

Energiebereitstellung mit Kohle, Erdöl und Erdgas - alles „fossile“ Technik?

Prof. i.R. Dr.-Ing. Dietmar Hein
h s energieanlagen gmbh

Das Thema Energie, oder besser gesagt, die ausreichende Bereitstellung von Energie zur Versorgung der Menschheit, möglichst ohne dies zu Lasten nachfolgender Generationen zu tun, erscheint uns als die Quadratur des Kreises. Energie hat etwas mit Lebensqualität zu tun; deshalb hat die Energieversorgung auch eine gesellschaftspolitische Dimension. Es ist daher eine der größten Herausforderungen unserer Zeit, die wachsende und nach mehr Lebensqualität strebende Weltbevölkerung ausreichend und mit bezahlbarer Energie zu versorgen.

Damit sind für eine Diskussion des „Energieproblems“ folgende Fragen zu stellen:

- Wie werden wir den Energiebedarf künftig, z.B. im Jahr 2050, decken?

Und speziell in diesem Beitrag, der sich mit der Energiebereitstellung mit Kohle, Erdöl und Erdgas befasst, stellen sich die Fragen:

- Können wir im Jahr 2050 bereits weitgehend auf fossile Energieträger verzichten, oder welchen Beitrag müssen diese noch leisten?
- Gibt es Technologien zur Schonung der Ressourcen und der Umwelt auch für die fossilen Energieträger?

Dieser Beitrag wird sich daher in folgende Abschnitte gliedern:

- Energiebedarf heute und im Jahr 2050
- Kraftwerkskonzepte
- künftige Bedeutung der fossilen Energieträger
- Technologien zur Schonung der Ressourcen und der Umwelt

Energiebedarf heute und im Jahr 2050

Ausgangspunkt der Frage, wie sich der Weltenergiebedarf entwickeln wird, ist zunächst der heutige Bedarf und seine Verteilung auf einzelne Regionen. Wenn an dieser Stelle von Energiebedarf gesprochen wird, so ist stets der Bedarf an Primärenergie zu verstehen.

Trägt man in einem Diagramm, Abb. 1, den Energiebedarf über der Bevölkerung auf, und zwar geordnet nach dem spezifischen Energiebedarf, so erhält man die interessante Information, dass heute $\frac{1}{4}$ der Weltbevölkerung $\frac{3}{4}$ des gesamten Weltenergiebedarfs verbraucht. Während in den Industrieregionen 7 t SKE pro Kopf und Jahr verbraucht werden, sind es in den Entwicklungsländern mit 0,7 t SKE nur $\frac{1}{10}$ des Wertes.

Weltenergiebedarf

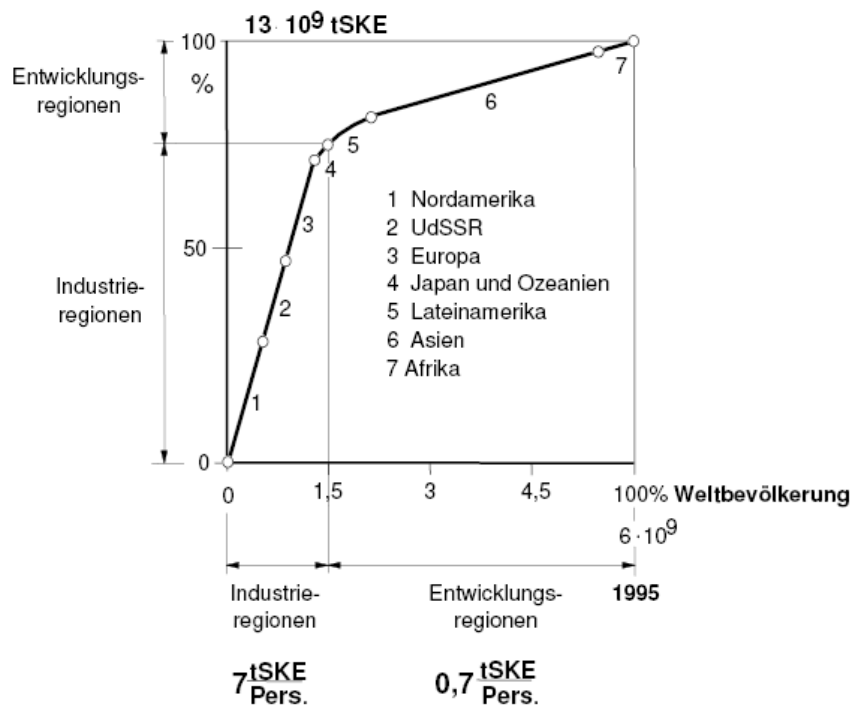


Abbildung 1: Weltenergiebedarf 1995

Welche Steigerung des Bedarfs ist nun bis zum Jahr 2050 zu erwarten, zumal davon auszugehen ist, dass die Weltbevölkerung von heute 6 Mrd auf 9 Mrd Menschen anwachsen wird?

Hierzu ist eine internationale Kommission zu folgendem Schluss gekommen:

- Die Bevölkerung in den Industrieländern wird nicht zunehmen, die Zunahme erfolgt in den Entwicklungsländern.
- Den Industrieländern wird es gelingen, ihren zusätzlichen Bedarf an Energie durch effizientere Nutzung bei der Energieanwendung zu kompensieren. Dies bedeutet, dass Punkt 5 in Abb. 1 an seiner Stelle verbleibt.
- Eine vorsichtige Prognose für die Entwicklungsländer geht davon aus, dass sich der Prokopfverbrauch dort von 0,7 auf 1,3 t SKE knapp verdoppeln wird.

Schon mit diesen moderaten Annahmen wird der Weltenergiebedarf von 13 auf 20 Mrd t SKE steigen, Abb. 2. Die Shell-Studie gibt für ihr Szenario „nachhaltiges Wachstum“ einen Wert von 33,8 Mrd t SKE an. Dabei müssen mehr als die Hälfte des Weltenergiebedarfs aus regenerativen Quellen gedeckt werden. Dies erscheint aus heutiger Sicht nicht realisierbar.

