
OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITÄT MAGDEBURG

Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik
Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik
Prof. Dr.-Ing. E. Specht



Verbrennungstechnik

Wintersemester 2007/2008

Inhaltsverzeichnis

Schrifttumverzeichnis

Formelverzeichnis

Verzeichnis der Tabellen mit Stoff- und Prozessdaten

1.	Bedeutung der Verbrennungstechnik.....
1.1	Charakterisierung.....
1.2	Einfluss der Feuerungstechnik auf die Entwicklung der Menschheit
2.	Zusammensetzung des Verbrennungsgases.....
2.1	Brennstoffe
2.2	Sauerstoff- und Luftbedarf
2.3	Verbrennungsgaszusammensetzung
2.3.1	Molbilanzen
2.3.2	Gleichgewichte
2.3.3	Nahstöchiometrische Zusammensetzung
2.3.4	Überstöchiometrische Zusammensetzung
2.3.5	Unterstöchiometrische Zusammensetzung
2.3.6	Bestimmung der Luftzahl
2.3.7	Wassertaupunkt
3.	Energieumwandlung.....
3.1	Heizwerte und Brennwerte
3.2	Verbrennungsgastemperaturen
3.2.1	Bezeichnungen
3.2.2	Adiabate Verbrennungstemperatur
3.2.3	Nichtadiabate Verbrennungsgas- und Abgastemperatur
3.3	Brennstoffbedarf
3.3.1	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad
3.3.2	Wärmerückgewinnung aus dem Abgas
3.3.3	Wärmerückgewinnung durch Brennstoffvorwärmung
3.3.4	O ₂ -Anreicherung der Luft
3.4	Haushaltsfeuerungen
3.4.1	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad
3.4.2	Brennwertnutzung
3.5	Verbrennung von Metallen
4.	Verbrennungsmechanismus von Brenngasen.....
4.1	Reaktionsablauf
4.1.1	Reaktionsmechanismus
4.1.2	Zündung
4.2	Vormischflammen
4.2.1	Flammenlänge
4.2.2	Flammengeschwindigkeit
4.2.3	Flammenstabilität
4.2.4	Löschabstand
4.2.5	Mindestzündenergie
4.2.6	Verdrallung
4.3	Diffusionsflammen
4.3.1	Vermischungsmechanismus (Freistrah)
4.3.2	Stöchiometrische Konzentration und Molenbruch
4.3.3	Laminare Flammenprofil
4.3.4	Turbulentes Flammenprofil
4.3.5	Flammenlänge
4.3.6	Stabilität
4.3.7	Diffusionsflamme mit teilweiser Vormischung
4.4	Technische Flammen
4.4.1	Maßnahmen zur Stabilität
4.4.2	Verdrallung
4.4.3	Austauschbarkeit von Brenngasen

- 5. Verbrennung flüssiger Brennstoffe**
- 5.1 Verbrennung
 - 5.1.1 Mechanismus
 - 5.1.2 Verbrennungszeit des Einzeltropfens
 - 5.1.3 Flammenabstand
- 5.2 Zerstäubung von Brennstoffen
 - 5.2.1 Mechanismus
 - 5.2.2 Einstoff Druckdüsen
 - 5.2.3 Pneumatische Zerstäuberdüsen
 - 5.2.4 Wirkung der Einflussgrößen
- 5.3 Verbrennung der Flammen

- 6. Verbrennung von Kohlen**
- 6.1 Mahlung
- 6.2 Entgasung und Zündung
- 6.3 Teilvorgänge der Koksverbrennung
 - 6.3.1 Mechanismus der Verbrennung
 - 6.3.2 Reaktionskoeffizienten
 - 6.3.3 Diffusionskoeffizienten
 - 6.3.4 Spezifische Oberflächen
 - 6.3.5 Stoffübergang
- 6.4 Abbrandzeit
 - 6.4.1 Große Einzelpartikel
 - 6.4.2 Kleine Einzelpartikel
 - 6.4.3 Einzelpartikel
 - 6.4.4 Partikeltemperatur
- 6.5 Ascheverhalten

- 7. Emissionen**
- 7.1 Kohlendioxid
- 7.2 Stickoxide
 - 7.2.1 Thermisches NO
 - 7.2.2 Promtes NO
 - 7.2.3 Brennstoff-NO
 - 7.2.4 Primärmaßnahmen zur Minderung von Stickoxiden
 - 7.2.5 Sekundärmaßnahmen zur NO-Minderung
- 7.3 Schwefeldioxid
 - 7.3.1 Mechanismus
 - 7.3.2 Primärmaßnahmen zur Entschwefelung
 - 7.3.3 Heißentschwefelung
- 7.4 Kohlenwasserstoffe und Ruß
- 7.5 Angabe von Emissionen
- 7.6 Konzentrations-Messverfahren

- 8. Technische Ausführungen**
- 8.1 Heizkessel
 - 8.1.1 Oberflächenbrenner
 - 8.1.2 Brenner mit kontinuierlicher Luftstufung
 - 8.1.3 Brenner mit Abgasrezirkulation
 - 8.1.4 Ölverdampfungsbrenner
- 8.2 Prozessfeuerungen
 - 8.2.1 Impuls- und Drallbrenner
 - 8.2.2 Strahlrohre
 - 8.2.3 Drehrohrbrenner
 - 8.2.4 Glaswannenbrenner
Kohlebrenner

- 8.3 Wärmekraftmaschinen
 - 8.3.1 Dieselmotor
 - 8.3.2 Ottomotor
 - 8.3.3 Gasmotor
 - 8.3.4 Turbinen
- 8.4 Nachbrennkammern
- 8.5 Ausrüstung von Brennern

1. Bedeutung der Verbrennungstechnik

1.1 Charakterisierung

Der weltweite Brennstoffverbrauch ist stetig gestiegen und wird in den nächsten Jahren weiterhin stark ansteigen. Bild 1-1 zeigt den Weltenergieverbrauch* seit dem Jahre 1860 mit den Prognosen für die Zukunft. Die Aufteilung in die verschiedenen Energieträger ist in Tabelle 1-1 veranschaulicht. Danach haben die fossilen Brennstoffe mit einem Anteil von knapp 90 % eine dominierende Bedeutung, die auch in den nächsten Jahrzehnten erhalten bleibt. An den fossilen Brennstoffen hat Erdöl den höchsten Anteil gefolgt von Erdgas und Kohle.

