

Wie haben sich die Wirkungsgrade der Kohlekraftwerke entwickelt und was ist künftig zu erwarten ?

von Hans-Dieter Schilling

e-mail: Hans-Dieter.Schilling@energie-fakten.de

Hier die Fakten - vereinfachte Kurzfassung

Die Stromerzeugung aus Kohle begann Ende des 19./Anfang des 20. Jahrhunderts. Die ersten Anlagen hatten einen Wirkungsgrad von 1 Prozent, d. h. es wurden 12,3 kg Kohle zur Herstellung einer elektrischen kWh verbraucht. Dies war gleichbedeutend mit einer Emission von 37 kg CO₂ je kWh.

Mit zunehmender technischer Erfahrung sowie Forschung und Entwicklung setzte bereits früh eine spürbare Erhöhung der Wirkungsgrade ein. Die Weiterentwicklung der Verbrennungstechnik, der Werkstoff- und Verfahrenstechnik ermöglichte in der Folgezeit eine ständige Erhöhung der Dampf-Parameter Druck und Temperatur und damit der Wirkungsgrade. In den 1910er Jahren wurde bereits ein Wirkungsgrad von 5 % erzielt, 1920 waren es bereits 20 %. Ab 1950 erbrachten Kraftwerks-Neubauten bereits Wirkungsgrade von 30%, wobei allerdings der Durchschnittswert aller Kraftwerke noch bei mäßigen 17 % lag. Durch die notwendig werdende Anwendung von Kühltürmen zur Abfuhr der nicht mehr in Strom umwandelbaren Wärme und später von Rauchgas-entschwefelungs- und

Stickoxidminderungsverfahren war zunächst ein Rückschlag der Wirkungsgrade zu verzeichnen, da diese Anlagen selbst auch Energie benötigen. Doch die ständige nachhaltige Weiterentwicklung führte bereits Mitte der achtziger Jahre zu einem Durchschnittswert aller in Betrieb befindlichen Kraftwerke von 38 % (323 g SKE) und zu Bestwerten von 43 %. In der zweiten Hälfte der neunziger Jahre erzielte ein dänisches Kraftwerk den Welt-Bestwert von 47 %.

Kraftwerke auf Braunkohlebasis haben wegen der andersartigen Eigenschaften der Braunkohle einen Wirkungsgrad, der um einige Prozent niedriger liegt als der von Steinkohlekraftwerken. Dennoch konnte die im Jahre 2002 ans Netz gegangene BoA-Anlage (Braunkohlekraftwerk mit optimierter Anlagentechnik) der RWE Power AG einen Netto-Wirkungsgrad von 45,3 Prozent erzielen, der höchste jemals von einem Braunkohlekraftwerk erreichte Wert.

Der durchschnittliche Wirkungsgrad aller Kohlekraftwerke der Welt beträgt z. Z. etwa 31 %. Somit steckt noch ein sehr hohes Entwicklungspoten-

zial zur Senkung des Kohleverbrauchs und der CO₂-Emissionen in dieser Technik.

In der Europäischen Union (E-15) bestehen für die nächsten 20 Jahre ein Zusatzbedarf an Kraftwerkskapazität von 100.000 und ein Ersatzbedarf von 200.000 MW. Deshalb ist eine erhebliche Weiterentwicklung der Kohlekraftwerkstechnik in Gange. Sie zielt in den nächsten 10 Jahren auf einen Wirkungsgrad bis zu 55 %. Dies würde einen spezifischen Kohleverbrauch von 223 g SKE je kWh bedeuten.

Weitere Entwicklungen verfolgen die Einführung von Gas- und Dampfturbinen (GuD)-Prozessen in die Kohlekraftwerkstechnik. Auch sie zielen auf Wirkungsgrade um 55 %.

Die heutigen und zukünftigen Wirkungsgrade von Kohlekraftwerken liegen bei vergleichbaren Bilanzgrenzen in der oberen Hälfte der Wirkungsgrade aller Stromerzeugungstechnologien.