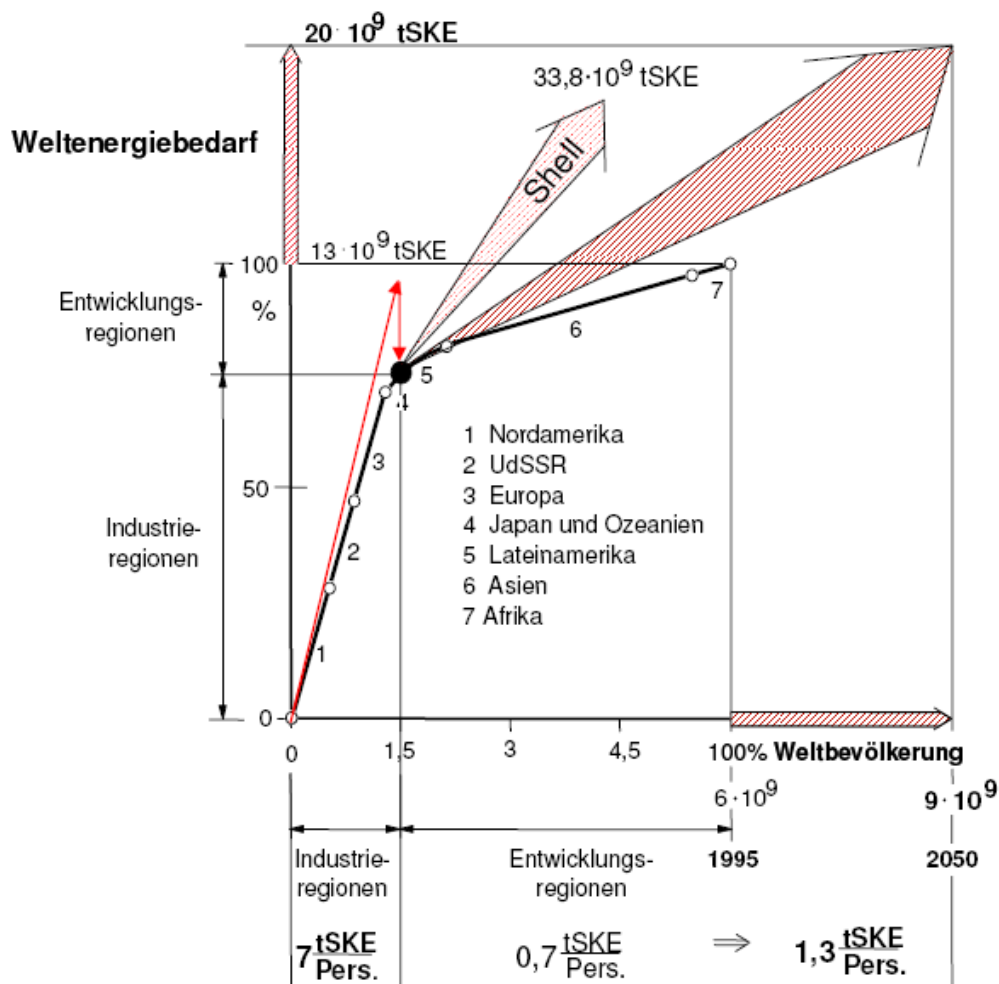


Abbildung 2: Weltenergiebedarf, Zuwachs durch Nachholbedarf

Welcher Bedarf sich einstellt, wenn in China das Fahrrad als Verkehrsmittel durch das Auto abgelöst wird, ist nur schwer vorstellbar. Dabei ist der Prozess bereits angelaufen: China produziert heute bereits mehr Automobile als Europa.

Kraftwerkskonzepte

Die Umwandlung der im Brennstoff gespeicherten chemischen Energie in mechanische Arbeit oder elektrische Energie ist mit unterschiedlichen Technologien möglich. Den heutigen Kraftwerken gemein ist, dass die Umwandlung über die Energieform Wärme, d.h. über Dampf oder heißes Gas erfolgt. Nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik kann dabei aber stets nur ein Teil der Wärme in Arbeit umgewandelt werden. Der Umwandlungswirkungsgrad ist nach Carnot um so höher, je höher das Temperaturniveau ist, auf dem die Wärme zugeführt wird, und je niedriger die Temperatur ist, bei dem die Wärme abgeführt wird. Die obere Prozesstemperatur wird durch die Werkstoffe vorgegeben, die untere ist bestenfalls die Umgebungstemperatur. Damit liegt der theoretisch erreichbare Wirkungsgrad eines Dampfkraftprozesses heute bei etwa 70 %.

Am weitesten verbreitet zur Erzeugung von elektrischer Energie sind heute die **Dampfkraftwerke**, Abb. 3. Wasser wird durch Zufuhr von Wärme auf hohem Druck verdampft. Der Dampf wird in einer Dampfturbine entspannt und leistet dabei Arbeit, indem er einen Generator antreibt. Der entspannte Dampf wird kondensiert und die Abwärme über einen Kühlturm an die Umgebung abgeführt. Nachteil dieser Technologie ist, dass zwar die Kohle bei bis zu 1.400 °C verbrannt wird, der im Dampferzeuger erzeugte Heißdampf aus Werkstoffgründen nur maximal eine Temperatur von 600 °C aufweisen kann. Dagegen wird die Abwärme nahezu bei Umgebungstemperatur abgeführt. Als Beispiel zeigt Abb. 3 das Braunkohlekraftwerk Niederaußem mit dem derzeit höchsten Wirkungsgrad von 43,8 %. Hauptbrennstoffe sind Stein- und Braunkohle; es wird aber auch Müll oder Biomasse verfeuert.

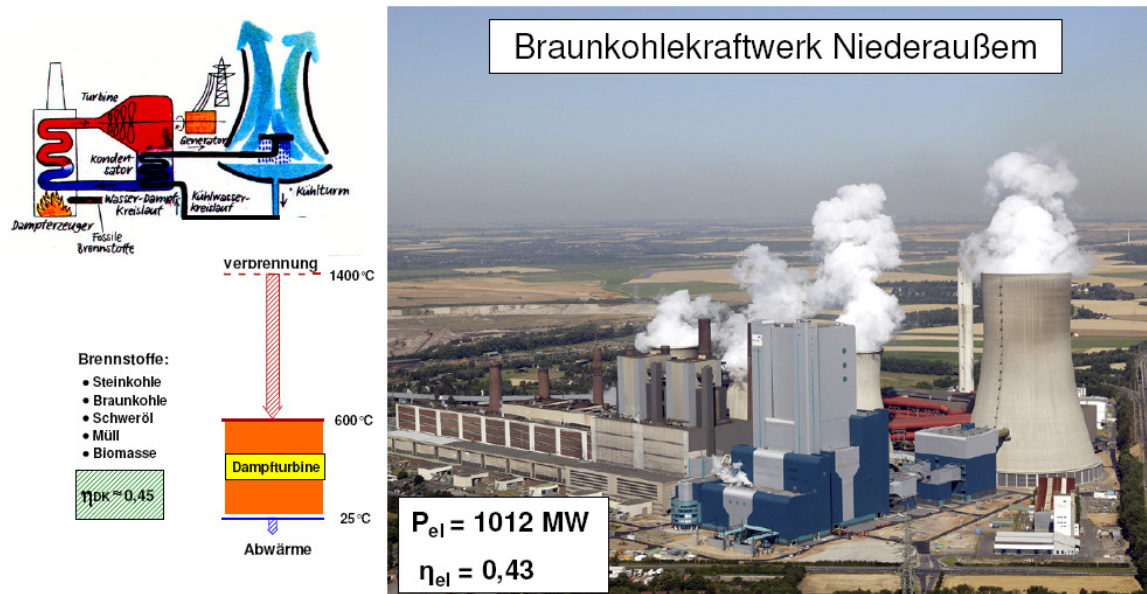


Abbildung 3: Braunkohlekraftwerk Niederaußem

Gasturbinenkraftwerke, Abb.4, sind einfache und relativ billige Kraftwerke. Luft wird aus der Umgebung angesaugt und verdichtet, d.h. der Druck erhöht. Dann wird die Temperatur durch Verbrennung erhöht. Da das bei der Verbrennung entstehende Rauchgas direkt durch die Turbine strömt, wird ein sauberer Brennstoff, z.B. Erdgas benötigt.