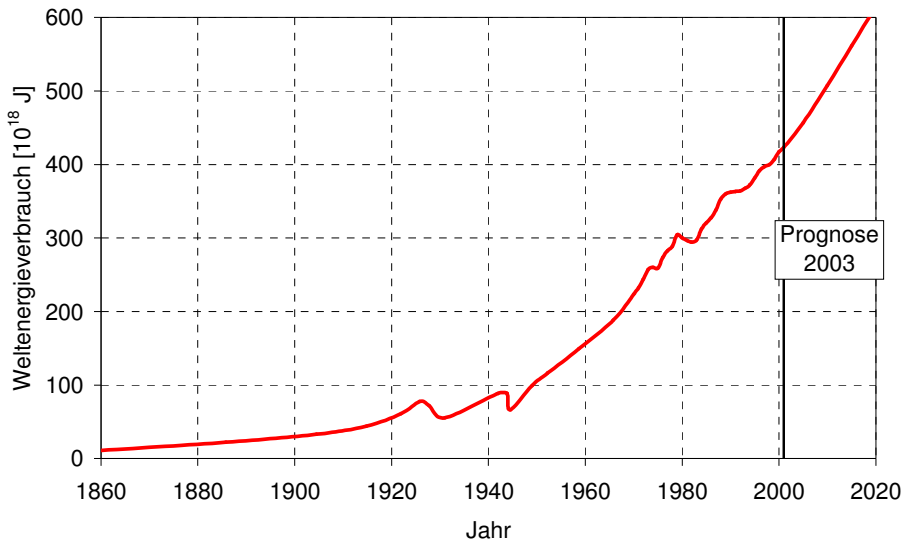


Bild 1-1:
Weltenergieverbrauch

Verbrauch in 10^{18} J (= $2,78 \cdot 10^8$ MWh)	1980	1982	1984	1986	1988	1990	1992	1994	1996	1998	2000	2001
Öl	143	134	135	139	146	149	151	154	161	166	173	174
Trockes Erdgas	55	54	62	66	76	80	81	84	89	90	96	98
Übriger Strom	18	18	19	19	21	23	23	24	26	28	30	31
Strom aus Wasserkraft	6	7	7	7	8	8	8	9	9	9	10	9
Strom aus Kernkraft	2	3	4	5	6	7	7	8	8	8	9	9
Strom Geothermal, Wasserkraft, Solar, Holz, Müll	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,9	0,9
Kohle	76	78	85	90	96	95	93	94	98	97	98	101
Weltprimärenergieverbrauch	300	294	312	328	353	362	364	372	392	400	417	423

Tabelle 1-1: Anteile der Energieträger am Weltenergieverbrauch [Energy Information Administration]

* Der Begriff Energieverbrauch ist thermodynamisch nicht korrekt, da Energie nicht verbraucht, sondern nur umgewandelt werden kann. Dem allgemeinen Sprachgebrauch folgend wird in diesem Buch trotzdem der Begriff Energieverbrauch verwendet, da synonym der Verbrauch des Energieträgers gemeint ist.

Mit der Verbrennung sind eine Reihe von Emissionen in die Atmosphäre verbunden. Der Anstieg der CO₂-Emissionen lässt sich im Wesentlichen nur über Einsparung von Energie begrenzen. Die CO- und NO_x-Emissionen können mit der Technik der Verbrennung reduziert werden. Dagegen ist eine Verringerung der SO₂-Emissionen nur durch eine Entschwefelung des Brennstoffs vor der Verbrennung oder durch eine Entschwefelung des Abgases nach der Verbrennung möglich. Die Entwicklung der Verbrennungstechnik zielt also darauf hin sowohl durch eine Erhöhung des Wirkungsgrades den Energieverbrauch einzuschränken als auch durch eine Verbesserung des Verbrennungsprozesses die Emissionen zu reduzieren. Die Möglichkeiten hierzu hängen von

- der Art der Nutzer und
- dem daraus resultierenden Zweck der Verbrennung

ab. Bei den Nutzern unterscheidet man in

- Industrie
- Verkehr
- Private Haushalte
- Kleingewerbe und Sonstige.

In Bild 1-2 ist der Energieverbrauch bei diesen Nutzern dargestellt, und zwar beispielhaft für Deutschland. Demnach ist der Gesamtenergieverbrauch bei allen Nutzern in der gleichen Größenordnung. Die Energieträger unterscheiden sich dagegen erheblich. Beim Verkehr werden fast ausschließlich Erdölprodukte eingesetzt. Bei den privaten Haushalten kommen direkt fast nur Heizöl EL und Erdgas zum Einsatz. Indirekt finden über den elektrischen Strom auch andere Energieträger Verwendung. In der Industrie werden dagegen alle Brennstoffe eingesetzt.

