

Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf)

Chemisch-physikalische Grundlagen der Eindampfungsverfahren sowie der Energiebereitstellung durch Nutzung von fossilen Primärenergieträgern, Kraft/Wärme-Kopplung und Nutzung von Abwärme eines GuD-Kraftwerkes

(Auszug aus Band 3.5 der Antragsunterlage zur Haldenerweiterung Hattorf Phase 1, Mai 2018; Alternativenprüfung: Eindampfung, Verwertung und Auflösung)



Vorhabensträger:

Standort Hattorf
Werk Werra
Postfach 1163
36267 Philippsthal

Dr. Martin Eichholtz
Abteilung K-CS

K+S KALI GmbH
Bertha-von-Suttner-Strasse 7
34131 Kassel



.....
Dr. Martin Eichholtz



.....
Heidi Keller

Impressum

Fassung vom 10.06.2014

Ansprechpartner: Dr. Martin Eichholtz

Telefon: +49 561 9301 1543

Fax: +49 561 9301 1748

e-Mail: martin.eichholtz@kali-gmbh.com

Web: www.kali-gmbh.com

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	4
2	EINDAMPFUNG VON HALDENWASSER	4
2.1	Grundlagen Lösungs- und Kristallisationsvorgänge	4
2.2	Grundlagen der Eindampfung	5
2.3	Energiebereitstellung durch Nutzung von fossilen Primärenergieträgern	9
2.4	Kraft/Wärme-Kopplung	14
2.5	Nutzung von Abwärme eines GuD-Kraftwerkes	15
	LITERATURVERZEICHNIS	17

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Temperaturverlauf beim Erwärmen von 1 kg Wasser	6
Abbildung 2: p-T-Diagramm für Wasser	7
Abbildung 3: Beispiel einer mehrstufigen Eindampfanlage ²	8
Abbildung 4: Klassifizierung der Kraftwerke nach der Stromerzeugung	10
Abbildung 5: Schema einer Wärmekraftmaschine und Verlauf des Carnot-Faktors	11
Abbildung 6: Prinzip der Energieumwandlung in einem Wärmekraftwerk ⁷	12
Abbildung 7: Schema eines Exergie/Anergie-Flussbilds einer Wärmekraftanlage	13
Abbildung 8: Beispielschema eines GuD-Kraftwerkes	14
Abbildung 9: Getrennte und gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung	15

Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Eberhardt Wagner: Abwärme: Kann man das Kühlwasser von Kraftwerken nutzen? & Elke Roth: Warum haben Wärmekraftwerke einen relativ niedrigen Wirkungsgrad?
-----------	---

1 Einleitung

In diesem Anhang werden die zum Verständnis des Themenkomplexes der Eindampfung von Haldenwässern erforderlichen wesentlichen thermodynamischen Grundlagen und Gesetzmäßigkeiten dargestellt sowie die wichtigsten Aspekte der dafür erforderlichen Energiebereitstellung betrachtet.

2 Eindampfung von Haldenwasser

Die Entsorgung der festen Aufbereitungsrückstände aus der Kalirohsalzaufbereitung in übertägigen Abfallentsorgungseinrichtungen, den Rückstandshalden, hat zur Folge, dass sich bedingt durch Niederschläge auf die Halde entsprechende Mengen an Haldenwässern bilden. Bei den Haldenwässern handelt es sich um konzentrierte Salzlösungen mit unterschiedlichen Anteilen gelöster Rückstandssalze. Im Zusammenhang mit der Frage des Umgangs mit den Haldenwässern ist zu prüfen, ob eine weitere Aufbereitung zu einer Wertstoffgewinnung führen kann. Dazu ist die Trennung von im Haldenwasser enthaltenem Stoffen bzw. Wertstoff vom Lösungsmittel Wasser erforderlich. Einen anerkannten Stand der Technik für z.B. „...zur Entfernung der gelösten Chloride aus dem Abwasser gibt es nicht.“¹

Für ein Abtrennen von in konzentrierten Salzlösungen gelösten Stoffen kommt großtechnisch letztlich nur das Eindampfverfahren in Frage. Durch Wärmezufuhr wird dabei so viel Wasser verdampft, dass die Sättigungskonzentrationen der Salze überschritten werden und diese als Feststoffe aus der Lösung auskristallisieren.

2.1 Grundlagen Lösungs- und Kristallisationsvorgänge

Beim Haldenwasser der Rückstandshalde Hattorf handelt es sich um eine konzentrierte Salzlösung, die im Wesentlichen durch Lösungsvorgänge des aus Niederschlägen stammenden Wassers auf die Halde verursacht ist, aber auch zu einem geringen Teil durch die dem Rückstand anhaftende Lösung in Menge und Zusammensetzung beeinflusst wird. Tritt das Niederschlagswasser in Kontakt mit dem Rückstandssalz, so kommt es zu einem Phasenwechsel vom festen Salz zum in Wasser gelösten Salz. Beim Auflösungsprozess dissoziieren die Salze im Wasser zu An- und Kationen, und es entsteht eine Elektrolytlösung mit anderen physikalischen Eigenschaften als das reine Niederschlagswasser. So ändern sich u. a. die Dichte, die Viskosität, die elektrische Leitfähigkeit sowie der Gefrier- und der Siedepunkt. Der Lösevorgang setzt sich solange fort, bis ein Gleichgewichtszustand zwischen dem festen Salz und der Salzlösung erreicht ist. Dies ist dann der Fall, wenn die Lösung kein weiteres Salz mehr aufnehmen, also lösen kann. Das gelöste Salz hat dann seine Gleichgewichts- bzw. Sättigungskonzentration erreicht. Häufig wird dafür auch der Begriff der Löslichkeit verwendet. Solange dieser Zustand noch nicht erreicht ist spricht man auch von einer untersättigten Lösung.

Die Löslichkeit von Salzen in Wasser wird durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst, dazu zählen u. a. die Temperatur, der Druck, aber auch die An- und Abwesenheit anderer gelöster Salze. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass sich Gleichgewichts- bzw. Sättigungskonzentrationen erst nach einer ausreichenden Kontaktzeit des Wassers mit den Salzen einstellen. Unter realen Bedingungen können somit auch lösungskinetische Effekte einen erheblichen Einfluss auf die Lösungszusammensetzung ausüben. Die unterschiedlichen Lösungsgeschwindigkeiten von Natriumchlorid und Kieserit hat man sich daher z. B. in der

¹ Deutscher Bundestag Drucksache 16/8038 vom 13.02.2008

Kieseritwäsche zunutze gemacht, um das Natriumchlorid vom Kieserit durch Auflösen zu trennen.

Die Umkehrung zum Löseprozess stellt der Kristallisationsprozess dar. Dabei wird festes Salz wieder aus der Salzlösung abgeschieden. Es findet somit eine Trennung zwischen dem Salz und dem Wasser statt. Dieser Vorgang kann aber erst einsetzen, wenn die Sättigungskonzentration des Salzes in der Lösung überschritten wird. Die treibende Kraft für die Kristallisation aus der Lösung ist die Übersättigung, d. h. es liegt eine Konzentration des zu kristallisierenden Salzes in der Lösung vor, die größer als die Sättigungskonzentration ist. Dieser Zustand kann u. a. durch Veränderung der Lösungstemperatur erreicht werden. So kann es sowohl durch Abkühlen als auch Erhitzen einer gesättigten Salzlösung gelingen, die Sättigungskonzentrationen zu überschreiten und einen Kristallisationsprozess in Gang zu setzen. Bei einem ausreichenden Entzug von Wasser stellt sich kurzfristig eine höhere Salzkonzentration in der Lösung ein, sodass die Sättigungskonzentration überschritten wird. Es kristallisiert solange Salz aus der Lösung aus, bis die Sättigungskonzentration erneut erreicht wird. Entsprechend der Lösekapazität des Wassers verbleibt dabei immer etwas Salz in Lösung. Eine vollständige Trennung zwischen dem gelösten Salz und dem Wasser gelingt nur durch ein Eindampfen bis zur Trockne und darüber hinaus. Der Wasserentzug durch Wasserverdampfung erfolgt dabei unter Zuführung entsprechender Mengen thermischer Energie.

Lösen und Kristallisieren stellen gegenläufige Prozesse dar, die im Zustand der Sättigungskonzentration miteinander im Gleichgewicht stehen. Dieses Gleichgewicht kann wie beschrieben durch Änderung der Temperatur oder die Veränderung der Wassermenge in der Salzlösung gestört und somit in Richtung eines neuen Gleichgewichtszustands verschoben werden. Diese Zusammenhänge macht man sich daher auch bei den thermischen Trennverfahren der Kalirohsalzaufbereitung zunutze.

2.2 Grundlagen der Eindampfung

Das Eindampfen bzw. Verdampfen stellt bei der Kalirohsalzaufbereitung wie auch in der chemischen Verfahrenstechnik eine Möglichkeit dar, ein Lösungsmittel von darin gelösten Stoffen zu trennen². Bei wässrigen Salzlösungen ist Wasser das Lösungsmittel und die Salze stellen die gelösten Stoffe dar. Beim Verdampfen wird die Lösung zunächst auf Siedetemperatur erhitzt. Für den eigentlichen Verdampfungsvorgang muss der Lösung die erforderliche thermische Energie, die Verdampfungsenthalpie des Wassers, zugeführt werden. Dies geschieht in Verdampferanlagen in der Regel über die indirekte Wasserdampfbeheizung. Im Laufe des Eindampfvorgangs steigt die Konzentration an gelöstem Salz in der Lösung immer weiter an, bis die Sättigungskonzentration überschritten wird und es zur Kristallisation kommt.

Für den Verdampfungsvorgang von Wasser ist im Vergleich zum Erhitzen eine sehr viel höhere thermische Energie notwendig. Dies zeigt sich in einer Auftragung des Temperaturverlaufs von Wasser in Abhängigkeit von der zugeführten Energie (Wärmemenge). In dem dargestellten Beispiel wird die Menge von 1 kg Wasser bei einer Temperatur von -30°C auf 130°C unter einem konstanten Druck von 1013,25 hPa erhitzt. Dabei werden zwei Phasenübergänge durchlaufen, der des Schmelzens und der des Verdampfens. Bei beiden Phasenübergängen bleibt die Temperatur so lange konstant, bis der Vorgang des Schmelzens bzw. Verdampfens vollständig abgeschlossen ist.

² Vauck & Müller, 1978

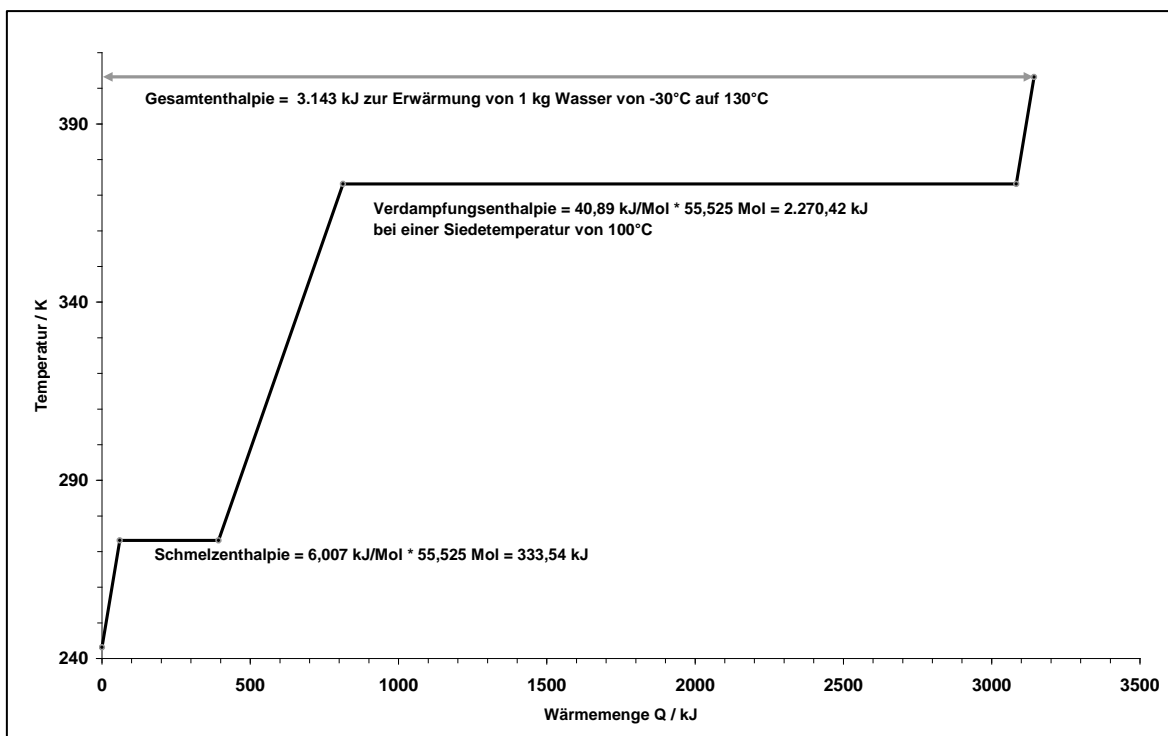


Abbildung 1: Temperaturverlauf beim Erwärmen von 1 kg Wasser

Bei einer Siedetemperatur von 100°C ist für die Verdampfung von 1 kg Wasser eine Verdampfungsenthalpie von 2.270,42 kJ erforderlich³. Diese Energiemenge macht rund 70 % der im dargestellten Beispiel zugeführten Gesamtenergie aus. Diese Energie wird im Falle der Kondensation, also beim Übergang von Wasserdampf zu flüssigem Wasser freigesetzt und kann wiederum genutzt werden. Bei technischen Eindampfprozessen macht man sich dies durch den Einsatz von mehreren, hintereinander geschalteten Verdampferstufen oder mit Hilfe der Brüdenkompression im Rahmen der Steigerung der Energieeffizienz zunutze⁴.