Wie haben sich die Wirkungsgrade der Kohlekraftwerke entwickelt und was ist künftig zu erwarten ?

von von [Hans-Dieter Schilling](#)

e-mail: von Hans-Dieter.Schilling@energie-fakten.de

Hier die Fakten - Langfassung

Grundlegendes

Mit einem Anteil von 23 Prozent im Jahr 2002 gehört die Kohle (Stein- und Braunkohle) heute und künftig zu den wichtigsten Energieträgern der Menschheit. Verbraucht wurden 2002 rd. 3,4 Milliarden (Mrd.) Tonnen (t) Steinkohleneinheiten (SKE – siehe nebenstehender Kasten). Davon wurde der weitaus größte Teil (2,8 Mrd. t SKE) zur Erzeugung von 7000 Mrd. Kilowattstunden (kWh) Strom eingesetzt. Bei der vollkommenen Verbrennung von 1 t SKE entsteht eine Wärmemenge von 8.140 kWh.

Diese wird als "Verbrennungs"-Energie oder als „thermische“ Energie bezeichnet (Einheit: kWh(therm)). Sie enthält zu einem Teil technisch nutzbare Arbeitsenergie (Exergie); der übrige Energieanteil lässt sich aus naturgesetzlichen Gründen nicht in Arbeit umwandeln und wird als „Anergie“ bezeichnet. Diese Verbrennungsenergie wird mit einem Wirkungsgrad von über 90 % im Dampferzeuger des Kraftwerks auf Wasser übertragen. Dabei entsteht Wasserdampf. Die im Dampf enthaltene

Arbeitsenergie (Exergie) ist aus naturgesetzlichen Gründen umso größer, je höher seine thermodynamischen Parameter (Temperatur und Druck) sind. Er wird der Dampfturbine zugeleitet und versetzt die auf einer Welle angebrachte Turbine in eine Drehbewegung. Das ist physikalische Arbeit, die mit Hilfe der Turbine aus der Energie des Wasserdampfes gewonnen („extrahiert“) wurde. Der Turbine folgt auf derselben Welle ein Generator (Dynamo), der die auf diese Weise übernommene Drehbewegung in elektrische Energie (kWh(el)) umwandelt. Diese Energieart lässt sich mit Motoren fast vollständig (zu mehr als 98 %) in Arbeit umwandeln. Elektrische Energie ist deshalb im Gegensatz zu allen anderen Endenergieträgern fast reine Arbeitsenergie (Exergie). Die so erzeugte elektrische Kilowattstunde wird deshalb auch gelegentlich als „Arbeits-Kilowattstunde“ bezeichnet, um sie von der Wärme-Kilowattstunde zu unterscheiden (Leider werden in der öffentlichen Diskussion diese beiden völlig unterschiedlichen Ener-

giearten immer wieder verwechselt, was oft zu Missverständnissen und Fehlbeurteilungen führt. Noch größer wird die Verwirrung, wenn z. B. jede Form der Nutzenergie, wie z. B. die Wärmeenergie zur Gebäudeheizung als „Exergie“ bezeichnet wird. Dies ist nicht Ihre Definition.)

1 t SKE (SteinKohlenEinheit) definiert als 7 Gcal oder 29,31 GJ (Gigajoule) oder 8.140 Wärme-Kilowattstunden kWh(therm). Dies entspricht dem Energiegehalt einer Tonne (t) guter Steinkohle, 3 t Braunkohle, 0,7 t Mineralöl.

Die beim Extraktionsprozess „übriggebliebene“ Wärme hat durch den Entzug der Arbeitsenergie (Arbeitsfähigkeit) nur noch eine Temperatur von ca. 30 °C. Sie besitzt auch keinen Druck mehr. Deshalb ist sie so „schlapp“, dass sie nicht mehr in elektrische Energie umsetzbar ist. Sie ist „Abfall“ (Anergie), der im Allgemeinen über Kühltürme in die Atmosphäre entsorgt wird. Diese Entsorgung stellt keine Umweltbelastung dar, da die Abfallenergiemengen auch weltweit gegenüber den in der

LANGFASSUNG

Atmosphäre vorhandenen Energiemengen vernachlässigbar klein sind.