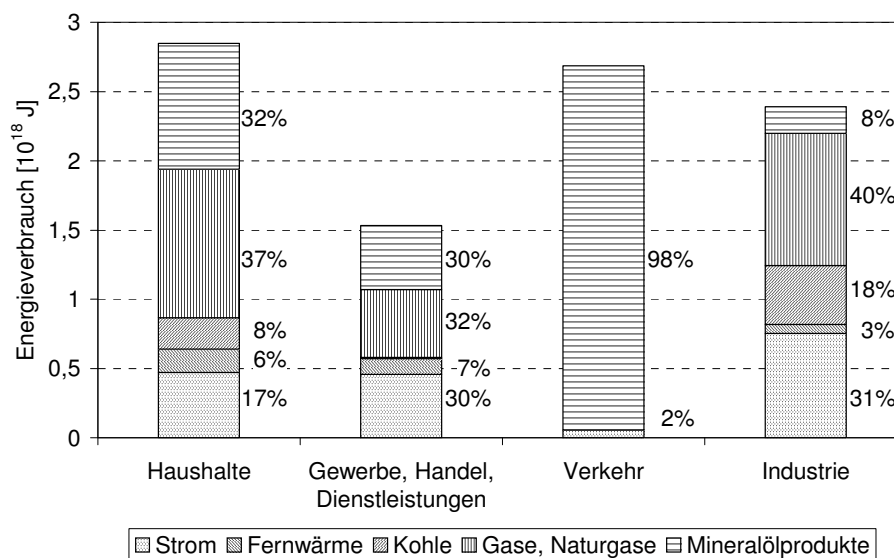


Bild 1-2: Energieverbrauch nach Nutzern und Energieträgern der Bundesrepublik Deutschland 2001

Klassifizierung

Eine Klassifizierung der Verbrennungstechniken ist in Tabelle 1-2 veranschaulicht. Demnach ist es zweckmäßig in die vier Bereiche

- Prozessfeuerungen
- Heizkessel
- Wärmekraftmaschinen und
- Nachbrennkammern

zu unterteilen. Diese Bereiche spiegeln den Zweck der Verbrennung wieder.

	Prozessfeuerungen	Heizkessel	Wärmekraftmaschinen	Nachbrennkammern
Zweck	Wärmebehandlung Stoffumwandlung	Wärmeerzeugung Prozessdampf	Erzeugung von mechanischer Arbeit	Abfall-/Abgas- behandlung
Brennstoff	Brennstoff prozessbedingt	Alle Brennstoffe	Spezielle Brennstoffe	Abfälle Reststoffe
Technik	Anpassung der Verbrennung an den Prozess	Anpassung des Brennraums an die Verbrennung	Abstimmung Verbrennung und Brennraum	Anpassung des Brennraums an den Ausbrand
Betriebsweise	Stationär	Stationär	Instationär	Instationär
Wände	Heiße Wände	Kalte Wände	Kalte Wände	Heiße Wände

Tabelle 1-2: Zweck und Charakterisierung von Verbrennungsprozessen

In Prozessfeuerungen, wie z. B. in Industrieöfen, wird eine Wärmebehandlung oder Stoffumwandlung durchgeführt. Hier steht die Qualität des Gutes im Vordergrund. Daher hängt es vom Gut und damit vom Prozess ab, welcher Brennstoff eingesetzt werden darf. Beispielsweise darf bei Metallen und Keramiken nur der "saubere" Brennstoff Gas eingesetzt werden, bei den Rohstoffen Zement und Kalk dagegen auch die "schmutzigen" Brennstoffe Schweröl und Kohle. Die Verbrennungstechnik muss stets dem Prozess angepasst werden.

Heizkessel dienen zur Wärmeerzeugung. In der Industrie wird überwiegend Prozessdampf, in den privaten Haushalten Heizwasser erzeugt. Hier kann der Brennraum an die Verbrennung angepasst werden. Dadurch ist es möglich, großtechnisch auch "schmutzige" und damit billige Brennstoffe einzusetzen. In den privaten Haushalten werden dagegen nur die sauberen Brennstoffe Erdgas und Heizöl EL verwendet.

Wärmekraftmaschinen, wie Motoren und Turbinen, dienen zur Erzeugung von mechanischer Arbeit. Hierbei sind die Verbrennung und der Brennraum so aufeinander abzustimmen, dass der Wirkungsgrad hoch wird. Daher können in der Regel nur speziell hergestellte Brennstoffe, wie Benzin und Diesel verwendet werden.

Die Nachbrennkammer steht speziell für die Zerstörung von Schadstoffen in Verbrennungsgasen unter Einsatz von fossilen Brennstoffen. Hier steht die Abgasbehandlung und der Ausbrand im Vordergrund. Der Brennraum ist der Reaktionszeit und damit der Verbrennung anzupassen. Die Verbrennung von Abfällen ist ein eigenes Gebiet, das in diesem Buch nicht behandelt wird.

Die Verbrennungstechnik dieser Bereiche unterscheidet sich noch durch die Zeitabhängigkeit des Prozesses und die Temperatur der Brennraumwände sowie der Flamme. Industrieöfen und Heizkessel werden überwiegend stationär betrieben. Die motorische Verbrennung läuft stets instationär. Nachbrennkammern können auf Grund der meistens diskontinuierlich anfallenden Schadstoffe instationären Prozessen zugeordnet werden. Die Temperatur der Wände beeinflusst maßgeblich die Zündung des Brennstoffs. Bei heißen Wänden zünden nahezu alle Brennstoffe relativ gut. Bei kalten Wänden sind dagegen einige Brennstoffe kaum zu zünden.

In Motoren werden möglichst hohe Temperaturen angestrebt, um den Wirkungsgrad zu steigern. In Heizkesseln wird die Verbrennungstemperatur so niedrig wie möglich gehalten, um ein Minimum der CO- und NO_x-Emissionen zu erreichen. In Industrieöfen muss die Verbrennungstemperatur oberhalb der Wärmebehandlungs- oder Stoffumwandlungstemperatur des Gutes liegen. In Nachbrennkammern ist die einzustellende Temperatur durch die Reaktionstemperatur vorgegeben.