Der Zusammenhang zwischen dem Dampfdruck eines Stoffes und der Temperatur ergibt sich aus der jeweiligen Dampfdruckkurve. Für Wasser ist die Dampfdruckkurve im folgenden p-T-Diagramm dargestellt. Die Linien stellen dabei die Phasenübergänge dar, z. B. von flüssig nach gasförmig oder fest nach gasförmig. Durch die Dampfdruckkurve ist das Wertepaar Druck und Temperatur eindeutig bestimmt. Zu einer bestimmten Temperatur gehört auf der Dampfdruckkurve immer ein bestimmter Druck zur Beschreibung des jeweils vorherrschenden Aggregatzustands von Wasser. Somit lässt sich z. B. der Dampfdruck des Wassers beim Kondensieren bei einer bestimmten Temperatur aus der Dampfdruckkurve ablesen.

³ D'Ans & Lax, 1998

⁴ Gnielinski, Mersmann, & Thurner, 2000

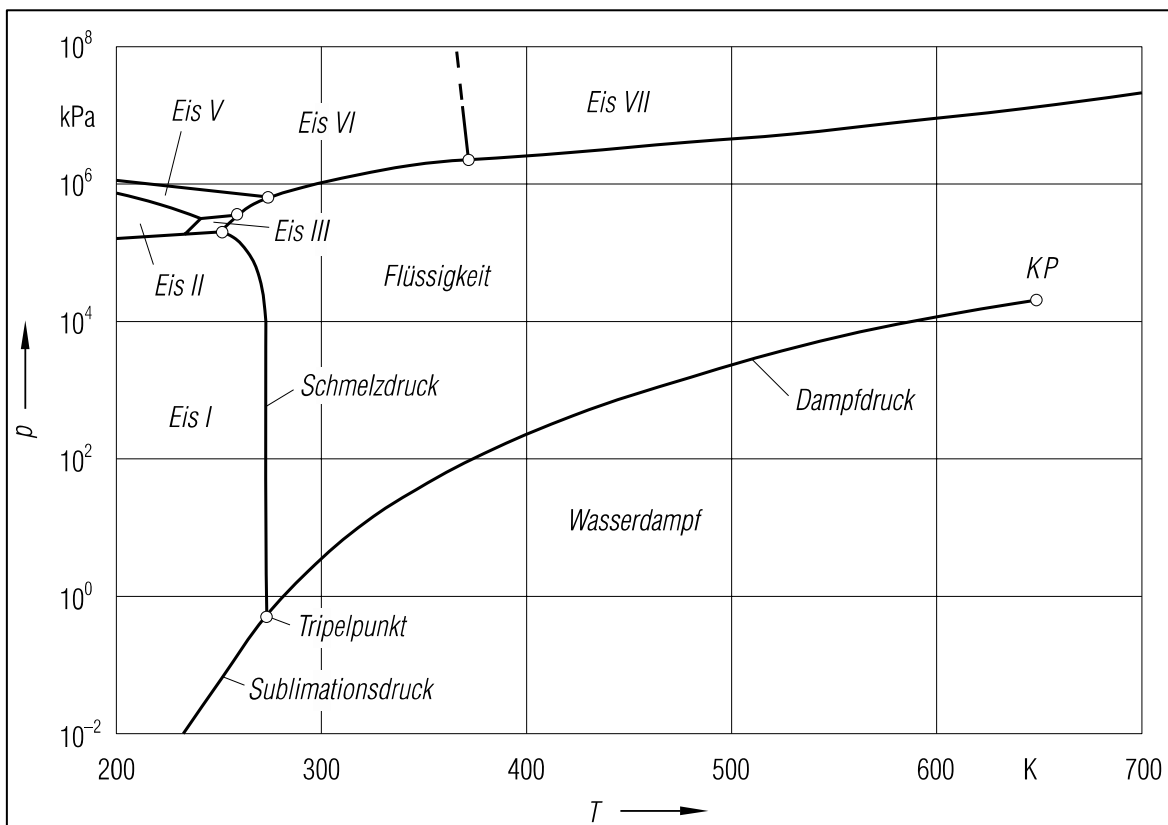


Abbildung 2: p-T-Diagramm für Wasser⁵

Damit die erforderliche Verdampfungsenthalpie an die Lösung übertragen werden kann, ist ein ausreichend hohes Temperaturgefälle zwischen der Temperatur des Heizdampfes und der Siedetemperatur der Lösung erforderlich. Dies ergibt sich aus den allgemeinen Zusammenhängen für Wärmeübergänge.

Aus dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik ergibt sich dabei: „*Wärme geht stets von dem System mit der höheren thermodynamischen Temperatur auf das System mit der niedrigeren thermodynamischen Temperatur über.*“⁵

Der übertragene Wärmestrom \dot{Q} ist von der Wärmeaustauschfläche A , der Wärmedurchgangszahl k und dem „treibenden“ Temperaturgefälle ΔT zwischen dem Heizdampf T_H und der Siedetemperatur T_S der Lösung abhängig:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T = k \cdot A \cdot (T_H - T_S)$$

Die Wärmedurchgangszahl k stellt dabei ein Maß für die unterschiedlichen Widerstände bei der Wärmeleitung dar. Eine Wärmeübertragung vom Heizdampf auf die Lösung findet also nur statt, wenn die Heizdampftemperatur unter Berücksichtigung von Wärmeleitwiderständen und damit verbundenen Temperaturverlusten ausreichend über der Siedetemperatur der Lösung im Verdampfer liegt.

Hohe Leistungen des Verdampfers gehen also mit großen Austauschflächen, ausreichenden Temperaturgradienten und hohen Wärmedurchgangszahlen, also geringen Wärmewiderständen, einher. Bei der effizienten Energieausnutzung des Primärdampfes durch mehrstufige Verdampferanlagen ist immer ein Kompromiss mit einer sinnvollen Anlagengröße

⁵ Baehr & Kabelac, 2009

zu finden. Zwar nimmt mit jeder weiteren Verdampferstufe der spezifische Dampfverbrauch ab, gleichzeitig sinkt aber auch das „treibende“ Temperaturgefälle zwischen dem Heizdampf (Brüden) und dem Siedepunkt der Lösung.

Voraussetzung für den Betrieb von mehrstufigen Verdampferanlagen ist, dass der Druck in jeder Stufe fällt und dadurch auch die Siedetemperatur der Lösung abnimmt, da die Temperatur des Brüdens ebenfalls nach jeder Stufe abnimmt. Dazu müssen die Verdampferanlagen gegen den Außendruck abgedichtet werden, die Anlagen müssen also barometrisch abgeschlossen sein. Dann stellt sich in jeder Stufe in Abhängigkeit von der herrschenden Temperatur der entsprechende Wasserdampfdruck ein.

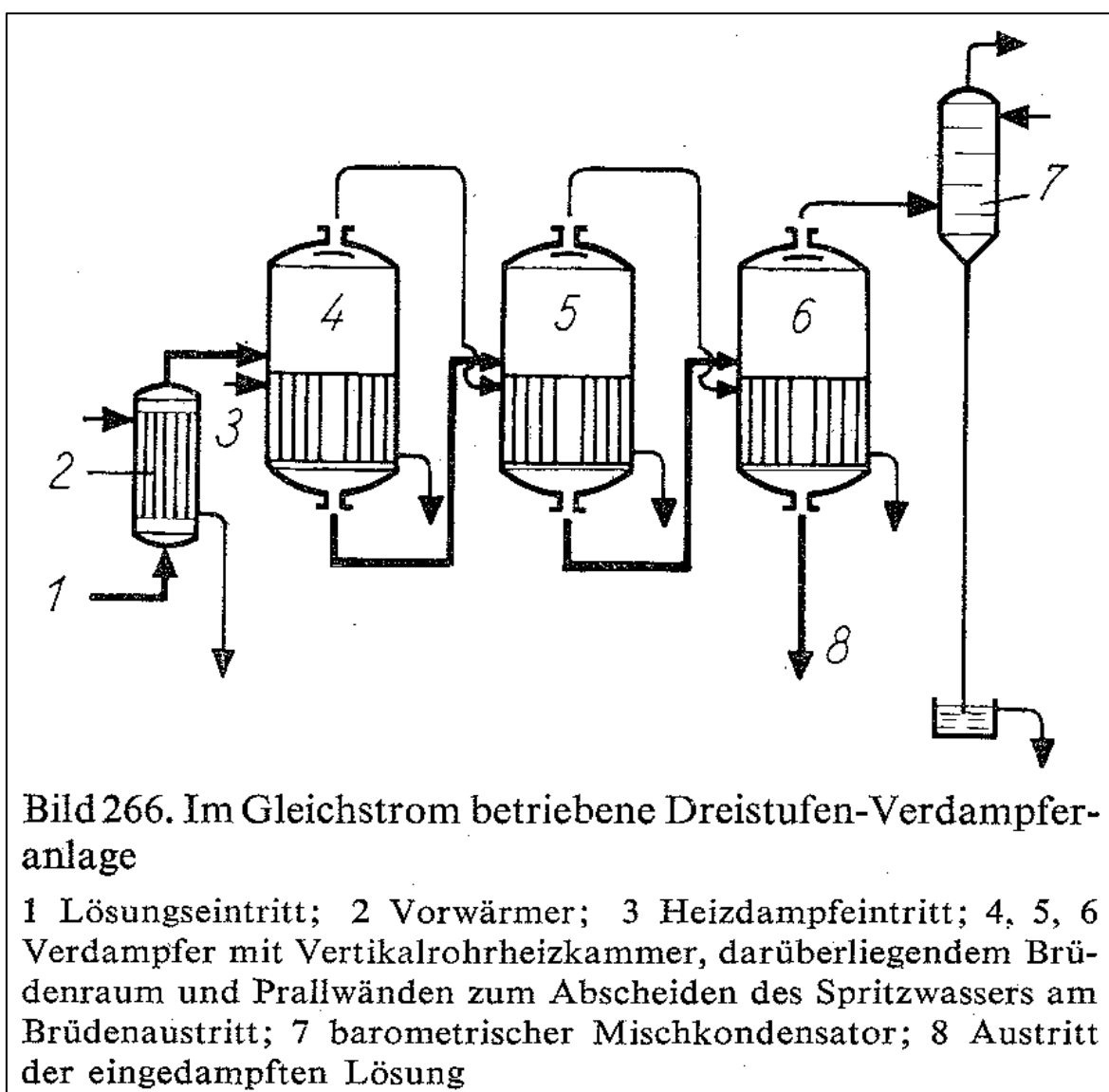


Abbildung 3: Beispiel einer mehrstufigen Eindampfanlage²

Durch die Druckdifferenz zwischen Verdampfern und der letzten Stufe zum Kondensator kann sich auch die notwendige Brüdenströmung in Richtung der nächsten Stufe ausbauen. Letztlich ergibt sich die Gesamttemperaturdifferenz zwischen der ersten Stufe und der

letzten Stufe aus der Temperatur des Primärdampfs und der Kühlwassertemperatur des Kondensators.

