

man zur Heizung eines Gebäudes aufwenden muss, ohne sonstige bauliche Veränderungen im Idealfall **auf** etwa 13% desjenigen Wertes senken kann, den eine konventionelle Heizung benötigt. Es geht also um die Möglichkeit einer Energieeinsparung um fast eine Größenordnung! Ich werde auf diesen Aspekt im Abschnitt 8.7.8 zurückkommen und dabei u.a. den Begriff der *Primärenergie* präzisieren und auf die damit zusammen hängenden Unterschiede in der (ökonomischen) Bewertung der verschiedenen Energieformen näher eingehen.

(XXX: Der weitere Text des Abschnitts *Kühlmaschinen und Wärmepumpen* ist noch nicht verfügbar.)

### 8.7.8 Thermodynamik der Energieversorgung (-)

Nachdem wir in den beiden vorangegangenen Abschnitten einiges über die technisch und ökonomisch wichtigen Maschinen zur wechselseitigen Umwandlung von thermischer und mechanischer Energie gelernt haben, werden wir nun die Frage der Energie-Umwandlung als generelle technische Aufgabe von einem anders positionierten Standpunkt aus diskutieren. Denn es wird nun die Frage nach der **ökonomisch** günstigsten Lösung im Vordergrund stehen! D.h. es geht um die Frage, nach welchem Konzept vorzugehen ist, wenn der vom Endverbraucher angeforderte Bedarf an Energie in einer vorgegebenen Form mit einem Minimum an Verbrauch von **Primärenergie** und mit einem Minimum an technischem Aufwand gedeckt werden soll. Unter dem Begriff *Primärenergie* wollen wir die Menge an Energie verstehen, die im Zuge eines technischen Prozesses über einen natürlich vorkommenden und für diesen Prozess verfügbar gemachten Energieträger in diesen Prozess einfließt. Dabei werden wir i.a. **nicht** zwischen *erneuerbaren* oder *nicht erneuerbaren* Trägern von Primärenergie unterscheiden, einfach weil diese Unterscheidung an dieser Stelle von untergeordneter Bedeutung ist. Beispiele von Primärenergieträgern sind

- Kohle, Erdgas, Holz (Träger von chemischer Energie);
- Wind, gezeiten-getriebene Meeresströmungen (Träger von kinetischer Energie);
- Sonneneinstrahlung (Strahlungsenergie).

Ich werde in diesem Abschnitt in Bezug auf den Energiegehalt von Rohstoffen, Energiespeichern etc.durchgehend von dem Begriff der jeweiligen **Energieform** Gebrauch machen, ohne jeweils erneut explizit darauf hinzuweisen, dass dieser Begriff eigentlich nur für **Energieänderungen** während eines **bestimmten** Prozesses zulässig ist und nicht für den **Energiegehalt** eines Objektes insgesamt, s. die ausführliche Diskussion im Abschnitt 8.1.3. Der Grund für diese leicht saloppe, aber hoffentlich besser verständliche Sprechweise liegt darin, dass für jedes dieser Objekte der für eine Energieabgabe bzw. Energiespeicherung bevorzugte Prozess offensichtlich ist. Den Begriff *ökonomisch* werde ich nicht in seiner trivialen Einschränkung auf die aktuelle Kostensituation verwenden, sondern im Sinne einer langfristig betrachteten Abwägung insbesondere der Faktoren *Verfügbarkeit des Rohstoffes, technischer Aufwand*

zu dessen Bereitstellung und *direkte* und *indirekte Auswirkungen* des eingesetzten Prozesses. Ziel dieser Betrachtungen ist es daher, die wirtschaftlich relevanten, aber von der zukünftigen Kostenentwicklung der verschiedenen Rohstoffe und der eingesetzten Technologien weitgehend unabhängigen Fakten und Zusammenhänge heraus zu arbeiten.