1.2 Einfluss der Feuerungstechnik auf die Entwicklung der Menschheit

Die Entwicklung der Menschheit ist direkt mit der Beherrschung der Verbrennung verknüpft. Mit der Fähigkeit, ein Feuer zu entzünden und damit die Energie des Holzes als Wärme zu nutzen, begann die neolithische Revolution. Als die Wärmeenergie mit Maschinen in mechanische Energie umgewandelt werden konnte, begann die industrielle Revolution. Voraussetzung hierzu war, dass Holz durch Kohle als Energieträger substituiert werden konnte. Die negativen Auswirkungen der anthropogenen Energienutzung auf die Umwelt ist nicht erst ein Sündenfall der modernen Industriegesellschaft. Ein Blick in die Historie zeigt, dass es zu allen Zeiten der Menschheitsgeschichte gravierende spezifische Umweltprobleme gegeben hat.

Beginn der Verbrennungstechnik

Die Entwicklung der Menschheit ist mit der Beherrschung des Feuers verbunden [Krämer 1995 und Jeschar 1993]. Die Voraussetzung hierzu bestand im Erlernen, es selbst zünden zu können. Mit der Nutzung des Feuers war der Mensch erst in der Lage, sich aus der direkten Abhängigkeit von der Sonne zu befreien. Damit konnte der Mensch Werkzeuge herstellen, Ackerbau betreiben und seine Lebensbedingungen verbessern. Die Energie zur Erwärmung und Aufhellung der Höhlen sowie für die erweiterte Nahrungsmittelzubereitung wird durch die Verbrennung von Holz gewonnen. Dabei macht der Mensch schon die Erfahrung, dass Feuer nicht nur eine positive, sondern auch eine zerstörerische Wirkung hat. Die in vielen Mythen, Sagen und religiösen Symbolen dargestellte Kraft des Feuers sowohl als Spender als auch als Zerstörer des Lebens weist schon früh auf die Ambivalenz dieser Energiequelle hin. In einer griechischen Sage wird Prometheus dafür bestraft, dass er den Menschen das Feuer vom Himmel geholt hat, indem ein Adler ihm jeden Tag ein Stück seiner Leber auffrisst. (Eine Höchststrafe für jeden Bier- und Weintrinker).

Mit der Beherrschung der Holzverbrennung vor etwa 10000 Jahren ist der Beginn des Neolithikums (Jungsteinzeit) verbunden, gekennzeichnet durch eine revolutionäre Kulturwende als Folge des Übergangs von der Jäger- und Sammlergesellschaft zur sesshaften Ackerbau- und Viehzüchtergesellschaft. Bei dieser Umstellung im Nahrungserwerb handelt es sich um einen radikalen Einschnitt in der Kulturgeschichte der Menschheit, vergleichbar in der Bedeutung nur mit der industriellen Revolution im 18. Jahrhundert. Infolge der nahrungstanzuierenden Wirtschaftsform und der dadurch möglichen Vorratshaltung

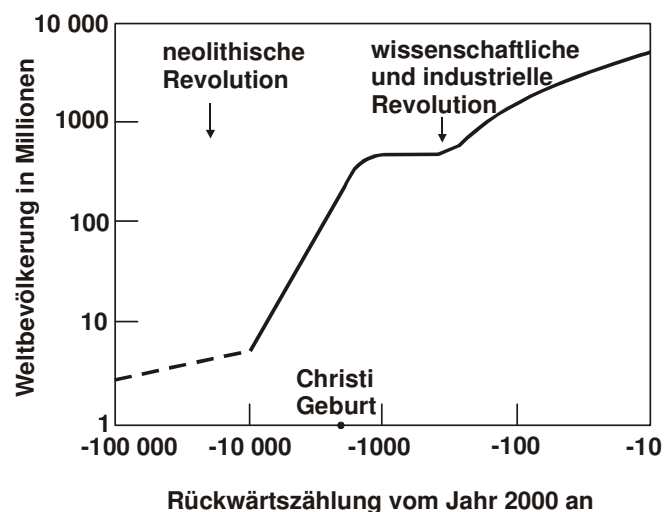


Bild 1-3: Entwicklung der Weltbevölkerung vom Jahr 2000 an rückwärts gezählt

kann sich der Mensch vom Zwang der Urproduktion befreien und sesshaft werden. Dadurch kann sich eine arbeitsteilige Gesellschaft entwickeln. Es bilden sich handwerkliche Tätigkeiten wie das Schmelzen und Schmieden von Nichteisenmetallen, Spinnen, Weben und Töpfern aus. Da durch den Ackerbau mehr Nahrung erzeugt werden kann, wächst die Weltbevölkerung von ca. drei Millionen steil an, wie im Bild 1-3 veranschaulicht ist [Jischa 1993]. Dabei steigt der Energieverbrauch auf das Sechsfache an. Heute ist im Vergleich der durchschnittliche Energieverbrauch des einzelnen Menschen auf das Zwanzigfache angewachsen.

Der Mensch ist zu jener Zeit noch nicht in der Lage, Wärmeenergie in mechanische Energie umzuwandeln. Diese Energieform muss der Mensch noch aus Muskel-, Wind- und Wasserkraft erzeugen. Mit der Wärmeenergie kann der Mensch jedoch verschiedene Werkstoffe herstellen. Je höher die Prozesstemperaturen sind, die der Mensch im Laufe der Zeit erreichen kann, desto mehr und qualitativ höherwertigere Werkstoffe kommen zum Einsatz. Einfache Keramiken und Ziegel können schon bei 500 - 800 °C gebrannt werden. Nichteisenmetalle wie Bronze und Kupfer weisen Schmelzpunkte von 800 bis 1000 °C auf. Eisen-Kohlenstoff-Legierungen werden hingegen erst zwischen 1200 und 1600 °C erschmolzen. Die technische Entwicklung ist somit mit der Entwicklung der Feuerungstechnik verknüpft. Auch heute wird intensiv versucht, Prozesse bei immer höheren Temperaturen betreiben zu können.