Bei dieser Technologie wird die Wärme bereits ab einer Temperatur von ca. 1.300 °C genutzt; die Abwärme wird jedoch mit ca. 550 °C abgegeben. Der Wirkungsgrad ist daher mit ca. 40 % relativ bescheiden.

Das Foto zeigt die GT13E2 und eine Skizze der GT 26 von Alstom, die mit einer gestuften Verbrennung arbeitet, was den Wirkungsgrad deutlich erhöht hat.

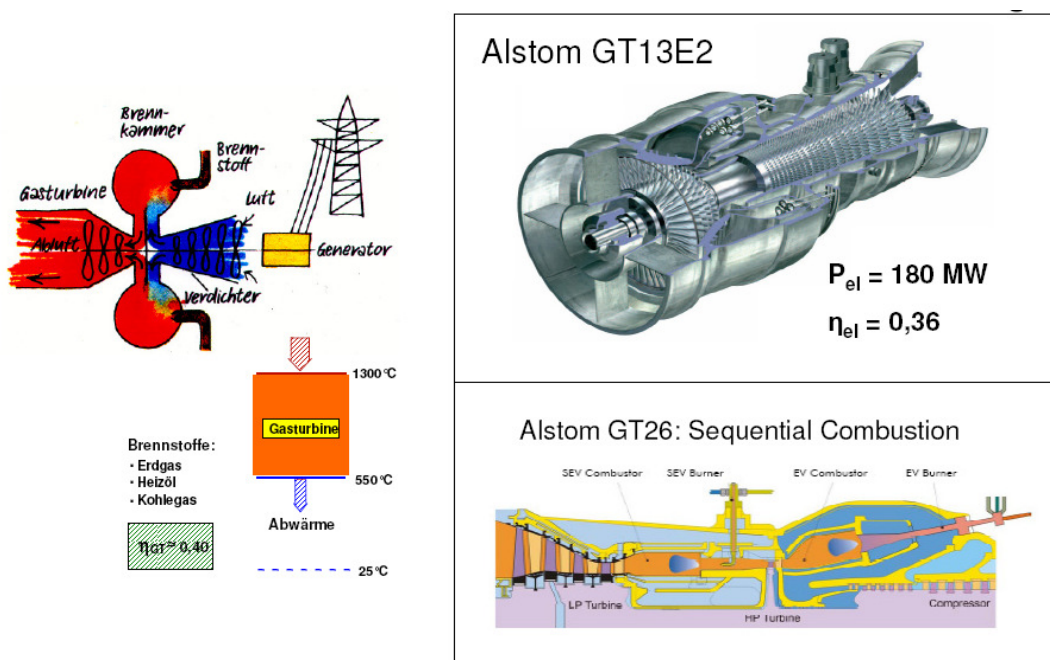


Abbildung 4: Gasturbinenkraftwerk und Gasturbine GT 13E2 bzw. GT 26

Es liegt nun nahe, die Vorteile dieser beiden Kraftwerkstypen im **kombinierten Gas- und Dampfturbinenkraftwerk** (GUD), Abb. 5, zu nutzen: Dabei erzeugt das heiße Abgas aus der Gasturbine in einem Abhitzedampferzeuger Dampf, der dann in einer Dampfturbine entspannt wird; die Abwärme kann nahe der Umgebungstemperatur über Kondensator und Kühlturm an die Umgebung abgegeben werden. Diese Kombination führt heute zu Wirkungsgraden bis zu etwa 60 %.

Das Foto (Abb. 5) zeigt den typischen Aufbau eines GUD-Kraftwerkes.

