

Warum ist der elektrische Wirkungsgrad von Kernkraftwerken in der Regel niedriger als der von Kohlekraftwerken ?

von Eberhard Wagner

e-mail Eberhard.Wagner@energie-fakten.de

Hier die Fakten - vereinfachte Kurzfassung

Sowohl Kernkraftwerke als auch Kohlekraftwerke sind Wärmekraftwerke. In ihnen wird zunächst Wärme erzeugt - in den Kohlekraftwerken durch Verbrennung, in den Kernkraftwerken durch Kernspaltungen. Die Wärme in Form von Wasserdampf wird dann in Turbinen in mechanische Arbeit (Energie) und danach in Generatoren in Strom umgewandelt. Der sog. elektrische Wirkungsgrad von Kraftwerken ist ein Maß für die Güte der Energieumwandlung. Er ist das Verhältnis aus der Ziel-Energiemenge, also Elektrizität, und der eingebrachten Energiemenge in Form von Brennstoff. Der Wert ist immer kleiner als Eins bzw. 100 Prozent (%).

Der theoretisch erreichbare höchstmögliche Wirkungsgrad eines Wärmekraftwerkes ergibt sich grundsätzlich aus dem Verhältnis aus der Temperaturdifferenz des Dampfes - Anfangstemperatur minus Endtemperatur an einer Dampfturbine - und der Dampftemperatur am Eingang in die Turbine; gemessen im absoluten Temperaturmaß

„Kelvin“. Der erreichbare Wirkungsgrad hängt entscheidend von der höchsten realisierbaren Dampftemperatur ab.

Der Bau von Dampfmaschinen, Dampfturbinen und auch Gasturbinen war seit Anbeginn von einem fortwährenden Ingenieur-Kampf um höhere Temperaturen und Drücke und damit höhere Wirkungsgrade (anfangs betragen diese nur rd. 3 %) begleitet. Dieses Bemühen ist nicht abgeschlossen. Höhere Temperaturen setzen hochwärmefeste Materialien voraus. Letztlich werden die Kraftwerks-Daten (Auslegung) aus einer wirtschaftlichen Gesamtoptimierung festgelegt.

Bei neuen Kohlekraftwerken werden derzeit höchste Dampftemperaturen von etwa 600 Grad Celsius erreicht. Damit können reale Wirkungsgrade von etwa 45 % erzielt werden. Im Durchschnitt erreichen alle fossil befeuerten thermischen Kraftwerke in Deutschland einen Wirkungsgrad von derzeit fast 41 %.

Bei Kernkraftwerken kommt eine Besonderheit hinzu. Die Materialien im Bereich des

Reaktorkerns sind den Belastungen durch ionisierende Strahlen ausgesetzt. Vor allem zur Erleichterung der Kettenreaktion (Kernspaltung) sollen nur möglichst wenige Neutronen „eingefangen“ werden. Diese Bedingungen führen zu einer Begrenzung der höchsten Dampftemperatur. Die Leichtwasserreaktoren (alle deutschen Kernkraftwerke arbeiten nach diesem Prinzip) haben eine Dampftemperatur am Turbineneintritt von etwa 330 Grad Celsius; es werden Wirkungsgrade von etwa 35 % erzielt. Kernkraftwerke haben deshalb in der Regel einen niedrigeren Wirkungsgrad als Kohlekraftwerke, eben weil sich beim derzeitigen Stand der Technik bei ihnen ein gesamtwirtschaftliches Optimum bei niedrigeren Dampftemperaturen ergibt.

Mit Demonstrations-Kernkraftwerken wurde nachgewiesen, dass eine Weiterentwicklung der Technik in Richtung auf höhere Wirkungsgrade – neben der Sicherheitstechnik – durchaus möglich wäre.

