

A.1 Entropie, Umwelt, Information

A.1.1 Entropieproduktion und Emissionen

In einem Nichtgleichgewichtssystem mit dem Volumen V wird die Entropie pro Zeiteinheit $d_i S/dt$ produziert. Die im Inneren des Volumens produzierte *Entropieproduktionsdichte* $\sigma_S(\mathbf{r}, t)$ am Ort \mathbf{r} zur Zeit t wird definiert durch die Identität

$$\frac{d_i S}{dt} \equiv \int_V \sigma_S(\mathbf{r}, t) dV. \quad (\text{A.1})$$

Das Volumen V kann auch so winzig klein sein, dass die rechte Seite von Gl. (A.1) einfach gleich $\sigma_S \cdot V$ ist. Damit folgt aus dem Zweiten Hauptsatz, d. h. aus $d_i S/dt > 0$ gemäß Gl. (1.3), dass auch die Entropieproduktionsdichte σ_S selbst überall und jederzeit unvermeidlich, d. h. größer als null, ist:

$$\sigma_S(\mathbf{r}, t) > 0. \quad (\text{A.2})$$

Die Entropieproduktionsdichte besteht aus einem Anteil $\sigma_{S,chem}$, der von chemischen Reaktionen hervorgerufen wird, und aus einem Anteil $\sigma_{S,dis}$, der mit Wärmeströmen und Teilchenströmen verbunden ist. Damit wird Gl. (A.2) zu

$$\sigma_S(\mathbf{r}, t) = \sigma_{S,chem} + \sigma_{S,dis} > 0. \quad (\text{A.3})$$

Dabei ist $\sigma_{S,chem}$ gegeben durch *skalare* verallgemeinerte Ströme und Kräfte, während in $\sigma_{S,dis}$ die in der Gl. (A.4) ausgewiesenen *vektoriellen* Ströme und Kräfte (bzw. deren Dichten) auftreten [230]. Diese beiden Terme können nicht miteinander

interferieren. Darum muss wegen der Gl. (A.3) auch jeder der beiden Terme für sich allein positiv sein, d. h. es gilt: $\sigma_{S,chem} > 0$ und $\sigma_{S,dis} > 0$.

Zur Analyse von Entropieproduktionsprozessen wie der Verbrennung einer gewissen Menge Kohle, Öl oder Gas kann man zuerst den Prozess der chemischen Umwandlung betrachten, bei dem $\sigma_{S,chem}$ entsteht, und *nach* dem in der Verbrennungsanlage und einer gewissen Umgebung (Schornstein) N verschiedene Teilchensorten vorliegen, die mit k durchnummeriert werden, und die sich dann im gesamten System gemäß den auf sie einwirkenden verallgemeinerten Kräften ausbreiten.¹ In ihrem hervorragenden Buch *Grundlagen der Thermodynamik* haben Kluge und Neugebauer [231] gezeigt, dass die damit verbundene (in [2] so genannte) „dissipative“ Entropieproduktionsdichte $\sigma_{S,dis}$ gegeben ist durch²

$$\sigma_{S,dis}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{j}_Q \nabla \frac{1}{T} + \sum_{k=1}^N \mathbf{j}_k \left[-\nabla \frac{\mu_k}{T} + \frac{\mathbf{f}_k}{T} \right] > 0. \quad (\text{A.4})$$

Darin ist $\mathbf{j}_Q(\mathbf{r}, t)$ die Wärmestromdichte und $\mathbf{j}_k(\mathbf{r}, t)$ bezeichnet die Diffusionsstromdichte der Teilchensorte k . Angetrieben wird \mathbf{j}_Q vom Gradienten ∇ der absoluten Temperatur $T(\mathbf{r}, t)$ und $\mathbf{j}_k(\mathbf{r}, t)$ wird getrieben von Gradienten des chemischen Potentials $\mu_k(\mathbf{r}, t)$ und der Temperatur sowie von spezifischen äußeren Kräften $\mathbf{f}_k(\mathbf{r}, t)$. Die Wärmestromdichten und Teilchstromdichten sind die Träger der Emissionen, von denen unter Gl. (1.3) die Rede ist.

N. Georgescu-Roegen, dem das große Verdienst zukommt, auf die Wichtigkeit der Entropie für die Wirtschaft hingewiesen zu haben [232], glaubte, einen Vierten Hauptsatz der Thermodynamik entdeckt zu haben: den von der Dissipation der Materie. Dies führte eine Zeitlang zu heftigen Diskussionen, bis geklärt war, dass der zweite Term auf der rechten Seite von (A.4) das abdeckt, was Georgescu-Roegen im Sinn hatte [233].