### Technische Vor- und Nachteile der verschiedenen Energieformen (-)

Die typischen Operationen der Energiewirtschaft sind:

1. Die *Beschaffung*, also die Bereitstellung von Energie in jeweils derjenigen Form, die sich ohne weiter gehende Verarbeitung ergibt, z.B. als chemische Energie (Kohle, Erdöl, Holz, Rapsöl, Rohrzucker etc.) oder auch direkt als elektrische Energie (aus Wasser- oder Windkraftwerken, aus photovoltaischen Anlagen etc. ). Auf diesen Schritt folgt ggfls. :
2. Die *Umwandlung* der Energie in eine für die nachfolgenden Operationen besser geeignete Form;
3. die (zeitliche begrenzte) *Speicherung* der Energie, um den zeitlichen Ablauf der Beschaffung an den des Verbrauchs anzupassen;
4. der *Transport*, also die Überbrückung der Entfernung zwischen dem Ort, an dem die Beschaffung erfolgt, und dem Aufenthaltsort des Endverbrauchers. Und ggfls. im Anschluss an diesen Transport:
5. die erneute *Umwandlung* der Energie in diejenige Form, die der Endverbraucher verlangt.

Nun genügt aber bereits ein oberflächlicher Blick auf die technischen Daten typischer Apparate und Anlagen zur Ausführung dieser Operationen an bzw. mit den verschiedenen Energieformen, um zu erkennen, dass diese Energieformen für diese verschiedenen Operationen in stark unterschiedlicher Weise geeignet sind. Um diese Behauptung zu untermauern, berechnen wir zunächst die physikalisch-technischen Voraussetzungen für einige konkrete Beispiele zur *Speicherung* einer Energie von  $1 \cdot kWh$ :

1. Zur Speicherung von  $1 \cdot kWh$  als chemische Energie z.B. in Form von hochwertiger Steinkohle benötigen wir eine Masse von

$$M = 1 \cdot kWh \cdot \frac{1 \cdot kg}{32 \cdot MJ} \cdot \frac{1 \cdot MJ}{0,278 \cdot kWh} = 0,11 \cdot kg \quad (8.518)$$

2. Für die Speicherung von  $1 \cdot kWh$  als elektrostatische Energie in einem auf  $100 \cdot V$  aufgeladenen Kondensator (s. Gl. 4.142) benötigen wir eine Kapazität von

$$C = \frac{2 \cdot E}{U^2} = \frac{2 \cdot kWh}{10^4 \cdot V^2} = 7,2 \cdot 10^2 \cdot F \quad (8.519)$$

Ein derartiger Kapazitätswert übersteigt alle derzeit technisch genutzten Werte um mehrere Größenordnungen, s. Abschnitt 14.2.3.

3. Für die Speicherung von  $1 \cdot kWh$  als Gravitationsenergie in Form von Wasser, das um eine Höhendifferenz von  $500 \cdot m$  angehoben wurde, benötigen wir eine Masse

$$M = \frac{E}{g \cdot h} = \frac{1 \cdot kWh}{9,81 \cdot \frac{m}{s^2} \cdot 500 \cdot m} = 0,73 \cdot kg \quad (8.520)$$

4. Für die Speicherung von  $1 \cdot kWh$  als mechanische Rotationsenergie in einem Speichenrad von  $10 \cdot m$  Durchmesser, das mit einer Drehzahl von  $10^3 \cdot \text{min}^{-1}$  rotiert, benötigen wir eine Radmasse von

$$M = \frac{2 \cdot E}{(r \cdot 2 \cdot \pi \cdot f)^2} = \frac{2 \cdot kWh}{(10 \cdot m \cdot \pi \cdot 10^3 \cdot \text{min}^{-1})^2} = 26 \cdot kg \quad (8.521)$$

5. Für die Speicherung von  $1 \cdot kWh$  als elektrochemische Energie in einem modernen Lithium-Ionen-Akkumulator benötigen wir ca.

$$M = 5 \cdot kg \quad (8.522)$$

6. Für die Speicherung von  $1 \cdot kWh$  als thermische Energie durch Aufheizung von Wasser von  $20^\circ C$  auf  $90^\circ C$  benötigen wir eine Masse von

$$M = \frac{E}{c \cdot \Delta T} = \frac{1 \cdot kWh}{4,182 \cdot \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 70 \cdot K} = 12,3 \cdot kg \quad (8.523)$$