Warum ist der elektrische Wirkungsgrad von Kernkraftwerken in der Regel niedriger als der von Kohlekraftwerken ?

von Eberhard Wagner

e-mail Eberhard.Wagner@energie-fakten.de

Hier die Fakten - Langfassung

Kernkraftwerke und Kohlekraftwerke sind Wärmekraftwerke. In ihnen wird zunächst Wärme erzeugt – in den Kohlekraftwerken durch Verbrennung, in den Kernkraftwerken durch Kernspaltungen. Die Wärme in Form von Wasserdampf wird dann in Turbinen in mechanische Arbeit (Energie) und danach in Generatoren in Strom umgewandelt. Die Energieumwandlungen erfolgen nach thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten (Physik). Der Wirkungsgrad als ein Maß für die Güte der Energieumwandlung ist das Verhältnis aus der Ziel-Energiemenge (Elektrizität) und der eingebrachten Energiemenge (Brennstoff). **Der Wert ist immer kleiner als Eins bzw. 100 Prozent (%).** Der Wirkungsgrad wird üblicherweise mit dem griechischen Buchstaben η (Eta) bezeichnet.

Die Unerreichbarkeit eines Wirkungsgrades von 100 % ist nicht nur eine Folge von in der Praxis unvermeidbaren Verlusten (z. B. durch Reibung), sondern auch eine Folge der physikalischen Grundtatsache, dass nicht

alle Energieformen vollständig ineinander umgewandelt werden können. Das gilt besonders für die Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Arbeit mit Wirkungsgraden deutlich unter 100 %. Im Unterschied dazu kann die Umwandlung von mechanischer Arbeit in Strom mit sehr hohen Wirkungsgraden (nahe 100 %) erfolgen.

Wärmekraftwerke haben deshalb immer Wirkungsgrade von wesentlich unter 100 %.

Der theoretisch erreichbare höchstmögliche Wirkungsgrad eines Wärmekraftwerkes ergibt sich grundsätzlich aus dem Verhältnis aus der Temperaturdifferenz des Dampfes – Anfangstemperatur minus Endtemperatur an einer Dampfturbine - und der Dampftemperatur am Eingang in die Turbine; gemessen im absoluten Temperaturmaß „Kelvin“. Dieser theoretisch ermittelbare Wirkungsgrad wird in der Fachsprache auch „Carnot-Wirkungsgrad“ genannt. In der Realität wird dieser Wert um die bei technischen Vorgängen immer auftretenden vielfältigen

Verluste (z. B. Reibung, Wärmeabstrahlung, unvollständige Verbrennung) vermindert.

Für das Braunkohle-Kraftwerk Niederaußem (Inbetriebnahme 2002) in der Nähe von Aachen ergibt sich beispielhaft:

T_{oben} = Dampf-Eintrittstemperatur 580 Grad Celsius,
 T_{unten} = Dampf-Austrittstemperatur 20 Grad Celsius,
Umrechnung mit 0 Grad Celsius = etwa 273 Kelvin (absolutes Temperaturmaß)

$$\begin{aligned}\eta_{\text{Carnot}} &= (T_{\text{oben}} - T_{\text{unten}}) / T_{\text{oben}} \\ &= ((580 + 273) - (20 + 273)) \\ &\quad / (580 + 273) \\ &= 0,657 = 65,7 \text{ \%}.\end{aligned}$$

Der Dampfdruck der Anlage beträgt 252 bar. Der real erzielbare elektrische Wirkungsgrad dieses Kraftwerkes beträgt etwa 43 %. Das sind etwa 2/3 des theoretisch möglichen Maximalwertes.

Die „Nachfolge Projekte“ des Kraftwerks Niederaußem werden mit höheren Dampftemperaturen und mit höheren Dampfdrücken auch höhere Wirkungsgrade erreichen.

LANGFASSUNG

Das Steinkohlekraftwerk Walsum (Inbetriebnahme 2010) arbeitet mit einer Dampftemperatur von 600 °C und einem Dampfdruck von 274 bar. Es wird ein Wirkungsgrad von etwa 45 % erzielt.

Im Durchschnitt erreichen alle fossil befeuerten thermischen Kraftwerke in Deutschland einen Wirkungsgrad von derzeit fast 41 %. (Siehe AG-Energiebilanzen.de)

Wie dargelegt, hängt der erreichbare Wirkungsgrad entscheidend von der höchsten realisierbaren Dampftemperatur ab.