Beim Betrieb von Eindampfanlagen sind technisch und verfahrenstechnisch bedingte Verluste zu berücksichtigen. Diese Verluste können insgesamt als Temperaturverluste in Verdampferanlagen zusammengefasst werden.² Eine wesentliche Verlustquelle stellt bei der Eindampfung einer Salzlösung die Siedepunkterhöhung dar.

Zwischen den im Wasser gelösten (Salz-)Teilchen und dem Wasser kommt es zu mikroskopischen Wechselwirkungen, die sich makroskopisch in der Änderung bestimmter Systemeigenschaften niederschlagen. In erster Näherung spielt dabei nur die Anzahl der gelösten Teilchen selbst, nicht aber die Art der Teilchen eine Rolle. So haben Salzlösungen bedingt durch diese Wechselwirkungen der gelösten Salzionen mit den Wassermolekülen bei einer bestimmten Temperatur immer einen geringeren Dampfdruck als reines Wasser bei der gleichen Temperatur. Dieses Phänomen, die sogenannte Dampfdruckerniedrigung, ist auch bei der Betrachtung der Eindampfung von Salzlösungen zu berücksichtigen.

Die Dampfdruckerniedrigung führt dazu, dass Salzlösungen bei einem bestimmten Druck noch nicht sieden, sondern dass erst eine höhere Temperatur der Lösung erreicht sein muss, bevor der Siedepunkt bei einem bestimmten Druck im Vergleich zu reinem Wasser erreicht ist (Siedepunkterhöhung). Beispielsweise siedet eine 33,5 %ige Natriumchlorid-Lösung bei 1013,25 hPa nicht bei 100°C, sondern erst bei 107°C. Zwar ist der Brüden oberhalb der siedenden Lösung noch überhitzt, diese Überhitzung baut sich aber sehr schnell ab, sodass die anschließende Kondensation bei der Sattedampf-temperatur des reinen Lösungsmittels erfolgt. Die Überhitzung des Brüdens kommt also der nachfolgenden Verdampferstufe nicht zugute. Bei der technischen Umsetzung von Eindampfanlagen ist somit der Effekt der Siedepunkterhöhung zu berücksichtigen. In mehrstufigen Verdampferanlagen steigen die Lösungskonzentrationen und damit die Siedepunkterhöhung von Stufe zu Stufe weiter an.

Weitere Verlustquellen in der Verdampferanlage stellen Strömungswiderstände, vorhandene Inertgase (wie z.B. Luft) oder Verkrustungen dar.² Diese Verlustquellen beeinflussen ebenfalls das Temperaturgefälle, damit die Wärmeübertragung und schließlich die Leistungs- und Funktionsfähigkeit der Verdampferanlagen.

2.3 Energiebereitstellung durch Nutzung von fossilen Primärenergieträgern

Wie dargestellt ist es für Eindampfprozesse erforderlich, dass die notwendige Verdampfungsenthalpie bereitgestellt wird und auf die Lösung übertragen werden kann. Dies wird in Eindampfanlagen durch Wasserdampf (Prozessdampf) mit einer ausreichend hohen Temperatur, in der Regel über 130°C gewährleistet. Dieser Prozessdampf wird dazu in entsprechenden Kraftwerken durch den Einsatz fossiler Energieträger wie z.B. Erdgas bereitgestellt. Um eine möglichst hohe Energieeffizienz der genutzten fossilen Energieträger zu erreichen, wird in diesem Zusammenhang neben der Dampferzeugung auch elektrischer Strom erzeugt. Alternativ zum Einsatz von Prozessdampf kann die Bereitstellung und Übertragung der Verdampfungsenthalpie auch durch die Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie über Heizplatten erfolgen. Dieser Weg stellt aber in der Regel für großtechnische Anlagen bezogen auf die Energieeffizienz eine schlechtere Variante dar. Diese Zusammenhänge werden im Folgenden kurz erläutert.

Hauptaufgabe des Energiesektors ist die Bereitstellung von elektrischem Strom. Dazu werden unterschiedliche Kraftwerkstypen verwendet, wie die nachfolgende Abbildung zeigt.

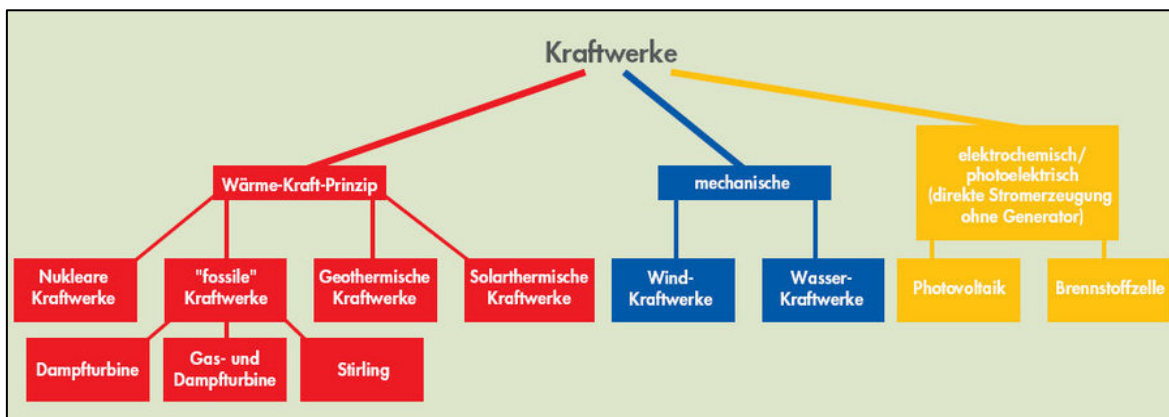


Abbildung 4: Klassifizierung der Kraftwerke nach der Stromerzeugung⁶

In Deutschland wird Strom überwiegend durch die Nutzung geeigneter Primärenergieträger in thermischen Anlagen mit Hilfe des Wärme-Kraft-Prinzips gewonnen. Im Jahr 2010 wurden so rund 588 Mrd. kWh Netto-Strom aus der Umwandlung von Erdgas (14%), Steinkohle (18%), Braunkohle (23%) und Kernenergie (23%) bereitgestellt.⁷ Der überwiegende Teil dieser Primärenergieträger muss dazu importiert werden.

Bei den thermischen Anlagen (Kraftwerken) wird zwischen Wärmekraftanlagen (wie z.B. Dampfkraftwerken) und Verbrennungskraftanlagen (wie z.B. Motoren und Gasturbinen) unterschieden. Beiden Anlagentypen liegt aber das gleiche Prinzip zugrunde. Für die Umwandlung von thermischer Energie (Wärme) in mechanische Arbeit bzw. elektrischen Strom werden immer zwei Wärmereservoirs mit unterschiedlichen Temperaturen in Verbindung mit einer Wärmekraftmaschine benötigt. Aus einem höher temperierten Wärmereservoir wird ein Wärmestrom mit bestimmter thermischer Energie an die Wärmekraftmaschine abgegeben. Ein Teil der übertragenen thermischen Energie kann in mechanische Arbeit bzw. elektrischen Strom umgewandelt werden. Der verbleibende und von Arbeit „entwertete“ Wärmestrom muss dann an das zweite Wärmereservoir mit niedrigerer Temperatur abgegeben werden. In der Regel wird die Umgebung der thermischen Anlage als zweites Reservoir genutzt.

⁶ <http://www.kraftwerkforschung.info>

⁷ Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., <http://www.bdew.de> (Stand 06/2014)

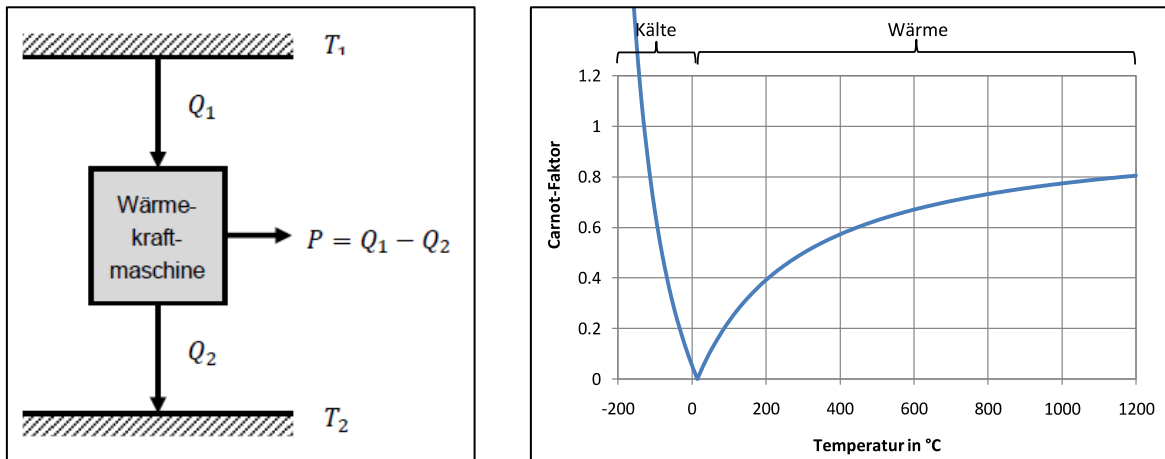


Abbildung 5: Schema einer Wärmekraftmaschine und Verlauf des Carnot-Faktors⁸

Der thermische Wirkungsgrad (auch Carnot-Faktor genannt) einer reversibel arbeitenden Wärmekraftmaschine ergibt sich aus der Kenntnis des zugeführten Wärmestroms (\dot{Q}_1) und der mechanischen Leistung (P) oder aus den Temperaturen der beiden Wärmereservoirs:

$$\eta_{th} = \frac{P}{\dot{Q}_1} = \frac{\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2}{\dot{Q}_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Hohe Kraftwerkswirkungsgrade ergeben sich, wenn die thermische Energie Q_1 bei möglichst hoher Temperatur T_1 der Wärmekraftmaschine zugeführt und Q_2 in Form von Abwärme bei möglichst niedriger Temperatur T_2 abgeführt werden können. Der dargestellte Verlauf des Carnot-Faktors zeigt darüber hinaus, dass Arbeit nur von der Wärmekraftmaschine geliefert werden kann, wenn ein Temperaturunterschied zwischen beiden Wärmereservoirs besteht, und dass selbst unter idealen Bedingungen ein Wirkungsgrad von 1, also die vollständige Umwandlung des zugeführten Wärmestroms in Arbeit, thermodynamisch nicht möglich ist. Ziel der Kraftwerkstechnologie muss es also sein, möglichst hohe Wirkungsgrade bei der Strombereitstellung zu erzielen, um zum einen die mit der Nutzung fossiler Primärenergieträger verbundenen Umweltauswirkungen so gering wie möglich zu halten, und zum anderen möglichst sparsam und effizient mit diesen endlichen Ressourcen umzugehen. Unabhängig von der Art der Wärmekraftmaschine muss es somit das Bestreben sein, einen maximal möglichen Wirkungsgrad zu erzielen. Damit geht die Forderung einher, die Abwärme aus der Wärmekraftmaschine bei möglichst niedriger Temperatur an die Umgebung abzugeben.

