Energie und Technologie : Potential der fortgeschrittenen Technologien : schweizerisches Nationalkomitee des Weltenergierates : Berichterstattung über den 15. Kongress des Weltenergierates in Madrid 1992

Autor(en): **Lüthi, Hans K. / Weissenfluh, Thomas von**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **84 (1993)**

Heft 2

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-902657

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Energia y vida, Energie und Leben, war das Gesamtthema des letzten Kongresses des Weltenergierates im September 1992 in Madrid. Die Nutzung der verschiedenen Energieträger gefährdet in der Tat das Leben auf unserer Erde nicht unwesentlich durch die Millionen von Tonnen an Schmutz und Schadstoffen, die jährlich aus fossilen Kraftwerken und Motoren in die Atmosphäre, die Gewässer und die Böden gelangen. Um diesen Trend umzukehren, gilt es neben dem vorsichtigen und sparsamen Umgang mit allen Energieträgern und Energieformen in erster Linie, auch die verwendete Energie besser umzusetzen und zu nutzen. In diesem Aufsatz werden die Technologien und das zukünftige Potential zur Umwandlung von fossilen Brennstoffen in Elektrizität für den Zeitraum aufgezeigt, in dem die fossilen Energieträger noch Hauptlieferant sein dürften, das heisst für die nächsten 30 bis 60 Jahre.

Energie und Technologie: Potential der fortgeschrittenen Technologien

Schweizerisches Nationalkomitee des Weltenergierates: Berichterstattung über den 15. Kongress des Weltenergierates in Madrid 1992

■ Hans K. Lüthi und
Thomas von Weissenfluh

Energie als Triebkraft

Führen wir uns vor Augen, was Energie für uns Verbraucher bedeutet: Licht und Kraft, Mobilität und Wärme (Bild 1). Die von uns heute verbrauchte Energie wird weltweit ungefähr je zu einem Drittel als Elektrizität, Treibstoff und Brennstoff konsumiert. In der Schweiz nutzen wir die uns zur Verfügung stehende Endenergie mit einem Wirkungsgrad von rund 56% (Tabelle 1). Die Nutzung der «neuen erneuerbaren» Energiequellen wie Wind, Biomasse und direkte Sonneneinstrahlung – ausser der Wasserkraft – deckt heute nur einen verhältnismässig kleinen Anteil am ganzen Energieverbrauch. In viel grösserem Umfang wird der Sonnenenergiestrom, welcher als Licht und Wärme auf der Erdoberfläche auftrifft, direkt als Lebenselixier in der Biosphäre und damit als Nahrungsmittelgrundlage genutzt. Wie weit die erneuerbaren Energiequellen ausreichen, um die Menschheit langfristig mit Energie zu versorgen, ist Spekulation, darauf wird hier nicht eingegangen. Grundsätzlich dürfte aber, um den globalen Energiehaushalt in ein Gleichgewicht zu bringen, nur soviel Energie genutzt werden, wie anfällt oder eingestrahlt wird.

Nutzung der fossilen Energieträger

Die fossilen Energieträger werden heute vor allem als Treibstoffe für die Fortbewegung im Strassen-, Flug- und Seeverkehr, als Brennstoffe im Wärmemarkt und als Primärenergieträger in Kraftwerken zur Elektrizitätserzeugung verwendet. Vom gesamten Primärenergieverbrauch decken heute weltweit die fossilen Bodenschätze, die sich während Jahrmillionen gebildet haben, knapp 80%. Nach den Modellrechnungen der Kommission «Energie für die Welt von morgen» des Weltenergierates dürften es im Jahr 2020 zwischen 60 und 75% sein, je nach Annahmen zu den möglichen Entwicklungen [1]. Auch bei der Elektrizitätserzeugung sind die fossilen Energieträger dominant; Kern- und Hydroenergie haben einen nicht vernachlässigbaren Anteil. In einigen Ländern sind diese Anteile sogar dominant: in Frankreich und Schweden die Kernenergie, in Norwegen und der Schweiz die Wasserkraft. Weltweit jedoch wird die Elektrizität zu rund 72% durch Verbrennung aus fossilen Energieträgern, zu 19% aus der Kernspaltung und zu 7% aus Hydroanlagen gewonnen (Tabelle 2). Dabei wird davon ausgegangen, dass die Kernenergie mit einem mittleren Wirkungsgrad von

Adressen der Autoren:
Hans K. Lüthi, ABB Kraftwerke AG, 5401 Baden,
und Dr. *Thomas von Weissenfluh*, Sekretär des Schweizerischen Nationalkomitees des Weltenergierates, Elektrowatt AG, 8022 Zürich.

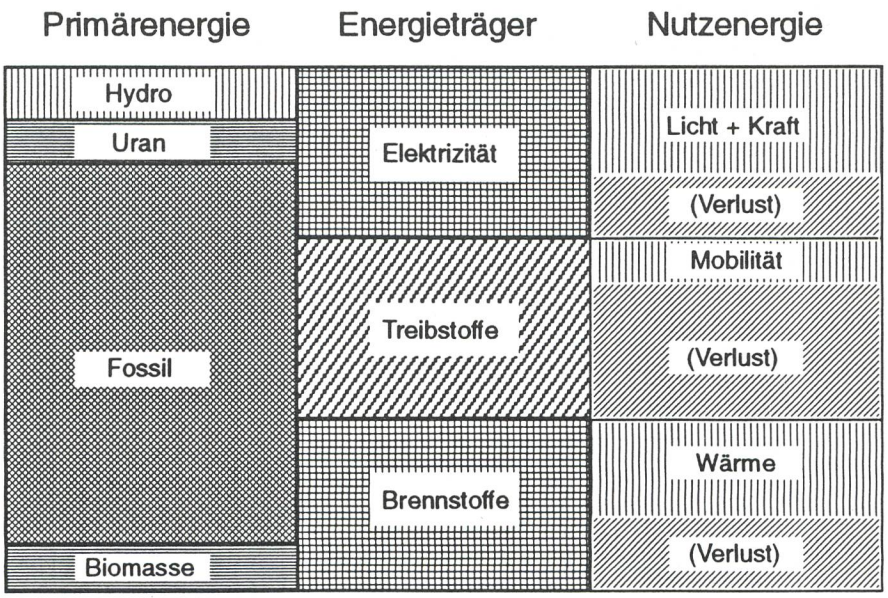

Bild 1 Primär-Energie gelangt über einen Energieträger zum Endverbraucher. In der Verbrauchs-Kolonne ist auch die Grössenordnung des Verlustes angezeigt, der bei der Umwandlung des Trägers in Nutzenergie entsteht. Schon bei der Umwandlung von Primär- in Trägerenergie sind zum Teil erhebliche Verluste entstanden. Wie diese reduziert werden können, ist eines der zentralen Themen dieses Artikels

	Wirkungsgrad in %
Brennstoffe	72
Treibstoffe	22
Erdgas	72
Elektrizität	70
Gesamt	56

Tabelle 1 Wirkungsgrad beim Endenergieverbrauch in der Schweiz 1991 (Nutzenergie/Endenergie)

Quelle: Schweiz. Gesamtenergiestatistik 1991

	MTOE	Anteil in %
Feste Brennstoffe	1128	42,8
Erdöl	313	11,9
Erdgas	472	17,9
Kernbrennstoffe	517	19,6
Hydrokraft	189	7,2
Geothermische Energie	25	0,9
Biomasse und andere	17	0,6
Summe	2636	100,0
Erzeugte Elektrizität in TWh	11606	

Tabelle 2 Anteile der Energieträger an der weltweiten Elektrizitätserzeugung 1990

Quelle: Energy in Europe, Commission of the European Community, Brussels, 1992

33% in Elektrizität und die Wasserkraft mit 100% umgewandelt wird.