Die Höhe des Wirkungsgrades ist aus naturgesetzlichen Gründen empfindlich von dem Quotienten aus Eingangs- und Ausgangstemperaturen sowie -drücken des Dampfes an der Eingangs- und Ausgangsseite der Turbine abhängig. Niedrige Ausgangstemperaturen, die durch die Außenkühlung der Kondensatoren bestimmt werden, führen zu spürbar höheren Wirkungsgraden insbesondere bei kalter Witterung. Besonders groß ist dieser Effekt bei Direktkühlung (d. h. ohne Kühlturm) z. B. durch Meerwasser. (Siehe auch: [„Kühlwasser - warum benötigen Kraftwerke das?“](#) Und [„Abwäme: Kann man das Kühlwasser von Kraftwerken nutzen?“](#))

Die Entwicklung der Wirkungsgrade von den Anfängen bis heute

Im 19. Jahrhundert wurde Kohle zunächst vorwiegend zur Wärmeerzeugung im Wirtschaftssektor Haushalt und Kleinverbrauch sowie zunehmend in der Industrie zur Unterstützung und Steuerung chemischer Prozesse eingesetzt. Die Stromerzeugung setzte Ende des 19./Anfang des 20. Jahrhunderts ein. Damals verwendete man zunächst Dampfkolbenmotoren. Diese hatten einen Wirkungsgrad von rund 1 Prozent. Dies bedeutet, dass aus 1 t SKE Wärmeenergie 81,4 elektrische kWh erzeugt wurden. Oder: Es wurden 12,3 SKE Kohle zur Herstellung einer elektrischen kWh (kWh(el))

verbraucht. Die Verbrennung von 1 kg SKE ergibt knapp 3 kg Kohlendioxid (CO₂). Der Verbrauch von 1 kWh (el) war somit gleichbedeutend mit einer Emission von 37 kg CO₂. Dieses Gas ist ungiftig. Und: ohne CO₂ in der Atmosphäre wäre kein Leben auf der Erde möglich. Doch zuviel CO₂ gefährdet nach Ansicht vieler Klimatologen das Weltklima im Sinne einer Erwärmung.

Ziel der frühen Entwicklung der Stromerzeugungstechnik aus Kohle war naturgemäß deren Wirtschaftlichkeit. Ein bedeutendes Instrument dafür war die Erhöhung der Wirkungsgrade. Denn sie ist gleichbedeutend mit der Senkung der Kohleeinsatzmenge und damit auch der Erzeugungskosten je kWh. Von ebenso großer Bedeutung sind die damit geringeren Emissionen an Kohlendioxid, Schwefel- und Stickoxiden je kWh. Die Erhöhung der Wirkungsgrade dient somit dem Umweltschutz und der Wirtschaftlichkeit gleichermaßen.

Mit zunehmender technischer Erfahrung sowie Forschung und Entwicklung (F&E) setzte insbesondere in Deutschland bereits früh eine spürbare Erhöhung der Wirkungsgrade ein. Eine Vielzahl von neuen Erkenntnissen und technischen Entwicklungen führte zu einer Verbesserung fast aller Komponenten eines Kraftwerks. Die ständige Verbesserung der Verbrennungstechniken, der Zeitstandeigenschaften neuer und weiterentwickelter Werkstoffe (Die Grundlastkraftwerke arbeiten rd. 8000 Std./a, Mittellastkraftwerke zw. 2000 und 4000 Std. Dabei sind hohe

Beanspruchungen z. B. durch CO-Korrosion, Verzunderung, Druck- und Temperaturwechsel u. v. a. extreme Beanspruchungen zu beherrschen. Die Werkstoffe müssen unter diesen Beanspruchungen den aggressiven Gasen und dem heißen und unter hohem Druck stehenden aggressiven Dampf mindestens einer Zeit von 100 000 Stunden standhalten (1 Jahr hat 8760 Std.), damit es nicht zu ständigen und ungeplanten, meist langfristigen und teuren Stillständen kommt, die dann wg. der Nichterfüllung von Lieferverträgen zu hohen Pönalen führen. (Die Werkstoffe müssen „100 000-Stunden-Werte“ erfüllen. Dafür bedarf es teilweise langjähriger Werkstoff-Tests unter Betriebsbedingungen.)