A.1.2 Treibhauseffekte

Natürlicher Treibhauseffekt

Die einfachste quantitative Beschreibung des natürlichen Treibhauseffekts betrachtet die Erde im Strahlungsgleichgewicht mit der Sonne. Der Fluss der

¹Stufenweise Analysen von Verbrennungsprozessen werden auch für die Berechnung der in solchen Prozessen gewinnbaren, zu Arbeitsleistung verwendbaren Energie (= Exergie) durchgeführt [49], s. auch Gl. (A.26).

²Die ausführlichen vektoranalytischen Rechnungen zur Herleitung der [231] entnommenen Gl. (A.4) werden knapp skizziert im Anhang zum Kapitel „Entropy“ von [2].

solaren Strahlungsleistung am Rande der Erdatmosphäre, die *Solarkonstante* S , wird mittels Ballon-, Raketen- und Satellitenexperimenten gemessen zu

$$S = 1367 \text{ W/m}^2. \quad (\text{A.5})$$

Etwa 30% der solaren Einstrahlung S , das sogenannte Albedo α , wird in den Welt- raum zurückreflektiert. Damit wird am Rand der Erdatmosphäre ein Strahlungsleis- tungsfluss von

$$S(1 - \alpha)/4 = 239 \text{ W/m}^2 \quad (\text{A.6})$$

absorbiert. Der Faktor 1/4 ist der Quotient aus Querschnittsfläche und Oberfläche der Erde. (Hierbei wird die Erde durch eine Kugel mit dem Radius R angenähert, so dass ihre Oberfläche die Größe $A_E \approx 4\pi R^2$ hat und ihr Querschnitt die Fläche πR^2 .) Das Produkt von $A_E = 510 \times 10^6 \text{ km}^2$ mit 239 W/m^2 ergibt die von der Erde *absorbierte* solare Strahlungsleistung zu

$$P_{solar} = 1,2 \cdot 10^{17} \text{ W}. \quad (\text{A.7})$$

Die auf den oberen Rand der Atmosphäre *auftreffende*, d. h. nicht um das Albedo verminderte solare Strahlungsleistung ist dann

$$P_{top} = 1,7 \cdot 10^{17} \text{ W}. \quad (\text{A.8})$$

Der Spektralbereich der gemäß (A.6) und (A.7) von der Biosphäre absorbierten Strahlungsleistung erstreckt sich von 0,2 bis $2 \mu\text{m}$. Diese Leistung wird im Infrarot- Spektralbereich zwischen etwa 5 und $30 \mu\text{m}$ in den Weltraum zurückgestrahlt. Die dazu erforderliche effektive Temperatur T_{eff} wird nach dem Stefan-Boltzmann Ge- setz (in der Näherung für „schwarze Körper“) aus der Gleichung

$$S(1 - \alpha)/4 = \sigma T_{eff}^4 \quad (\text{A.9})$$

unter Verwendung von (A.6) zu

$$T_{eff} = 255\text{K} = -18^\circ\text{C} \quad (\text{A.10})$$

berechnet. Dabei ist $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ die Stefan-Boltzmann Konstante.

Die feste Erdoberfläche hat jedoch eine mittlere Temperatur von $+15^\circ\text{C} = 288 \text{ K}$. Bei dieser Temperatur liefert das Stefan-Boltzmann Gesetz eine abgestrahlte Wär- meflussdichte von 390 W/m^2 . Die Differenz von 151 W/m^2 zwischen den Wär- meflussdichten, die einerseits vom Erdboden und andererseits vom oberen Rand der Erdatmosphäre abgestrahlt werden, wird von den Infrarot-absorbierenden Spurenga- sen der Erdatmosphäre gewissermaßen „eingefangen“ und teils nach oben, teils nach

unten wieder abgestrahlt. Diese Gase umgeben dadurch die Erde mit einem wärmenden Strahlungsmantel, der unser Leben erhält. Sie spielen etwa dieselbe Rolle wie das Glasdach und die Glaswände eines Treibhauses: Das sichtbare Sonnenlicht passiert das Glas nahezu ungehindert und wird vom Boden und den Pflanzen im Treibhaus absorbiert, die dadurch erwärmt werden. Die aufgenommene Wärme strahlen Boden und Pflanzen im Infraroten wieder ab. Diese Strahlung wird ihrerseits von den umgebenden Glasflächen absorbiert und danach teils nach Innen und teils nach Außen abgestrahlt. Die zurückgestrahlte Wärme hebt die Temperatur im Treibhaus über die Außentemperatur. (Die Unterbindung der Konvektion durch das Glasdach trägt noch zusätzlich zur Erwärmung bei.)