Die weltweiten Kohlevorräte reichen bei einem Jahresverbrauch von Anfang der 90er Jahre für mehrere hundert Jahre aus. Das leicht abbaubare Erdöl und das Erdgas, das heisst zu heute wirtschaftlichen Bedingungen förderbar, würden je für rund 60 Jahre ausreichen. Unter diesem Aspekt ist es nicht nur natürlich, sondern Gebot, den Möglichkeiten der fortschrittlichen Nutzung der Kohle vor allem zur Stromerzeugung besonderes Gewicht beizumessen. Wird es doch möglich sein noch während rund zehnmal längerer Zeit Energie aus Kohle und aus Erdöl oder Erdgas zu gewinnen.

Auswirkungen auf die Umwelt

Noch bis vor 10 Jahren machten wir uns vor allem Sorgen um die Quellen, das heisst die Energiereserven, die schon in Kürze zur Neige gehen könnten. Heute überwiegen klar die Bedenken um den Zustand der Umwelt, das heisst der Energiesenken: Luft, Wasser, Boden. Dass die Verbrennung der fossilen Energieträger Auswirkungen auf die Umwelt haben, ist unbestritten. Wie sich die verschiedenen Schadstoffe aber auswirken, darüber herrscht schon weit weniger Einigkeit.

Immerhin gibt es doch einige gesicherte Angaben:

– *Smog* entsteht lokal und hat gesundheitsschädigende Folgen. Er entsteht im wesentlichen durch die Bildung von Ozon aus NO_x (Stickoxide) unter der Einwirkung der UV-Strahlung der Sonne. NO_x bildet sich bei der Verbrennung fossiler Energieträger in zweifacher Art: «chemisches» NO_x, durch Reaktion des Luftsauerstoffs mit dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff und thermisches NO_x, durch die Verbindung des in der Luft enthaltenen Stickstoffs mit dem Sauerstoff. Beide Mechanismen können durch geeignete Prozessführung eingedämmt werden.

– *Saurer Regen* macht sich regional mit schlimmen Folgen für Wald, Kulturen und Gewässer bemerkbar. Er entsteht hauptsächlich durch Auswaschen von saurem SO_2 und NO_2 aus der Atmosphäre. Die Regentropfen transportieren die sauren Moleküle aus der Luft auf die Pflanzen, in den Boden und in die Gewässer. Die Zusammenhänge und insbesondere die detaillierten Auswirkungen sind noch nicht vollständig bekannt. Die Auswirkungen sind in Osteuropa, wo in grossem Stil schwefelhaltige Kohle ohne Rückhaltevorrichtungen zur Elektrizitätserzeugung verbrannt wird, unübersehbar. Ganze Landstriche mit kahlen Bäumen sind keine Seltenheit. «Waldsterben» in unseren Längengraden Westeuropas ist vor allem in der Schädigung der Nadelgehölze deutlich sichtbar.

– Der *Treibhauseffekt* wirkt global mit noch unabsehbaren Folgen für die ganze Biosphäre unserer Erde. Bei der Verbrennung der fossilen Energieträger entsteht das natürliche und in der Atmosphäre vorhandene Kohlendioxid, CO_2. Durch Verbrennen während Jahrmillionen aus der Luft absorbierten Kohlenstoffs wird in kurzen Zeiträumen CO_2 in einem bisher unbekannten Umfang in die Atmosphäre abgegeben. Die Auswirkungen sind zweifacher Natur: Eine erhöhte Konzentration von CO_2 und auch anderer treibhausrelevanter Gase (CH_4 usw.) bewirkt eine erhöhte Absorption der langwelligen Wärmeabstrahlung der Erdoberfläche und damit eine Temperaturerhöhung in der ganzen Atmosphäre. Die Veränderung erfolgt mit einer für natürliche Verhältnisse rasanten Geschwindigkeit, die instabile klimatische Effekte zur Folge haben könnte.

Ein Teil dieser Probleme werden durch die Reststoffe des Verbrennungsprozesses bei der Umwandlung fossiler Brennstoffe hervorgerufen. Angelastet werden sie unserer Industrie bzw. unserer industrialisierten Gesellschaft. Dies geschieht zum Teil zurecht, oft auch zu unrecht, denn es ist ja so viel einfacher, mit dem Finger auf einen Kraftwerks-Schornstein zu deuten als auf den Auspuff des eigenen Autos.

Heute erfolgen 60% der energiebedingten weltweiten CO_2-Produktion in den industrialisierten Ländern. Die Modellrechnungen des Weltenergierates führen auf eine Erhöhung der weltweiten CO_2-Produktion zwischen 30 und 100% bis zum Jahre 2020. Davon werden zu diesem Zeitpunkt 60–70% in den Entwicklungsländern produziert werden. Die Stromerzeugung selbst ist zu fast einem Drittel an der Produktion von CO_2 beteiligt und ähnlich verteilt. Der Rest geht auf das Konto von Verkehr und Wärme.

Treibhausrelevante Gase, allen voran das Kohlendioxid (CO_2) aber auch Luftfeuchtigkeit (H_2O), Stickstoffdioxid (NO_2), Methan (CH_4) und andere sind ausschlaggebend für

die Erhöhung des natürlichen Treibhauseffektes. Das Ausmass anderer Effekte ist noch nicht vollständig bekannt: Das Abholzen und Verbrennen von tropischen Regenwäldern hat zwei Effekte. Der Kohlenstoffspeicher Biomasse wird verbrannt, es entsteht CO_2 und die Absorption von CO_2 durch den Wald – Aufbau von Biomasse – ist reduziert. Heute wird angenommen, dass ein Teil des CO_2 im Meerwasser gespeichert wird. Wie sich dieser Effekt entwickeln wird, ist noch unklar, da nicht nur die Wassertemperaturen, sondern auch die Meeresströmungen einen Einfluss haben. Das Abschmelzen des polaren Eises, das Auftauen der Permafrostböden in weiten Teilen Sibiriens und Kanadas und die rückgängige Schneebedeckung der Alpen und Polgebiete haben auf den globalen Temperaturverlauf Einfluss mit teilweise noch unbekanntem Vorzeichen.

Wie dies auch zu bewerten ist, spielt eigentlich gar keine Rolle, erwartet werden Problem-Lösungen.

Strategie zur CO_2-Minderung

Es scheint offensichtlich, dass wir vorerst in grossem Stil nicht auf die Nutzung der fossilen Energieträger verzichten können. Nach der neuesten Untersuchung des Weltenergierates [1] dürfte eine Dominanz auch über das Jahr 2020 hinaus noch gegeben sein. Die Minderung des Verbrauchs fossiler Energieträger kann deshalb nur ein Teil einer Gesamtstrategie sein, die Probleme der Umweltbelastungen zu reduzieren. Für die Übergangsphase (d.h. bis wir dazu fähig sind, umweltneutrale Energieträger zu nutzen und einzusetzen) ist es deshalb notwendig, auch die Erzeugung von CO_2 und anderer Luftschadstoffe zu reduzieren. Damit werden zwar die Symptome, nicht die Ursachen bekämpft. Auch die Konferenzen in Rio (UNCED, Beitrag B. Fritsch) und Madrid konnten zu den bekannten fünf Möglichkeiten, die Emissionen von CO_2 zu mindern, keine hinzufügen. Es sind dies:

(1) Sparsamer und/oder effizienterer Verbrauch fossiler Energieträger.
(2) Verstärkte Nutzung der erneuerbaren Energiequellen: das heisst zusätzlich zur schon weitgehend genutzten Wasserkraft auch Sonne, Wind, Biomasse und andere.
(3) Rückhaltung des CO_2, rezyklieren oder deponieren.
(4) Effizientere Nutzung, das heisst höherer Wirkungsgrad bei der Umwandlung.
(5) Substitution von Kohle durch Erdöl und Erdgas und – konsequenterweise – auch fossile Brennstoffe durch Uran oder andere Kernbrennstoffe.