Der Bau von Dampfmaschinen, Dampfturbinen und auch Gasturbinen war seit Anbeginn von einem fortwährenden Ingenieur-Kampf um höhere Dampftemperaturen und höhere Dampf-Drücke und damit höhere Wirkungsgrade (anfangs betrug diese nur rd. 3 %) begleitet. Dieses Bemühen ist nicht abgeschlossen. Höhere Temperaturen setzen hochwärmefeste Materialien (hoch legierte Stähle, die nicht einfach zu verarbeiten und natürlich auch sehr teuer sind) voraus. Letztlich werden die Kraftwerks-Daten (Auslegung) aus einer wirtschaftlichen Gesamtoptimierung festgelegt.

Kernkraftwerke

Bei Kernkraftwerken ist das vom Prinzip her natürlich gleich. Als Besonderheit kommt hier dazu, dass die Materialien im Bereich des Reaktorkerns auch den Belastungen durch ionisierende Strahlen ausgesetzt sind und vor allem zur Erleichterung der Kettenreaktion (Kernspaltung)

nur möglichst wenige Neutronen „einfangen“ dürfen. Die Gesamtoptimierung ergibt bei Leichtwasserreaktoren (alle deutschen Kernkraftwerke arbeiten nach diesem Prinzip) eine Dampftemperatur am Turbineneintritt von etwa 330 Grad Celsius. Nach der gleichen Rechnung wie oben beträgt dann der theoretisch maximal erreichbare Wirkungsgrad etwa 51%. In deutschen Kernkraftwerken wird derzeit ein Wirkungsgrad von etwa 35 Prozent erzielt.

Mit anderen Kernkraftwerks-Konzepten hat man versucht, die genannte Dampftemperatur zu erhöhen. Zu nennen sind:

Im Demonstrations-Kernkraftwerk Lingen (Emsland, Betrieb von 1968 bis 1976) wurde durch eine fossil befeuerte zusätzliche Aufheizung des Reaktordampfes angestrebt, einen höheren Gesamtwirkungsgrad zu erreichen. Gleiches wurde im „Heißdampfreaktor“ in Großwelzheim (bei Frankfurt am Main) mit einer nuklearen Nachheizung (Rückführung des Dampfes in den Reaktorkern zur weiteren Aufheizung) angestrebt. Der Betrieb wurde 1971 eingestellt; die totale Beseitigung der Anlage wurde 1998 mit der Herstellung der „Grünen Wiese“ abgeschlossen. Beide Techniken wurden aus Kostengründen nicht weiter verfolgt.

Eine andere in Deutschland erprobte Technik, zu hohen Dampftemperaturen zu gelangen, ist der sog. Hochtemperatur-Reaktor. Dabei wurde zur Wärmeabfuhr Helium verwendet, dessen Betriebstemperatur über 700 Grad Celsius betrug. Der anschließend erzeugte Wasser-

dampf zum Betrieb einer konventionellen Dampfturbine hatte eine Temperatur von über 550 Grad Celsius. Der Leistungsbetrieb dieses Demonstrationskraftwerks in Hamm-Uentrop (THTR - Leistung 300 MW) wurde aus vorwiegend politischen Gründen nach drei Jahren 1988 eingestellt. Der Wirkungsgrad betrug 40 Prozent. Hochtemperatur-Reaktoren wären auch für die sog. „In-situ (Vor-Ort)-Vergasung“ von Steinkohle unter Tage geeignet.

Auch die „Brut-Reaktortechnik“ ermöglicht höhere Dampftemperaturen und damit höhere Wirkungsgrade. Das Demonstrations-Kernkraftwerk „Schneller-Brüter“ in Kalkar (SNR – Leistung 300 MW) war für eine Temperatur von 545 Grad Celsius ausgelegt; als Reaktor-Kühlmittel war Natrium vorgesehen. Bei dem Betriebsdruck von 10 bar ist Natrium flüssig. Das Kraftwerk wurde 1985 fertig gestellt. Aus vorwiegend politischen Gründen kam es nicht zu einer Inbetriebnahme. Das Konzept versprach insgesamt – bei fortwährender Wiederaufarbeitung des Brennstoffes - eine 60-fach höhere Ausnutzung von Uran. In anderen Staaten wird das Schnellbrüter-Konzept weiter verfolgt.

In England wird mit dem sog. Advanced-Gas-cooled-Reactor ein Reaktortyp betrieben, der mit CO₂ (Kohlendioxid) als Wärmeübertragungsmittel arbeitet und reale Wirkungsgrade von über 40 % erreicht. Die Wirtschaftlichkeit dieser Technik im Vergleich zum Leichtwasserreaktor ist allerdings fraglich.

