

Klausurfragen „Energie und Umwelt“

1. Erläutern Sie die unterschiedliche Abrufbarkeit von Strom bei den wichtigsten Energieerzeugungen. Unter Abrufbarkeit ist sowohl eine zeitliche Steuerung gemeint wie auch eine Relation zur Nennleistung. Beschreiben Sie Wirkungsgradketten des elektrischen Stromes normal und in der Verschwendung der Nachtspeicherheizungen. (3)
2. In einem Hamburger Magazin ist am 24.02.2001 in einem Artikel zur Energiepolitik folgendes zu lesen: „Kraft-Wärme-Kopplung, im Techniker-Jargon kurz KWK, steht für eine besonders ressourcen- und klimaschonende Form der Energieumwandlung. Anders als bei herkömmlichen Großkraftwerken wird die Abwärme nicht in die Atmosphäre gepustet, sondern als Heiz- oder industrielle Prozesswärme genutzt. Bei gleichem Ressourceneinsatz erzeugen KWK-Kraftwerke weitaus mehr Energie für den Endverbraucher.“ Nehmen Sie hierzu Stellung und beschreiben Sie beide Prozesse realistisch in ungefähren Wirkungsgraden bzw. Energiemengen. (3)
3. Wie ergibt sich die Preisuntergrenze (Opportunitätskosten) für Heizdampf bei einem Energieerzeuger, der diesen Heizdampf vor dem Niederdruckteil der Dampfturbine (mit Stromgenerator) auskoppelt? Erläutern Sie den Begriff Preisuntergrenze und seine Bedeutung. Wie verändern sich Preisrelation und Überschuss, wenn auf Basis der sogenannten kalorischen (energetischen) Methode kalkuliert wird? (3)
4. Nennen Sie mindestens zwei direkte Treibhausgase. Wie werden solche Gase zur Emissionsbeschreibung „gleichnamig“ gemacht? Beschreiben Sie die Situation in Bezug auf das gegenwärtige und zukünftige Weltklima. Wie sollen Regulierungen stattfinden, einmal über Zertifikate und zum anderen über einen „Export“ von Reduzierungen in Treibhausgasen? (3)
5. Welches sind die Verbrennungsprodukte etwa von Braun- und Steinkohle „versus“ Erdgas, wie ergeben sich analoge Klimawirkungen bezüglich Treibhausgasen? Was sind Heizwert und Brennwert bei Primärenergien, welche Rolle spielt ihre Ausnutzbarkeit bezüglich ökonomischer Kriterien und Klimakriterien? (?)

Aufgabe 1:

Erläutern Sie die unterschiedliche Abrufbarkeit von Strom bei den wichtigsten Energieerzeugungen. Unter Abrufbarkeit ist sowohl eine zeitliche Steuerung gemeint wie auch eine Relation zur Nennleistung. Beschreiben Sie Wirkungsgradketten des elektrischen Stromes normal und in der Verschwendung der Nachtspeicherheizungen.

Unter Abrufbarkeit wird die Möglichkeit verstanden, 100% der Nennleistung jederzeit in vollem Umfang abfragen zu können. Konventionelle Energieerzeuger, wie Kondensations-, Gas- und Dampf- oder Kernkraftwerke bieten den Vorteil, dass sie 100% der Nennleistung jederzeit zur Verfügung stellen können. Regenerative Energieträger, wie Windkraft oder Solarenergie vermögen dies nicht, da sie von den jeweiligen Umweltzuständen (Wind, Sonne etc.) abhängig sind und Energie nicht in großen Mengen speicherbar ist. Es sind zudem auch stark Unterschiede in den Wirkungsgraden der einzelnen Energieproduzenten zu verzeichnen. Der Wirkungsgrad beschreibt dabei das Verhältnis von produzierter Energie (in Form von elektrischer Energie) zu eingesetzter Energie. Bei Windkraftanlagen ergibt sich der Wirkungsgrad durch die Anzahl an Volllaststunden zu einem Betrag von ca. 15%. AKWs realisieren einen Wirkungsgrad von ca. 33%, Kondensationskraftwerke ca. 40%, Gas- und Dampf-Kraftwerke ca. 60% und Kraft-Wärme-Kopplung ca. 95%.