Bei der Umwandlung der chemischen Energie der fossilen Energieträger zu elektrischem Strom sind zwangsläufig Verluste hinzunehmen. Diese Verluste beruhen auf der unterschiedlichen Umwandlungsfähigkeit der jeweiligen Erscheinungsformen von Energie. Mit dem Exergie/Anergie-Konzept kann dies sehr anschaulich verdeutlicht werden. Energie wird dabei unterschieden in Exergie und Anergie⁵:

⁸ <http://www.axpo-holz.ch/files/artikel/190/Thermodynamik.pdf> (Stand 06/2014)

„*Exergie* ist Energie, die sich unter Mitwirkung einer vorgegebenen Umgebung in jede andere Energieform vollständig umwandeln lässt. *Anergie* ist Energie, die sich nicht in Exergie umwandeln lässt.“

Jede Energieform lässt sich also als Summe eines bestimmten Anteils von Exergie und Anergie beschreiben:

$$\text{Energie} = \text{Exergie} + \text{Anergie}$$

Im folgenden Beispiel eines Kohlekraftwerkes sind die einzelnen Umwandlungsschritte der unterschiedlichen Erscheinungsformen von Energie zur Stromerzeugung dargestellt.

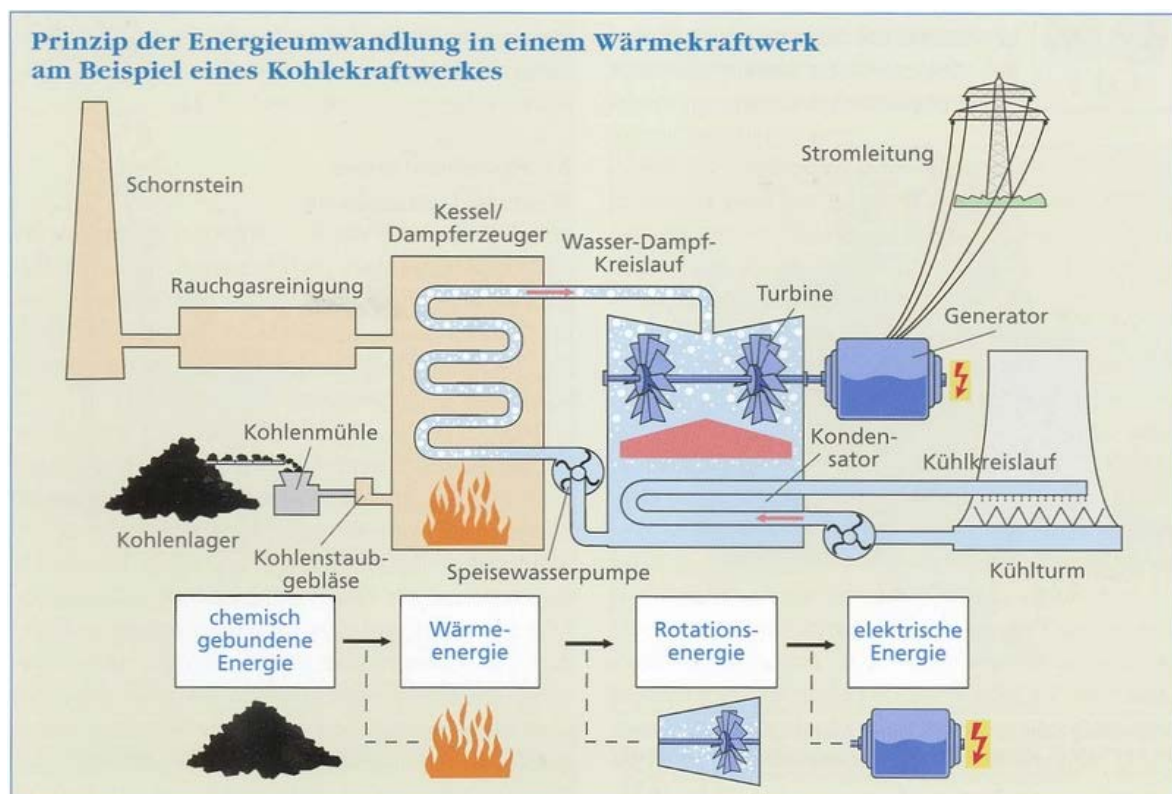


Abbildung 6: Prinzip der Energieumwandlung in einem Wärmekraftwerk⁷

Anhand des nachfolgenden Schemas sind die Exergieverluste bei den einzelnen Umwandlungsschritten ebenfalls beispielhaft dargestellt:

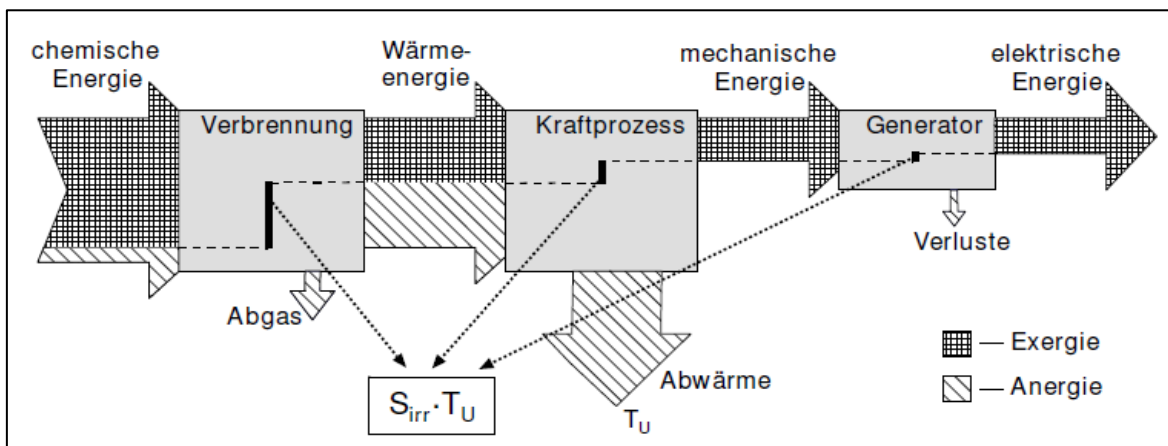


Abbildung 7: Schema eines Exergie/Anergie-Flussbilds einer Wärmekraftanlage⁹

Bei der Verbrennung fossiler Primärenergieträger treten im Kessel rund 30 % der Exergieverluste auf. Als weitere Quelle mit ca. 21 % sind die Exergieverluste bei der Wärmestromübertragung zu nennen. Dagegen ist der Exergieverlust über das Abgas und Abstrahlungsverluste mit ca. 4 % eher gering. Somit ist der Umwandelbarkeit der chemischen Energie in elektrischen Strom über das Wärme-Kraft-Prinzip eine grundsätzliche Grenze in Bezug auf den erreichbaren Wirkungsgrad gegeben. Eine 100 %ige Umwandlung ist aus thermodynamischen Gründen nicht möglich. Es wird stets ein vergleichsweise hoher Betrag an nicht mehr nutzbarer thermischer Energie in Form von Abwärme an die Umgebung abgegeben. Dabei werden weitere Verluste vermieden, wenn die Abwärme selbst möglichst der Umgebungstemperatur des Kraftwerks entspricht.

„Von der dem Dampf einer Kondensationsdampfkraftanlage zugeführten Wärme wird fast die Hälfte als Abwärme an die Umgebung abgeführt. Dieser Energieanteil ist durch Brennstoffenergie zu decken. Die Nebelschwaden am Austritt eines Kühlturms (fälschlicherweise oft als Dampfschwaden bezeichnet) enthalten jedoch fast keine Exergie. Die Exergieverluste entstehen durch Verbrennung und Wärmeübertragung.“¹⁰

Die höchsten Wirkungsgrade mit über 60 % erreichen heute modernste GuD-Kraftwerke. Dies gelingt durch den kombinierten Betrieb einer Gasturbinenanlage, die ihre Abhitze an eine Dampfturbinenanlage abgibt.

⁹ M. Siemer, Diss. Lokale Entropieproduktionsraten in der Polymerelektrolyt-Membran-Brennstoffzelle, Universität der Bundeswehr Hamburg, 2007

¹⁰ R. Pruscek, Elektrizitätserzeugung aus fossilen Brennstoffen in Kraftwerken, in Energiehandbuch, Hrsg. E. Rebhan, Springer-Verlag 2002

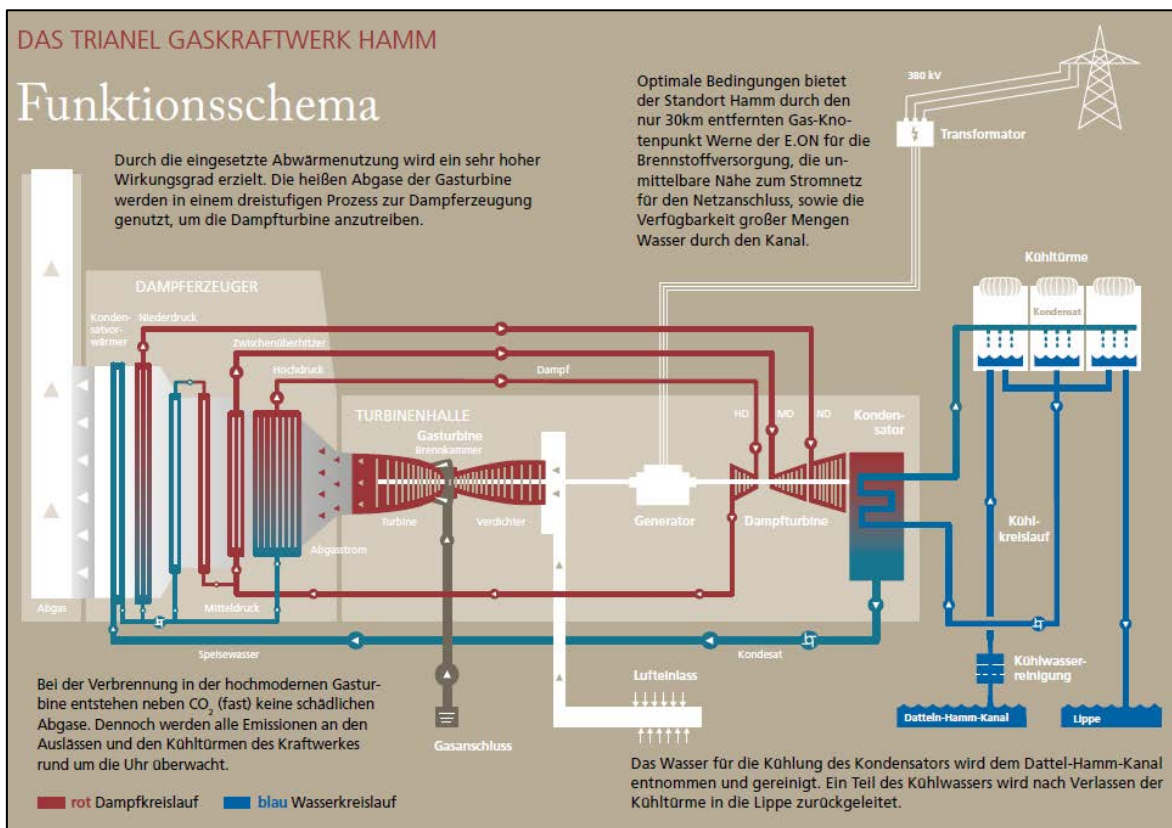


Abbildung 8: Beispielschema eines GuD-Kraftwerkes¹¹

Weitere Ausführungen zu GuD-Kraftwerken finden sich u. a. bei Baehr & Kabelac (2009) oder Schwab, A. (2009).