Wir beschränken uns vorerst auf die Betrachtung der Reduktionsmöglichkeiten von CO_2, da mit den gleichen oder ähnlichen Massnahmen auch die anderen wichtigen Luftschadstoffe (NO_x, SO_2, Russ) reduziert werden können. Zudem gibt es heute technische Möglichkeiten, gerade diese Schadstoffe bei der Verbrennung in stationären wie auch mobilen Verbrennungsanlagen zu reduzieren. Dafür ist ein Preis zu bezahlen, der die Wirtschaftlichkeit zwar verschlechtert, die Umweltbelastungen aber reduziert und damit einer Internalisierung von Umweltkosten entspricht.

Sparsamer Umgang und rationelle Nutzung der Energie

Ein Vergleich des spezifischen Pro-Kopf-Energieverbrauchs in den verschiedenen industrialisierten Ländern zeigt, dass ein grosser Unterschied zwischen den Ländern Europas und Nordamerikas besteht. Es muss also mindestens möglich sein, den Energiebedarf in einem Teil dieser Länder zu reduzieren. Verschiedene Stimmen sind der Meinung, dass durch sparsamen und bewussten Umgang mit allen Energieträgern es möglich sei, mindestens so viel Energie einzusparen, damit der Gesamtenergieverbrauch nicht mehr weiter ansteigt.

Rationelle Nutzung hat sicher das höchste Potential, Energie einzusparen, allerdings weniger durch technologische Forschritte als durch Veränderung der gesellschaftlichen Werteskala. Damit bei uns und in allen anderen Industrieländern ein Konsumverzicht erreicht wird, sind wirtschaftliche und rechtliche Massnahmen unumgänglich. Stichworte dazu sind: Verursacherprinzip, Vollkostenrechnung unter Einschluss der externen Kosten, Lenkungsabgaben, aber auch Emissions- und Nutzungsvorschriften.

Dies gilt im wesentlichen nur für die OECD-Länder und die Länder des ehemaligen Ostblocks. Eine Reduktion des Energiebedarfs in den Ländern der Dritten Welt ist schlicht nicht erreichbar, da der spezifische Pro-Kopf-Verbrauch schon fünf- bis zehnmal tiefer ist als derjenige der Industrieländer. Dort besteht vielmehr ein Nachholbedarf als ein Einsparpotential. (Vergleiche auch Beitrag D.A. Davis.)

Verstärkte Nutzung der erneuerbaren Energiequellen

Alle erneuerbaren Energiequellen sind von der Sonneneinstrahlung auf die Erde abhängig. Direkte Nutzung der Sonnenstrahlung in photovoltaischen oder solarthermischen Anlagen auch in Verbindung mit Nachfeuerungen und die Nutzung von Wind- und Wellenenergie sind möglich. Nur die traditionelle Wasserenergie ist bisher umfangreich genutzt. Die Kraft der Gezeiten und geothermische Energie können ebenfalls zu den erneuerbaren Energien gezählt werden, obwohl sie nicht solaren Ursprungs sind.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist zu sagen, dass trotz fortschreitender, gewaltiger Verbesserungen die Technologien der erneuerbaren Energieträger immer noch auf Energiekosten führen, die schlicht um den Faktor 1,5 bis 5 zu hoch sind. Die Gründe für dieses Missverhältnis sind relativ schnell aufgeführt, aber es ist sehr schwierig, eine Verbesserung der Situation herbeizuführen.

Die Nutzung der geringen Leistungsdichten eines Grossteils der erneuerbaren Energiequellen erfordert einen grossen Kapitalaufwand; daraus ergeben sich hohe Fixkosten, die zudem wegen des geringen Nutzungsgrades auf nur etwa 2000 Vollaststun-

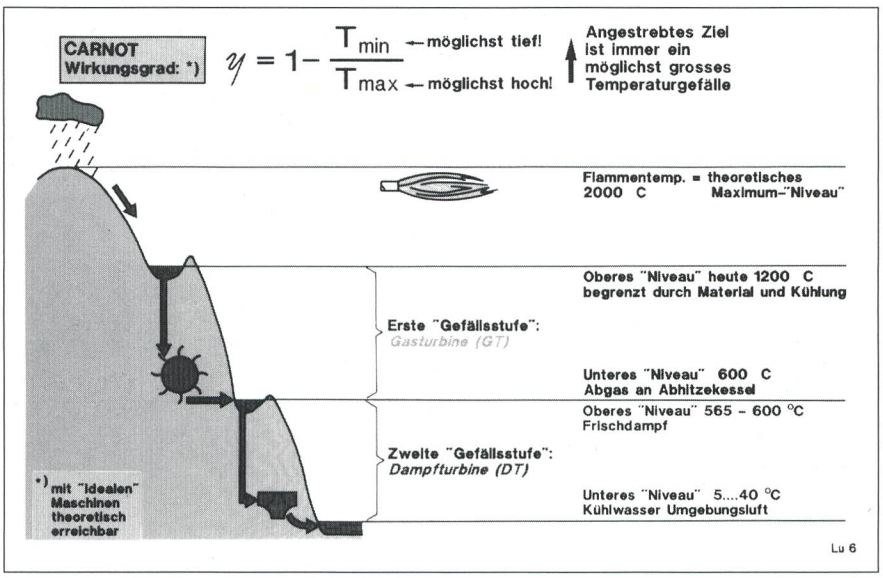

Bild 2 Thermodynamisches Grundprinzip des Kombi-Kraftwerkes, bestehend aus Gasturbine, Abhitzekessel und Dampfturbine als Analogie zur mehrstufigen Wasserkraft-Nutzung

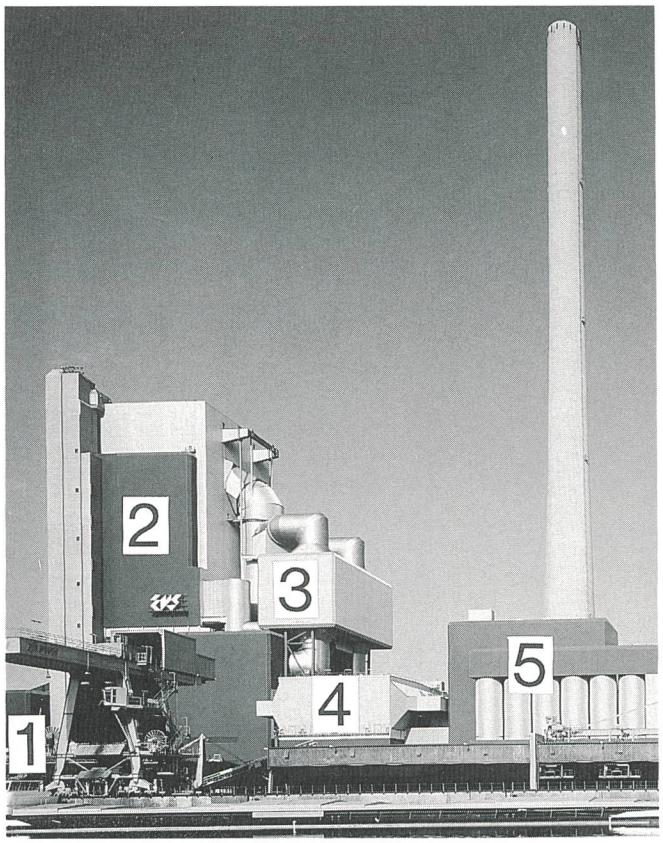

Bild 3 Stand-der-Technik-Kohlekraftwerk Heilbronn, 800 MW. Kapital- und Betriebskosten der gesamten Rauchgas-Reinigungsanlage (3–5) erhöhen die Stromgestehungskosten um etwa 1/3 (Bild ABB)