Die Infrarot-aktiven Spurengase (Treibhausgase) in der Atmosphäre, ihre Konzentrationen in „Anteilen (parts) pro Million“ (ppm), und ihre Beiträge zur Temperaturerhöhung über -18°C sind: Wasserdampf, H_2O (zwischen 2 ppm bis zu 3×10^4 ppm, $20,6^{\circ}\text{C}$), Kohlendioxid, CO_2 (vorindustriell: 280 ppm, 7°C), (bodennahes) Ozon, O_3 (0,03 ppm, $2,4^{\circ}\text{C}$), Stickoxid, N_2O (0,3 ppm, $1,4^{\circ}\text{C}$), Methan, CH_4 (1,7 ppm, $0,8^{\circ}\text{C}$) und andere ($0,6^{\circ}\text{C}$).

Anthropogener Treibhauseffekt

Erhöhen sich aufgrund menschlicher Aktivitäten die Konzentrationen von Infrarot-aktiven Spurengasen in der Atmosphäre, verdichtet sich der wärmende Strahlungsmantel, mit dem sie die Erde umgeben, und alle von der Sonne zugestrahlte Energie kann nur durch Erhöhung der Oberflächentemperatur der Erde als Wärme in den Weltraum zurückgestrahlt werden.

Der wesentliche Punkt beim anthropogenen Treibhauseffekt (ATE) liegt darin, dass die Absorptionsmaxima der (vom Wasserdampf verschiedenen) Treibhausgase für die Wärmestrahlung in den „Fenstern“ des Infrarot-Absorptionsspektrums des Wasserdampfes (H_2O), des stärksten aller Treibhausgase, liegen. Diese Fenster, durch die in vorindustriellen Zeiten viel Wärmestrahlung in den Weltraum entkam, werden mit wachsender Konzentration der vom Menschen freigesetzten Treibhausgase immer dichter geschlossen.

Energetisch gesehen liegen die wichtigsten offenen Fenster des atmosphärischen Wasserdampfes zwischen $7 \mu\text{m}$ und $13 \mu\text{m}$ – dort erreicht die Infrarotstrahlung der Erdoberfläche ein Maximum – und zwischen $13 \mu\text{m}$ und $18 \mu\text{m}$ – dort wird die Infrarotstrahlung nur teilweise vom Wasserdampf absorbiert. Im Zentralbereich des offenen Fensters zwischen $8 \mu\text{m}$ und $12 \mu\text{m}$ spielt die quasikontinuierliche Absorption der Wärmestrahlung durch den Wasserdampf eine wichtige Rolle. Sie wächst mit dem Quadrat des Wasserdampfdrucks. Wegen des exponentiellen Anstiegs des Partialdrucks von H_2O mit der Temperatur kommt es zu einer starken Rückkopplung zwischen Temperaturanstieg und Infrarotabsorption durch Wasserdampf. Deswegen leisten wachsende CO_2 -Konzentrationen einen großen Beitrag zum ATE (obwohl die beiden Hauptabsorptionsbanden des CO_2 bei $15 \mu\text{m}$ und $4,3 \mu\text{m}$ schon größtenteils gesättigt sind): Zusätzliches CO_2 bewirkt nur eine kleine Temperaturerhöhung δT ; doch der Partialdruck des atmosphärischen H_2O wächst exponentiell mit δT ,

und die Infrarotabsorption durch den Wasserdampf wächst quadratisch mit dem Druck. Alles zusammengenommen wächst der durch zusätzliches CO_2 verursachte ATE mit dem Logarithmus der CO_2 -Konzentration, so dass für jede Verdopplung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration die Temperatur der Erdoberfläche um den gleichen Betrag (von ungefähr $2,5^\circ\text{C}$) zunimmt.

A.1.3 Entropie und Information

Die kanonische Zustandssumme eines Systems vieler miteinander wechselwirkender Teilchen im Kontakt mit einem Wärmebad der absoluten Temperatur T ist mit $\beta = 1/kT$

$$Z = \sum_R e^{-\beta E_R}. \quad (\text{A.11})$$

E_R ist die Energie eines mit R indizierten Vielteilchenzustands, und summiert wird über alle Vielteilchenzustände R des Systems. Einen der (im einfachsten Fall eines idealen Gases) möglichen Vielteilchenzustände zeigt die Abb. 1.1. Die Wahrscheinlichkeit, dass das System bei einer Messung in einem bestimmten Zustand R angetroffen wird, ist