2.4 Kraft/Wärme-Kopplung

In vielen Bereichen wird Energie sowohl in Form von elektrischem Strom als auch in Form von Prozess- bzw. Heizwärme benötigt. Die effizienteste Form der Bereitstellung beider Energieformen gelingt heute über die Kraft/Wärme-Kopplung (KWK). Durch die gekoppelte Bereitstellung von Strom und Wärme in Kraftwerken kann die dabei eingesetzte Primärenergie sehr viel effektiver genutzt werden, als wenn der benötigte Strom und die benötigte Wärmeenergie separat erzeugt werden. Dies sei an folgendem Schema verdeutlicht:

¹¹ <http://www.trianel-hamm.de/de/kraftwerk/funktionsschema.html> (Stand 06/2014)

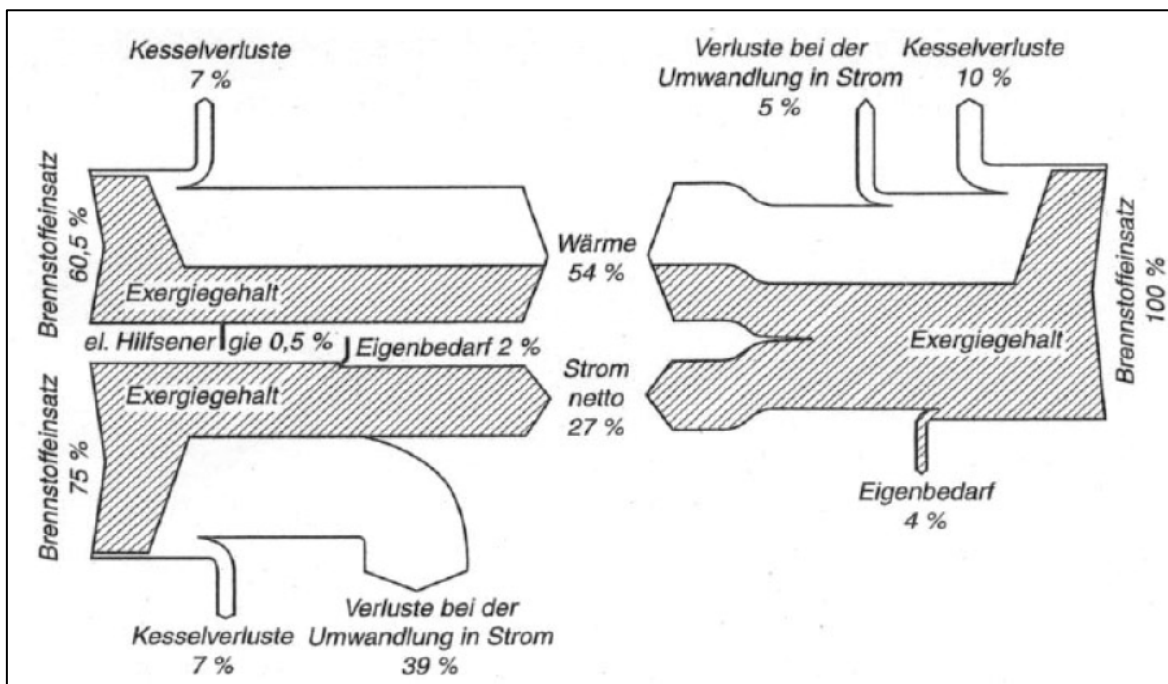


Abbildung 9: Getrennte und gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung¹²

Durch die Kraft/Wärme-Kopplung kann also im Vergleich mit den jeweiligen Einzelprozessen rund 30 % bis 35 % an Primärenergie bei gleicher Strom- und Wärmeproduktion gespart werden. Zu beachten ist dabei immer, welche Kraftwerkstypen und verwendeten Primärenergieträger verglichen werden. In der Industrie - und dies gilt insbesondere auch für die Kaliindustrie - dienen die Kraftwerke mit KWK vornehmlich der Prozesswärmeversorgung. Die Erzeugung von geeignetem Prozessdampf ist damit auch die Führungsgröße der Leistungsregelung. Je nach Dampfbedarf kann Prozessdampf in unterschiedlichen Zuständen als Hoch-(HD), Mittel-(MD) oder Nieder-(ND) -druckdampf an den entsprechenden Stellen des Dampfkraftwerkes entnommen werden. Eine Entnahme von Dampf geht naturgemäß immer zu Lasten der Stromerzeugung, denn dieser steht der Dampfturbine zur Stromerzeugung nicht mehr zur Verfügung. Bei Vergleich eines GuD-Kraftwerkes mit reiner Stromerzeugung und eines GuD-Kraftwerkes mit KWK, also Prozessdampfentnahme, schneidet also das erstgenannte in Bezug auf die Stromerzeugung immer besser ab. Wird aber eine bestimmte Menge an Prozessdampf benötigt, so ist die Erzeugung mit Hilfe der Kraft/Wärme-Kopplung im Vergleich zum reinen Kesselbetrieb, also der einfachen Dampferzeugung, die effizientere Methode.

Die in der Kaliindustrie eingesetzten GuD-Kraftwerke zur Erzeugung von Prozessdampf und elektrischem Strom haben einen sehr hohen Wirkungsgrad in Bezug auf die eingesetzte Primärenergie, in der Regel Erdgas, der bei rund 90 % liegt. Eine effizientere Primärenergienutzung zur Prozesswärme- und Stromerzeugung ist derzeit nicht verfügbar.

2.5 Nutzung von Abwärme eines GuD-Kraftwerkes

Für die Eindampfung von Salzwässern ist eine erhebliche Menge an thermischer Energie (Wärmeenergie) notwendig, insbesondere muss die Verdampfungsenthalpie von Wasser

¹² IER, Kraft-Wärme-Kopplung, Mai 2009,

<http://www.ier.uni-stuttgart.de/lehre/skripte/versuche/KWK/KWK.pdf> (Stand 06/2014)

der Lösung zugeführt werden. Dies geschieht in der Regel in mehrstufigen Verdampferanlagen, wobei die eingesetzte Energie des Primärdampfes mit einer Temperatur von mindestens 130°C mehrfach genutzt wird. Die einzudampfende Lösung muss zunächst auf die entsprechende Siedetemperatur erhitzt werden. Anschließend ist dann die Verdampfungsenthalpie zuzuführen. Standardmäßig wird dazu sehr heißer Wasserdampf in Form von Prozessdampf verwendet, da für eine Wärmeübertragung immer ein entsprechend großes „treibendes“ Temperaturgefälle zwischen dem Heizdampf und der zu beheizenden Lösung erforderlich ist.

Die u. a. von der Werra-Weser-Anrainer-Konferenz (WWA) vorgeschlagene Nutzung von Abwärme aus einem Kraftwerk zur Stromerzeugung ist dafür aber ungeeignet, da die Temperatur der Abwärme deutlich niedriger liegt als dies für eine Nutzung in einer Eindampfanlage für konzentrierte Salzlösungen (wie z.B. Salzwasser) erforderlich wäre.

Bei effizienten Kraftwerken unterscheidet sich die Temperatur der Abwärme nicht erheblich von der Temperatur in der Umgebung des Kraftwerkes. In der Regel liegt die Temperatur des in den Kondensator eintretenden Dampfes nur bei ca. 35°C. Dadurch ist eine wesentliche Voraussetzung für die Nutzung von Abwärme zur Eindampfung nicht erfüllt. Die Abwärme hat eine geringere Temperatur als die Siedetemperatur der einzudampfenden Lösung. Eine Übertragung der Verdampfungsenthalpie auf die Salzlösung ist daher nicht gegeben, auch wenn die Abwärme rechnerisch die notwendige Energie in Form von Anergie enthält.

Wenn man Salzlösungen oder –abwässer durch Eindampfung reduzieren will, so ließe sich der dafür erforderliche Prozessdampf am vertretbarsten mit Hilfe eines wärmegeführten GuD-Kraftwerkes mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bereitstellen. Dies ist auch ein Ergebnis der Prüfung des Runden Tisches "Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion"¹³. Es ändert aber nichts an der daraus resultierenden Konsequenz, dass die dabei verbrauchten fossilen Primärenergieträger nicht mehr mit höchster Effizienz zu elektrischem Strom umgewandelt werden können. Daher trifft es auch nicht zu, dass die Nutzung der Abwärme zur Eindampfung von Salzlösungen kostenneutral ist, weil sie „über den Stromverkauf finanziert werden kann“. Vielmehr geht sie - wie oben ausführlich erläutert – in jedem Fall zu Lasten der Stromausbeute und beinhaltet damit sehr wohl eine eigene Kostendimension.

Die Forderung nach einer Eindampfung von Salzwasser im Rahmen der Abwasserbehandlung, insbesondere für große Abwassermengen, läuft damit den großen politischen Bemühungen der Steigerung der Kraftwerkseffizienz zur Stromerzeugung bei der Nutzung fossiler Energieträger zuwider und ist weder ökologisch noch ökonomisch zu rechtfertigen. Dies hat im Übrigen auch den Gesetzgeber bewogen, die Eindampfung von Abwasser zur Verringerung des Salzgehalts nicht als den Stand der Technik vorzuschreiben.

Der u. a. von der WWA vorgelegte Vorschlag zur Vermeidung der bisherigen Form der Salzwasserentsorgung ist aus den dargestellten Gründen nicht umsetzbar und daher zu verwerfen. Ergänzende Ausführungen zur Nutzung von Abwärme und dem Wirkungsgrad von Kraftwerken finden sich in der Anlage 1.

¹³ <http://www.runder-tisch-werra.de/> (Stand 06/2014)

Literaturverzeichnis

- [1] Baehr, H.D. & Kabelac, S. (2009): Thermodynamik, Heidelberg, Springer
- [2] D'Ans & Lax (1992): Taschenbuch für Chemiker und Physiker, Berlin, Springer-Verlag
- [3] Dietzel, F. & Wagner, W. (1998): Technische Wärmelehre: Grundlagen für Ingenieure, Würzburg, Vogel
- [4] Gnielinski, V., Meersmann, A. & Thuner, F. (1993): Verdampfung, Kristallisation, Trocknung, Braunschweig, Vieweg
- [5] Pruschek, R. (2002): Elektrizitätserzeugung aus fossilen Brennstoffe in Kraftwerken. In E. Rebhahn: Energiehandbuch S. 131-245, Berlin. Springer-Verlag
- [6] Schwab, A. (2009): Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie, Heidelberg, Springer-Verlag
- [7] Vauck, W. & Müller, H. (1978): Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik, Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie

Anlage 1:

Eberhardt Wagner: Abwärme: Kann man das Kühlwasser von Kraftwerken nutzen?

&

Elke Roth: Warum haben Wärmekraftwerke einen relativ niedrigen Wirkungsgrad?

Abwärme: Kann man das Kühlwasser von Kraftwerken nutzen ?

von [Eberhard Wagner](#)

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

Hier die Fakten - vereinfachte Kurzfassung

Als Argument gegen konventionelle Kraftwerke und Kernkraftwerke wird immer wieder ihr relativ niedriger Wirkungsgrad vorgebracht: 2/3 der Energie gingen bei ihrem Betrieb verloren, man solle sie daher besser nicht nutzen. Was stimmt davon?

Die Geschichte der Wärmekraftmaschinen (insbesondere Dampfmaschinen und Dampfturbinen) ist seit ihrem Beginn ein fortwährender Kampf um eine bessere Ausnutzung der Brennstoffe. Diese Entwicklung ist auch derzeit keineswegs zu Ende. Man lernte, dass es auf eine möglichst große Temperatur-Differenz des Wasserdampfes zwischen dem Eintritt in die Wärmekraftmaschine und dem Austritt aus der Maschine ankommt: Die Dampf-Eintrittstemperatur soll möglichst hoch, die Dampf-Austrittstemperatur möglichst niedrig sein.

Um letzteres zu erreichen, wird der Dampf am „kalten En-

de“ des Prozesses soweit wie möglich abgekühlt. Maximal möglich ist dies bis in die Nähe der Umgebungstemperatur bzw. der Temperatur des verwendeten Kühlmediums. Bei den Dampfkraftwerken ist das in der Regel Wasser eines Flusses oder Sees. Bei der Abkühlung des Dampfes wird Wärme auf das Kühlmedium übertragen. Dies ist die sog. Abwärme.

In Deutschland kann man im Winter von einer Flusswassertemperatur von etwa 5 °C ausgehen. Mit dieser Temperatur tritt das Kühlwasser in das Kraftwerk ein. Im Kraftwerk wird es aufgewärmt und beim Austritt aus dem Kraftwerk hat es dann eine Temperatur von etwa 15 °C. Diese sog. „Aufwärmspanne“ von typischerweise etwa 10 °C ist in den Betriebsgenehmigungen der Kraftwerke geregelt und darf nicht überschritten werden.