1 = Turbinenhaus,
2 = Kesselhaus,
3 = De-NO_x- Anlage,
4 = Elektro-Filter,
5 = De-SO_x-Anlage, auch REA genannt: Rauchgas-Entschwefelungsanlage

den pro Jahr umgelegt werden können (in den allerbesten Lagen wie in der Süd-Sahara bis höchstens 2500 Stunden, Photovoltaikanlage Mont-Soleil im Jura: 1440 Stunden). Das photovoltaische Solarfeld auf dem Mont-Soleil setzt etwa die Leistung von 1 kW/m² um. Die gesamte Leistung dieser Anlage entspricht ungefähr der Leistung, die in einer einzigen Gasturbinenschaufel umgesetzt wird.

Sonnen- und Windkraftwerke liefern wohl Energie (kWh) ins Netz, tragen heute aber kaum zu dessen Kapazität (kW) und schon gar nicht zur Stabilität bei, da die Produktion stark witterungsabhängig ist.

Heute machen die kommerziell genutzten neuen erneuerbaren Energieträger (ohne Hydroenergie) weltweit nur einen sehr kleinen Teil an der gesamten Energieproduktion aus. Die wirtschaftlich ungünstige Produktionsmöglichkeit eines Grossteils der erneuerbaren Energien verhindert vorerst ein starkes expandieren. Zweifellos ist es aber notwendig, dass bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts diese neuen erneuerbaren Energien einen wesentlichen Anteil am gesamten Energieaufkommen haben, weil zu diesem Zeitpunkt die vorhandenen Erdöl- und Erdgasvorräte ihrer Neige zugehen dürften. Sie sind deshalb bereits heute auf allen Stufen zu fördern und zu unterstützen.

Rückhaltung des CO_2

Die Rückhaltung von CO_2 ist in grossen Verbrennungsanlagen prinzipiell durchführbar. Das ungelöste Problem ist die Deponierung des Kohlendioxids. Versenkung in Form von Trockeneis im Meer, Rückführung als Gas in leergepumpte Erdöl- oder Erdgasfelder wären Möglichkeiten, das CO_2 zeitlich begrenzt zu lagern, sie bestehen jedoch nur auf dem Papier. Grösstes Hindernis für Rückhaltung und Deponie ist der technische und energetische Aufwand. Der Nettowirkungsgrad von grossen Stromproduktionsanlagen wird um rund einen Drittel reduziert. Leider ist die Rückhaltung des CO_2 noch auf lange Sicht unwirtschaftlich. Bedenkt man, dass bei der Verbrennung ungefähr zwei- bis dreimal so viel Masse an CO_2 anfällt, wie Brennstoff eingesetzt wurde, so ist leicht vorstellbar, dass die Deponierung auf der genannten Basis kaum realisierbar ist.

Erhöhung der Wirkungsgrade

Höhere Wirkungsgrade bewirken eine Reduktion der spezifischen, bei gleich bleibender Leistung auch der absoluten Schadstoffemissionen aus einem Verbrennungsprozess. Gasturbinen leisten den weitaus grössten Beitrag zur Erhöhung von Anlagewirkungsgraden in Kraftwerken. Dazu war es aber notwendig, Gasturbinen mit sowohl hoher Eintritts- (ab 1100 °C) als auch hoher Austrittstemperatur (etwa 600 °C) zu entwickeln. Erst nach Vorliegen solcher Turbinen war es möglich, einen vollwertigen Dampf/Wasser-Prozess der Gasturbine nachzuschalten und sogenannte «Kombi»-Kraftwerke zu realisieren.

Bild 2 stellt den Versuch dar, durch eine Analogie das Prinzip auch dem Nicht-Thermodynamiker zu verdeutlichen: Ein Kubikmeter Wasser auf Meereshöhe ist, energetisch gesehen, wertlos. Die gleiche Menge Wasser aber auf 2000 m Höhe über dem Meeresspiegel enthält «potentielle Energie», das heisst das Wasser ist in der Lage, auf dem Weg zur Meereshöhe Arbeit zu leisten (Bild 2, links). Durch Nutzung des Gefälles in einer oder mehrerer Turbinenstufen kann Arbeit (Energie) geleistet werden. Bei Nutzung der potentiellen Energie über zwei Stufen muss der Austritt aus der ersten Stufe über dem Eintritt der zweiten Stufe liegen.

Analog ist bei der thermodynamischen Umwandlung von Wärmeenergie nur mechanische Arbeit gewinnbar, wenn die Wärmeenergie bei einer Temperatur vorliegt, die über der Umgebungstemperatur liegt (Bild 2, rechts). Wärmeenergie auf dem Niveau der Umgebungstemperatur ist wertlos. Je grösser das Temperaturgefälle, desto mehr mechanische Arbeit (Energie) lässt sich gewinnen. Im Gegensatz zum Wasserkraftwerk gibt es zwar kein Medium, das erlaubt, über das ganze Temperaturgefälle, das heisst von 2000 °C (Flammentemperatur) bis Umgebungstemperatur, Arbeit zu gewinnen. Trotzdem ist es möglich, mit Luft im oberen Bereich – in Gasturbinen – und mit Wasser im unteren Bereich – in Dampfturbinen – die Wärmeenergie in mechanische Arbeit zu wandeln. In Analogie zum mechanischen Fall gilt auch hier die Bedingung, dass die Austrittstemperatur der Gasturbine (obere Stufe) über dem oberen Niveau der Dampfturbine (untere Stufe) liegt. Dies ist mit den eingangs erwähnten neuen Generationen von Gasturbinen realisierbar.

Mit der kombinierten Anordnung von Gas- und Dampfturbinenprozess ist es möglich, die heute üblichen elektrischen Nettowirkungsgrade von reinen Dampfturbinenprozessen von 40 bis 42% auf bis zu 55% zu steigern. Dies entspricht einer relativen Steigerung der Energieausnutzung um rund 30%. Es ist heute also durchaus möglich, mit der in Kraftwerken eingesetzten Erdöl- und Erdgasmenge bis zu 30% mehr Strom zu erzeugen. Solche kombinierten Anlagen werden heute auf der ganzen Welt gebaut.

Auch in Kohlekraftwerken kann diese Technologie des kombinierten Gas- und Dampfturbinenzyklus eingesetzt werden, dazu ist aber die Kohle vorangehend zu vergasen.

Substitution von schadstoffreichen Energieträgern

Der konsequente Weg zur Kernenergie zur Vermeidung aller Luftschadstoffe ist heute realistischerweise – aus politischen Gründen – in keinem Land möglich. Ob und wann sich die Situation wieder ändert, so

dass auch Mittelwege mit einem Mix von Kraftwerken mit fossilen, nuklearen und erneuerbaren Energieträgern wieder opportun werden, ist noch unabsehbar. Dies wäre aus der heutigen Sicht wünschbar, könnte sich dadurch die Situation bei der Akkumulierung von Umweltschadstoffen deutlich verbessern. Die in nuklearen Kraftwerken anfallenden radioaktiven Schadstoffe sind einfacher zu handhaben als die Unmengen von Schadstoffen der fossilen Energieträger. Die radioaktiven Schadstoffe fallen konzentriert an, sie können deshalb durch weniger aufwendigere Verfahren entsorgt werden, als wenn riesige Volumenströme durch komplizierte Methoden zu reinigen sind. Die Entsorgungskosten steigen damit nicht in exorbitante Höhen.