Bei Ausnutzen der Kondensationswärme (Speicherung als thermische Energie durch Verdampfen von bereits nahezu  $100^\circ C$  warmem Wasser beträgt die benötigte Masse lediglich

$$M = \frac{E}{\lambda} = \frac{1 \cdot kWh}{2,256 \cdot 10^3 \cdot \frac{kJ}{kg}} = 1,6 \cdot kg \quad (8.524)$$

Offenbar gelingt die Energie-Speicherung besonders einfach und effektiv in Form von chemischer Energie. Aber auch die Speicherung in Form von Gravitationsenergie (z.B. durch Pumpspeicherwerke) kann in konkreten Fällen technisch-wirtschaftlich interessant sein.

Als nächstes betrachten wir einige konkrete Beispiele des Energie-*Transports*. Ein wichtiges Problem dabei ist, dass mit dem gewollten Energietransport i.a. zwangsweise auch ein störender, weil Energie und Betriebskosten verursachender Massentransport verbunden ist. Wir berechnen daher das bei diesem Transport auftretende Verhältnis

$$\frac{\frac{dE}{dx}}{\frac{dM}{dx}} = \frac{E}{M} \quad (8.525)$$

Bei den Energieformen, bei denen wir bzgl. deren Speicherung ebenfalls die damit verknüpfte Masse als das wichtigste Problem gedeutet haben, ist dies einfach der Kehrwert der vorher berechneten Größe.

1. Beim Transport von chemischer Energie in Form von hochwertiger Steinkohle beträgt das Verhältnis von Energie- und Massentransport

$$\frac{E}{M} = 32 \cdot \frac{MJ}{kg} \quad (8.526)$$

Allerdings ist dieser Energie-Transport für sich genommen i.a. verlustfrei. Die transportbedingten Energieverluste resultieren primär aus den mit jedem realen Massentransport verbundenen Verlusten z.B. durch mechanische Reibung.

2. Der Transport als elektrische Energie durch Überland-Hochspannungsleitungen, die mit Wechselspannung (s. auch Kapitel 6.5) betrieben werden, ist wohl mit gewissen elektrischen Verlusten verbunden, aber mit keinerlei Massentransport,

$$\frac{E}{M} = \infty \quad (8.527)$$

Allerdings sind insbesondere die Investitionskosten für den Aufbau der Hochspannungsleitungen erheblich; auch die Instandhaltungskosten sind relevant.

3. Der Transport als elektro-chemische Energie in hochwertigen Gleichspannungs-Akkumulatoren ist nur durch den Transport des gesamten Akkumulators möglich. Wir können also den bereits zitierten Zahlenwert übernehmen,

$$\frac{E}{M} = \frac{1 \cdot kWh}{5 \cdot kg} = 0,2 \cdot kWh = 0,72 \cdot \frac{MJ}{kg} \quad (8.528)$$

4. Der Transport als mechanische Energie wird aktuell praktisch nur noch **innerhalb** von Maschinen und Aggregaten realisiert z.B. mit Hilfe von Antriebswellen, Keil- oder Zahnriemen. Zu Beginn des technischen Zeitalters war es noch üblich, innerhalb einer Fabrik den Bedarf an mechanischer Energie von einer einzigen WKM bereit zu stellen. Die Weiterleitung der mechanischen Energie an die einzelnen Arbeitsplätze erfolgte dann über umfangreiche sog. *Transmissionsanlagen* aus Drehachsen, die i.a. an die Decken der Fabrikhallen montiert waren (s. Abb. 15), und daran angeschlossenen Transmissionsriemen, an die ihrerseits die einzelnen Maschinen angeschlossen waren.