Brennstoff Holz

Holz ist über Jahrtausende der einzige Energieträger. Das Einsatzgebiet liegt sowohl im privaten Bereich zum Heizen und Kochen als auch im gewerblichen Bereich. Die größten Energieverbraucher in diesem Bereich sind die Ziegeleien, die Töpfereien, das Kalkbrennen, das Hüttenwesen (Herstellung der Metalle wie Bronze, Kupfer, Silber, Gold, Eisen usw.), die Glashütten und die Salinen, bei denen zur Salzgewinnung die Sole eingedampft wurde. Die Wirkungsgrade der Feuerungen waren sehr gering, was zu einem relativ hohen Verbrauch führte. Darüber hinaus war Holz auch im nichtenergetischen Bereich - als Werkstoff - von eminenter Bedeutung. Hier sind als größte Einsatzgebiete zu nennen: der Wohnungs- und Festungsbau, der Schiffsbau, der Bergbau, der Fahrzeugbau, der Bau von Geräten (Mühlen, Wasserräder, Gestängen, Hammerwerken, usw.), die Papierherstellung und die Gerbereien, die Baumrinde zum Färben verwendeten.

Der enorme Holzverbrauch führte zu erheblichen Umweltschäden [Korff 1992 und Spiegelberg 1984]. So war der gesamte Mittelmeerraum im Altertum ursprünglich einmal bewaldet. Als Folge der Rodung und in geringerem Maße auch des bewussten Waldabbrandes der Römer im Umkreis ihrer Feinde sind Nordafrika, Griechenland, der Apenninen und die iberische Halbinsel noch heute zum größten Teil verkarstet. Dieses soll eine regionale Klimaänderung zur Folge gehabt haben, die zu einer Temperaturerhöhung und einer geringeren Niederschlagsmenge geführt hat. Das Holz musste aus immer größer werdenden Entfernungen herangeholt werden, wie aus dem Schwarz-Meer-Raum und dem Kaukasus, was schließlich nicht mehr in ausreichendem Maße bewältigt werden konnte. Dadurch fehlte Holz für Schiffe, Wagen sowie Kriegs- und Verteidigungswerkzeuge. Der Niedergang des römischen Reiches ist im Wesentlichen die Folge einer entstandenen Energiekrise [Prague 1964]. Ähnlich erging es den Polynesiern, die um etwa 400 v. Chr. die Osterinseln besiedelten. Die Entwaldung dieser Inseln führte letztlich zum Zusammenbruch dieser Gesellschaft. Schon damals beklagten etliche Leute, wie beispielsweise der griechische Philosoph Plato sowie die römischen Naturforscher Seneca und Plinius, die "Ausbeutung der Erde".

In Mitteleuropa führte der enorme Holzbedarf zu einer Abnahme der Waldfläche um etwa die Hälfte. Insbesondere kommt es zu immer ausgedehnteren Entwaldungen um die Städte und Industriegebiete. So entstand die Lüneburger Heide durch die Rodung für die Saline. Eines der Hauptprobleme war folglich der Transport des Brennstoffes. Der Anstieg der Bevölkerung und der gewerblichen Produktion beanspruchen die Wälder so stark, dass es in vielen Gebieten zu ernsthaften Energieproblemen kommt. Die Holzverknappung führt zu einem enormen Preisanstieg. Zeitweise müssen Brennholzzuteilungen für ärmere Bevölkerungsschichten gewährt werden, um Unruhen zu vermeiden. (Eine der ersten Formen der Sozialhilfe). Im Revolutionsjahr 1789 kommt es in Frankreich auch zu Holzunruhen. Der Holzdiebstahl zählt im 19. Jahrhundert zu den häufigsten Eigentumsdelikten.

Man versucht, den Energieproblemen mit einer Reihe von Maßnahmen entgegenzuwirken, wie staatliche Reglementierung des Holzverbrauches, Aufforstung und vor allem technische Entwicklungen, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen wird. Im Jahre 1735 erscheint das erste Buch über die Verbrennung mit dem Titel *Vulcanus Famulus* (Das Feuer als Diener) [Jacobs 1994]. Der Autor war ein Pastor, der mit Experimenten den rationellen Holzeinsatz untersuchte. Gleichzeitig sollte das Rauchen in Stuben verhindert werden. Schon damals wurde der Umweltschutz als gleichwertig angesehen. So wurde übrigens im Jahre 1815 an der damaligen Universität Clausthal speziell eine Fakultät für Aufforstung gegründet.

Entwicklung des Steinkohleeinsatzes

Angesichts der Verknappung des Holzes wird versucht, dieses durch andere Energieträger zu substituieren. Torf, Stroh und Braunkohle bleiben jedoch Ausnahme. Erst Mitte des 18. Jahrhunderts wird in Europa Holz vermehrt durch Steinkohle substituiert. Vorreiter dabei ist England, da dort die Wälder weitgehend abgeholzt sind. Anfang des 19. Jahrhunderts kann man auch aus Kohle Koks herstellen und damit die Holzkohle substituieren. Beim Übergang auf den neuen Brennstoff treten auf Grund der Asche- und Schwefelemissionen häufig technische Probleme auf, wie z. B. beim Hausbrand, beim Brotbacken, beim Ziegelbrennen und bei der Eisenverhüttung. Die meisten Probleme können jedoch durch die Entwicklung geeigneter Feuerungen und Öfen beseitigt werden.