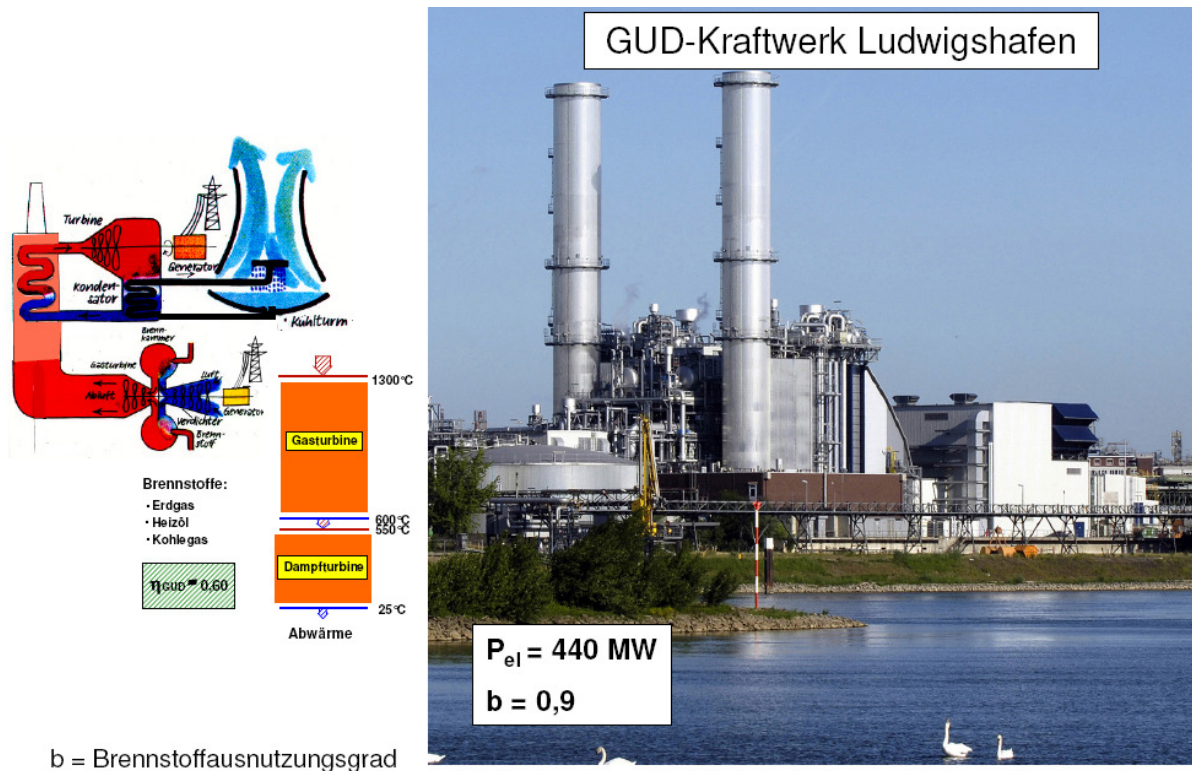


Abbildung 5: GUD-Kraftwerk Ludwigshafen

Eine noch bessere Ausnutzung der im Brennstoff enthaltenen Energie erhält man, wenn auch die Abwärme des Kraftwerks genutzt wird, z.B. als Prozesswärme oder zur Raumheizung. Wir sprechen in diesem Fall von einem **Heizkraftwerk**, Abb. 6, oder von **Kraft-Wärme-Kopplung**. Um die Wärme auf einem Temperaturniveau zu erhalten, die für eine Nutzung erforderlich ist, wird der Dampf in der Turbine nicht vollständig entspannt. Man verzichtet dafür aber auf etwas elektrische Leistung. Der elektrische Wirkungsgrad eines Heizkraftwerkes ist daher etwas geringer, der Brennstoffausnutzungsgrad jedoch hoch.

Das Foto (Abb.6) zeigt ein typisches Industrie-Heizkraftwerk. Diese weisen eine kleinere Leistung auf, da sie häufig nach dem Wärmebedarf ausgelegt werden.

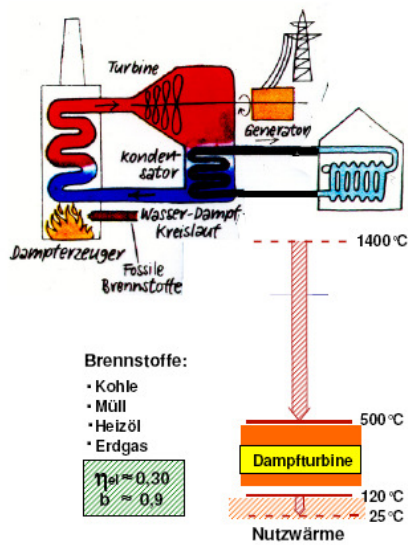


Abbildung 6: Kraft-Wärme-Kopplung

Künftige Bedeutung der fossilen Energieträger

Aus welchen Energiequellen decken wir heute unseren Energiebedarf von 13 Mrd. t SKE (Abb. 7)?

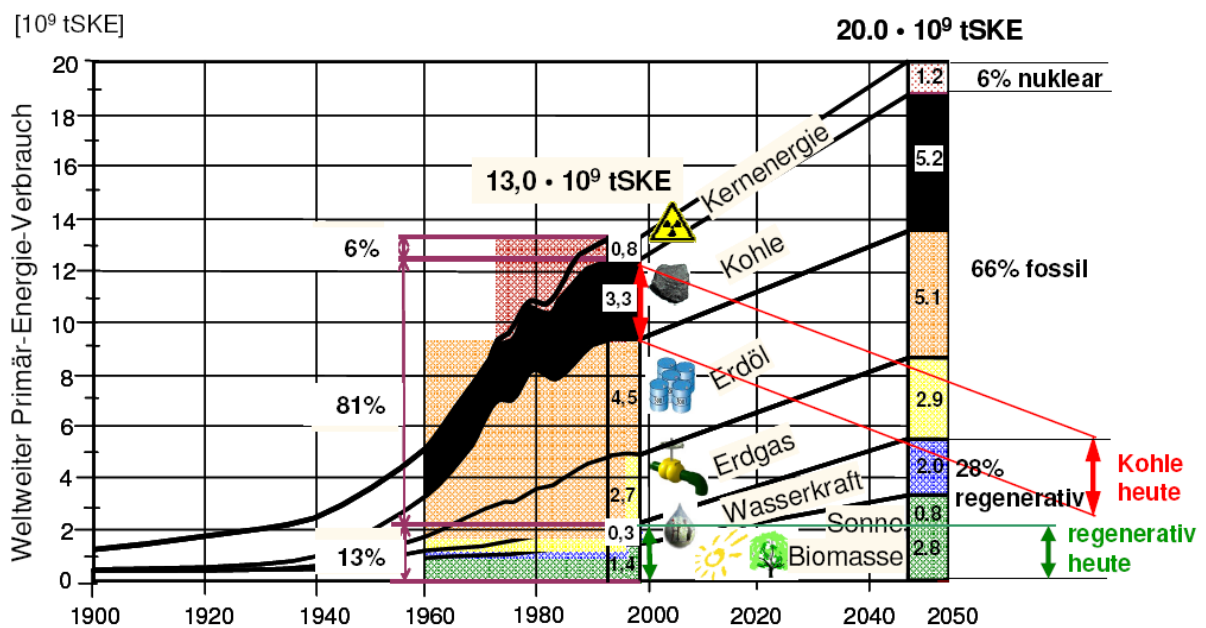


Abbildung 7: Beitrag der Energieträger zur Deckung des Bedarfs

Es wird niemanden überraschen, dass 81 % mit den fossilen Brennstoffen Kohle, Erdöl und Erdgas bereitgestellt werden. Dazu kommen noch 6 % Kernenergie und die restlichen 13 % stammen aus regenerativen Quellen, wobei die Wasserkraft den größten Anteil ausmacht; Holz, Dung und andere Biomasse werden in armen Ländern zum Kochen und Heizen eingesetzt.

Für das Jahr 2050 hat die Enquete-Kommission des Bundestages „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ eine Prognose für die Verteilung des Bedarfs von 20 Mrd. t SKE auf die einzelnen Energieträger abgegeben (Abb. 7). Danach geht der Anteil der fossilen Energieträger von 80 % auf 66 % zurück und die Regenerativen müssen einen Anteil von etwa 30 % decken.

Was bedeutet das aber wirklich? Regenerative müssen dann ein Äquivalent von 5,6 Mrd. t SKE bereitstellen; die Zunahme bei den Erneuerbaren macht dann mehr aus, als heute durch Kohle bereitgestellt wird. Das bedeutet eine gewaltige Anstrengung und vor allem klare, verlässliche Vorgaben durch die Politik.

Der Anteil der Fossilen geht von 80 % auf 66 % zurück. Wegen des gestiegenen Bedarfs erhöht sich jedoch der Wert von 10,5 auf 13,2 Mrd. t SKE. Das entspricht dem gesamten Energiebedarf heute!

Ist das bei den begrenzten Ressourcen im Jahr 2050 noch machbar und was bedeutet das für den CO₂-Ausstoß und damit für unser Klima?