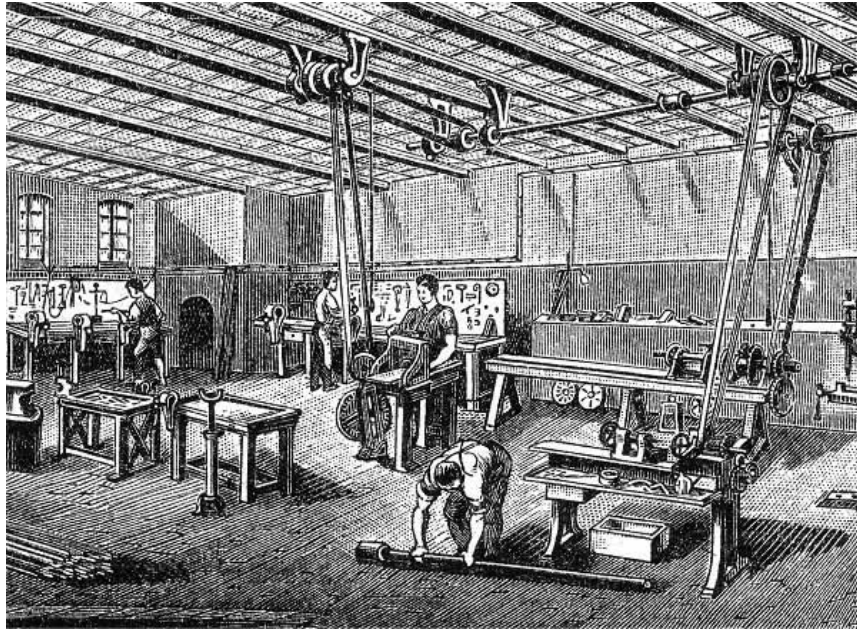


Abb. 15 Werkstattraum einer Druckerei (ca. 1900) mit Transmissionsriemen-Anlage zur Übertragung von mechanischer Energie  
(Quelle: [www.solingen-internet.de/Si-hgw/imprimator/druckerei1900.htm](http://www.solingen-internet.de/Si-hgw/imprimator/druckerei1900.htm))

Offensichtlich ist für den Energie-*Transport* die Form der elektrischen Energie besonders gut geeignet. Damit sich bei der Kostenrechnung die Investitions- und Instandhaltungskosten für die Hochspannungsleitungen auf ausreichend hohe Werte der insgesamt übertragenen Energie aufteilen, muss allerdings dieser Transport zwischen ortsfesten Stellen erfolgen und sollte mit zeitlich nicht zu stark schwankenden Werten des Energiestroms verbunden sein.

Wir betrachten schließlich noch einige typische Zahlenwerte für die Energie-*Umwandlung*:

1. Die Umwandlung von chemischer Energie in thermische Energie erfolgt üblicherweise auf dem Wege der Verbrennung. Da hierbei die Energie nicht nur an das jeweilige Arbeitsmedium übertragen wird, sondern z.B. auch an die (übrigen) Verbrennungsprodukte, lässt sich auch unter Optimierung aller technisch machbaren Wärmeaustausch-Prozesse real nur ein Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{\text{an das Arbeitsmedium übertragene thermische Energie}}{\text{umgesetzte chemische Energie}} \quad (8.529)$$

merklich unter 1 erreichen. Ein realistischer Wert für moderne Verbrennungsanlagen ist  $\eta \approx 0,9$ .

2. Die Umwandlung von thermischer Energie in nicht-thermische, also in mechanische, elektrische oder chemische Energie ist durch den 2. Hauptsatz der Thermodynamik begrenzt (Satz 46). Entscheidend ist also insbesondere der Temperaturunterschied zwischen den Temperaturen der beiden Wärme-Reservoirs, zwischen denen die Wärmekraftmaschine arbeitet. Moderne mehrstufige Turbinenanlagen zur Stromerzeugung in konventionellen Kraftwerken erreichen bei diesem Arbeitsschritt Wirkungsgrade von etwa  $\eta \approx 0,4$ .
3. Die direkte Umwandlung von chemischer in elektrische Energie gelingt z.B. in den sog. *Brennstoffzellen* (Abschnitt 8.3.5) Heutige Brennstoffzellen erreichen Wirkungsgrade von etwa  $\eta \approx 0,70 \dots 0,85$ .
4. Eine nur vordergründig direkte Umwandlung von chemischer in mechanische Energie findet in den Verbrennungsmotoren der Kraftfahrzeuge statt. Allerdings besteht der Prozess in Wirklichkeit aus einer sequentiellen Umwandlung von chemischer in thermische Energie und erst danach in mechanische Energie, s. Unterabsatz *Der Verbrennungsmotor* ab S. 697). Pauschal betrachtet erreichen moderne Verbrennungsmotoren einen Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{\text{an das Getriebe übertragene mechanische Energie}}{\text{umgesetzte chemische Energie}} \approx 0,2 \dots 0,45 \quad (8.530)$$