Wirkungsgrad η (Eta):

η = Produzierte Strommenge dividiert durch eingesetzte Energiemenge z. B.: Werden aus 1 t SKE 3100 kWh(el) produziert, so beträgt der Wirkungsgrad:
 $\eta = 3100 \text{ kWh(el)} / 8140 \text{ kWh(therm)} = 0,381$ entsprechend 38,1%

Nur so wurde eine Erhöhung der Dampf-Parameter und damit ein höherer Exergiegehalt (Gehalt an Arbeitskilowattstunden) des Wasserdampfes möglich. Dies sowie die Zwischenüberhitzung (Teilrückführung des Dampfes nach Exergieextraktion von der Turbine in den Dampferzeuger zur nochmaligen Aufheizung) des Dampfes u. a. sind bedeutende Marksteine zur ständigen Erhöhung des Wirkungsgrades. Hinzu kommen die Vergrößerung der Anlagen und damit die Vergrößerung der Feuerräume mit der Verlängerung der Brenn-

LANGFASSUNG

wege, die eine effizientere Verbrennung der Kohle ermöglichen. Eine effizientere Vorwärmung des Speisewassers durch Nutzung von Abwärme und von (Anzapf-)Dampf aus der Dampfturbine, aber auch die Reduzierung von Wärmeverlusten z. B. durch die Wände der Dampferzeuger nach außen, trug maßgeblich zur weiteren Erhöhung der Wirkungsgrade bei. Die wirksamste Maßnahme blieb aber die ständige Erhöhung der Dampfparameter. Um die 1910er Jahre lagen die Dampfparameter bereits bei 13 bar und 275 °C. Sie ermöglichten einen Wirkungsgrad von 5 %, und somit eine fünfmal bessere Kohlenutzung. Anfang der 1920er Jahre wurden Dampfparameter von 36 bar und 450 °C ($\eta = 20\%$) möglich. Die weitere Entwicklung bis 1950 erbrachte bei den Kraftwerks-Neubauten 150 - 180 bar und 510 bis 540 °C und führte zu einem Wirkungsgrad von 30 Prozent. Der spezifische Kohleverbrauch betrug nur noch 728 Gramm SKE je kWh). Doch der Durchschnittswert aller Kraftwerke lag noch bei mäßigen 17 %. Die Effizienz der Kohleausnutzung erhöhte sich in den folgenden Jahrzehnten weiter. Abgebremst wurde die Entwicklung durch die Notwendigkeit des Einsatzes von Kühltürmen sowie durch den Einbau energieverzehrender Anlagen zur Entschwefelung und Reduzierung der Stickoxide in den Rauchgasen (generelle Wirkungsgradminderung etwa 2-4 Prozentpunkte). Mitte der 1980er Jahre war man jedoch bei Bestwerten von ca. 43 % angekommen (260 bar, rd. 540 °C). Der

Durchschnittswert aller Anlagen lag damals bei ca. 38 Prozent (323 g SKE/kWh). Damit war der spezifische Steinkohleverbrauch innerhalb von 80 Jahren um den Faktor 38 gesunken. Seither ist der durchschnittliche Wirkungsgrad durch Stilllegung älterer Anlagen noch etwas gestiegen. Ein in Dänemark mit neuesten Erkenntnissen an der Küste gebautes Steinkohlekraftwerk, das in der zweiten Hälfte der 90er Jahre in Betrieb ging, erzielte damals mit Direktkühlung mit Meerwasser den Weltbestwert von 47 %.

Der Wirkungsgrad von Braunkohlekraftwerken liegt einige Prozentpunkte unter denen von Steinkohlekraftwerken. Gründe sind die andersartigen Eigenschaften der Braunkohle (der höhere Wassergehalt der Braunkohle erfordert mehr Energie für die Trocknung bis auf 18 % Wassergehalt. Für dessen Verdampfung bei der Verbrennung wird wegen der wasserspezifisch hohen Verdampfungsenergie ein vergleichsweise hoher exergetischer Anteil des heißen Verbrennungsgases verbraucht und gelangt nicht mehr in den Turbinendampf. Der Wasserdampfgehalt des entstandenen Verbrennungsgases der Braunkohle ist deshalb größer als bei Steinkohle. Dies sowie die Tatsache, dass ca. 3 Tonnen Braunkohle einer Tonne SKE entsprechen, führt zu einem höheren Abgasvolumen, so dass bei vergleichbarer Abgastemperatur mehr Energie mit diesen größeren Abgasmengen über den Kamin abgeführt wird. Das weltweit beste und größte Braunkohlenkraftwerk „BoA“ (Braunkohlekraftwerk mit opti-