Elektro-Nachtspeicheröfen stellen ein eklatantes Beispiel für Energieverschwendung dar. Sie werden nachts über Rundsteueranlagen über elektrischen Strom aufgefüllt oder aufgeheizt, um dann tagsüber die Wärme kontrolliert wieder abzugeben. Dies hat dazu geführt, dass das Nachttal in den Stromverbrauchs- und Erzeugungslinien bei manchen Energieversorgungsunternehmen ganz verschwunden ist. Dies stellt aus der Sicht der EVU das klassische Beispiel einer Grenzkostenbetrachtung dar, denn an Kosten für diesen Strom sind bei dieser Sicht praktisch nur die „Materialkosten“ der verbrauchten Primärenergien relevant. Dies ist dadurch zu begründen, dass das Kraftwerk im Nachttal heruntergefahren werden müsste. Dieser Prozess ist sehr zeit- und personalintensiv, so dass zusätzliche Kosten entstehen würden. Bei einem durchgängig relativ konstanten Betrieb des Kraftwerks kann dieses Personal eingespart werden, so dass praktisch nur noch die Materialkosten relevant sind.

Als Wirkungsgradkette wird hier die Abfolge von Prozessen verstanden, bei der es zur Umwandlung von einer Energieform in eine andere kommt. Eine schlechte Abfolge von Wirkungsgraden bedeutet dabei eine fortlaufende Verschwendung von Energie und damit verbunden zusätzlicher Freisetzung von CO₂.

Bei den (zentral betriebenen) Elektro-Nachtspeicheröfen beginnt die Wirkungsgradkette im Kondensationskraftwerk mit ca. 40%. Beim Stromtransport kommt es zu Verlusten von ca. 4-5% und somit zu einem Wirkungsgrad von 95% und endet mit ca. 90% bei der Wärmeumwandlung von Strom in Heizwärme. Dies ergibt einen gesamten Wirkungsgrad von ca. 34% (aus: $40\% \cdot 95\% \cdot 90\%$) im Vergleich zu 95% bei dezentraler zeitgerechter Hausheizung. Die Differenz von 61% sind Abwärmern, die unnötigerweise irgendwo anfallen, weitgehend begleitet durch entsprechend proportionale Umweltbelastungen.

Aufgabe 2:

In einem Hamburger Magazin ist am 24.02.2001 in einem Artikel zur Energiepolitik folgendes zu lesen: „Kraft-Wärme-Kopplung, im Techniker-Jargon kurz KWK, steht für eine besonders ressourcen- und klimaschonende Form der Energieumwandlung. Anders als bei herkömmlichen Großkraftwerken wird die Abwärme nicht in die Atmosphäre gepustet, sondern als Heiz- oder industrielle Prozesswärme genutzt. Bei gleichem Ressourceneinsatz erzeugen KWK-Kraftwerke weitaus mehr Energie für den Endverbraucher.“ Nehmen Sie hierzu Stellung und beschreiben Sie beide Prozesse realistisch in ungefähren Wirkungsgraden bzw. Energiemengen.

Kraft-Wärme-Kopplung kann als sogenannte Kuppelproduktion bezeichnet werden, d.h. es werden Strom und Wärme (und idealerweise auch Kälte) gleichzeitig produziert. In dem Artikel wird davon ausgegangen, dass die Abwärme nicht wie normalen Kondensationskraftwerken an die Luft abgegeben wird, sondern als Prozesswärme weiter genutzt wird.