Technologien zur Schonung der Ressourcen und der Umwelt

Die Ressourcen an fossilen Energieträgern sind begrenzt und, was immer mehr in den Vordergrund tritt, auch die Aufnahmefähigkeit der Umwelt an Schadstoffen, insbesondere die Aufnahmefähigkeit der Erdatmosphäre an klimarelevanten Gasen. Im Fall der Energiebereitstellung ist es das Kohlendioxid (CO₂) aus der Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas, das zur Erwärmung der Erde beiträgt. Dem Treibhauseffekt werden schwerwiegende und unumkehrbare Folgen zugeschrieben: Verschiebung von Klimazonen, Ausbreitung der Wüstenzonen und auf der anderen Seite Überflutungen von großen Gebieten durch das Abschmelzen der Polkappen sowie die Befürchtung des Umkippen des Golfstroms mit einer drastischen Klimaänderung für Nordeuropa.

Ein Hoffen auf eine Reduzierung des weltweiten Energiebedarfs ist, wie gezeigt wurde, nicht realistisch; im Gegenteil, der Einsatz fossiler Energieträger wird noch zunehmen. Wie können wir also eingreifen?

Auch wenn der Bedarf an Nutzenergie nicht reduziert werden kann, so kann doch durch **Effizienzsteigerung bei der Umwandlung** die für die Nutzenergie, z.B. 1 kWh Strom, aufzuwendende Brennstoffmenge verringert werden. Dafür

muss der Kraftwerkswirkungsgrad gesteigert werden. Abb. 8 zeigt, wie der spezifische Wärmeverbrauch, d.h. die notwendige Brennstoffmenge um eine kWh Strom zu erzeugen, in den vergangenen Jahrzehnten verringert werden konnte. Waren 1950 bis zu 5 kWh Kohle für 1 kWh Strom aufzuwenden, 1970 noch 3, so sind es heute nur noch 2,0 kWh bei Kohle und 1,7 kWh bei Erdgas. Möglich war dies durch immer höhere Prozesstemperaturen durch die Entwicklung von hochwarmfesten Werkstoffen, aber auch durch eine bessere Systemintegration, d.h. durch eine bessere Nutzung aller internen Wärmeströme im Kraftwerk.

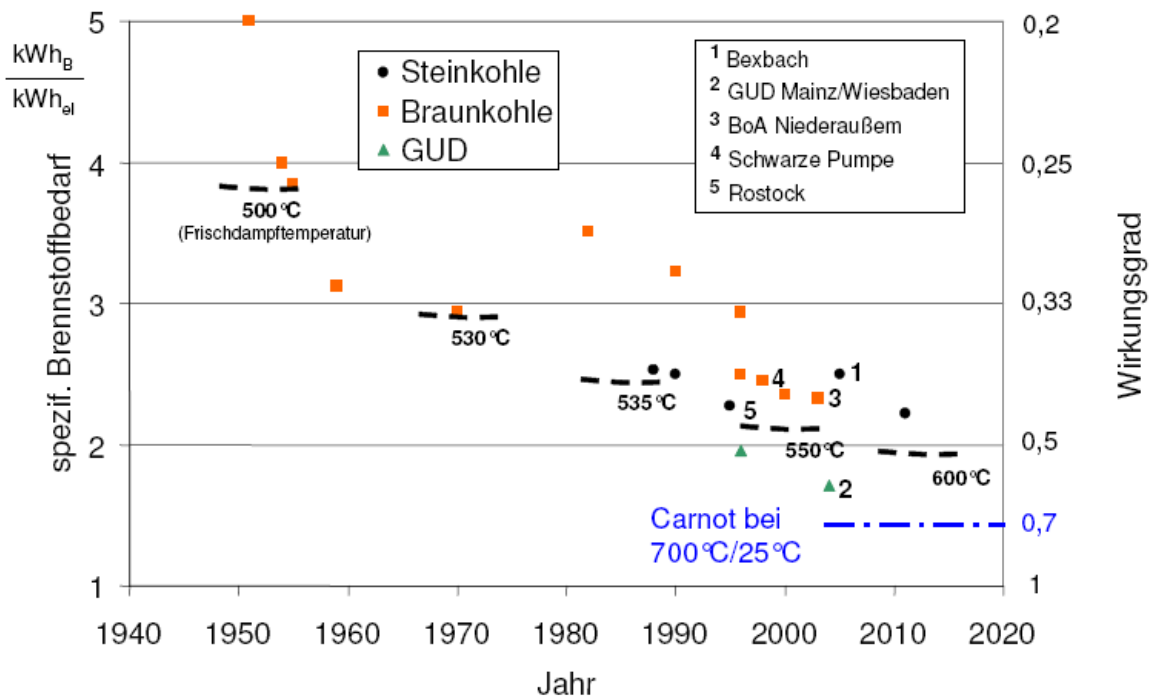


Abbildung 8: Steigerung der Effizienz bei der Energieerzeugung

Zu beachten ist wieder, dass bei der Umwandlung von Wärme in Arbeit nach den Gesetzen der Thermodynamik ein Wirkungsgrad von 1 nicht möglich ist. Nach Carnot liegt der theoretisch erreichbare Wirkungsgrad eines Dampfkraftwerkes (300 bar Druck, 700 °C Dampftemperatur) bei etwa 70 %.

Mit dem spezifischen Einsatz des Brennstoffs geht mit einer Erhöhung des Wirkungsgrades auch die CO₂-Emission eines Kraftwerks zurück. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass Kohle, Erdöl und Erdgas unterschiedlich viel Kohlenstoff enthalten, der bei der Verbrennung zu Kohlendioxid aufoxidiert wird (Abb. 9). Entsprechend entsteht bei der Verbrennung unterschiedlich viel CO₂: bei Kohle 400 g CO₂, bei Erdgas dagegen mit 200 g CO₂ nur die Hälfte. Das heißt, durch einen Brennstoffwechsel von Kohle zu Erdgas könnte zumindest temporär der CO₂-Ausstoß verringert werden.