mierter Anlagentechnik) der RWE Power AG mit einer Bruttoleistung von über 1.000 MW(El), das 2002 ans Netz ging, erzielt einen Wirkungsgrad von netto (nach Abzug des Eigenverbrauchs des Kraftwerks für die dortigen Hilfsanlagen, Beleuchtung etc.) 45,3 %. In nachfolgenden neuen Anlagen ist beabsichtigt, vor dem Einsatz das noch in der Braunkohle enthaltene Wasser mit exergiearmer Abwärme in einem Spezialverfahren zu verdampfen. Bei erfolgreicher Entwicklung wird dies zu einer weiteren spürbaren Erhöhung des Wirkungsgrades führen.

Der durchschnittliche Wirkungsgrad aller Kohlekraftwerke der Welt beträgt z. Zt. etwa (mäßige) 31 %. In vielen Regionen der Welt bestehen deshalb noch erhebliche Entwicklungspotentiale zur Erhöhung der Wirkungsgrade und zur Senkung der Emissionen.

Sind weitere Steigerungen des Wirkungsgrades möglich?

In Deutschland muss aus Altersgründen zwischen 2010 und 2030 eine Kraftwerkskapazität von etwa 40.000 MW ersetzt werden. In der Europäischen Union (mit den bisherigen 15 Mitgliedstaaten: EU-15) besteht ein Zusatzbedarf von 100.000 und ein Ersatzbedarf von 200.000 MW. Außerdem müssen in Deutschland die Kernkraftwerke mit einer Kapazität von ca. 21.000 MW ersetzt werden (wenn sie denn tatsächlich alle stillgelegt werden). Windräder oder Fotovoltaik-Anlagen sind dazu weder ökonomisch noch ökologisch in der Lage; hinzu

kommt ihre Unplanbarkeit der Stromproduktion, die sie für eine zuverlässige Stromversorgung der Sektoren Haushalt und Kleinverbrauch, Industrie sowie Verkehr (Schienenbahnen), von Ausnahmen vielleicht abgesehen, großflächig leider unbrauchbar macht. Auch Wasserstoff, an sich ein hervorragender Brennstoff, kommt wegen des außerordentlich niedrigen Gesamtwirkungsgrades seiner Herstellungs- und Anwendungskette großtechnisch für die Stromversorgung - auch mittelfristig - nicht in Betracht. Er kommt in der Natur nur chemisch gebunden vor (z. B. im Wasser, aber auch in Erdgas, Mineralöl und Kohle) und muss unter hohem Exergieaufwand (geringem Wirkungsgrad) mit zusätzlichen Verlusten und zu hohen Kosten erst gewonnen werden. Die EURELECTRIC, Wirtschaftsverband europäischer Stromversorgungsunternehmen, setzt auf einen erheblichen zusätzlichen Beitrag von Erdgas. Doch sind die Erdgaspreise vergleichsweise hoch und die Stromerzeugungskosten ebenfalls höher als bei Kern- und Kohlekraftwerken. Außerdem werden in verschiedenen Ländern erhebliche wirtschaftliche Risiken durch starke Preisschwankungen des Erdgases gesehen. So wird in Deutschland u.a. auch auf einen verstärkten Einsatz von Kohle gesetzt.

In der EU-15 wurde von der [VGB PowerTech](#), dem internationalen technischen Verband der Kraftwerksbetreiber, unter der Bezeichnung „E max“ eine konzertierte Initiative begonnen, die Wirkungsgrade bis zu Beginn

des nächsten Jahrzehnts nachhaltig weiter zu erhöhen:

- 1998 wurde das Verbundprojekt KOMET 650 begonnen (Kraftwerks-Optionen: Material- und Messtechnik-Entwicklungen und ihr Test unter Betriebsbedingungen). Ziel ist die Erhöhung der Dampfparameter auf eine Temperatur von 650 °C und einen Druck von über 280 bar. Dadurch könnte ein Wirkungsgrad von über 47 % erreicht werden. Die Tests der 14 Einzelprojekte sind erfolgreich abgeschlossen. Geplant ist ein Referenzkraftwerk in Nordrhein-Westfalen von 400 MW.