Wasser mit einer Temperatur von etwa 15 °C ist für die Beheizung von Wohnräumen, Büros,

Werkstätten usw. nicht geeignet. Der höchstmöglichen Ausnutzung der Brennstoffe steht also die weitgehende Nichtverwertbarkeit der Abwärme gegenüber. Nur wenn die Abkühlung des Dampfes nicht bis in die Nähe der Umgebungstemperatur erfolgt, lässt sich die Abwärme sinnvoll zu Heizzwecken nutzen. Der Abkühlungsprozess muss quasi abgebrochen werden. Diese Technik wird in sog. Heizkraftwerken angewendet, man spricht von Kraft-Wärme-Kopplung. Der Abbruch der Dampfabkühlung ist mit Einbußen bei der Stromerzeugung verbunden. Man bekommt also auch bei dieser Technik nichts geschenkt. Bei geringem Heizwärme- oder Warmwasserbedarf, z. B. im Sommer, müssen die Heizkraftwerke weitgehend auf diese durchaus sinnvolle Doppelfunktion verzichten.

Mehr Details finden Sie in der [Langfassung](#).

Abwärme: Kann man das Kühlwasser von Kraftwerken nutzen ?

von [Eberhard Wagner](#)

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

Hier die Fakten - Langfassung

Die Erzeugung von Elektrizität in sog. thermischen Kraftwerken, also Kraftwerken, die mit fossilen Brennstoffen (Kohle, Gas, Öl), mit Biomasse oder mit Kernbrennstoff „befeuert“ werden, soll nach Meinung von Kritikern weitgehend uneffizient sein. Es wird das Argument der vorgeblich sehr großen Energieverluste genannt. Außerdem soll dieser Nachteil durch den generellen Bau (Energiepolitik) von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen verhindert werden. Bei der vorgeblichen Uneffizienz spricht man von sog. ungenutzter Abwärme.

Es stellen sich deshalb die Fragen: Warum benötigen Kraftwerke Kühlwasser und warum ist Abwärme nicht nutzbar bzw. bei welchen Bedingungen wäre diese nutzbar? Ist die „Nichtnutzung“ der Abwärme gar eine „technische Böswilligkeit“ (Kostenaspekt)?

Historie

Die Geschichte der Wärmekraftmaschinen ist seit ihrem Beginn ein fortwährender Kampf um eine bessere Ausnutzung der Brennstoffe. In den Anfängen

des Einsatzes von Dampfmaschinen, wesentlich zur Entwässerung von Kohlegruben (immer tieferer Abbau), benötigte man buchstäblich eine Grube für die Dampfmaschine und nur eine andere Grube blieb für die Kohlenutzung zu anderen Zwecken. Man lernte, dass es auf eine möglichst große Temperatur-Differenz des Wasserdampfes zwischen dem Eintritt des Dampfes in eine Dampfmaschine und dem Austritt des Dampfes beim Verlassen der Maschine ankommt: Die Dampf-Eintrittstemperatur soll möglichst hoch, die Dampf-Austrittstemperatur möglichst niedrig sein. Diese Entwicklung ist auch derzeit keineswegs zu Ende.

Bei der Dampferzeugung in neuesten Großkraftwerken, z. B. im Braunkohle-Kraftwerk Niederaußem, in der Nähe von Aachen, Brutto-Leistung 1012 MW, wird ein Frischdampfzustand von etwa 580 °C bei einem Dampfdruck von etwa 274 bar erreicht. Zum Vergleich beträgt der Druck in einem Autoreifen etwa 2 bar. Die Grenzen, die man immer höher treibt, liegen bei der Ver-

fügbarekeit von hochwarmfesten Stählen. Die Entwicklung derartiger Stähle ist aufwändig, sie sind teuer, und sie bringen in der Regel auch Probleme bei ihrer Verarbeitbarkeit (z. B. Schweißbarkeit) und des Turbinenbetriebs (z. B. Wärmeausdehnung beim An- und Abfahren der Maschinen, Teillastbetrieb) mit sich. Bei Gasturbinen liegen die Gas-Eintrittstemperaturen derzeit bei etwa 1200 °C. Diese Temperaturen können allerdings nur mit raffinierten Kühlsystemen an und in den relativ kleinen Turbinenschaufeln beherrscht werden. Gasturbinen erreichen nicht die Leistungsgrößen von Dampfturbinen. Das Leistungsverhältnis der größten Maschinen beträgt etwa 1 zu 10.

Das kalte Ende

Die zweite und ebenso wichtige Quelle einer optimalen Ausnutzung von Brennstoffen – eigentliches Thema dieses Beitrages – ist das „kalte Ende“ des Dampfprozesses. Da Wasser bei Atmosphärendruck bei 100 °C verdampft, sind niedrigere Dampftemperaturen nur im Unter-

LANGFASSUNG

druckbereich möglich. Diesen erreicht man mit einem Trick: Wenn der Dampf zu Wasser kondensiert, tritt eine enorme Volumenverminderung ein. Dadurch wird der Druck entsprechend reduziert. Dieser Vorgang findet am Ausgang der Turbine im sog. Kondensator statt. Beträgt der Dampfdruck z. B. etwa 0,03 bar, liegt die Dampftemperatur nur bei etwa 24 °C. Damit sind entsprechend höhere Wirkungsgrade möglich.

Carnot-Wirkungsgrad

Die theoretisch höchstmögliche Energienutzung in einem Dampfprozess ergibt sich rechnerisch als Quotient aus der Temperaturdifferenz zwischen Dampfeintritt (T oben) und Dampfaustritt (T unten) und der Dampfeintrittstemperatur, gemessen im absoluten Temperaturmaß „Kelvin“ (z. B. 25 °C sind 298 Kelvin). Man spricht vom

Carnot-Wirkungsgrad =
$$(T_{\text{oben}} - T_{\text{unten}}) / T_{\text{oben}}$$

Dieser Carnot-Wirkungsgrad könnte theoretisch bei einer idealen Maschine als Maximum erreicht werden. Er ist deshalb kleiner 100 %, weil die untere Prozesstemperatur (T unten) durch die Umgebungstemperatur begrenzt ist.

Dampfkondensation

Größtmögliche Wirkungsgrade der Umwandlung von Brennstoffen in Elektrizität werden dann erreicht, wenn die Abkühlung des Dampfes bis zur Umgebungstemperatur bzw. der Temperatur eines geeigneten Kühlmediums

erfolgt. Bei den Dampfkraftwerken ist das in der Regel Wasser eines Flusses oder Sees. In Wärmetauschern, den sog. Kondensatoren, kühlt dieses Wasser den Dampf ab. Aus technischen Gründen ist dabei das Erreichen der je nach Wetter gegebenen Kühlwassertemperatur nicht vollständig möglich. Eine kleine Temperaturdifferenz zwischen dem Dampf am Ende des Energieumwandlungsprozesses und der Umgebungstemperatur ist unvermeidbar. Diese Differenz ist ein Maß für die Güte der verwendeten Kondensatoren (Grädigkeit) und der angewendeten Kühltechnik. Die bei der Abkühlung des Dampfes vom Kühlmittel aufgenommene und damit aus dem Prozess abgeführte Wärme ist die sog. „Abwärme“. Um ihre mögliche Nutzung geht es hier.

Abwärmenutzung ?

In Deutschland kann man im Winter, z.B. im Februar als typischen Heizmonat, von einer Temperatur eines zum Kühlen genutzten Gewässers von etwa 5 °C ausgehen. Das Kühlwasser hat dann beim Austritt aus dem Kraftwerk eine Temperatur von etwa 15 °C. Diese Temperaturspanne ist in den Betriebsgenehmigungen der Kraftwerke streng geregelt.

Typische Werte für ein Großkraftwerk am Rhein mit 2500 MW Leistung sind wie folgt: Monat Februar, Wassertemperatur des Rheins etwa 5 °C, Abflussmenge des Rheins etwa 1.200 m³/s, Kraftwerk mit voller Leistung in Betrieb, Kühlwasserbedarf etwa 120 m³/s, Kühlwasser-Austrittstemperatur etwa 15 °C.

Aus diesen Werten lässt sich eine „Aufwärmung“ des Rheins von etwa 1 °C ermitteln (Wärmemengenbilanz). Die sog. Kühlwasserfahne nach dem Austritt aus dem Kraftwerksbereich ist nach einigen Fluss-Kilometern kaum noch nachweisbar.

Raumtemperatur 15 °C ?

Es wird jedermann verständlich sein, dass Wasser oder Luft mit einer Temperatur von etwa 15 °C für die Beheizung von Wohnräumen, Büros, Werkstätten usw. nicht geeignet ist. Außerdem wäre auch noch eine Verminderung der Temperatur durch einen sicherlich notwendigen Transport des Kühlwassers zu den Verbrauchern zu beachten.

Der höchstmöglichen Ausnutzung der Brennstoffe steht also die weitgehende Nichtverwertbarkeit der Abwärme (Anergie) gegenüber.

Abwärmenutzung ja, aber nur bei höheren Temperaturen !

Abwärme lässt sich generell zu Heizzwecken dann nutzen, wenn die Abkühlung des Dampfes nicht bis in die Nähe der Umgebungstemperatur erfolgt. Dazu muss der Abkühlungsprozess des Dampfes bei höheren Temperaturen (z. B. 60 bis 120 °C) und höheren Dampfdrücken (z. B. 0,2 bis 2 bar) quasi abgebrochen werden. Diese Technik wird in sog. Heizkraftwerken angewendet, man spricht von Kraft-Wärme-Kopplung (siehe dort). Der Abbruch der Dampfabkühlung ist mit Einbußen bei der Stromerzeugung verbunden. Man bekommt also auch bei dieser

LANGFASSUNG

Technik nichts geschenkt. Bei keinem oder geringem Heizwärme- oder Warmwasserbedarf, z. B. im Sommer, müssen die Heizkraftwerke weitgehend auf diese grundsätzlich sinnvolle Doppelfunktion verzichten. Sie arbeiten dann, wenn ihr Einsatz überhaupt möglich und auch notwendig ist, ohne Wärmeauskopplung als reine sog. Kondensationskraftwerke. Der hierbei erreichbare Wirkungsgrad hängt davon ab, welche untere Prozesstemperatur (umgebungsbedingt und mit der vorhandenen Kraftwerksausstattung) erreichbar ist.

Abwärmenutzung über Wärmepumpen

Eine Nutzung der Abwärme - als „Primärenergie“ - könnte über Wärmepumpen ermöglicht werden. Dabei wird unter Zufuhr von

Arbeitsenergie (z. B. in Form von Strom), Wärme von einem niederen Temperaturniveau auf ein höheres Temperaturniveau (das dann z. B. für Heizzwecke nutzbar ist) gehoben. Dieser Prozess ist umso effektiver, je kleiner der erforderliche Temperaturhub ist; 15 °C „warmes“ Kühlwasser ist also deutlich effektiver nutzbar als 5 °C „kaltes“ Flusswasser. Es hängt von den spezifischen Gegebenheiten (insbesondere von der Entfernung zwischen Kraftwerk und Heizenergieverbraucher) ab, ob die direkte Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung beim Kraftwerk oder der Betrieb einer Wärmepumpe mit aufgewärmtem Kühlwasser an einem Ort fern vom Kraftwerk wirtschaftlicher ist. Je größer die zu überwindende Entfernung zwischen dem Ort der Heizwärmeerzeu-

gung und dem Ort des Wärmeverbrauchs ist, desto konkurrenzfähiger ist die Installation einer Wärmepumpe am Ort des Wärmeverbrauchs.

Fazit

Ja, man kann das Kühlwasser von Kraftwerken nutzen, aber nur sehr eingeschränkt.

Warum haben Wärmekraftwerke einen relativ niedrigen Wirkungsgrad ?

von Eike Roth

e-mail Eike.Roth@energie-fakten.de

Hier die Fakten - vereinfachte Kurzfassung

Wärmekraftwerke sind das Rückgrat unserer Stromversorgung. Sie wandeln Wärmeenergie zunächst in mechanische Arbeit und diese dann in Strom um. Ihr Wirkungsgrad liegt typischerweise zwischen etwa 30 und 50 %. Das heißt, dass bei ihnen nur rund die Hälfte oder noch weniger der zunächst erzeugten Wärmeenergie anschließend als Strom zur Verfügung steht, der Rest geht ungenutzt in die Umgebung. „Energieverschwender“ ist daher ein häufig gehörtes Urteil, diese Kraftwerke sollten möglichst bald durch „bessere“ Kraftwerke ersetzt werden.