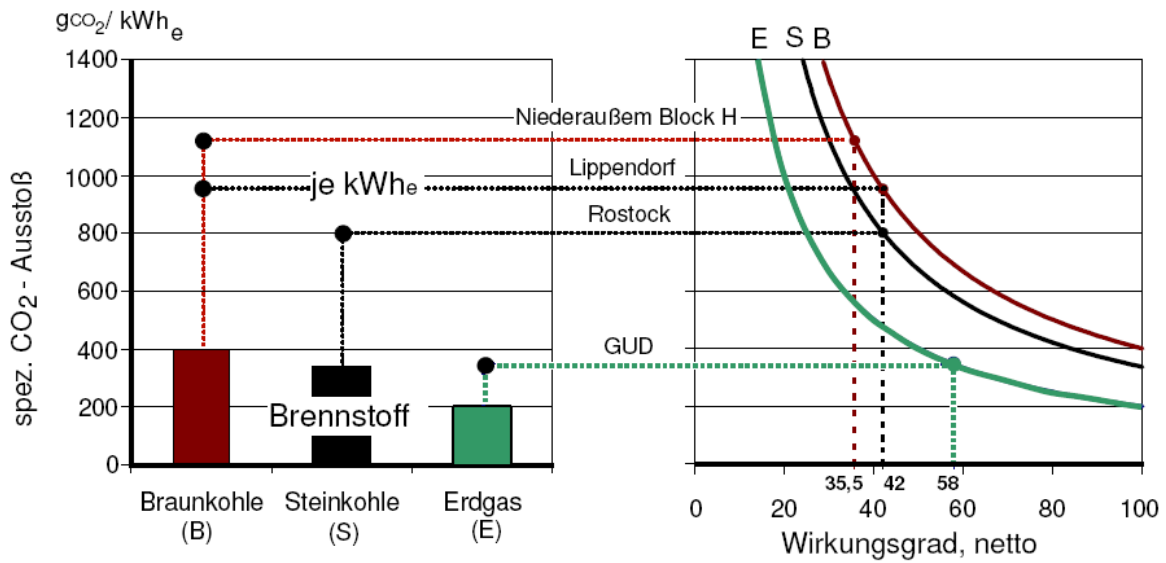


Abbildung 9: Kohlendioxid-Emission bei der Elektrizitätserzeugung

Berücksichtigt man nun noch die mit den einzelnen Kraftwerkstypen erreichbaren Wirkungsgrade, so reichen die spezifischen CO₂-Emissionen von 1.150 g CO₂ / kWh_e für ein Braunkohlekraftwerk (Inbetriebnahme 1990) bis herunter zu 350 g CO₂ / kWh_e bei einem mit Erdgas befeuerten GUD-Kraftwerk (Inbetriebnahme 2000). Allein durch den Ersatz alter Braunkohlekraftwerke in der früheren DDR mit einem Wirkungsgrad von 32 % durch moderne Kraftwerke mit einem Wirkungsgrad von 42 %, konnte der CO₂-Ausstoß um 25 %, d.h. um 9 Mrd t CO₂ pro Jahr gesenkt werden.

Trotz dieses Erfolges reicht eine solche Maßnahme nicht aus, die Zielwerte des „Intergovernmental Panel of Climate Change“ (IPCC) zu erreichen (Abb. 10), die für die Industrieländer eine Reduktion der CO₂-Emissionen **um 80 %** bis zum Jahr 2050 fordern, also auf einen Wert von 20 % bezogen auf das Jahr 1990. Hierzu ist es erforderlich, das bei der Verbrennung entstehende CO₂ abzutrennen und in geologisch stabilen Formationen, z.B. in ausgebeutete Erdöl- oder Gasfelder einzulagern.

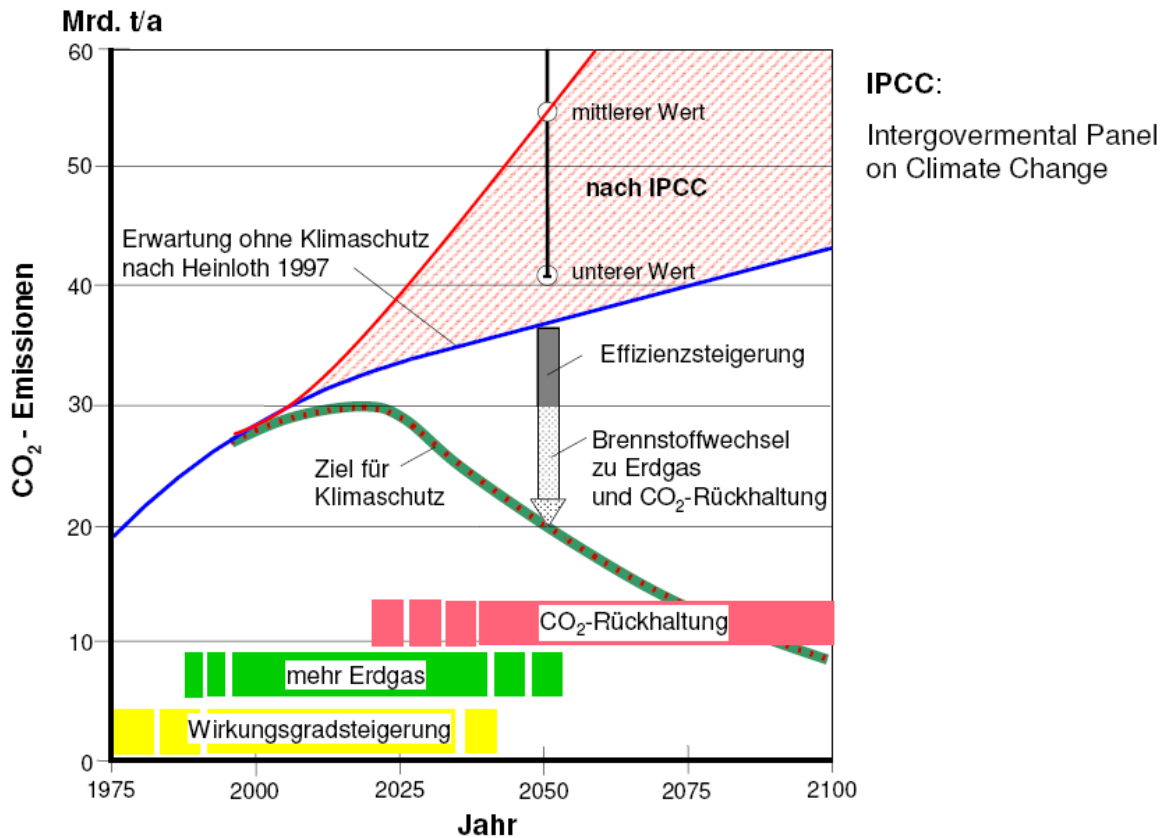


Abbildung 10: CO₂-Emissionen (weltweit)

Welche **Techniken für das Abtrennen des CO₂** stehen bereits heute zur Verfügung bzw. welche sind denkbar?

Aus der chemischen Industrie sind Verfahren bekannt, CO₂ durch Absorption und Desorption aus Gasen abzutrennen; dieses Verfahren ist für eine Abtrennung aus dem Rauchgas zu adaptieren (Abb. 11). Nach einer zusätzlichen Abkühlung wird das Rauchgas in eine Kolonne mit Monoethanolamin (MEA) geleitet, das das CO₂ absorbiert und somit CO₂-armes Rauchgas an die Umgebung abgegeben wird. Durch Desorption in einer zweiten Kolonne wird das CO₂ wieder freigesetzt und ausgeschleust.