$$P_R = \frac{e^{-\beta E_R}}{Z}. \quad (\text{A.12})$$

Die mittlere Energie des Vielteilchensystems ist gegeben durch den Erwartungswert

$$\bar{E} \equiv \sum_R P_R E_R. \quad (\text{A.13})$$

Lehrbücher der Thermodynamik und Statistik wie [162] zeigen, dass die in Abschn. 1.1 durch $S = k_B \ln \Omega$ definierte Entropie auch aus

$$S = k[\ln Z + \beta \bar{E}] \quad (\text{A.14})$$

berechnet werden kann. Setzt man darin \bar{E} aus Gl. (A.13) ein und beachtet, dass

$$\sum_R P_R = 1 \quad (\text{A.15})$$

ist, erhält man nach kurzer Umrechnung

$$S = -k \sum_R P_R \ln P_R. \quad (\text{A.16})$$

Hierbei ist die Konstante k der Boltzmann-Konstanten k_B gleichzusetzen und $\ln P$ ist der natürliche Logarithmus von P .

In der Informationstheorie hat *Shannon*, ausgehend von Boltzmanns H-Theorem (siehe z. B. [162, S. 624–626]), die Entropie einer diskreten Zufallsvariablen X mit den möglichen Werten $\{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ definiert als den Erwartungswert des Informationsgehalts von X :

$$H = -k \sum_i P(x_i) \ln P(x_i). \quad (\text{A.17})$$

Dabei ist $P(x_i)$, mit

$$\sum_i P(x_i) = 1, \quad (\text{A.18})$$

die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Zufallsvariable X den Wert x_i annimmt. Die Shannon-Entropie ist ein Maß für Unsicherheit/Zufälligkeit. (Diese Unsicherheit verschwindet unter Beachtung von (A.18), wenn ein Ereignis $x_{i=e}$ mit Sicherheit eintritt, so dass $P(x_e) = 1$ und $\ln P(x_e) = 0$ ist.)

Die Fixierung der Konstanten k entspricht einer Festlegung der Informationseinheit. Wählt man $k = 1/\ln 2$, so erhält man wegen $\log_2 P = \ln P / \ln 2$ im Dualsystem mit der Informationseinheit Bit die Shannon-Entropie zu

$$H = - \sum_i P(x_i) \log_2 P(x_i). \quad (\text{A.19})$$

Beispiele:

- $X = \{0, 1\}$ sei eine Nachricht, in der die beiden Zeichen 0 und 1 mit der gleichen Wahrscheinlichkeit von je $1/2$ auftreten. Dann ist der Informationsgehalt dieser Nachricht $H = -(1/2)\log_2(1/2) - (1/2)\log_2(1/2) = -\log_2(1/2) = 1$.
- $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}$ sei eine Nachricht aus zehn Zeichen. Alle Zeichen mögen wieder mit derselben Wahrscheinlichkeit auftreten, so dass $P(x_i) = 1/10$ ist. Dann ist der Informationsgehalt dieser Nachricht $H = -10 \frac{1}{10} \log_2(1/10) = \log_2(10) \approx 3,322$.

Ausführlicher wird der Zusammenhang von Entropie und Information in [28] behandelt; zur Shannon-Entropie s. dort die Abschn. 1.6 und 3.3.

A.2 Energie und Exergie

A.2.1 Energieeinheiten

Größenordnungen

Zeichen	Abkürzung	Zahl	Wort
μ	Mikro	$= 10^{-6}$	Millionstel
m	Milli	$= 10^{-3}$	Tausendstel
k	Kilo	$= 10^3$	Tausend
M	Mega	$= 10^6$	Million
G	Giga	$= 10^9$	Milliarde
T	Tera	$= 10^{12}$	Billion
P	Peta	$= 10^{15}$	Billiarde
E	Exa	$= 10^{18}$	Trillion

SI-Energieeinheiten

SI ist Abkürzung für **Système International** (Internationales System).

1 Joule [J] = 1 Wattsekunde [Ws]

1 Megajoule	$= 10^6 \text{ J}$	$= 1 \text{ MJ}$
1 Gigajoule	$= 10^9 \text{ J}$	$= 1 \text{ GJ}$
1 Terajoule	$= 10^{12} \text{ J}$	$= 1 \text{ TJ}$
1 Petajoule	$= 10^{15} \text{ J}$	$= 1 \text{ PJ}$
1 Exajoule	$= 10^{18} \text{ J}$	$= 1 \text{ EJ}$