deutschen Bundesministeriums für Arbeit und Wirtschaft zielt auf ein „emissionsfreies“ Kohlekraftwerk (d. h. ein sehr emissionsarmes, da ein Kohlekraftwerk ohne jegliche Schadstoff-Emissionen wegen chemischer Vorgänge nicht möglich ist). Was das Kohlendioxid betrifft, so werden zwar Techniken der Abtrennung erprobt, es ist aber noch völlig unklar, wie das Problem der sicheren Endlagerung der riesigen Mengen (mindestens dreifach höher als die Kohlemengen) bewältigt werden könnte)). Die Machbarkeit wird z. Zt. mit Hilfe der Industrie und zwei einschlägigen

	η (%)	g SKE/kWh	g CO ₂ /kWh
China/Russland	23	534	1.600
Welt	31	396	1.188
Deutschland	38	323	969
Künftige Technik	55	223	669
Langfristig	60-65	205-189	612-567

Tabelle: Durchschnittliche Wirkungsgrade, spezifischer Kohleverbrauch, CO₂-Emissionen

- Das Projekt „Advanced 700 °C Power Plant (AD 700)“, von der dänischen Kraftwirtschaft begonnen, zielt auf Dampfparameter von 700 °C und 350 bar. Angestrebt wird ein Wirkungsgrad von 55 %. Die Definitionsphase wurde 2002 abgeschlossen. Die Testphase hat unter Mitwirkung von 35 Planungs-, Hersteller- und Betreiberunternehmen sowie F&E-Institutionen Europas im Jahre 2002 begonnen. Bis zum Jahr 2005 sollen die Ergebnisse für ein Demonstrationskraftwerk mit einer el. Leistung von 400 MW vorliegen.
- Die Initiative COORETEC (CO₂-Reduktions-Technologien) des

Hochschulinstituten untersucht. Parallele Untersuchungen werden in den USA betrieben.

Andere Optionen sind verschiedene Varianten der Kombination von Kohlevergasung und nachgeschaltetem Gas- und Dampfturbinen - Kraftwerk (GuD - Kraftwerk), um die Vorteile der Gasturbine zusätzlich im Gesamtprozess zu nutzen. (Das sind Kraftwerke mit gekoppelten Gas- und Dampfturbinen i. a. auf Erdgasbasis, in denen die eingesetzte Energie durch die gewissermaßen komplementären Gas- und Dampfparameter besser ausgenutzt werden kann. Dabei kommen die Umstände

entgegen, dass es sich bei Erdgas um einen reinen Brennstoff handelt (der Eigenbedarf des GuD-Kraftwerks an Exergie ist deshalb wesentlich geringer). Außerdem steht das Gas bereits von vorn herein unter Druck an; somit bringt es bereits einen zusätzlichen Exergiegehalt mit, der der thermischen Energie des Gases nicht zuzurechnen ist.)

Großversuche dieser Art wurden 1968 in Deutschland begonnen und sind heute international im Gange. Dabei hat sich bisher die Kombination der beiden verfahrensfremden Technologien der Kohlevergasung (mit Dampferzeugung) und der Kohleverbrennung als nachteilig erwiesen. Denn es handelt sich um zwei technologisch-strukturell verschiedene Anlagenkonzepte z. B. mit unterschiedlichem Teillastverhalten. Außerdem hat die Kohlevergasung naturgemäß einen Wirkungsgrad, der deutlich unter 100% liegt. D. h., die Eingangsenergie in das GuD - Kraftwerk ist deutlich geringer als bei dem oben behandelten Kohlekraftwerk. Die damit verbundene Wirkungsgradminderung muss zunächst durch den GuD - Prozess erst wieder „herausgeholt“ werden. Dazu bedarf es zusätzlicher technischer Maßnahmen. Es hat sich jedoch bisher gezeigt, dass mit dem zuverlässigen und vergleichsweise einfachen Dampfprozess vergleichbare Wirkungsgrade erzielt werden konnten. Dennoch erscheinen auch diese weitreichenden Konzepte langfristig noch so reizvoll, dass eine Weiterentwicklung durchaus von Interesse ist.