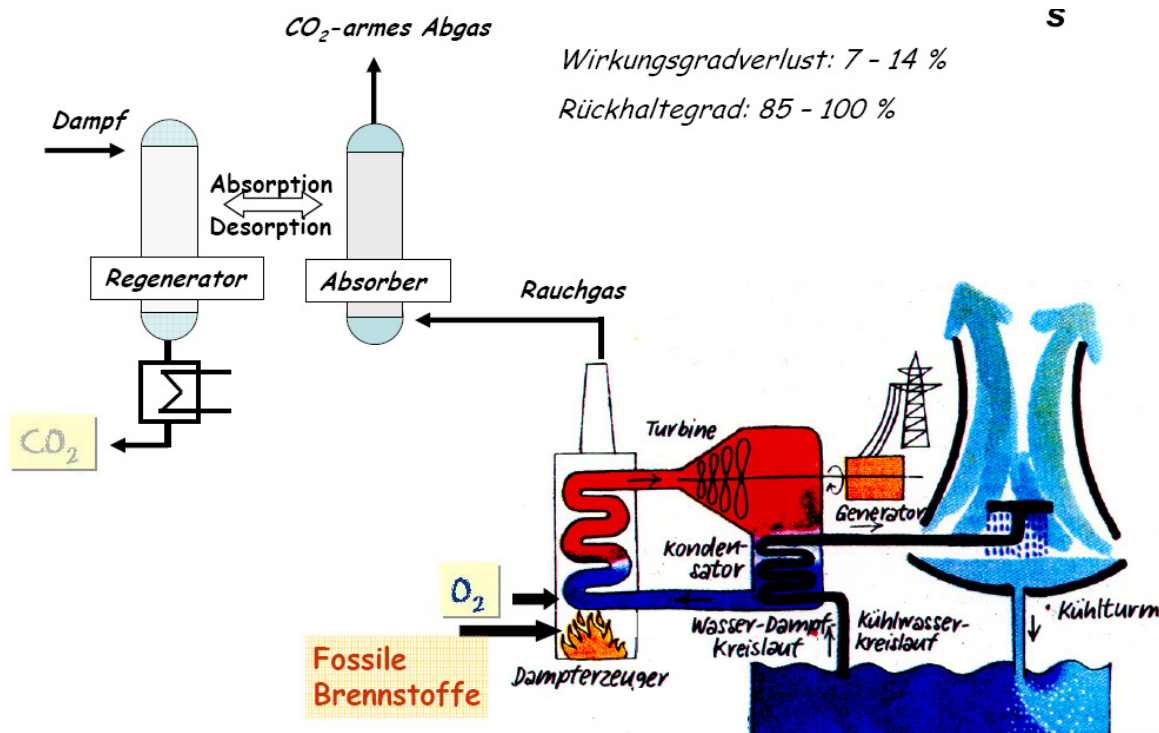


Abbildung 11: Oxyfuel-Prozess: CO₂-Abtrennung aus dem Rauchgas

Um die Baugröße und die Abtrennarbeit zu begrenzen, wird zur Verbrennung im Kraftwerk Sauerstoff anstelle von Luft verwendet, um so die CO₂-Konzentration im Rauchgas zu erhöhen. Das Verfahren zählt also zu den Oxyfuel-Prozessen. Mit diesem Verfahren wird ein Rückhaltegrad von 90 % erwartet; der Wirkungsgrad des Kraftwerks wird um 7 – 14 %Pkte auf einen Wert um 30 % reduziert. Dies bedeutet aber einen erhöhten Einsatz an Brennstoff, was hinsichtlich der Ressourcenschonung kontraproduktiv ist. Ein Vorteil dagegen ist, dass sich ein solches Verfahren zur Nachrüstung bestehender Kraftwerke eignen könnte.

Ein völlig anderer Weg wird bei dem Konzept **Oxyfuel-GUD**, auch als Graz-Cycle bekannt, verfolgt. Bei diesem Verfahren wird die CO₂-Abtrennung nicht nachgeschaltet, sondern in den Kraftwerksprozess integriert (Abb. 12). Bei der Verbrennung von Erdgas oder Gas aus der Vergasung von Kohle mit Sauerstoff entsteht ein Gemisch aus CO₂ und Wasserdampf. Mit diesem Gasgemisch werden die Turbinen betrieben. Da bei der Verbrennung immer neues CO₂ und Wasserdampf entsteht, muss ein Teil des Gasgemisches abgezogen werden. Durch Kondensieren des Wasserdampfes kann das CO₂ abgetrennt und ausgeschleust werden.

Ein interessantes Konzept mit einem sehr hohen Rückhaltegrad und sehr hohem Kraftwerkswirkungsgrad. Allerdings müssen für diesen Kraftwerkstyp nahezu alle Komponenten – z.B. die Brennkammer, die Turbinen und Verdichter und auch der Kondensator – erst noch entwickelt werden; auch die Werkstoffe sind an das Medium anzupassen.

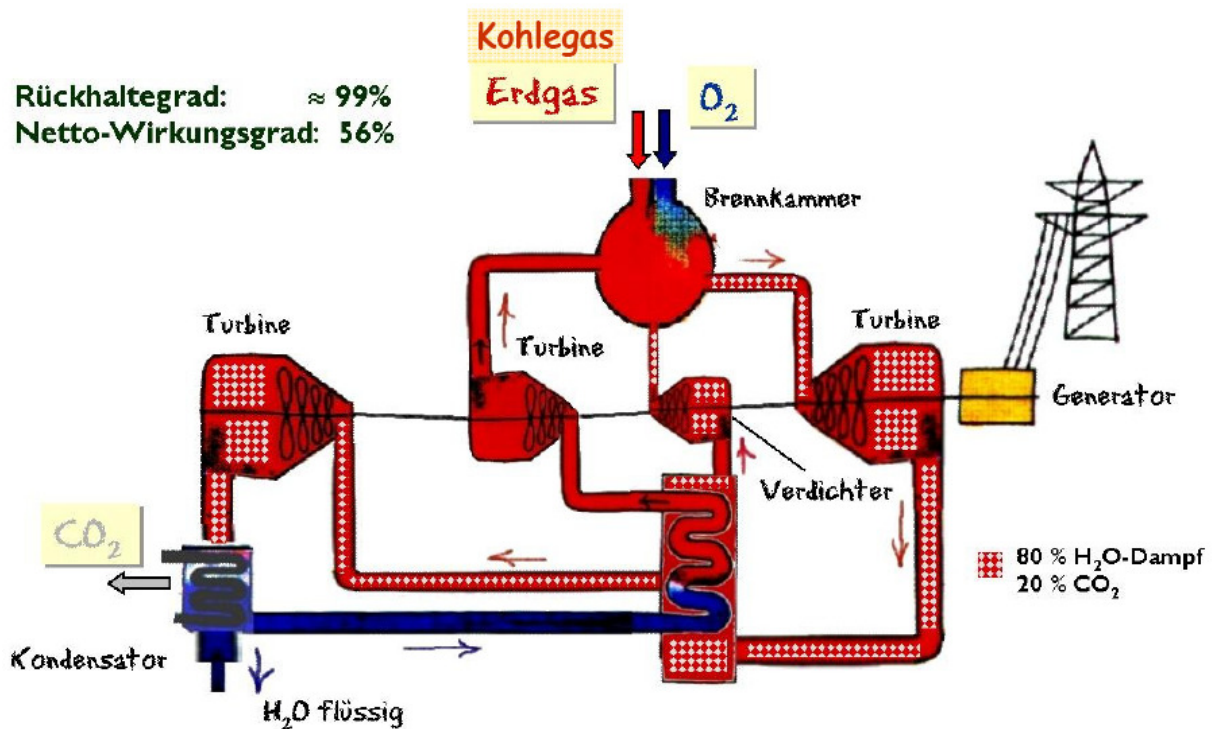


Abbildung 12: Oxyfuel-GUD-Prozess: CO₂-Abtrennung aus dem Kreislaufmedium

Schlussfolgerungen

Was lässt sich aus dem bisher Dargelegtem ableiten?