Für Kraftwerksbetreiber in Europa, in Nordamerika und am «Pacific Rim» erweist sich ein Ausweichen auf Erdgas als möglich und als ideale Lösung, da genügend und kostengünstiges Erdgas zur Verfügung steht. Praktisch werden dadurch nicht nur die spezifischen Emissionen, sondern auch die Investitionskosten für die Kraftwerke auf die Hälfte reduziert und zudem die Brennstoffkosten nicht untragbar erhöht. Das Erdgas wird teilweise in verflüssigtem Zustand in «Erdgastankern» oder in Druckleitungen transportiert.

In vielen Ländern kann oder will man bei der Kohleverstromung bleiben. Tiefe Kohle-Brennstoffkosten (ohne Umweltkosten zu berücksichtigen), landeseigene Förderung (Arbeitsplätze) und mangelnde Devisen sind dabei ausschlaggebend. Kohle ist heute der meist eingesetzte fossile Energieträger und dürfte es zumindest in den beiden bevölkerungsreichsten Ländern China und Indien noch längere Zeit bleiben. Gerade für diese Länder dürfte die Entwicklung neuer schadstoffarmer Technologien zur Verstromung von Kohle von zentraler Bedeutung sein.

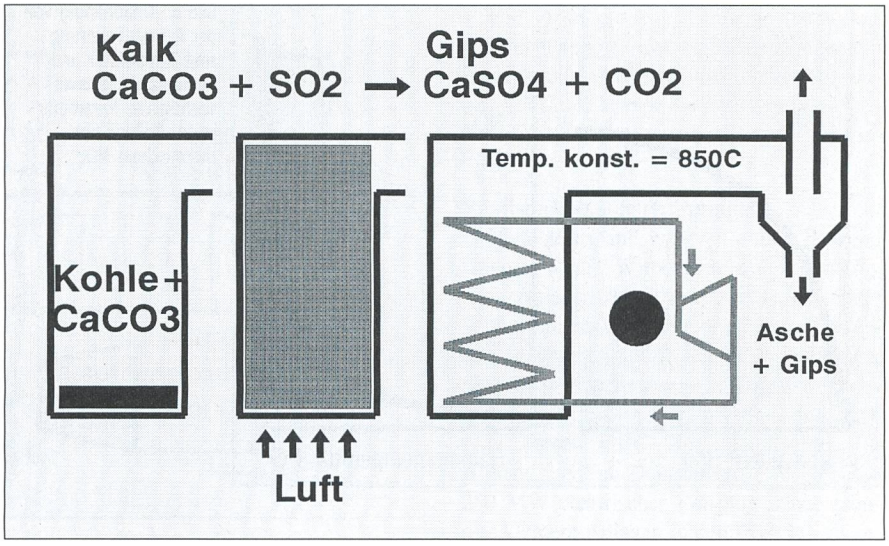

Bild 4 Prinzip der Wirbelschicht-Feuerung (Erklärung im Text)

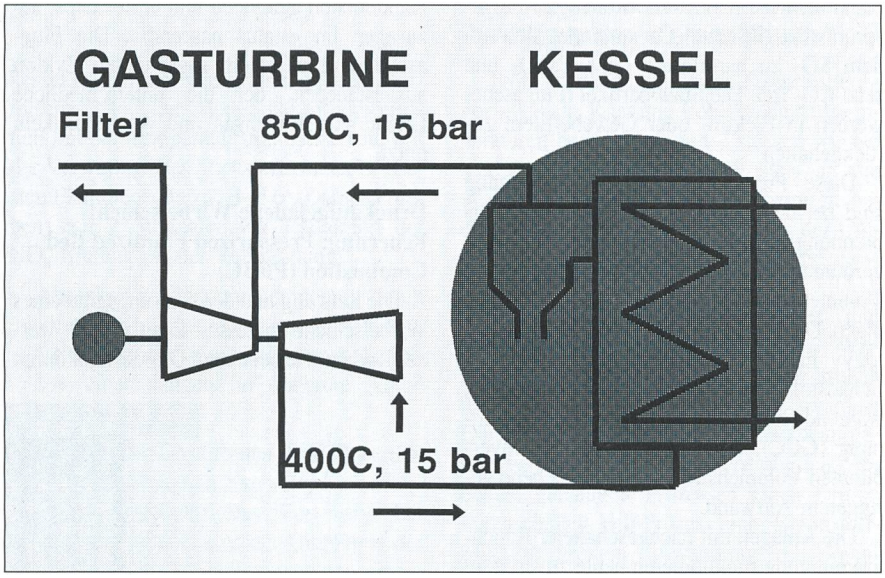

Bild 5 Durch «Aufladen» des Kessels mit dem Kompressor einer Gasturbine (wie beim Diesel) ergibt sich die Druckwirbelschicht-Feuerung. Sie wird dadurch kompakt und hat einen höheren Wirkungsgrad

Folgerung

Neue erneuerbare Energien können im überblickbaren Zeitraum von 20 bis 30 Jahren nur unbedeutende Beiträge zur Entlastung der Umwelt von Schadstoffen beitragen. Die Kernenergie ist in politische Fesseln gelegt, so dass auch ihr Beitrag zur Entlastung der Umwelt beschränkt ist. Hingegen können Wirkungsgradverbesserungen und Substitution von schadstoffreichen durch schadstoffarme fossile Brennstoffe schon jetzt beim Planen von Neuanlagen zum Teil auch für Nachrüstungen gewählt werden. Wir brauchen nicht auf grosse technologische Durchbrüche zu warten. Der Ausstoss von CO_2 – und damit proportional auch all der anderen Schadstoffe – kann bereits jetzt massgeblich reduziert werden.

Trotz allem bleibt, global gesehen, Kohle die wichtigste Primärenergiequelle für die Stromerzeugung. Deshalb wird im folgenden Kapitel auf die heute in Entwicklung stehenden technologischen Möglichkeiten zur Kohleverstromung im Detail eingegangen.

Zu erwähnen ist, dass nicht nur bei der Verstromung eine Substitutionstendenz in Richtung schadstoffarmer Energieträger auszumachen ist. Auch im Transportsektor, das heisst beim Fahrzeugverkehr, zeichnet sich diese Tendenz ab. Hier sind nur einige der erfolgsversprechenden Ersatzbrennstoffe genannt: Bioäthanol, Methanol, Erdgas, Raffineriegas und in Zukunft Wasserstoff.

Die «Clean Coal Technologies»

Die Erbauer von Kohlekraftwerken sprechen gerne von den Errungenschaften und dem Potential der «sauberen Kohletechnologien» («Clean Coal Technologies»). Damit meinen sie diejenigen Techniken der Kohleverbrennung, bei der ein Grossteil der Schadstoffe im Prozess selbst und nicht erst in den Rauchgasen entzogen wird. Die folgenden Techniken sind dazu geeignet:

- FBC = Fluidized Bed Combustion (Wirbelschicht-Feuerung)
- GCC = Gasification Combined Cycle (Kombi-Kraftwerk mit integrierter Kohlevergasung).