5. Der klassische Apparat zur Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie ist der Elektromotor (Kapitel 6.4). Mit ihm werden ohne große technische Anstrengungen Wirkungsgrade bis etwa  $\eta \approx 0,95$  erreicht.

Über den privaten und industriellen Bereich gemittelt benötigt der Endverbraucher von Energie diese Energie

- zu etwa 33 · % in Form von mechanischer Energie, also zum Antrieb von mechanischen Vorrichtungen (davon gehen 20% zu Lasten des Verkehrs);
- zu etwa 65 · % in Form von thermischer Energie, im privaten Bereich also insbesondere zur Gebäudeheizung und im industriellen Bereich sowohl zur Gebäudeheizung als auch als sog. *Prozesswärme* zur Erwärmung der Reaktionspartner einer chemischen Reaktion auf die erforderliche Arbeitstemperatur; und
- zu etwa 2 · % in Form von Strahlungsenergie, also zur Beleuchtung von Gebäuden und Straßen.

Andererseits sind Elektromotore die derzeit technisch einfachsten, mechanische Energie erzeugenden Wandler, und die einfachsten Strahlungsenergie erzeugenden Wandler sind ebenfalls elektrisch betriebene Lampen, so dass letztendlich ein Bedarf von etwa 35 · % elektrischer und 65 · % thermischer Energie besteht.

Ein an vielen Stellen entscheidendes Faktum, das das Konzept zur ökonomisch optimalen Gestaltung der Energie-Wirtschaft bestimmt, ist nun der 2. Hauptsatz der Thermodynamik. Durch ihn wird die Gleichwertigkeit der verschiedenen Energieformen aufgehoben und zwar unabhängig von technisch bedingten (und damit auch dem Wandel durch den technischen Fortschritt unterworfenen) Details. Der 2. Hauptsatz definiert eine neue *Wertigkeit* der real in einem System vorhandenen und über technisch mögliche Prozesse entnehmbaren Energie. Diese Wertigkeit ist um so höher, je **niedriger** die Entropie ist, die mit dieser Energie verbunden ist. Denn ohne weitere Hilfsmittel, also letztlich ohne weitere Energiequellen, sind ja nur Prozesse möglich, die diesen Entropiewert nicht erniedrigen, sondern - bei allen realen Prozessen - im Gegenteil signifikant erhöhen. Das aus diesen Überlegungen resultierende Konzept der *Exergie* werden wir im nachfolgenden Abschnitt behandeln. Mit ihrer Hilfe lässt sich eine bestehende Struktur der Energieversorgung nach Stellen der *Verschwendung von Exergie* durchforsten und damit ein detaillierter Maßnahmenkatalog zur Energieeinsparung erarbeiten.