In einem normalen thermischen Kraftwerk wird der Strom in einer Dampf- oder Gasturbine erzeugt, so dass die Abwärme eine Temperatur von ca. 50-80° C hat. Um jedoch die Abwärme als Prozesswärme nutzen zu können, muss diese eine Temperatur von ca. 150-200° C aufweisen. Somit befindet sich die Abwärme hier auf einem energetisch so niedrigen Niveau, dass sie nicht mehr zum Heizen oder für Industriebetriebe genutzt werden kann. Dieser Dampf müsste über Gegendruck- und Entnahmeturbinen vor dem Strom erzeugenden Generator entnommen werden, so dass insgesamt weniger Strom erzeugt werden würde. Es handelt sich also bei der Abwärmeabgabe nicht um Energieverschwendung. Allerdings wird durch KWK ein deutlich höherer Wirkungsgrad erzielt. Normale Kondensationskraftwerke erreichen einen Wirkungsgrad von ca. 40%, Gas- und Dampf-Kraftwerke von ca. 60%. Moderne Heizkraftwerke mit KWK erreichen hingegen Wirkungsgrade von über 90%, davon ca. 30% Strom und 60% Wärme.

Dieses lässt sich anschaulich am Beispiel des Umbaus des Kraftwerks Wedel vom Kondensationskraftwerk zum Heizkraftwerk 1987 darstellen. Der Dampf wird vor dem Niederdruckteil aus der Turbine herausgeführt zum Wärmetauscher, von dem aus das Hamburger Fernwärmenetz gespeist wird. Der nicht mehr benötigte Niederdruckteil der Turbine läuft leer mit und trägt nicht mehr zur Stromerzeugung bei. Dadurch ergibt sich eine Leistung des Kraftwerks von 140 MW Strom und 300 MW Fernwärme, also eine Stromkennzahl von $140/300 = 46,67\%$. Der gesamte (thermische) Wirkungsgrad wird mit 80% angegeben, d.h. er ist doppelt so hoch wie vor dem Umbau (40%). Somit verringert sich auch der Primärenergieeinsatz und die damit verbundene Emission von CO₂. Allerdings kommt es zu dem Problem der zeitverteilten Nachfrage nach Strom und Wärme, da diese (z.B. im Winter) meist zeitgleich benötigt werden. Wedel steht deshalb im Sommer still.

Auch die Aussage, dass mehr Energie für den Endverbraucher zur Verfügung steht, ist kritisch zu betrachten. Aufgrund der Umstellung zum KWK-Kraftwerk steht den Verbrauchern jetzt zwar kalorisch gesehen etwa doppelt so viel Energie bei gleichem Primärenergieeinsatz zur Verfügung (440 MW statt 270 MW), jedoch schlägt sich dies nicht in niedrigeren Preisen nieder, da die EVU nach der kalorischen Methode nur ihren Umsatz verdoppeln, da sie eine kWh Wärme mit einer kWh Strom gleichsetzen, anstatt nur die Opportunitätskosten der entgangenen Strommenge als Preisuntergrenze zu berechnen. Zudem besteht die Schwierigkeit darin, dass Wärme und Strom mit saisonalen Schwankungen (Sommer – Winter) nachgefragt werden.

Aufgabe 3:

Wie ergibt sich die Preisuntergrenze (Opportunitätskosten) für Heißdampf bei einem Energieerzeuger, der diesen Heißdampf vor dem Niederdruckteil der Dampfturbine (mit Stromgenerator) auskoppelt? Erläutern Sie den Begriff Preisuntergrenze und seine Bedeutung. Wie verändern sich Preisrelation und Überschuss, wenn auf Basis der sogenannten kalorischen (energetischen) Methode kalkuliert wird?

Als Preisuntergrenze bezeichnet man den Preis einer abzusetzenden Leistungseinheit, bis zu dem sich die Vermarktung für das Unternehmen lohnt. Bei der Kalkulation der Kosten liegt die exergetische Kalkulation anhand der Opportunitätskosten vor. Unter Opportunitätskosten werden entgangene Gewinnbeiträge bzw. entgangene Deckungsbeiträge verstanden, die dadurch entstehen, dass der zu Heizzwecken bei der Kraft-Wärme-Kopplung vor der stromerzeugenden Turbine ausgekoppelte Dampf nicht mehr zur Stromerzeugung herangezogen werden kann. Der dabei weniger produzierte Strom multipliziert mit seinem Preis ergibt den Einnahmeausfall, der durch die Dampfauskopplung entsteht. Die Preisuntergrenze ergibt sich dann dadurch, dass dieser Einnahmeausfall ins Verhältnis zu der neu gewonnenen thermischen Energie gesetzt wird.