Der neue Brennstoff Kohle hat in Deutschland jedoch erhebliche Akzeptanzprobleme. Viele befürchten gesundheitliche Beeinträchtigungen auf Grund des Rauchs und der Flugasche. Der Steinkohleverbrennung und den damit verbundenen Emissionen werden verschiedene Lungenkrankheiten, Schwindsucht und Pest zugeschrieben. Der neue Energieträger setzt sich erst durch staatliche Initiativen durch. So ordnet beispielsweise Friedrich II von Preußen 1754 an, dass Kasernen nur noch mit Kohle beheizt werden dürfen. Diese Anordnung wird einige Jahre später auf alle öffentlichen Gebäude ausgedehnt. Um 1790 wird Holz künstlich verteuert und Kohle subventioniert. (Eine frühe Form der Energiesteuer). Die Entwicklung des ersten Kokshochofens 1796 ist auf die staatliche Förderung der Steinkohle zurückzuführen. Liegt in Deutschland der Einsatz von Holzkohle bei der Eisenverhüttung im Jahre 1850 noch bei 75 %, so sinkt dieser innerhalb von 20 Jahren auf nur noch 6 % ab.

An dieser Stelle sei übrigens darauf hingewiesen, dass in China bereits im 13. Jahrhundert Koks in großen Mengen erzeugt wurde [Mc Neill 1982]. Die Metallurgie und die Porzellanherstellung waren wesentlich fortgeschrittener als in Europa.

Entwicklung des Kokereigases

Der neue Energieträger Kohle bewirkt eine starke industrielle Entwicklung. Holz wird dadurch auch als Werkstoff zu Gunsten des Eisens ersetzt. Dies führt wiederum zu einem

verstärkten Bevölkerungsanstieg, u. a. da nun mehr Landfläche zum Ackerbau, anstatt zur Forstwirtschaft verwendet werden kann. Mit den immer größer werdenden Städten wächst die Unsicherheit auf den Straßen. Diese müssen daher beleuchtet werden. Das bei der Verkokung anfallende Gas wird 1786 erstmals in England zur Beleuchtung eingesetzt und löst die Pechfackeln ab. Ab dem Jahre 1815 werden in London Gasrohre zur Beleuchtung verlegt. Paris folgt im Jahre 1819. Im Gegensatz dazu setzt sich die Gasbeleuchtung in Deutschland erst Jahrzehnte später durch, da weite Teile der Bevölkerung dieser Neuerung wieder sehr skeptisch gegenüberstehen. Mit der Einführung der Gasverbrennung müssen wiederum neue Brenneinrichtungen konstruiert werden, um u. a. übermäßiges Flammenrußen und Explosionen zu vermeiden.

Industrielle Revolution

Mit der Kohle steht Energie wieder in größerer Menge zur Verfügung. Insbesondere im Bergbau besteht ein immer größer werdender Bedarf an mechanischer Energie, um das Grubenwasser aus den zunehmenden Teufen zu pumpen. Um die vielen Pferde und Menschen zu ersetzen, wird versucht, Maschinen zum Pumpen zu entwickeln. Im Jahre 1690 baut der Franzose Papin als erster eine Kolbenmaschine mit Dampfkondensation, die der Brite Savery 1710 zur kontinuierlich arbeitenden Dampfmaschine weiterentwickelt. Die Ideen zur Dampfmaschine bauen auf den Versuchen von Otto von Guericke auf, der 1635 mit seinem berühmten Versuch der Magdeburger Halbkugeln die Kräfte durch den Atmosphärendruck nachwies und der die Luftpumpe erfand.

Die ersten Dampfmaschinen hatten einen Wirkungsgrad unter einem Prozent. Trotzdem waren die Pumpen wirtschaftlich, so dass diese in größerer Stückzahl gebaut wurden. Folglich lohnte sich auch deren Weiterentwicklung. Die Erfindung der Dampfmaschine von James Watt, dessen Maschine erster Bauart 1776 in Betrieb geht, steht stellvertretend für den Beginn des Zeitalters des modernen Maschinenbaus. Der Wirkungsgrad dieser Dampfmaschine beträgt 1,6 %, was gegenüber den bisherigen Maschinen eine enorme Steigerung bedeutet. Die Wirkungsgrade werden in den folgenden Jahren stetig verbessert, wie dem Bild 1-4 zu entnehmen ist. Eine weitere Wirkungsgradsteigerung ergibt sich durch den Einsatz von Gasturbinen. Die Entwicklung hierzu wurde dadurch ausgelöst, dass auf Grund der Kokserzeugung Gas in größeren Mengen zur Verfügung stand. Wärme kann durch diese Entwicklungen nun wirtschaftlich in mechanische Energie umgewandelt werden, die industrielle Revolution beginnt.