Eine pauschale Aussage ist jedoch bereits an dieser Stelle möglich: Vergleichen wir die aktuelle Struktur des Energiebedarfs (35 · % elektrische und 65 · % thermische Energie) mit dem aktuell maximal erreichbaren Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine ( $\eta \approx 0,4$ ), so erkennen wir unmittelbar, dass die benötigte thermische Energie bereits zwangsweise bei der Produktion der benötigten elektrischen Energie anfällt, solange diese überwiegend aus chemischen Brennstoffen durch Wärmekraftmaschinen erzeugt wird. Wir bekämen daher 65 · % der aktuell benötigten Energie "umsonst", d.h. **ohne** den Verbrauch weiterer chemischer Brennstoffe geliefert, wenn es denn gelänge, die bei der Produktion der elektrischen Energie anfallende Abwärme vollständig zu nutzen. Dieses mit dem Schlagwort *Kraft/Wärme-Kopplung* belegte Konzept ist wegen der gerade skizzierten Schwierigkeiten bei dem Transport von Wärme jedoch nur in einem ausreichend **dezentralen** Verbund von elektrischen Energiestrom erzeugenden Kraftwerken realisierbar. 2 konkrete typische Ausführungsbeispiele für dieses Konzept sind:

1. Der Betrieb einer sog. *Blockheiz-Kraftwärmekopplungs-Einheit* (BHKWK), also eines elektrischen Energiestrom erzeugenden thermischen Kraftwerks in einem ausreichend dicht besiedelten Stadtteil. Diese Einheit ist so dimensioniert, dass die von ihr abgegebene thermische Energie ausreicht, um die in ihrer Nähe liegenden Wohngebäude während der Heizungsperiode mit thermischer Energie für Gebäudeheizung und Warmwasser zu versorgen. Die dabei erzeugte elektrische Energie wird in das allgemeine Stromnetz eingespeist. Außerhalb der Heizungsperiode bleibt die BHKWK-Einheit abgeschaltet.
2. Die räumliche Nachbarschaft von Industrieanlagen mit hohem Bedarf an thermischer Energie (sog. Prozesswärme), aber nicht zu hoher Prozesstemperatur, und elektrischen Energiestrom erzeugenden thermischen Kraftwerken, so dass die von der Industrieanlage benötigte thermische Energie vollständig durch die

sog. Abwärme des Kraftwerks geliefert wird. Die dabei erzeugte elektrische Energie wird i.a. zumindest teilweise von der Industrieanlage selbst benötigt. Der verbleibende Anteil wird wieder in das allgemeine Stromnetz eingespeist. Typische Beispiele für industrielle Produktionstechniken mit hohem Bedarf an Prozesswärme sind bestimmte chemische Prozesse der sog. Grundstoffchemie (z.B. die  $NH_3$ -Synthese) sowie bestimmte verfahrenstechnische Techniken wie die Destillation.

Die Umsetzung dieses Konzeptes ist daher technisch problemlos, die benötigten technischen Anlagen entsprechen dem aktuellen Stand der Technik. Die Schwierigkeiten resultieren primär und überwiegend aus den massiv vorhandenen politisch-kommerziell bedingten Gegeninteressen der an diesen Prozessen beteiligten Industrie-Unternehmen. Eine weitere, nicht zu unterschätzende Schwierigkeit resultiert aus der durchgängig konservativen Grundhaltung unserer Gesellschaft: Jeder Versuch, bisher akzeptierte Strukturen und Vorgehensweisen substanziell zu verändern, generiert nahezu zwangsläufig den massiven Widerstand der (real oder auch nur vermeintlich) betroffenen Gruppen.

### Das Konzept der Exergie (-)

Ich beginne diesen Abschnitt mit dem Hinweis, dass im Bereich der technischen Physik nur äußerst selten die Energie eines physikalischen Objektes in ihrer absoluten Definition verwendet wird, sondern nahezu ausschließlich als Differenz zur Energie ihres (der jeweiligen Anwendung entsprechend unterschiedlich festgelegten) Referenz-Zustandes. So wird man bei der Behandlung elektrischer Fragestellungen als Energie eines bestimmten elektrischen Kondensators den Wert

$$\Delta E = E(U) - E(U = 0 \cdot V) \quad (8.531)$$

verwenden und nicht etwa auch den Teil der Energie des Objektes berücksichtigen, der sich erst ändert, wenn mit dem Kondensator nicht-elektrische Prozesse durchgeführt werden, wenn z.B. mit den Materialien, aus denen dieser Kondensator besteht, chemische Prozessen ausgeführt werden (z.B. indem man den Kondensator verbrennt). Wenn also von der Energie eines physikalischen Objektes die Rede ist, gilt es immer genau nachzuprüfen, welcher Teil der Gesamtenergie dieses Objektes konkret gemeint ist.