Diese Beispiele sollen zeigen,

LANGFASSUNG

dass eine Weiterentwicklung der Technik der Kernkraftwerke in Richtung auf höhere Wirkungsgrade - neben der Sicherheitstechnik – durchaus möglich wäre.

Das Argument, Kernkraftwerke nutzen die eingesetzte Energie nur zu einem Drittel, kann demgegenüber nicht überzeugen. Alle natürlich vorkommenden Kernbrennstoffe (Uran, Thorium) sind außer zu energetischen Zwecken, nämlich letztlich der Wärmeengewinnung (und damit der Stromerzeugung), zu nichts Anderem zu gebrauchen. Wenn es betriebswirtschaftlich und volkswirtschaftlich vertretbar ist, Elektrizität und Wärme (Fernwärmenutzung durch Kraft-Wärme-Kopplung im nunmehr still gesetztem Kernkraftwerk Stade) aus diesen Stoffen zu erzeugen, ist die Höhe des Wirkungsgrades von nachgeordneter Bedeutung.

Bei einer derartigen Ressource ist deshalb die Behauptung eines Professors, bei der Stromerzeugung aus Kernenergie müsse man zu den eigentlichen (gerade bei ihr sehr niedrigen) „Externen Kosten“ etwa 20 Cent pro Kilowattstunde für den Ressourcenverzehr hinzurechnen, als absurd zu bezeichnen. Zum Vergleich: Die Stromerzeugungskosten aus

Kernenergie betragen derzeit etwa 3 Cent pro Kilowattstunde.

Photovoltaik- und Windkraftanlagen

In diesem Zusammenhang ist auf die Wirkungsgrade von Photovoltaik- und Windkraftanlagen hinzuweisen. Bisher werden für Photovoltaikanlagen im praktischen Betrieb bei bester Einstrahlung höchste Werte von etwa 10 bis maximal 15 Prozent erreicht (Solarzellen aus kristallinem Silizium). Für Windkraftanlagen gibt es eine dem „Carnot-Wirkungsgrad“ vergleichbare physikalische obere Nutzungsgrenze. Das ist die „Betz'sche Zahl“. Danach ergibt sich - unabhängig von Nutzungstechniken - bei einer optimalen Ausnutzung der Windgeschwindigkeit (Abströmgeschwindigkeit beträgt 1/3 der Anströmgeschwindigkeit) ein theoretischer Grenzwert von $16/27 = 59,3\%$. Real liegen die Wirkungsgrade deutlich unter der Betz'schen Zahl, zwischen etwa 40 % (Anfahrbereich) und 30 % bei höheren Windgeschwindigkeiten. Bei beiden Energiearten handelt es sich um naturgegebene Energien, die sonst nicht, wenigstens nicht energetisch, ausgenutzt werden können. Eine Ausnahme macht

die Sonnenenergie, die auch zur Wärmeengewinnung, bei vergleichbar geringen Wirkungsgraden, in direkter Konkurrenz (Flächenbedarf) zur Stromerzeugung mit Photovoltaikanlagen zu sehen ist.

Blockheizkraftwerke

Auch die - meist mit Erdgas betriebenen - Blockheizkraftwerke (BHKW) sind grundsätzlich Wärmekraftwerke. Diese erreichen bei der Stromerzeugung Wirkungsgrade von maximal 33 %. Die bessere Energieausnutzung wird ausschließlich durch eine sinnvolle Wärmeabgabe (Heizungsbedarf) bestimmt. ■

Siehe auch:

- [Wie haben sich die Wirkungsgrade der Kohlekraftwerke entwickelt und was ist künftig zu erwarten ?](#)
- [Warum haben Wärmekraftwerke einen relativ niedrigen Wirkungsgrad ?](#)
- [Abwärme: Kann man das Kühlwasser von Kraftwerken nutzen ?](#)
- [Kühlwasser: Warum benötigen Wärmekraftwerke das ?](#)
- [Wie hoch sind die „externen Kosten“ der verschiedenen Energie-Techniken bei der Stromerzeugung ?](#)