Am Beispiel des Umbaus des Kraftwerks Wedel kann dies folgendermaßen illustriert werden:

Vor dem Umbau wurden 270 MW Strom produziert, nach dem Umbau 140 MW. Dies ergibt einen Ausfall von 130 MW. Diesem Ausfall von 130 MW elektrisch stehen jetzt jedoch gewonnene 300 MW thermisch gegenüber. Somit kostet eine gewonnene kWh thermisch den Betrag $130/300 = 43,33\%$ des nicht erlösten Strompreises. Bei einem durchschnittlichen Strompreis von 10,2 Cent ergibt dies ca. 4,43 Cent/kWh.

Bei der kalorischen Methode, also der energetischen Betrachtung, verteuert sich die Fernwärme beträchtlich, ohne dass eine korrespondierende Verbilligung des Stroms stattfindet, da Wärmeenergie und elektrischer Strom gleichgesetzt werden. Bei kalorischer Betrachtung kostet eine kWh thermisch jetzt genauso viel wie eine kWh elektrisch, also 10,2 Cent, so dass sich die kWh thermisch gegenüber der exergetischen Betrachtung um 120% verteuert hat, da dort die Opportunitätskosten nur 4,43 Cent/kWh betragen haben. Der Heizenergieverbraucher, der umgestellt hat und jetzt entsprechende Fixkosten der Umstellungsinstallation nicht rückgängig machen kann, steht diesen Preissteigerungen relativ hilflos gegenüber. Der Umsatz hat sich kalorisch für die EVU von 270 MW auf 440 MW nahezu verdoppelt, jedoch gibt es in der Praxis Schwierigkeiten, da Wärmeenergie nur partiell und saisonbedingt nachgefragt wird, so dass das Kraftwerk Wedel im Sommer still steht.

Aufgabe 4:

Nennen Sie mindestens zwei direkte Treibhausgase. Wie werden solche Gase zur Emissionsbeschreibung „gleichnamig“ gemacht? Beschreiben Sie die Situation in Bezug auf das gegenwärtige und zukünftige Weltklima. Wie sollen Regulierungen stattfinden, einmal über Zertifikate und zum anderen über einen „Export“ von Reduzierungen in Treibhausgasen?

Mit Treibhausgas (oder auch Klimagas) werden die Gase bezeichnet, die wesentlich zum Treibhauseffekt beitragen:

- **Kohlendioxid** (CO₂)
- **Methan** (CH₄)
- **Lachgas** (Distickstoffoxyd N₂O)
- **Fluorkohlenwasserstoffe** (FSKW, z.B. CHF₃)
- **Schwefelhexafluorid** (SF₆).

Um die **Treibhauswirksamkeit** (Global Warming Potential **GWP**) durch eine einzige Zahl bewerten zu können („gleichnamig“ machen), wird die Treibhauswirkung der Treibhausgase mit der von CO₂ verglichen (GWP von CO₂ = 1) und mit "**CO₂-Äquivalent**" bezeichnet. Die Bezugsgröße ist CO₂, so dass dieser Wert mit 1 angesetzt wird. Methan hat eine Äquivalenzziffer von 21, Lachgas von 310, FKW 11700 und SF₆ 23900. Ein Äquivalenzwert von z.B. 21 bei Methan bedeutet hierbei, dass Methan 21 mal umweltschädlicher ist als CO₂. Bedeutend für den Treibhauseffekt ist CO₂ wegen der enormen Menge, die täglich produziert wird. CO₂ entsteht bei der Verbrennung des Kohlenstoffs fossiler Brennstoffe. Methan als zweitwichtigstes Treibhausgas gehört zu den fast idealen Brennstoffen der Kohlenwasserstoffe (Methan, Äthan, Propan, Butan, Pentan) und ist als Bestandteil im Erdgas enthalten. Methan enthält dabei den relativ höchsten Anteil an Wasserstoff, so dass bei der Verbrennung relativ weniger CO₂ entsteht.