Stand der Technik der Kohleverstromung ist heute die Kohlestaubfeuerung (Bild 3). Die Stickoxide und das Schwefeldioxid können bei diesem Prozess in einer De-NO_x- und einer De-SO_x-Anlage dem Rauchgas entnommen werden. Zur Reduktion der Stickoxide wird Ammoniak (NH_3) in das Rauchgas eingedüst. Der Wasserstoff reduziert das NO_2 zu molekularem Stickstoff N_2 und

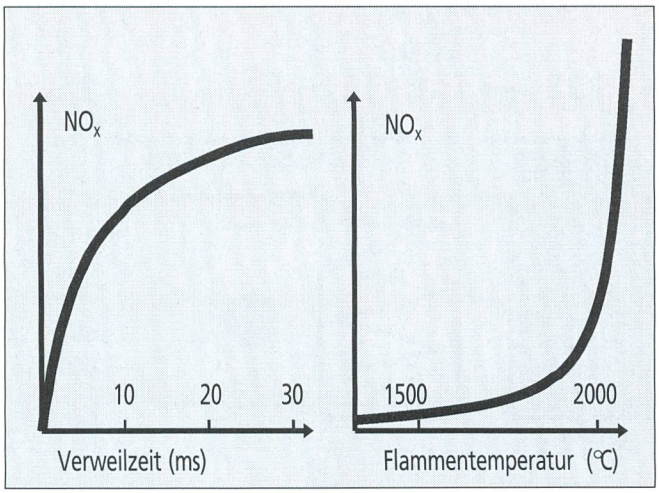

Bild 6 Unabhängig von der Art der Feuerung sind Temperatur und Verweilzeit die zwei wichtigsten Parameter in der Bildung von thermischem NO_x

Wasserdampf. In der De-SO_x(Rauchgas-Entschwefelung) -Anlage oder REA wird Kalkmilch ($CaCO_3$) ins Rauchgas eingesprüht. Das Kalcium Ca verbindet sich mit dem SO_2 zu harmlosem Gips $CaSO_4$ und setzt CO_2 frei. Die Staubpartikel (Flugasche) werden in Elektro- oder Gewebefiltern zurückgehalten.

Diese Prozesse der Rauchgasreinigung sind bei der Kohlestaubfeuerung dem Verbrennungsprozess nachgeschaltet. Die stark verdünnten Rauchgase, das heisst ein grosser Volumenstrom ist zu bearbeiten bzw. zu reinigen. Die Prozesse der «Clean Coal Technology» hingegen entfernen und binden die Schadstoffe in einem integrierten Prozess, während (FCB) oder sogar vor der Verbrennung (GCC), das heisst aus einem unverdünnten Volumenstrom mit entsprechend geringerem Aufwand.

Die Anlagen mit nachgeschalteter Rauchgasreinigung funktionieren heute zuverlässig und effektiv, erhöhen aber die Stromgestehungskosten um etwa einen Drittel. Neben dem apparativen Aufwand ergibt sich ein nennenswerter Verbrauch an Chemikalien Ammoniak und Kalk. Der Netto-Gesamtwirkungsgrad von Grossanlagen liegt etwa bei 42%.

Die Wirbelschicht-Feuerung: Fluidized Bed Combustion (FBC)

Ein Gemisch von gemahlener Kohle und Kalkstein wird dem Kessel beigegeben und bildet ein «Bett» (Bild 4). Die Verbrennungsluft wird durch Öffnungen im Kesselboden ins Bett eingeblasen. Die Strömung reisst die feinen Teile hoch wie ein Tornado den Sand vom Boden: es bildet sich ein «Staubwirbel»; das Bett wird «fluidisiert». Nachdem die Kohleteile entzündet sind, wird die entstehende Wärme direkt an den Dampf/Wasser-Kreislauf abgegeben, der den Kessel umschliesst. Im ganzen Kesselraum steigt damit die Temperatur nirgends über 850 °C, dadurch entsteht auch kein thermisches NO_x. Das aus der Verbrennung des Schwefels entstehende SO_2 wird sogleich an das nächste Kalkteilchen gebunden und ergibt Gips; sozusagen im «status nascendi». Die Flugasche wird in einem sogenannten Zyklon ausgeschieden, der die unterschiedliche Dichte von Rauchgas und Aschepartikeln nutzt.

Druckaufgeladene Wirbelschicht-Feuerung: Pressurized Fluidized Bed Combustion (PFBC)

Die Leistung und der Wirkungsgrad eines Wirbelschicht-Prozesses kann erhöht werden, indem wie bei einem Dieselmotor durch Aufladung (pressurizing) mit Turbolader die Verbrennung im Kessel unter erhöhtem Druck erfolgt. In diesem Fall spricht man von einer druckaufgeladenen Wirbelschichtfeuerung (Bild 5). Unter Berücksichtigung der integrierten Prozesse zur Reduktion von SO_2 und thermischem NO_x und der Ausscheidung der Flugasche erwartet man für grosse, druckaufgeladene Wirbelschichtfeuerung Nettowirkungsgrade um 43%.

Der Prozess kann entweder mit einem Kessel als Brennkammer zur Gasturbine oder die Gasturbine als Ladegruppe zum Kessel betrachtet werden. In jedem Fall wird durch den erhöhten Druck der Kessel kleiner; damit sinken die Investitionskosten.

Kohlevergasung-Kombianlage: Gasification Combined Cycle (GCC)

Noch konsequenter wird bei diesem Prozess versucht, die Schadstoffe bereits vor der Verbrennung zu entfernen. Dazu muss die Kohle in einem vorgeschalteten Prozess vergast werden. 10–15% der chemischen Energie der Kohle geht bei der Vergasung verloren. Wettgemacht wird dieser Verlust dadurch, dass das erzeugte Kohlegas in einem Kombi-Kraftwerk mit höchstem Wirkungsgrad verstromt werden kann. Man rechnet mit Wirkungsgraden um 44%.

Vergasung: Im ersten Prozessschritt wird die Kohle mit Wasserdampf und Sauerstoff zu Kohlenmonoxyd (CO) und Wasserstoff

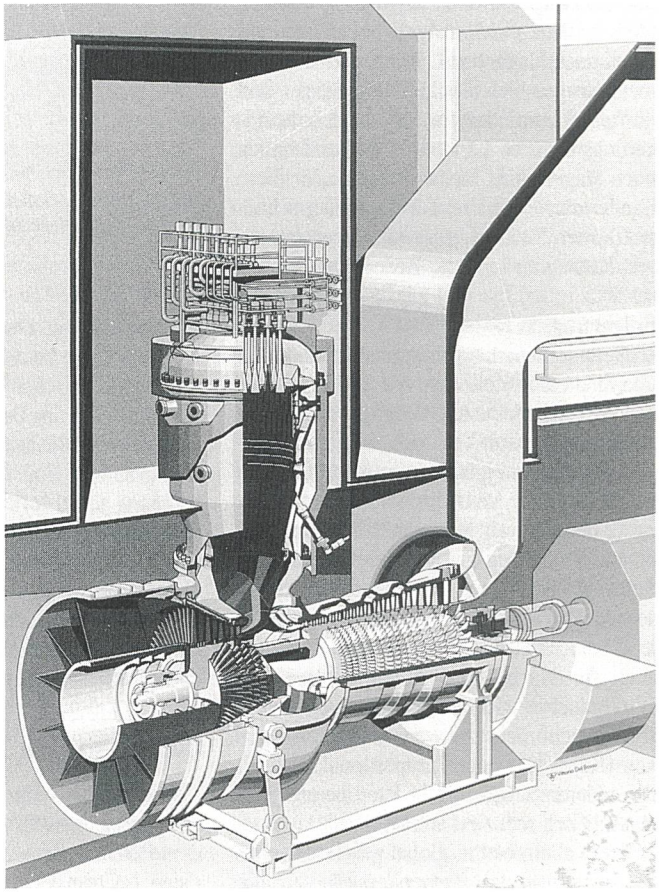

Bild 7 Verbrennung in Gasturbinen läuft mit fast doppeltem Luftüberschuss. Dadurch wird es möglich, den Brennstoff mit Luft zu «verdünnen». Das senkt die Flammentemperatur ab. Zudem wird in modernen Gasturbinen die Verbrennung auf viele kleine Flammen aufgeteilt. Das verkürzt die Verweilzeit. Beides zusammen führt zur «lean pre-mix»-Verbrennung mit NO_x-Werten unter 10 ppm (Bild ABB)

