungsgrad 85 % → durch Ölverbrennung freiwerdende Energie
8330 MJ / 0,85 = 9800 MJ
(9800 MJ) / (42,7 MJ / kg Heizöl) = 229,5 kg Heizöl

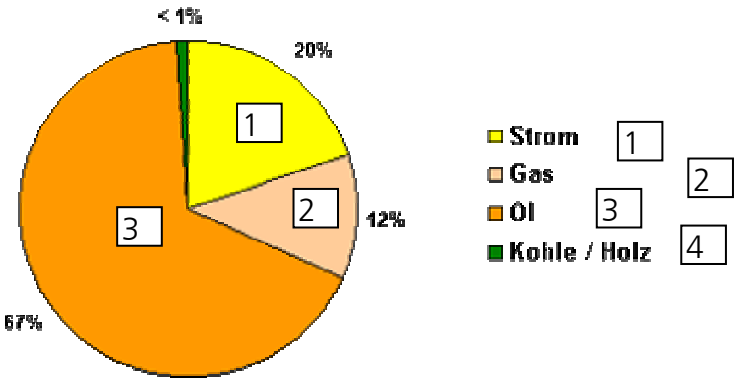
b 0,86·(12+32) /12 kg CO_2 / kg Heizöl b = 3,15
kWh – MJ – Umrechung

c 0,278·0,34 = 0,0944 kg CO_2 / kg Holz c = 0,0944
0,278 (kg CO_2 / MJ)·0,34 (MJ/kg Holz)
Zeile 4

d	0,278·10,9 = 3,03 Zeile 4	kg CO_2 / kg Heizöl	d = 3,03
e	0,0944 e = c	kg CO_2 / kg Holz	e = 0,0944
f	3,03 + 3,15 = 6,18	kg CO_2 / kg Heizöl	f = 6,18
g	0,0944 / (0,7*11,9) = 0,01133 e/(Heizwert*Wirkungsgrad)	kg CO_2 / MJ Nutzenergie	g = 0,01133
h	6,18 / (0,85*42,7) = 0,1703 f / (Heizwert*Wirkungsgrac)	kg CO_2 / MJ Nutzenergie	h = 0,1703
j	0,0944·1000 = 94,4 e * Brennstoffmenge	kg CO_2	j = 94,4
k	6,18 ·229,5 = 1418,6 f* Brennstoffmenge	kg CO_2	k = 1418,6

Aufgabe 14: Berechnen Sie aus folgender Abbildung den Brennstoffanteil für Heizung und Warmwasserbereitung unter der Annahme, dass der 1-%-Anteil für (Kohle/Holz) sich a) lediglich auf Kohlenfeuerungen (Steinkohle nach Tabelle 11), und b) lediglich auf Holzfeuerungen (Brennholz nach Tabelle 11) bezieht.

Kohlendioxid-Emissionen aus Heizung und Warmwasserbereitung



Quelle: Stadt Gütersloh, FB Umweltschutz; Bearbeitet durch ©UMBLICK, September 2000

	Strom	Gas	Heizöl	Kohle
Anteil an CO_2-Belastung [%]	20	12	67	1
g CO_2 / kWh (Tab. 11)	930	247	311	439
Anteil [kWh / g CO_2]	0,2 / 930 = 2,15E-4	0,12/247= 4,86E-4	0,67/311= 2,03E-3	0,01/439= 2,28E-5
Gesamt [kWh / g CO_2]	2,75E-3			
Anteil an kWh [%]	7,82	17,7	73,1	0,83
	Strom	Gas	Heizöl	Brennholz
g CO_2 / kWh (Tab. 11)	930	247	311	25 (Mittelwert)
Anteil an CO_2-Belastung [%]	20	12	67	1
Anteil [kWh / g CO_2]	0,2 / 930 = 2,15E-4	0,12/247= 4,86E-4	0,67/311= 2,03E-3	0,01/25 4E-4
Gesamt [kWh / g CO_2]	3,13E-3			
Anteil an kWh [%]	6,87	15,5	64,7	12,8

Aufgabe 15 Die Rohstoffreserven sind eine variable Größe. Weshalb?