In dem Zeitraum von 1990 bis 1997 ist die CO₂-Emission kontinuierlich zurückgegangen und liegt mit 1.035.594 Gigagramm (1 Gigagramm = 1000 Tonnen) inklusive der CO₂-Äquivalente CH₄, N₂O etc., 13,57% unter dem Jahreswert von 1990.

Allerdings sind diese Zahlen kritisch zu betrachten, da eine Messung mit derartiger Genauigkeit nicht möglich ist. Der Rückgang bis 2004 kann mit etwa 15% angenommen werden.

Die Verringerung des CO₂-Ausstoßes ist nur so gering, da die Selbstverpflichtung der Unternehmen als nahezu wirkungslos anzusehen sind. Ein Unternehmen wird erst dann Investitionen in CO₂-senkende Technologien vornehmen, wenn die Kosten der Sanktionen höher werden als die Umrüstkosten. Es handelt sich also um ein rein betriebswirtschaftliches Kalkül.

Das Europäische Parlament hat daher beschlossen, dass ab 2005 Verschmutzungsrechte gehandelt werden können. Dabei können energieintensive Betriebe Emissionsrechte kaufen und verkaufen, um die Regulierung von Treibhausgasen zu gewährleisten. Problematisch erweist sich die Zuteilung von Emissionsbudgets auf die Verursacher. Es wird daher eine Gesamtemissionsmenge ermittelt, die in einzelne Emissionsrechte aufgeteilt und an die Verursacher vergeben werden. Diese Rechte der CO₂-Emission sollen dann von Jahr zu Jahr diskontiert werden, so dass die Unternehmen entweder zusätzliche Emissionsrechte am Markt kaufen oder Ihre Emission durch Investitionen in emissionsärmere Anlagen verringern müssen. Ein Unternehmen wird erst dann Investitionen in CO₂-senkende Technologien vornehmen, wenn die Kosten des Zukaufs höher werden als die Umrüstkosten. Es handelt sich also um ein rein betriebswirtschaftliches Kalkül.

Der Handel dieser Rechte kann auch zwischen zwei Ländern erfolgen, wie im Protokoll von Kyoto festgelegt wurde. Das Kyoto-Protokoll sieht vor, dass alle Vertragsparteien ihre Treibhausgase insgesamt im Zeitraum von 2008 bis 2012 um mindestens 5 Prozent gegenüber dem Bezugswert von 1990 senken werden. Das Protokoll tritt dann in Kraft, wenn es von mindestens 55 Vertragsparteien ratifiziert worden ist.

Die USA als Verursacher von 36,11% der weltweiten CO₂-Emission nimmt an diesem Protokoll nicht teil. Zudem sind China und Indien mit einer Bevölkerung von zusammen ca. 2,5 Milliarden Menschen ebenfalls nicht beteiligt.

Russland als Verursacher von 17,40% der weltweiten Treibhausgase braucht diese zudem aufgrund der wirtschaftlichen Verhältnisse vorerst nicht reduzieren und bleibt bei 100% des Bezugswertes von 1990, genauso wie die teilnehmenden Entwicklungsländer.

Das Protokoll von Kyoto sieht folgende Maßnahmen („Einzelnen oder gemeinsam“) vor:

- Emissionshandel der Industrieländer untereinander
- Realisierung von Umweltschutzmaßnahmen in
 - anderen Industrieländern
 - Entwicklungsländern

Allerdings besteht hier die Auflage, dass mindestens 50% der CO₂-Reduktionsmaßnahmen im eigenen Land vorgenommen werden müssen.

Der Emissionshandel ist der Königsweg zum Klimaschutz. Problematisch erweisen sich dabei jedoch die Kontrolle und die Sanktionen, so dass marktwirtschaftliche Lösungen gefunden werden müssen.

Das Emissionszertifikat zielt ab auf Verbesserung. Allerdings führt dies dazu, dass Unternehmen bestraft werden, die bereits Verbesserungen vorgenommen haben, da jede weitere Verbesserung mit überproportionalen Kosten verbunden ist. Da diese Unternehmen sich kaum verbessern können, müssen sie Zertifikate nachkaufen, um die geforderten Richtlinien zu erfüllen. Das gleiche gilt bei einer jährlichen Abwertung der Zertifikate.