Wir gehen nun noch einen Schritt weiter und konzentrieren uns auf den Anteil der Energie eines Systems, der ihm bei einer Energieumwandlung in Form von nicht-thermischer Energie **maximal entzogen** werden kann. Sobald es sich um ein thermodynamisches System handelt, also um ein System, dem in jedem Zustand eine wohl definierte Entropie zugeordnet ist, ist dieser Anteil durch den 2. Hauptsatz der Thermodynamik (Satz 46) begrenzt: Das System sei durch die Gibbs-Funktion  $E = E(S, X)$  beschrieben, wobei  $S$  die Entropie ist und  $X$  für einen Satz weiterer

nicht näher spezifizierter extensiver Variablen steht. Wird nun an diesem System ein Prozess ausgeführt, durch den es vom Zustand (1) in den Zustand (2) übergeht, so ändert sich dabei i.a. sowohl seine Energie wie auch alle seine Variablen,

$$(S_1, X_1) \rightarrow (S_2, X_2) \quad ; \quad E_1 = E(S_1, X_1) \neq E_2 = E(S_2, X_2)$$

Wird dem System durch diesen Prozess Energie entzogen, so gilt wegen Gl. 8.2 zwangsläufig

$$E_1 > E_2 \quad \Rightarrow \quad S_1 > S_2 \quad (8.532)$$

d.h. die Entropie des Systems nimmt ebenfalls ab. Damit dieser Prozess dennoch möglich ist, muss als Folge dieses Prozesses die Entropie eines anderen Systems mindestens um diese Differenz  $S_1 - S_2$  zunehmen. Dieses 2. System sei ein *Wärmereservoir* der Temperatur  $T_0$ . Im Grenzfall des reversiblen Prozesses nimmt dieses Reservoir gerade die Wärmeenergie

$$\Delta E_{\text{th}} = T_0 \cdot (S_1 - S_2) \quad (8.533)$$

auf, so dass die Entropie des Gesamtsystems aus System und Reservoir konstant bleibt. Damit dieser Wärmetransfer vom System an das Reservoir möglich ist, muss gelten

$$T_2 \geq T_0 \quad (8.534)$$

Bei maximaler Energieänderung ( $E_1 - E_2$ ) gilt in der Gl. 8.534 das Gleichheitszeichen. Für die Energieabgabe in Form von nicht-thermischer Energie steht daher maximal der Anteil

$$\Delta E_{\text{nth}} = E_1(S_1, X_1) - E_2(S_2, X_2) - T_0 \cdot (S_1(E_1, X_1) - S_2(T_0, X_2)) \quad (8.535)$$

zur Verfügung. Durch die explizite Aufführung der jeweils relevanten Variablen wird herausgestellt, dass diese Größe  $\Delta E_{\text{nth}}$  nicht nur von der Wahl der Temperatur  $T_0$  des Wärmereservoirs abhängt, sondern auch von den Werten  $X_2$  der nicht-thermischen Variablen im Zustand (2), m.a.W. von der Wahl des Prozesses, der das System vom aktuellen Zustand  $(S, X)$  in den Zustand  $(T_0, X_2)$  überführt. Ist die Anzahl der nicht-thermischen Variablen  $X$  gleich 1, so gibt es nur **einen** zulässigen Prozess, nämlich gerade die Veränderung dieser einen Variablen  $X$  (, die bei einfach strukturierten realen Beispielen meist das Volumen  $V$  ist). Und es gibt genau einen Wert  $X_2$ , der die Bedingung

$$T_2 = \frac{\partial E(S, X_2)}{\partial S} = T_0 \quad (8.536)$$

erfüllt. Ist dagegen diese Variablenanzahl  $> 1$ , so gibt es i.a. unendlich viele verschiedene mögliche Prozesswege, die zu einem Zustand mit  $T = T_0$  führen. Für das weitere Vorgehen wählen wir nun den Prozess aus, der auf einen Zustand  $(T_0, X_2)$  führt, für den der Ausdruck  $\Delta E_{\text{nth}}$  maximal wird und bezeichnen diese Größe als die *Exergie* des Systems. Zu ihrer Kennzeichnung werde ich den Buchstaben  $\Xi$  verwenden. Wir fassen diese Begriffsbildung in Form einer Definition zusammen:

**Definition 124** Die Exergie  $\Xi$  eines thermodynamischen Systems ist definiert als der Betrag an Energie, der ihm in nicht-thermischer Form maximal entzogen werden kann, wenn der Prozess durch Austausch mit einem Wärmereservoir der Temperatur  $T_0$  abläuft.

I.a. nimmt man hierfür die Umgebungstemperatur von  $20^\circ\text{C}$ . Die Exergie ist also keine eindeutig definierte physikalische Größe, sondern lässt, ähnlich wie der Wirkungsgrad eines Prozesses oder eines technischen Apparats (s. Abschnitt 8.7.6 und Gl. 8.488) eine gewisse, die anvisierte technische Anwendung berücksichtigende Willkür in ihrer Festlegung zu. Überdies ist sie im allgemeinen Fall nur relativ schwierig zu berechnen. Lediglich bei der Beschränkung auf nur eine nicht-thermische Variable gilt die einfache Beziehung

$$\Xi(S, X) = E(S, X) - E(T_0, X_2) - T_0 \cdot (S(E, X) - S_2(T_0)) \quad (8.537)$$

Vermutlich wegen dieser begrifflichen Besonderheiten wurde bis heute von dieser Größe nur sehr selten Gebrauch gemacht, obwohl sie insbesondere bei der Diskussion der Energiewirtschaft und Energieeinsparung sehr hilfreich sein kann.

Zur Veranschaulichung des Begriffes *Exergie* betrachten wir dessen Veränderung im Zuge eines typischen technischen Nutzungsprozesses eines sog. *Energie-Rohstoffs*. Steinkohle hat einen sog. Heizwert von

$$H = 3,2 \cdot 10^7 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 3,84 \cdot 10^5 \cdot \frac{\text{J}}{\text{Mol}} \quad (8.538)$$

D.h. bei der chemischen Reaktion von  $1 \cdot \text{Mol}$  Kohlenstoff mit  $1 \cdot \text{Mol}$  Sauerstoff gemäß der Reaktionsgleichung



wird dieser Betrag von  $3,84 \cdot 10^5 \cdot \frac{\text{J}}{\text{Mol}}$  frei. Die Formulierung *frei werden* sagt aus, dass dieser Energiebetrag im Zuge dieser chemischen Reaktion an einen Reaktionspartner, also an ein anderes physikalisches System abgegeben werden kann, z.B. auch in Form von nicht-thermischer Energie. Ist ein derartiger weiterer Reaktionspartner nicht vorhanden, wird diese Energie an das Reaktionsprodukt  $\text{CO}_2$  in Form von thermischer Energie übertragen. Dem Konzept der Exergie folgend werden wir also dem Ausgangsprodukt Kohlenstoff die Exergie

$$\frac{\Xi}{N} = 3,84 \cdot 10^5 \cdot \frac{\text{J}}{\text{Mol}} \quad (8.540)$$

zuordnen.

(XXX: Der weitere Text des Absatzes *Das Konzept der Exergie* ist noch nicht verfügbar.)

**Exergie-orientierte Strukturierung der Energieversorgung (-/-)**

(XXX: Der Text des Absatzes *Exergie-orientierte Strukturierung der Energieversorgung* ist noch nicht verfügbar.)

**Zusammenfassende Wertung (-/-)**

(XXX: Der Text des Absatzes *Zusammenfassende Wertung* ist noch nicht verfügbar.)

**8.7.9 Technische Verfahren zur Herstellung chemischer Produkte (-/-)**

(XXX: Der Text des Abschnitts *Technische Verfahren zur Herstellung chemischer Produkte* ist noch nicht verfügbar.)