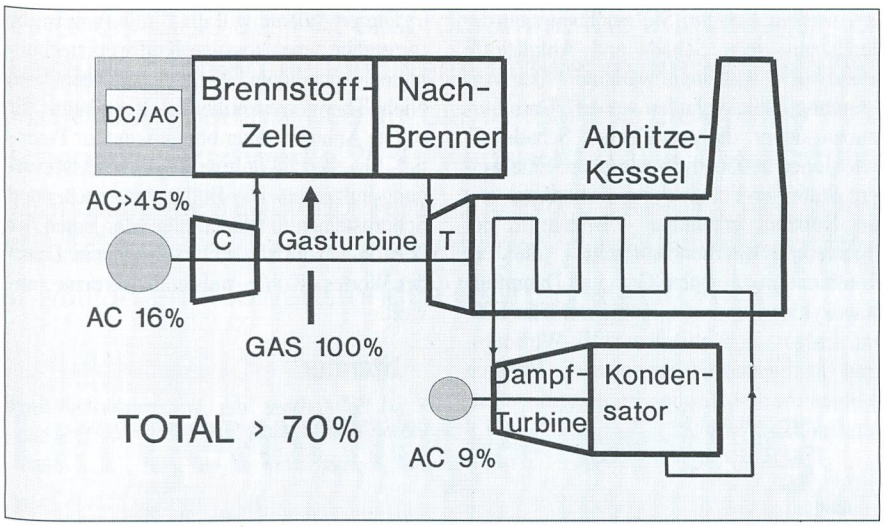

Bild 8 Dem in Bild 2 vorgestellten Kombi-Prozess kann nochmals ein Umwandlungsprozess vorgeschaltet werden, wenn einmal die Hochtemperatur-Brennstoffzellen ausgereift sind. Solche setzen die Brennstoff-Energie direkt in Elektrizität um, das heisst ohne den thermisch/mechanischen Umweg. Für solche «Triple-Kombi's» errechnet sich ein Nettowirkungsgrad von über 70%

(H_2) umgesetzt. Ein ganz besonderes Merkmal dabei ist die hohe Temperatur während der Vergasung (bis 1600°C), welche alle Asche zum Schmelzen bringt. Beim anschliessenden «Gefrieren» lagern sich auch die heute gefürchteten Schwermetalle in der glasähnlichen Schlacke ein und werden so vor dem Auslaugen geschützt. Die Schlacke ist volumenmässig wesentlich einfacher zu handhaben als die Entsorgung von Trockenasche oder auch Gips aus einer Rauchgas-Entschwefelungsanlage. Für die Umwandlung der Kohle in Gas gibt es verschiedene patentierte Verfahren. Die ältesten Anlagen gehen auf die Zeit vor dem Zweiten Weltkrieg zurück, als sie zur Herstellung von synthetischen Treibstoffen aus Kohle angewandt wurden.

Rohgas-Reinigung: Der Volumenstrom des Rohgases ist rund 100mal kleiner als der entsprechende Rauchgasstrom nach der Verbrennung in einem Kessel. Eine effizientere und umfassendere Reinigung ist deshalb möglich. Besonders geeignet ist zur Schonung vor erosiven Effekten der nachfolgenden Gasturbine – und auch der Umwelt – die Nasswäsche. In dieser werden die wasserlöslichen Verunreinigungen wie Cl, Na, K sowie der Feinststaub gebunden. Anschliessend wird der Schwefel, der im Brenngas als H_2S vorkommt, herausgelöst. Verschiedene Verfahren dazu sind in der Erdgas- und Petrochemie bekannt.

Verbrennung: Das gereinigte Gas ist nun ebenso sauber wie Erdgas. Bei der Verbrennung besteht daher nur noch eine letzte Forderung: möglichst geringe Mengen NO_x zu erzeugen.

Strategie zur NO_x-Minderung

Bei jeder Verbrennung, sei es im Holzfeuer in der Küche, im Automotor, Dampfkessel oder in der Gasturbine, entsteht thermisches NO_x. Die Menge nimmt exponentiell mit der Temperatur und abflachend mit der Verweilzeit des Stickstoffs in der heissesten Flammenzone zu (Bild 6). Daraus ergeben sich 2 Strategien zur Reduktion der NO_x-Bildung bei der Verbrennung:

- Absenken der Flammentemperatur durch «Verdünnen» des Brenngases.
- Verkürzen der Verweilzeit durch Aufteilen einer langen in mehrere kurze Flammen.

In modernen Gasturbinen (Bild 7) werden meist beide Strategien zum «Dry Low-NO_x-Brenner» kombiniert. Das Wort «dry» bedeutet, dass kein Wasser zur Absenkung der Temperatur im Verbrennungsraum eingedüst wird. Der Einsatz von Wasser und Dampf reduziert den Gesamtwirkungsgrad einer Anlage, da mit dem Rauchgas mehr Energie durch den Kamin in die Atmosphäre abgegeben wird. In den neuen Brennern der Gasturbinen wird dem Brenngas anstatt Dampf ein Teil der eigenen Verbrennungsluft zugemischt. Da die Verbrennung in einer Gasturbine ohnehin mit starkem Luftüberschuss (Lambda ungefähr 2) erfolgt, heisst diese Art Verbrennung «lean pre-mix combustion». Der Ausdruck erinnert an die Technik des «Magermotors».

Zu bemerken ist, dass in einem Kessel zur Wärmeübertragung an einen Wasser/Dampf-Kreislauf sich die Verhältnisse aus zwei Gründen von denen bei der Gasturbine unterscheiden:

- Kohle enthält immer auch gebundenen Stickstoff, der bei der Verbrennung ohne geeignete Gegenmassnahmen fast vollständig in NO umgesetzt wird.
- Lambda, der Luftüberschuss, ist nur wenig grösser als 1.

Die «lean pre-mix»-Strategie kann deshalb nicht angewendet werden. Im Gegenteil: Aus Rücksicht auf den in der Kohle gebundenen Stickstoff erfolgt die Verbrennung in einem Kessel meistens mit einem reichen Gemisch.

Realisierung solcher Anlagen

Im Betrieb sind weltweit einige Dutzend Anlagen mit Wirbelschicht-Verbrennung. Vier Anlagen des Typs druckaufgeladener Wirbelschicht-Verbrennung sind in Schweden, in Spanien und in den USA in Betrieb, und die Inbetriebnahme eines Kraftwerks in Japan steht kurz bevor. Im Bau sind auch zwei grosse GCC Demo-Kraftwerke (in Holland und in Deutschland) mit je über 250 MW elektrischer Leistung sowie mehrere kleinere Anlagen in den USA.

Ausblick ins nächste Jahrhundert: Durchstoss der «Carnot-Mauer»?

Trotz all den aufgeführten Fortschritten – vor allem in Richtung höherer Eintrittstemperaturen bei Gasturbinen – stossen wir bei Verbrennungsprozessen doch stets an die «Carnot-Mauer», der thermodynamisch bedingte maximale Wirkungsgrad bei der Umsetzung von Wärme in mechanische bzw. elektrische Energie.