- o Wir werden zumindest bis zum Jahr 2050 **mehr**, und nicht weniger Kohle, Erdöl und Erdgas für die Energieversorgung einsetzen müssen, sofern die Ressourcen reichen.
- o Es besteht berechnete Hoffnung, dass die Energiewandlung künftig mit weit umweltschonenderen Verfahren erfolgen wird und so die CO₂-Emissionen erheblich reduziert werden.

Es stellt sich aber die Frage, warum wir nicht in der Lage sind, einen erheblich höheren Anteil aus erneuerbaren Energiequellen bereitzustellen und außerdem, „es wird uns schon noch etwas Neues einfallen um das Energieproblem zu lösen“.

Hierzu kann ein Diagramm nachdenklich stimmen (Abb. 13): Es ist dargestellt, welche Anteile die einzelnen Energieträger am Gesamtverbrauch in der Vergangenheit hatten. Im Jahr 1950 ergab sich folgende Verteilung: Kohle 35 %, Erdöl 35 %, Erdgas 17 %, Holz 3 % und alle übrigen 10 %. Im Jahr 2004 hatten sich die Anteile – bei gestiegenem Bedarf – verschoben: Den größten

Anteil liefert nun Erdöl mit 34 %, Kohle 25 % und Erdgas 21 %; Biomasse bleibt mit 10 % konstant, Kernenergie erreicht 6 % und der Rest beträgt 4 %.

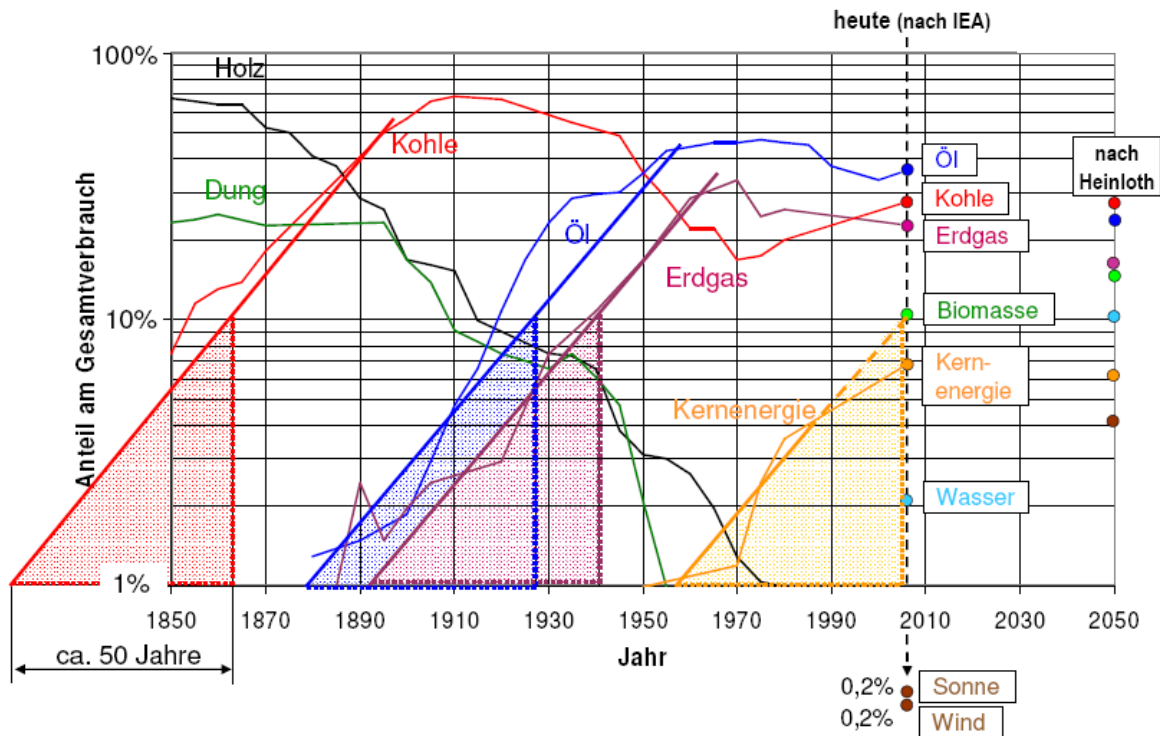


Abbildung 13: Verlagerung der Bedeutung von Energieträgern

Die wichtigere Aussage dieses Diagramms aber ist, dass die Zeitdauer für einen Anstieg eines Energieträgers von 1 % Anteil – das bedeutet, diese Technologie ist auf dem Markt etabliert – bis auf 10 % stets etwa 50 Jahre gedauert hat. Dies wiederum könnte bedeuten, dass alle Technologien, die heute noch unter einem Anteil von einem Prozent liegen, im Jahr 2050 auf jeden Fall nicht mehr als 10 % zur Bedarfsdeckung beitragen werden. Damit löst sich auch die Hoffnung auf **die** durchschlagende Idee in Rauch auf, dass „uns schon noch etwas einfallen wird“ – wenigstens für die nächsten 50 Jahre!

Mein **Schlusswort** lautet deshalb:

Wir werden zumindest bis zum Jahr 2050 mit den uns heute bekannten Technologien zur Energiebereitstellung zurechtkommen müssen. Daher ist es dringend erforderlich, die Verfahren zur Nutzung der fossilen Energieträger weiterzuentwickeln.

Und wir werden auf keinen Fall auf heute angewendete Technologien zur Energiebereitstellung verzichten können – z.B. auch nicht auf die Kernenergie.

Literatur

- Thomas, H.-J.: Thermische Kraftanlagen; Springer Verlag Berlin 1985
- Göttlicher, G.: Energietechnik der Kohlendioxidrückhaltung in Kraftwerken; VDI Verlag Düsseldorf 1999
- Heinloth, K.: Die Energiefrage – Bedarf und Potentiale, Nutzung, Risiken und Kosten; Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden 1997
- IPCC Working Group III: Emissions Scenarios – Summary for Policymakers; Intergovernmental Panel on Climate Change, Nairobi 2000
- International Energy Agency (IEA): Homepage www.iea.org, 2006
- Shell-Studie: Homepage www.shell.com, 2006