Versucht wird auch die direkte Kombination mit der Kohle-Druckverbrennung. Dabei wird Kohle unter hohem Druck verbrannt und nach einer Hochtemperatur - Reinigung von Staub- und flüssigen Schlackepartikeln und anderen für die Turbinenschaufeln schädlichen chemischen Verbindungen mit einer Gasturbine und nachfolgendem Dampfkraftwerk zur Nutzung der noch heißen Abgase der Gasturbine zugeführt. Technisch problematisch ist u. a. die notwendige Abscheidung der dampfförmigen und festen mineralischen Bestandteile des Verbrennungsgases unter hohem Druck und hoher Temperatur sowie die Verschmutzung und Erosion der Gasturbinenschaufeln z. B. durch nicht abgeschiedene Asche- und Schlackebestandteile. Die Experimente befinden sich in den Anfängen. Die sehr aufwendige Entwicklung könnte langfristig in die Nähe von Wirkungsgraden von nahezu 60 % führen, die mit GuD-Anlagen auf Erdgasbasis heute bereits möglich sind.

Fazit:

Es erscheint machbar, bis zum Beginn des notwendigen Ersatzes und Zubaus von Kohlekraftwerken modernste Konzepte mit Wirkungsgraden bis zu 55% zur Verfügung zu haben

Die heutigen und zukünftigen Wirkungsgrade von Kohlekraftwerken liegen bei vergleichbaren Bilanzgrenzen im oberen Bereich der Wirkungsgrade aller Stromerzeugungstechnologien.

Zusatz:

Es wird oft gefragt, weshalb die restlichen 45 % nicht in Strom umgewandelt werden können. Dies hat naturgesetzliche Gründe: Der absolute, auf die Gesamtenergie des Dampfes bezogene Grenzwirkungsgrad, der nicht überschritten werden kann, ist der sog. „Carnot - Wirkungsgrad“. Er liegt bei einer Turbineneintrittstemperatur von 600 °C und entsprechendem Druck bei 67 %. Bezieht man ihn auf den Exergiegehalt des Dampfes, liegt er bei etwa 94 %. Doch auch die Verbrennung hat einen Wirkungsgrad, der unter 100 % (ca. 95 %) liegt. Die Übertragung der Verbrennungswärme im Dampferzeuger liegt z. B. bei ca. 96 %. Die Strömungsverluste durch äußere und innere Reibung können etwa bei 5 % liegen (Wirkungsgrad: 95 %). Generatorwirkungsgrad etwa durchschnittlich: 98 %. Usw.

Der Gesamtwirkungsgrad ergibt sich durch Multiplikation der Einzelwirkungsgrade aller Einzelkomponenten. Allein bei den genannten ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von $0,67 \times 0,94 \times 0,95 \times 0,96 \times 0,95 \times 0,98 = 0,535$ entsprechend 53,5 %.

Dabei sind noch nicht einmal alle Komponenten-Wirkungsgrade berücksichtigt. Abzuziehen ist ferner der Eigenbedarf an Exergie (Strom) für die Motoren der Kohlemühlen, Pumpen, Gebläse usw. Der konkrete Wirkungsgrad (netto) liegt etwa zwischen 40 und 45 %. Dauernde Lastveränderungen, d. h. z. B. Anpassungen an den schwankenden Bedarf, An- und Abfahren

usw. senken den Wirkungsgrad (ähnlich wie bei einem Kraftwagen: Andauernde Laständerungen, wie sie bei Stadtfahrten notwendig sind, führen zu erhöhtem Kraftstoffbedarf und damit zu einer erheblichen Senkung des Wirkungsgrades. Grundlastbedingungen, wie sie

etwa auf der Autobahn bestehen (weniger Laständerungen), senken den Kraftstoffverbrauch erheblich und erhöhen damit den Wirkungsgrad.) Die zunehmenden Schwankungen durch die Einspeisung der unberechenbaren Windenergie werden zunehmend auch zu vermehrten

Lastschwankungen in den Kraftwerken führen, wodurch deren Wirkungsgrad sinkt. Damit bekommen der Kohleverbrauch und die CO₂-Emissionen steigende Tendenz. ■