Aber dieses Urteil ist vor schnell. Eine genauere Betrachtung zeigt, dass der numerische Wert eines Wirkungsgrades sich vor allem aus dem Zusammenspiel von Naturgesetzen mit von Menschen festgelegten Definitionen ergibt. Dabei ist auf zwei Besonderheiten besonders zu achten: Erstens kann aufgrund physikalischer Gesetze von der

für die Stromerzeugung benötigten Energiemenge häufig nur ein Teil in Strom umgewandelt werden. Dieser Teil ist von Kraftwerkstyp zu Kraftwerkstyp verschieden groß. Und zweitens wird der nicht in Strom umwandelbare Anteil in der genauen Definition des Wirkungsgrades bei unterschiedlichen Kraftwerkstypen unterschiedlich behandelt: Mal wird er bei der Berechnung des Wirkungsgrades mit berücksichtigt, mal nicht. Weitgehend ist das historisch bedingt, wobei die Berechnungsvorschrift meist so festgelegt wurde, dass die Berechnung des Wirkungsgrades möglichst einfach ist. Das spart Arbeit beim jeweiligen Kraftwerkstyp, erschwert aber den Vergleich zwischen verschiedenen Kraftwerken erheblich. Bei Wärmekraftwerken wirkt sich die willkürliche Festlegung besonders stark aus. Ihr relativ niedriger Wirkungsgrad ist in erster Linie eine Folge der gewählten Definition und auf Basis die-

ser Definition ist er vor allem naturgesetzlich bestimmt.

Infolge der unterschiedlichen Definitionen kann anhand des Wirkungsgrades nicht entschieden werden, ob z. B. ein Wasserkraftwerk mit 85 % Wirkungsgrad, ein kohlebeheiztes Wärmekraftwerk mit 45 % Wirkungsgrad, oder ein Sonnenkraftwerk mit 15 % Wirkungsgrad „besser“ ist. Welches Kraftwerk „besser“ ist, hängt davon ab, welches Kraftwerk seinen Zweck, Strom zuverlässig, billig und umweltverträglich zu erzeugen, am besten erfüllt. Das kann durchaus auch einmal eines mit einem relativ niedrigen Wirkungsgrad sein.

Warum haben Wärmekraftwerke einen relativ niedrigen Wirkungsgrad ?

von Eike Roth

e-mail Eike.Roth@energie-fakten.de

Hier die Fakten - Langfassung

Wärmekraftwerke sind Anlagen, die Wärmeenergie (auf dem „Umweg“ über mechanische Energie) in elektrische Energie (Strom) umwandeln. Die wichtigsten Wärmekraftwerke sind Kohle-, Gas- und Kernkraftwerke, ausserhalb Deutschlands vielfach auch Ölkraftwerke. Wärmekraftwerke stellen das Rückgrat unserer Elektrizitätsversorgung dar. Ihr Wirkungsgrad liegt im Allgemeinen etwa im Bereich von 30 bis 50 %. Daraus wird oft der Schluss gezogen, Wärmekraftwerke seien technisch unvollkommene Anlagen, gewissermaßen Energieverschwender und wir sollten sie daher durch „bessere“ Anlagen ersetzen. Um die Berechtigung dieser Forderung zu beurteilen, müssen sowohl die physikalischen Besonderheiten von Wärmeenergie als auch die Eigenheiten der vom Menschen festgelegten Definition des Wirkungsgrades berücksichtigt werden.

Definition des Wirkungsgrades

Der Wirkungsgrad eines Kraftwerkes wird mit dem griechi-

schen Buchstaben η (Eta) bezeichnet und wie folgt definiert:

$$\eta = \frac{\text{produzierte Strommenge}}{\text{eingesetzte Energiemenge}}$$

Meist wird der Wirkungsgrad in % angegeben, dann ist noch mit dem Faktor 100 zu multiplizieren.

Diese Definition gilt allgemein für jedes Kraftwerk. Sie erscheint unproblematisch, doch sind in der Praxis einige Probleme zu berücksichtigen: Zunächst einmal verbraucht ein Kraftwerk für seine Betriebsführung meist selbst Strom (Beleuchtung, Antrieb von Pumpen etc.). Setzt man in die Berechnung des Wirkungsgrades die insgesamt erzeugte Strommenge ein, so erhält man den „Brutto-Wirkungsgrad“, zieht man den elektrischen Eigenbedarf des Kraftwerkes (seinen selbst benötigten Strom) ab, so erhält man den „Netto-Wirkungsgrad“. Vergleiche sind eigentlich nur auf Basis des Netto-Wirkungsgrades sinnvoll.

Vor allem aber muss genauer gesagt werden, was man in der

Berechnung des Wirkungsgrades als „eingesetzte Energiemenge“ zu nehmen hat. Bei einem Kohlekraftwerk z. B. könnte man hierfür die in der Kohle chemisch gebundene Energiemenge nehmen, die bei der Verbrennung möglichst vollständig in Wärmeenergie und dann weiter in Strom umgewandelt werden soll. Was ist aber, wenn die Kohle nass ist und bei ihrer Verbrennung viel Energie zur Trocknung (Verdampfen des Wassers) verbraucht wird? Dann ist die zur Stromerzeugung tatsächlich nutzbare Wärmemenge kleiner als die in der Kohle chemisch gebundene Energie. Das trifft auch zu, wenn die Kohle nur unvollständig verbrennt und ein Teil unverbrannt in der Asche verbleibt oder als Kohlenstaub mit den Abgasen abgegeben wird. Auch die mit den heißen Abgasen an die Umgebung abgegebene Wärmeenergie steht für die Stromerzeugung nicht zur Verfügung. Letztlich hat man sich darauf geeinigt, bei einem konventionellen Wärmekraftwerk stets die im Brennstoff chemisch ge-

LANGFASSUNG

bundene und bei vollständiger Verbrennung freiwerdende Energie zu nehmen, hiervon aber die Verdampfungswärme des in den Abgasen enthaltenen Wasserdampfes abzuziehen (weil diese Energie des Wasserdampfes üblicherweise über den Schornstein abgegeben und nicht mit ausgenutzt wird). Bei einem Kernkraftwerk hat man sich darauf geeinigt, stets die im Reaktor erzeugte Wärmeenergie (auf die Zeiteinheit bezogen ist das die „thermische Leistung“) der Wirkungsgradberechnung zugrunde zu legen.

Damit ist bei Wärmekraftwerken alles geregelt. Wie aber sieht es bei anderen Kraftwerken aus? Bei einem Wasserkraftwerk z. B. hat man sich darauf geeinigt, als „eingesetzte Energiemenge“ die potentielle Energie (Fallenergie) des Wassers bezogen auf die im Kraftwerk ausnutzbare Fallhöhe (nicht bezogen auf Meereshöhe oder gar auf den Mittelpunkt der Erde) zu nehmen. Bei einem Sonnenkraftwerk (Fotovoltaik) hat man sich auf die Sonnenenergie geeinigt, die auf die Kraftwerksfläche direkt und indirekt (gestreut) eingestrahlt wird. Dabei berücksichtigt man aber nicht die gesamte Fläche des Kraftwerkes, sondern nur die aktive Fläche der Solarzellen. Die Energie, die z. B. auf Wege und auf Abstandsflächen zwischen den Solarzellen (notwendig zur Vermeidung gegenseitiger Abschattungen) eingestrahlt wird, bleibt also unberücksichtigt. Bei einem Windkraftwerk wird die auf die aktive Rotorfläche entfallende kinetische Energie (Bewegungsenergie) des Windes ge-

nommen (womit z. B. der erforderliche Abstand zwischen zwei Windrädern unberücksichtigt bleibt) u. s. w. Für jeden Kraftwerkstyp hat man eigene Festlegungen getroffen. Diese sind jeweils pragmatisch für diesen Typ ausgewählt worden. Das erleichtert die Berechnung für den jeweiligen Typ, erschwert vergleichende Aussagen zwischen verschiedenen Kraftwerkstypen aber ganz wesentlich.

Das Besondere an Wärmekraftwerken

Die bei der Verbrennung (von Kohle, Öl, Biomasse, Müll etc.) entstehende Wärme („thermische“ Energie) wird im Kraftwerk im sogenannten Dampferzeuger (Dampfkessel des Kraftwerkes) mit einem Wirkungsgrad von deutlich über 90 % auf das Wasser übertragen, das dabei verdampft. Im Wasserdampf des Wasser-Dampf-Kreislaufes des Wärmekraftwerkes findet sich also fast die ganze ursprünglich erzeugte Verbrennungswärme wieder.

Für das Weitere ist es entscheidend zu erkennen, dass Wärmeenergie grundsätzlich aus zwei Teilen besteht: Einem Teil, der Arbeitsfähigkeit enthält, das heißt, er kann in physikalische Arbeit (= mechanische Energie) und dann weiter in Strom umgewandelt werden, und einem zweiten Teil, der aus naturgesetzlichen Gründen nicht in physikalische Arbeit umgewandelt werden kann. Für die Stromerzeugung steht dieser Teil nicht zur Verfügung. In der Fachsprache der Physiker heißen der erstgenannte Teil „Exergie“ und der

zweitgenannte Teil „Anergie“. Die genaue Aufteilung auf diese beiden Teile ist keine feste Eigenschaft der Wärmeenergie, sondern hängt von den thermodynamischen Prozessparametern (Druck und Temperatur des Dampfes, allgemein des die Wärme speichernden Mediums) und von den Umgebungsrandbedingungen (vor allem von der Umgebungstemperatur) ab: Je höher die Dampftemperatur ist und je niedriger die Umgebungstemperatur ist, desto höher ist der Exergie-Anteil an der Wärmeenergie.

Der Exergie-Anteil an der Wärmeenergie lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$Ex = (TW - TU) / TW.$$

Darin bedeuten:

Ex den Exergie-Anteil

TW die Temperatur des die Wärmeenergie speichernden Mediums (also des heißen Dampfes) und

TU die Temperatur der Umgebung

(alle Temperaturen in Grad Kelvin, also als absolute Temperaturen angegeben (der absolute Nullpunkt liegt bei etwa -273 °C); um den Exergie-Anteil in % zu bekommen, ist noch mit dem Faktor 100 zu multiplizieren).

Die Formel zeigt klar die Zunahme des Exergie-Anteils (also des prinzipiell in Strom umwandelbaren Anteils) mit steigendem TW und mit sinkendem TU. In einem Kraftwerk will man daher eine möglichst hohe Dampftemperatur haben. Allerdings steigt mit der Dampftemperatur auch der Dampfdruck stark an. Die Grenzen sind durch die Material-

LANGFASSUNG

festigkeit bei hohen Temperaturen gegeben. Die Geschichte der Entwicklung der Kraftwerke war und ist weitgehend eine Geschichte der Entwicklung hochwarmfester Werkstoffe. Heute sind wir bei Kohlekraftwerken bei Dampfzuständen von 540 °C und 260 bar angelangt und das ist noch keineswegs das Ende.

Der zweite Einflussfaktor auf den Exergie-Anteil ist die Umgebungstemperatur T_U . Wenn wir eine Umgebung auf der Temperatur des absoluten Nullpunktes hätten und ein Kraftwerk unter Ausnutzung dieser Temperatur betreiben könnten, würde die Anergie verschwinden und die Wärmeenergie des Dampfes wäre reine Exergie. Dann könnte die gesamte Wärmeenergie in Strom umgewandelt werden. Real gibt es aber nur deutlich höhere Umgebungstemperaturen, Wärmeenergie besteht daher in der Praxis immer aus Exergie und aus Anergie und der Wirkungsgrad kann (bei der gewählten Definition) nicht beliebig hoch werden.

Zurück zum Kraftwerk. In diesem treibt der Wasserdampf die Dampfturbine an, genauer: er versetzt die Turbine in eine Drehbewegung. Dabei wird der Exergie-Anteil der Wärmeenergie mit einem sehr hohen Wirkungsgrad (theoretisch 100 %, in der Praxis fast 100 %) in physikalische Arbeit (= mechanische Energie) umgewandelt, (diese physikalische

Arbeit wird gewissermaßen der Wärmeenergie entzogen („extrahiert“, daher der Name „Exergie“)). Die mechanische Energie wird dann über die Turbinenwelle auf den Generator (Dynamo) übertragen und dort (wieder mit einem sehr hohen Wirkungsgrad von theoretisch 100 % und in der Praxis fast 100 %) in elektrische Energie umgewandelt. Die in der Wärmeenergie enthaltene Exergie wird also fast vollständig in elektrische Energie umgewandelt. Theoretisch kann die Exergie sogar zu 100 % in elektrische Energie umgewandelt werden. Dann würde der Wirkungsgrad des Kraftwerkes dem Exergie-Anteil entsprechen¹. Wie nahe man in der Praxis diesem theoretischen Grenzwert kommt, ist ein Maß für die technische Güte des Kraftwerkes.