Die Einstufung Ressource – Reserve hängt von vielen Faktoren ab, die sich täglich ändern Können (z.B. Energiepreis).

Aufgabe 16 Die Primärenergieversorgung der Welt wird heute zu etwa 80% von 3 Energieträgern getragen. Diese sind

1. .....Kohle..... 2. .....Öl..... 3. .....Gas.....

Aufgabe 17 Erdgas bildet sich oft zusammen mit Erdöl, es kann aber auch durch die Entgasung von .....Kohlelagerstätten ….. entstehen.

Aufgabe 18 Voraussetzungen die erfüllt sein müssen, damit Kohlenlagerstätten entstehen können.
1. .....Sauerstoffabschluss.....
2. .....Hoher Druck.....
3. .....Hohe Temperatur.....

Aufgabe 19 Steinkohlen sind in der Regel jünger (nein!), **härter (ja!), energiereicher (ja!),** wasserhaltiger (nein!) als Braunkohlen. (Streichen Sie die falschen Angaben!)

Aufgabe 20: Warum haben hat das aus russischem Rohöl gewonnene Heizöl einen überdurchschnittlich hohen Heizwert?
Das russische Rohöl besitzt einen überdurchschnittlich hohen Gehalt an Naphtenen, die wegen der höheren Bindungsspannung in der Molekularstruktur einen höheren Heizwert aufweisen als die paraffinhaltigen Öle.

Aufgabe 21: Warum erhöht sich beim Ottomotor die Klopffestigkeit mit der Erhöhung der Oktanzahl?
Die Oktanzahl bedeutet einen hohen Gehalt an Isooktan bzw. damit vergleichbaren Kraftstoffkomponente. Isooktan wiederum hat wegen der kompakten Molekularstruktur eine überdurchschnittlich hohe Zündtemperatur und somit eine verminderte Neigung zur Selbstzündung.

Aufgabe 22: Warum erhöht sich die Neigung zur Russbildung mit Zunahme des Olefingehalts des Heizöls?
Olefine weisen Doppel- und Dreifachbindungen auf. Diese Bindungen neigen bei der Pyrolyse zur Polymerisation und sind damit „Russbausteine“.

Aufgabe 23: Warum muss bei der Alkoholverbrennung hoher Luftüberschuss gemieden werden?
Alkohole zeigen wegen des chemisch gebundenen Sauerstoffatoms erhöhte Neigung zur Formaldehydbildung. Die Formaldehydbildung verstärkt sich bei der Verbrennung mit hohem Luftüberschuss.

Aufgabe 24: Was ist der Nachteil von russunterdrückenden Additiven?
Russunterdrückende Additive haben eine oxidierende katalytische Wirkung. Damit erhöht sich der Schwefeltrioxidanteil im Abgas, d.h. das Abgas wirkt sehr korrosiv.

Aufgabe 25: Warum bevorzugt man Ethin (Azetylen) beim Schweißen?
Die Azetylenflamme ist sehr russhaltig. Die erhöhte Russkonzentration der Flamme lässt bei der Schmelze Kohlenstoff in den Stahl diffundieren. Der erhöhte Kohlenstoffgehalt reduziert die Sprödigkeit der Schweißnaht.

Aufgabe 26: Warum ist die Neigung zur Russbildung einer Brennstoffkomponente verbunden mit einem Anstieg der NO-Konzentration im Abgas?
Brennstoffe mit erhöhter Neigung zur Russbildung können nicht im Luftmangelbereich verbrannt werden. Die gestufte Verbrennung, eine Maßnahme zu Reduzierung von NO-Bildung, ist wegen der erhöhten Neigung zur Russbildung nicht optimal anwendbar.