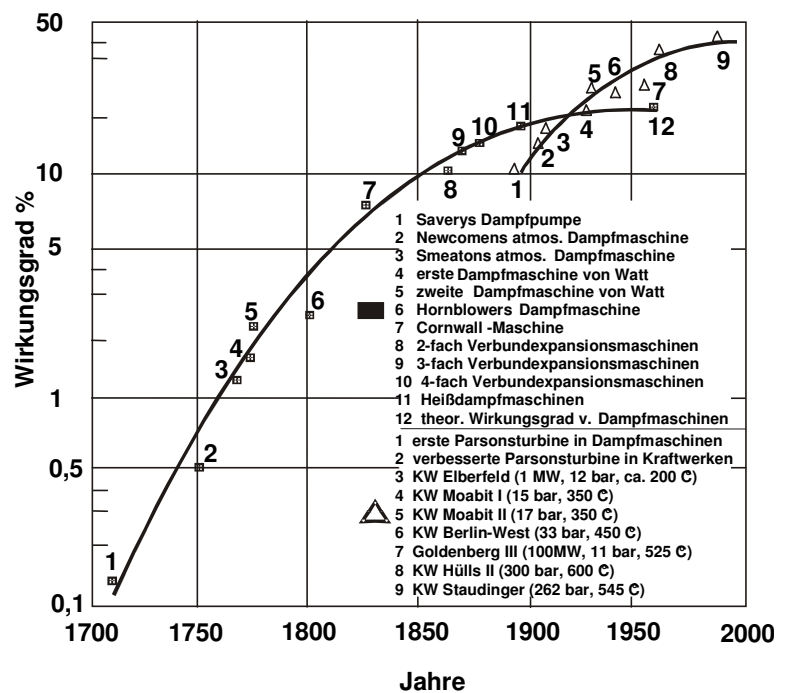


Bild 1-4: Entwicklung des Wirkungsgrades von Wärmekraftmaschinen

Erdöl und Erdgas

Die Entwicklung von Verbrennungsmotoren und deren rasche Erfolge am Markt werden erst möglich, als Anfang des 20. Jahrhunderts als weiterer fossiler Energieträger Erdöl im größeren Maße zur Verfügung steht. Erdöl ist, genauso wie die Kohle und das Erdgas, schon seit mehreren tausend Jahren bekannt. So wurden beispielsweise um etwa 300 v. Chr. in China Erdöllager bis zu einer Tiefe von 1000 m durch Bohrungen erschlossen. Die Römer verwendeten schon Petroleumlampen. Die erste kommerzielle Bohrung der Neuzeit wird im Jahre 1859 durch Edwin Drake in Pennsylvania (USA) niedergebracht. Zum Antrieb seiner Bohrwerkzeuge benutzte er eine Dampfmaschine. Erst die raffinierte Form (Destillation in einzelne Fraktionen) macht aus dem fossilen Energieträger ein konsumfähiges Produkt. An Bedeutung gewinnt Erdöl weltweit Anfang des 20. Jahrhunderts, in Deutschland ab etwa 1950. Der Aufstieg des Energieträgers Erdöl ist nicht nur als Antriebsenergie für Motoren, sondern auch als Rohstoff für chemische Produkte begründet.

Erdgas hat, wie Erdöl, als fossiler Energieträger erst Anfang des 20. Jahrhunderts an Bedeutung gewonnen, obwohl Erdgas ebenfalls seit mehreren tausend Jahren bekannt ist. Erdgas fällt in eigenen Lagerstätten und als Beiprodukt bei der Erdölförderung an. Die Gasnutzung ist in Deutschland durch das Kokereigas etwa seit dem Jahre 1825, in dem das erste deutsche Gaswerk errichtet wurde, eingeführt. Nach dem zweiten Weltkrieg ist das Kokereigas kontinuierlich durch das Erdgas verdrängt worden.

Anthropogene Umweltbeeinflussung

Infolge der Nutzung der fossilen Energieträger ist die Umwelt direkt durch deren Verbrennung und indirekt durch die dadurch möglichen stoffumwandelnden Industrieprozesse stets auch negativ beeinflusst worden. Auf einige Umweltprobleme infolge der Rodungen sowie der Rauch- und Schwefelemissionen ist an einigen Beispielen bereits hingewiesen worden. Daher beschäftigen die Umweltbeeinträchtigungen seit jeher die Menschheit. Schon im 4. Jahrhundert v. Chr. durften in der Nähe der griechischen Stadt Sunion auf Grund der Emissionen, die beim Schmelzen silberhaltigen Bleierztes auftraten und die Böden verseucht hatten, kein Vieh mehr geweidet werden. Im Mittelalter musste im Harzvorland zur Frühjahrszeit das Vieh ebenfalls von den Weiden geholt werden, da das schwermetallhaltige Wasser infolge der Verhüttung der Erze durch die Schneeschmelze dann über die Ufer trat. In einem alten Bergmannslied heißt es: „... was riecht so schweflig sauer und tötet Baum und Strauch? Das ist des Harzes Herold, der biedre Hüttenrauch. Kein Mensch kann ihm entfliehen, ein jeder muss dran riechen, und räuspern sich und pusten, und fluchen laut und husten ...“. Im 17. Jahrhundert stellt der Brite John Evelyn den ersten Smog fest. Er erkannte, dass sich der Themsenebel mit dem Kohlenrauch aus den Haushaltsöfen und Manufakturen zu einem Reizstoff für Lungen und Hals vermischt. So klagte Evelyn im Jahr 1664: „Dieser schreckliche Rauch schwärzt unsere Kirchen, ruiniert unsere Kleider, verdirbt das Wasser, und selbst mit dem Regen und dem Tau, die solche Erfrischung bringen können, fällt dieser Schmutz herab, der schwarz und klebrig alles befleckt und verunreinigt.“

Es gab viele Versuche, gegen die Umweltbeeinträchtigungen vorzugehen. So versuchte beispielsweise schon Kaiser Diokletian, die Luftverschmutzung in Rom zu bekämpfen. Die Stadt Venedig verwies im 14. Jahrhundert alle Gewerbebetriebe mit giftigen Abgasen aus ihrem Hoheitsgebiet. In Köln wurden im Jahre 1464 alle Kupfer- und Bleihütten geschlossen. Zar Peter I. erließ 1696 ein Waldschutzgesetz. Um die Mitte des 16. Jahrhunderts wurden sogenannte Flugstaubkammern entwickelt, in denen durch Strömungsumlenken und Geschwindigkeitsverringerungen Staub aus den Ofenabgasen abgeschieden werden konnte. Diese Kammern sind dann erstmals eingesetzt worden auf Verlangen des Böhmisches Königs

und des Kurfürsten von Meißen. In Berlin wurden ab dem Jahre 1796 die chemischen Fabriken aus der Stadt ausgegliedert und im Umland angesiedelt. In Preußen mussten ab dem Jahre 1836 in den Sodafabriken Koksrieseltürme zum Auskondensieren der Salzsäure in den Abgasen eingesetzt werden.