Durch die Kombination von Gas- und Dampfturbinenprozessen kann der Wirkungsgrad einer Umwandlung von Wärme in mechanische Energie verbessert werden. Durch diese Kombination wird kein Naturgesetz verletzt. Es ist nun noch möglich, den beiden genannten Prozessen einen Dritten vorzuschalten, den Prozess einer Brennstoffzelle zur direkten Umwandlung von Brennstoff in elektrische Energie.

Heute werden verschiedene Typen von Brennstoffzellen entwickelt. Allen ist gemeinsam, dass chemische Energie direkt in Elektrizität umgesetzt wird, ohne den thermisch/mechanischen Zwischenweg beschreiten zu müssen. Prinzipiell handelt es sich bei diesen Prozessen um eine Umkehrung einer Elektrolyse. Beispielsweise wird aus Sauerstoff (O_2) und Wasserstoff (H_2) Wasser hergestellt. Auch andere «Brennstoffe», Erdgas oder Methanol sind geeignet, in Brennstoffzellen direkt in Elektrizität umgewandelt zu werden. Die Reaktion wird jeweils durch eine mit Katalysator und poröser Elektrode beschichtete Membrane, die als Elektrolyt (Ionenleiter) wirkt, kontrolliert. Je nach Typ werden verschiedene feste und flüssige Membranmaterialien eingesetzt, entsprechend sind Brennstoff- und Temperaturniveau ebenfalls verschieden. Brennstoffzellen auf Basis von Phosphorsäure (phosphoric acid), geschmolzener Karbonate (molten carbonate), fester Oxyde werden heute weltweit entwickelt.

Die beiden Typen von Hochtemperatur-Brennstoffzellen «Molten Carbonate Fuel Cell» (MCFC) und «Solid Oxyde Fuel Cell» (SOFC) erfüllen die Bedingung, dass das Energieniveau am Austritt höher ist als dasjenige am Eintritt der zweiten Stufe, hier der Gasturbine. In diesem Fall werden in der Brennstoffzelle die ersten 50% der Brennstoffenergie in Elektrizität umgesetzt. Die anderen 50% sind «Abwärme», die nochmals genutzt werden können und zwar, da diese bei 1200–1400 °C anfällt, in einem Kombikraftwerk mit einem Wirkungsgrad von mindestens nochmals 50%. Dies verdeutlicht, dass ein solcher Prozess zu rund 70% Netto-Brennstoffausnutzung führen kann. Dazu braucht es eine «aufgeladene» Brennstoffzelle, ähnlich dem Prozess der druckaufgeladenen Wirbelschichtverbrennung (Bild 8).

Basierend auf dieser Perspektive scheint es technisch möglich, innerhalb der nächsten anvisierten 30 Jahre, die Ausnutzung der Brennstoffe bei der Stromerzeugung zu verdoppeln. Bei gleichbleibendem Energiebedarf gelingt es dadurch, die resultierenden Schadstoffemissionen zu halbieren. Bei einer Verdoppelung des Energiebedarfs, wie er als Extremmodell vom Weltenergierat berechnet wurde, könnte damit ein beträchtlicher Beitrag geleistet werden, damit die Schadstoffemissionen sich nicht ebenfalls verdoppeln. Schon wegen der langen Lebensdauer von thermischen Kraftwerken (25–40 Jahre) wird es sicher noch bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts dauern, bis die Mehrheit der Energiewandlungssysteme durch Anlagen mit Wirkungsgraden von 70% ersetzt sind.

Zusammenfassung

Ein wesentlicher Anteil der Primärenergie wird heute und wohl auch in der Zukunft weltweit zur Stromerzeugung eingesetzt. Es scheint deshalb sinnvoll, die Entwicklung der Technologien zur Stromerzeugung voranzutreiben, allen voran die Technologien der Kohleverstromung. Stammt doch heute und wohl auf lange Zeit noch die erzeugte Elektrizität rund zur Hälfte aus Kohle. Kurz- und mittelfristig sind wir gezwungen, in den Worten von Theodor Boveri gesprochen, «das was wir schon tun, verbessern»: Hohe Wirkungsgrade und tiefe Emissionen durch vermehrten Einsatz der «Clean Coal Technologies» in Gas- und Dampfturbinenkraftwerken wurden erreicht. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass Schad- und Abfallstoffe schon vor – spätestens während – der Verbrennung zurückgehalten werden. Damit erlauben sie es, die spezifischen Schadstoffemissionen beträchtlich zu senken. Eine weitere Stufe der Entwicklung – allerdings erst am Horizont erkennbar – besteht in der Hochtemperatur-Brennstoffzelle, die in Kombination mit einem Gas- und Dampfturbinenzyklus verspricht, Kohle mit über 60% und Erdgas sogar mit über 70% Wirkungsgrad in Elektrizität umzusetzen. Dadurch nehmen die spezifischen Emissionen selbstverständlich weiter ab.

Dieser Aufsatz will als Einführung in die fortgeschrittenen fossilen Kraftwerkstechnologien auch dem Nicht-Spezialisten und Nicht-Thermodynamiker das Verständnis für solche Anlagen näher bringen und ihr Potential für die zukünftige Elektrizitätsversorgung aufzeigen. Die Bilder von rauchenden Schornsteinen in Manchester oder Essen der 20er Jahre, die vielleicht schon beim Lesen des Wortes «Kohle» auftreten, werden relativiert.

Literatur

[1] 15. Kongress des Weltenergierates. Draft Global Report, Madrid, September 1992

Energie et technologie: potentiel des technologies avancées

«Energia y vida – Energie et vie», tel était le thème général du dernier Congrès du Conseil mondial de l'énergie, qui a eu lieu en septembre dernier à Madrid. L'utilisation des divers agents énergétiques menace effectivement, et ceci de manière non négligeable, la vie sur notre terre, car des millions de tonnes d'ordures et de polluants produits chaque année par les centrales thermiques conventionnelles et les moteurs à combustion s'échappent dans l'atmosphère, s'introduisent dans les eaux ou s'infiltrent dans les sols. Afin de changer cette tendance, il faut non seulement utiliser de manière prudente et économe tous les agents et formes d'énergies, mais, en premier lieu, faire un meilleur usage de l'énergie utilisée.

Une part importante de l'énergie primaire sert actuellement dans le monde à produire de l'électricité; selon toute vraisemblance, il en sera de même à l'avenir. Il semble donc judicieux de pousser le développement des technologies de production d'électricité, dont en particulier les technologies de transformation du charbon en énergie électrique. Près de la moitié de l'électricité produite de nos jours est tirée du charbon. Parlant comme Theodor Boveri, nous sommes à court et à moyen terme tenus «d'améliorer ce que nous faisons déjà»: des rendements élevés et de faibles émissions de polluants obtenus grâce à une utilisation accrue des «clean coal technologies» dans les centrales fonctionnant aux turbines à gaz et turbines à vapeur – qui se distinguent par le fait que des polluants et des déchets sont déjà retenus avant (au plus tard pendant) la combustion – permettent de diminuer considérablement les émissions polluantes spécifiques. Un autre échelon prometteur du développement représente la pile à combustible à température élevée qui, combinée avec un cycle de turbine à gaz et de turbine à vapeur, promet de transformer du charbon et du gaz naturel en électricité avec un rendement respectif de plus de 60, voire de plus de 70%. Il est clair que les émissions spécifiques continueront par là à diminuer.

Cet article tient, à titre d'introduction aux technologies fossiles avancées, à sensibiliser le non-spécialiste et le non-thermodynamicien à de telles installations et à en montrer le potentiel pour le futur approvisionnement en électricité. Les images de cheminées fumantes des années vingt à Manchester ou Essen, qui peuvent éventuellement apparaître rien qu'en lisant le mot «charbon», sont relativisées.