Aufgabe 5:

Welches sind die Verbrennungsprodukte etwa von Braun- und Steinkohle „versus“ Erdgas, wie ergeben sich analoge Klimawirkungen bezüglich Treibhausgasen? Was sind Heizwert und Brennwert bei Primärenergien, welche Rolle spielt ihre Ausnutzbarkeit bezüglich ökonomischer Kriterien und Klimakriterien?

Bei der Verbrennung der fossilen Brennstoffe Kohle, Heizöl und Erdgas fallen überwiegend Wasserdampf (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2) an. Ihre Hauptbestandteile entsprechen der natürlichen Zusammensetzung der Atmosphäre. Außerdem entstehen je nach Brennstoff in geringeren Mengen weitere chemische Verbindungen (z. B. Stickstoffoxide, Schwefeldioxid, Kohlenwasserstoffe, Fluoride) sowie Staub und Ruß. Erdgas bietet den Vorteil, dass es als kurzkettiges Kohlenwasserstoff einen hohen Anteil an Wasserstoff, einen geringen Anteil an Kohlenstoff und nahezu keinen Schwefel enthält. Somit entsteht bei der Verbrennung gegenüber den festen Brennstoffen Braun- und Steinkohle ca. 40-50% weniger CO_2 bei gleichem Primärenergieeinsatz.

Der Heizwert ist die Energie, die bei einer vollständigen Verbrennung abgegeben wird, wenn Rauch- oder Abgas bei konstantem Druck bis auf die Bezugstemperatur zurückgekühlt werden. Der aus der Verbrennung entstandene Wasserdampf bleibt aber hierbei gasförmig. Früher wurde dieser Wert als "unterer Heizwert H_u " bezeichnet.

Der Brennwert ist die Energie, die bei einer vollständigen Verbrennung abgegeben wird, wenn das Abgas bei konstantem Druck bis auf die Bezugstemperatur zurückgekühlt wird. Der Brennwert beinhaltet also zusätzlich die durch Kondensation des entstandenen Wasserdampfes freiwerdende Energie, die Kondensationswärme. Früher wurde dieser Wert als "oberer Heizwert H_o " bezeichnet. Der Heizwert von Steinkohle liegt bei ca. 9,3 kWh/kg, von Braunkohle bei ca. 5,5 kWh/kg und von Erdgas bei ca. 11,8 kWh/m³.

Durch den niedrigeren Heizwert von Kohle gegenüber Erdgas ist eine größere Menge an Kohle nötig, um die gleiche Menge Energie einer Einheit Erdgas zu erzeugen. Somit erzeugt Erdgas relativ geringe CO_2 -Emissionen und ist damit ein relativ klimafreundlicher Brennstoff. Ökonomisch ist zudem zu erwähnen, dass Erdgas relativ günstig auf den Weltmärkten angeboten wird, so dass die Kosten auch in bezug auf die Energieausbeute als geringer anzusetzen sind.

Bei der Verbrennung in Kraftwerken wird versucht, den höheren Brennwert zu realisieren. Dazu muss die Verbrennung bei niedrigen Temperaturen unter 100° C stattfinden, um die Verdampfung des in dem Energieträger gespeicherten Wassers zu verhindern. Das Problem bei der Abwärme mit einer Temperatur unter 100° C ist darin zu sehen, dass der in den Abgasen enthaltene Schwefel einen Taupunkt von 130° C hat, so dass sich dieser bei den niedrigen Temperaturen unter 100° C verflüssigt und zurück in die Kessel fließt, anstatt sich mit den Abgasen zu verflüchtigen. Dies hat Kesselfraß zu Folge durch die Bildung von Schwefelsäure.

Auch hier liegt der Vorteil wiederum beim Erdgas aufgrund des geringen Schwefelgehalts und der somit saubereren Verbrennung. Allerdings ist dabei auch zu berücksichtigen, dass Erdgas als Bestandteil Methan enthält, das als zweitwichtigstes Treibhausgas als CO_2 -Äquivalent 21 mal so schädlich ist wie CO_2 .