Umweltprobleme traten jedoch nicht nur durch die Luftverschmutzung auf. Mit steigenden Bevölkerungszahlen und zunehmender Industrialisierung wuchs akut die Fluss- und Gewässerverschmutzung. So war die Themse im 18. Jahrhundert bereits so verunreinigt, dass häufig Parlamentssitzungen wegen unerträglicher Geruchsbelästigungen abgebrochen werden mussten [Baum 1988]. In Frankreich beschäftigte sich eine Untersuchungskommission mit dem Zustand der Seine, da der Fluss bei Paris tot war. Die Pariser Luft wurde berühmt, weil man deren Gestank schon von weiten wahrnehmen konnte. Um diese Geruchsbelästigung besser ertragen zu können, wurden in Paris verstärkt Parfüme entwickelt.

Mit Beginn der Industrialisierung treten noch weitere Arten von Umweltproblemen auf. So beklagt beispielsweise der Franzose Louis S. Mercier im Jahre 1775 die Gefährdung der menschlichen Gesundheit durch unzureichende Hygiene, durch verunreinigte Lebensmittel sowie durch Verkehrstopfer infolge rücksichtsloser Raser und überfüllter Straßen. Der Lärm durch die vielen kleinen Handwerks- und Industriebetriebe sowie der Kutschen und Wagen auf den Straßenpflastern wird vielerorts ebenfalls als äußerst lästig empfunden. Durch eine kaum vorhandene Abwasserkanalisation treten viele gesundheitliche Beeinträchtigungen auf.

Konsequenzen für die Zukunft

Man mag nun lange darüber philosophieren, ob die individuelle Beeinträchtigung für den Menschen durch die Umweltverschmutzung damals oder heute größer gewesen ist. Die Umweltverschmutzung ist jedoch in der Regel lokal begrenzt geblieben. Durch die starke Bevölkerungszunahme infolge der Industrialisierung hat die Verschmutzung absolut gesehen mit Sicherheit ständig zugenommen und hat vor allem globale Ausmaße erreicht. Diese globale anthropogene Umweltbeeinflussung steigt durch die Bevölkerungsexplosion rasant an. Als Beispiel für die zunehmende Industrialisierung und der damit verbundenen Umweltbeeinflussung mag die Entwicklung des Weltenergieverbrauches dienen, die in Bild 1-1 dargestellt ist. Der Weltenergieverbrauch wird auch zukünftig überproportional stark ansteigen. Dabei werden die fossilen Brennstoffe Kohle, Erdöl und Erdgas mit einem Anteil von ungefähr 90 % weiterhin die dominierende Rolle spielen. Es stellt sich daher die Frage, inwieweit der Mensch in der Lage ist, aus der geschichtlichen Entwicklung heraus zu lernen und folglich den negativen Einflüssen des technischen Fortschritts weiterhin in ausreichendem Maße entgegen zu streben.

In der Geschichte gibt es genug Beispiele, die zeigen, dass der Mensch die Umweltzerstörung nicht mehr beherrscht hat. So verlor etwa vor 5000 Jahren China in seiner Hochkulturphase zwei Drittel seiner Anbaufläche durch Bodenerosion und Bodenversalzung. In Babylonien wiederholte sich diese Entwicklung um 2000 v. Chr. in ähnlicher Weise. Denn das damalige ausgeklügelte und hochtechnische Bewässerungssystem führte ebenfalls in die Katastrophe, da die Ackerböden zunehmend versalzten. Hatten um 1800 v. Chr. noch 15 Millionen Menschen in diesem Gebiet gelebt, so waren es im 5. Jahrhundert v. Chr. kaum mehr als 1 Million. Über den Niedergang der Hochkulturen der Griechen und Römer im Mittelmeerraum sowie der Polynesier im hinteren asiatischen Raum wurde bereits geschrieben. Alle Versuche, diese Entwicklung zu stoppen, scheiterten letztendlich an den Bedürfnissen einer stetig wachsenden Bevölkerung [Korff 1992]. Die ressourcenschonende Nutzung von Energie stellt sich also nicht erst heute als zentrale Frage unseres Überlebens dar. Die zukünftige Bedrohung der Menschheit besteht sicherlich in der globalen Erwärmung in Folge des

Treibhauseffektes durch das CO₂. Der vermehrte CO₂-Ausstoß und damit die Erwärmung ist nicht mehr zu verhindern. Die tatsächlichen Auswirkungen sind zwar noch nicht gesichert vorhersehbar, es werden jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit in etlichen Regionen erhebliche Probleme auftreten. Da die in den industrialisierten Ländern bereits stattgefundene Bevölkerungsexplosion inzwischen auf alle anderen Länder übergegriffen hat, ist bei lokaler Zerstörung ein Ausweichen nicht mehr möglich. Dem globalen rationalen Einsatz unserer fossilen Brennstoffe und der Reduzierung der bei ihrer Verbrennung entstehenden Schadstoffe kommt daher eine immer größer werdende Bedeutung zu.

Die Geschichte hat gezeigt, dass der Energieverbrauch im Wesentlichen stets nur durch eine verbesserte Technologie reduziert werden konnte. Als Konsequenz für die Zukunft sollte die Förderung der Technik und der Technologien eine bedeutende Stellung in der Energiepolitik einnehmen. Voraussetzung für technische Entwicklungen ist eine gute Ausbildung junger Menschen. Dieses Buch soll zur Ausbildung auf dem Gebiet der Verbrennungstechnik beitragen.