Der Anergie-Anteil der Wärmeenergie verbleibt im Dampf. Nachdem dem Dampf in der Turbine durch Abkühlung und Entspannung seine Arbeitsfähigkeit entzogen worden ist, verlässt er die Turbine mit einer Temperatur, die nur noch knapp über der Umgebungstemperatur liegt. Die darin noch enthaltene Wärmeenergie kann daher nicht mehr genutzt (in physikalische Arbeit und dann in elektrische Energie umgewandelt) werden. Sie ist Abfall (daher der Name „Anergie“), der im Allgemeinen über Kühltürme in die Atmosphäre ab-

gegeben wird (siehe hierzu auch den Energie-Fakten-Beitrag: "[Abwärme: Kann man das Kühlwasser von Wärmekraftwerken nutzen?](#)"). Vor allem dieser unvermeidbare, aber eben nicht nutzbare Anergie-Anteil ist es, der bei der gewählten Definition den Wirkungsgrad eines Wärmekraftwerkes nach oben begrenzt². Der tatsächliche Wirkungsgrad eines Wärmekraftwerkes liegt stets relativ knapp unter dem Exergie-Anteil, je näher am Exergie-Anteil er liegt, desto „besser“ ist das Kraftwerk. Der Abstand zwischen dem Exergie-Anteil und dem Wirkungsgrad sagt mehr über die "technische Qualität" eines Kraftwerkes aus als sein Wirkungsgrad.

Wasserkraft

Bis zu einem gewissen Grad analog ist die Situation bei einem Wasserkraftwerk: Auch dort enthält das Wasser am Kraftwerksausgang durchaus noch potentielle Energie. Diese kann nur nicht mehr ausgenutzt werden, weil die „Umgebung“ das nicht zulässt (weil kein geeignetes Gefälle mehr vorhanden ist). Die noch vorhandene potentielle Energie (theoretisch wird die potentielle Energie erst am Mittelpunkt der Erde zu Null) wird mit dem ablaufenden Wasser aus dem Kraftwerk in die Umwelt abgegeben. Anders ausgedrückt: Die potentielle Energie des Wassers lässt

¹ Hinweis: Dieser theoretisch maximal mögliche Wirkungsgrad eines Wärmekraftwerkes wird zu Ehren des französischen Physikers Nicolas Leonard Sadi Carnot (1796 bis 1832) als "Carnot-Wirkungsgrad" bezeichnet.

² Manchmal findet man in der Literatur auch Angaben über den „exergetischen Wirkungsgrad“ eines Kraftwerkes. Dieser unterscheidet sich vom „normalen“ Wirkungsgrad dadurch, dass in seiner Definitionsformel bei der „eingesetzten Energiemenge“ nur der Exergie-Anteil berücksichtigt wird. Der „exergetische Wirkungsgrad“ kann theoretisch den Wert 1 erreichen und ist in der Praxis stets höher als der „normale Wirkungsgrad“.

LANGFASSUNG

sich nur bis zum Umgebungsniveau (hier als Höhenniveau vorgegeben) abarbeiten. Und das ist ganz analog wie beim Wärmekraftwerk: Bei diesem lässt sich eben die Wärmeenergie des Dampfes nur bis zum Umgebungsniveau (hier als Temperaturniveau vorgegeben) abarbeiten. In beiden Fällen ist die im Arbeitsmedium (Wasser bzw. Wasserdampf) noch vorhandene restliche Energie nicht mehr weiter nutzbar, und sie wird an die Umgebung abgegeben. Der Unterschied besteht nur in der vom Menschen unterschiedlich festgelegten Definition des Wirkungsgrades: Während beim Wasserkraftwerk die „eingesetzte Energiemenge“ definiert ist als die in Bezug auf die Umgebung nutzbare Energiemenge, die nicht nutzbare Energiemenge also gleich wegbleibt, ist sie beim Wärmekraftwerk definiert in Bezug auf den absoluten Nullpunkt, enthält also auch den in der Praxis nicht nutzbaren Anteil. Kein Wunder, dass die errechneten Wirkungsgrade für Wasserkraftwerke viel höher sind als die für Wärmekraftwerke. Aber daraus zu schließen, dass letztere technisch weniger gut oder gar Energieverschwender wären, ist sachlich nicht zulässig. Wenn man überhaupt einen Vergleich anstellen wollte, müsste man für das Wärmekraftwerk den Wirkungsgrad nur auf Basis der Exergie berechnen („exergetischer Wirkungsgrad“, siehe auch Fußnote 2) und mit dem „normalen“ Wirkungsgrad der Wasserkraftwerke vergleichen (oder man müsste beim Wasserkraftwerk die potentielle Energie mit

Bezug auf den Erdmittelpunkt einsetzen). Dann würde das Ergebnis ganz anders aussehen. Technisch sind beide Anlagen in erster Näherung gleich gut.

Was ist besser: Wasserkraft oder Wärmekraft?

Der Unterschied zwischen diesen beiden Kraftwerkstypen besteht vor allem darin, dass Wärmekraftwerke (jedenfalls, wenn sie mit fossilen Brennstoffen befeuert werden) ihre Primärenergieträger verbrauchen, während Wasserkraftwerke sich einer regenerativen (sich stets erneuernden) Primärenergieform bedienen. Wärmekraftwerke können wir daher nicht ewig betreiben, aber solange der Vorrat reicht (und das tut er bei den fossilen Energieträgern ziemlich sicher noch für mindestens 100 Jahre, es werden uns höchstens unsere Kinder verurteilen, weil wir wichtige Rohstoffe für Chemie- und Pharmaindustrie unwiederbringbar vernichtet (verbrannt) haben; und bei Kernkraftwerken reicht der Vorrat ohnehin für viele Jahrtausende) können wir sie in sehr großem Maßstab und praktisch überall einsetzen, während wir Wasserkraftwerke nur an wenigen, hierfür geeigneten Stellen auf der Erde und nur in dem Ausmaß einsetzen können, wie das Wasser nachrinnt.

Und des Weiteren unterscheiden sich die beiden Kraftwerkstypen vor allem hinsichtlich ihrer Risiken und Umweltauswirkungen. Nähere Angaben hierzu sind z. B. in den Energie-Fakten-Beiträgen „[Sind die deutschen Kernkraftwerke sicher?](#)“, „[Ändert der Mensch das Klima?](#)“

und „[Wie groß sind die Risiken der unterschiedlichen Stromerzeugungstechniken?](#)“ zu finden. Hier sei nur darauf hingewiesen, dass die ungelöste Entsorgungssproblematik der fossilen Energieträger (unvermeidlicher Ausstoß des klimaschädlichen CO₂) deren Einsatz wahrscheinlich früher begrenzen wird, als deren prinzipiell begrenzte Vorräte.

Wirkungsgrade anderer Kraftwerkstypen

Aber auch bei anderen Kraftwerkstypen ergeben sich naturgesetzliche Einschränkungen für den Wirkungsgrad auf Basis der jeweils festgelegten Definition. Bei einem Windkraftwerk z. B. kann die kinetische Energie des Windes nicht auf die Geschwindigkeit Null abgebaut werden, da die „verbrauchte“ Luft ja noch abströmen muss, um neuer Luft Platz zu machen. Die in der abströmenden Luft noch vorhandene kinetische Energie bleibt ungenutzt, wird in der „eingesetzten Energiemenge“ aber per Definition mit erfasst. Bei dieser Definition beträgt der theoretisch maximal erreichbare Wirkungsgrad eines Windkraftwerkes rund 59,3 %. In der Praxis werden etwa 40 % erreicht.

Auch bei der Sonnenenergie (Photovoltaik) gibt es naturgesetzliche Grenzen, weil Photonen (Lichtquanten) mit zu wenig Energie nicht zur Stromerzeugung beitragen können, und weil solche mit zu viel Energie die überschüssige Energie in hier nutzlose Wärme umwandeln. Bei der Wirkungsgradberechnung wird als „eingesetzte Energiemenge“ aber die gesamte Photonenener-

LANGFASSUNG

gie (die auf die aktive Fläche einfällt, siehe oben) berücksichtigt. Bei Silizium als aktivem Material (dem mit Abstand am häufigsten verwendeten Material) liegt der bei dieser Definition maximal erreichbare Wirkungsgrad bei etwa 28 %. Die derzeit erreichten Werte liegen unter 15 % (einzelne Zellen erreichen auch höhere Wirkungsgrade, aber für ganze Kraftwerke sind 15 % bereits deutlich optimistisch).

In der folgenden Tabelle sind typische Wirkungsgrade zusammengestellt, wie sie bei moderner Technik heute erreicht werden. Es sei nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, dass Wirkungsgradvergleiche zwischen verschiedenen Kraftwerkstypen wenig Aussagekraft besitzen, da sie vor allem von willkürlich vorgenommenen definitorischen Festlegungen bestimmt werden. Zum Vergleich sind auch die Wirkungsgrade von Autos und Elektromotoren angegeben.

Außerdem sei noch darauf hingewiesen, dass die Wärmekraftwerke (Steinkohle-, Braunkohle-, Erdgas-, Kernkraftwerk) bedarfsgerecht eingesetzt werden können, ihren jeweiligen Wirkungsgrad also immer erbringen können, wenn sie benötigt werden, die regenerativen Kraftwerke aber nur dann zur Verfügung stehen, wenn Wasser, Wind oder Sonne auch ausreichend verfügbar sind. In der dritten Spalte der Tabelle sind typische Werte für die auf das Jahr berechneten (Arbeits-)Verfügbarkeiten der einzelnen Kraftwerkstypen unter deutschen Verhältnissen angegeben. Dabei bedeutet z. B. eine Arbeitsverfügbarkeit von 50 %, dass das Kraftwerk bei einem fiktiven Betrieb unter ständiger Volllast in einem halben Jahr genau so viel Strom erzeugen würde, wie es mit seiner realen Leistung im ganzen Jahr erzeugt. Oder, z. B. beim Fotovoltaik-Kraftwerk bedeuten seine 10 %

Arbeitsverfügbarkeit auch, dass es im Durchschnitt nur mit 10 % seiner maximalen Leistung betrieben werden kann und selbst wenn man nur die Tageszeit als potentielle Sonnenscheinzeit berücksichtigt, selbst dann erreicht es im Mittel nur 20 % seiner maximal möglichen Leistung, mehr gibt die Sonne in Deutschland einfach nicht her.

Die Werte für die Arbeitsverfügbarkeit sind zum Teil enttäuschend niedrig. Damit aber noch nicht genug, wie schließlich die letzte Spalte der Tabelle zeigt, ist immer dann, wenn die Verfügbarkeitswerte niedrig sind, auch der Kraftwerkseinsatz zeitlich nicht oder nur bedingt planbar, weil von den Launen des Wetters abhängig. Die Verfügbarkeitspalte und die Planbarkeitspalte sagen mehr darüber aus, wie gut sich ein Kraftwerkstyp zur Stromversorgung einer modernen Volkswirtschaft eignet als die Wirkungsgradspalte. ■

Kraftwerkstyp	Wirkungsgrad in %	(Arbeits-) Verfügbarkeit in %	Kraftwerkseinsatz zeitlich planbar
Steinkohle	47	95	Ja
Braunkohle	45	95	Ja
Erdgas GuD*	58	95	Ja
Wasserkraft	85	50	Bedingt
Wind	40	20	Nein
Sonne Fotovoltaik	15	10	Nein
Solarthermisches Kraftwerk	30	10	Nein
Kernkraftwerk LWR**	35	95	Ja
Auto Benzin	20		
Auto Diesel	25		
E-Motor	95		

* GuD = Gas- und Dampfturbine

** LWR = Leichtwassereaktor