1 Mio. Tonnen Steinkohleeinheiten (tSKE) 1 MtSKE = 29,3 PJ

1 Mio. Tonnen Öleinheiten (tÖE) = 1 MtÖE = 41,9 PJ

1 Tonne ÖE = 7,3 Barrel ÖE (1 Barrel = 159 Liter)

historische Einheit: Kalorie (cal). 1 cal = 4,19 J

Energieumrechnungsfaktoren

Einheit	MJ	kWh	tSKE	tÖE
1 MJ	1	0,278	0,000034	0,000024
1 kWh	3,6	1	0,000123	0,000086
1 tSKE	29.304	8140	1	0,700
1 tÖE	41.868	11.630	1,429	1

Leistungseinheiten

1 Watt (W) = 1 Joule pro Sekunde (J/s)

1 PS (1 Pferdestärke) = 0,7355 kW

A.2.2 Energiemenge und -qualität

Für Energiedienstleistungen kommt es neben den in Joule (J), Kilowattstunden (kWh) oder auch Tonnen Steinkohleeinheiten (tSKE) gemessenen Energiemengen auch auf deren Qualität an. Bestimmt wird die Energiequalität durch die in einer Energiemenge enthaltene *Exergie*.

Betrachten wir zwei Systeme unterschiedlicher Atome und Moleküle, die anfangs voneinander isoliert sind. Ihre entsprechenden inneren Energien, die bei konstanten Volumina gemessen werden, sind U'_1 und U''_1 , und die gesamte innere Anfangsenergie ist $U_1 = U'_1 + U''_1$. Dann werden die Systeme in Kontakt und Wechselwirkung miteinander gebracht. Während der chemischen Reaktionen werden die Elektronen und Atome neu arrangiert. Wenn das Gesamtsystem ein neues Gleichgewicht gefunden hat, ist seine innere Energie U_2 .

Die meisten chemischen Reaktionen spielen sich bei konstantem Druck p und nicht bei konstantem Volumen ab. Ist das Gesamtvolumen der beiden isolierten Systeme am Anfang $V_1 = V'_1 + V''_1$ und das Gesamtvolumen nach der Reaktion V_2 , wird die Arbeit $p(V_2 - V_1)$ zwischen dem Gesamtsystem und der Umgebung ausgetauscht. Die Umgebung ist in vielen Fällen die Atmosphäre.

Die Differenz $U_2 - U_1$ zwischen den inneren End- und Anfangsenergien ist dann gegeben durch

$$U_2 - U_1 = -p(V_2 - V_1) - Q_{12}. \quad (\text{A.20})$$

Dabei ist Q_{12} die Wärme, die bei der Reaktion an die Umgebung abgegeben wird. Man bezeichnet die chemische Reaktion als exotherm (endotherm), wenn $Q_{12} > 0$ ($Q_{12} < 0$) ist.

Interessiert die Wärmebilanz einer chemischen Reaktion, ist es zweckmäßig, die *Enthalpie* genannte thermodynamische Zustandsfunktion H einzuführen. Sie ist definiert als

$$H \equiv U + pV. \quad (\text{A.21})$$

Damit kann die Gl. (A.20) geschrieben werden als

$$H_1 - H_2 = Q_{12}. \quad (\text{A.22})$$

Sind sowohl Anfangs- als auch Endzustand der chemischen Reaktion flüssig oder fest, ist der Unterschied zwischen Enthalpie H und innerer Energie U klein. Spielen allerdings auch gasförmige Zustände eine Rolle, wie das bei der Verbrennung fossiler Energieträger der Fall ist, muss man die erzeugte Wärme aus Gl. (A.22) berechnen.

Bei der Bestimmung der in fossilen Brennstoffen enthaltenen *Energiemengen* werden alle Reaktionspartner von einem Anfangszustand vor der wärmeerzeugenden

Reaktion in einen Referenzzustand nach der Reaktion überführt. Der Anfangszustand ist durch die Enthalpie H_1 charakterisiert und der Endzustand durch die Enthalpie H_2 . Dann ergibt sich die freigesetzte Wärme zu $Q_{12} = H_1 - H_2$.

Die aus Enthalpiedifferenzen folgenden Wärmemengen geben die in den Brennstoffen enthaltenen Energiemengen an.

Normalerweise wählt man als Temperatur des Referenzzustands $25^\circ\text{C} \approx 298\text{ K}$. Als Druck wählt man oft den der natürlichen Umgebung. Der Referenzzustand jedes chemischen Elements ist die stabilste, in der Natur vorkommende Verbindung dieses Elements. Für Kohlenstoff und Wasserstoff sind diese Verbindungen CO_2 und gasförmiges oder flüssiges Wasser (H_2O). Man misst die Energiemengen von Kohle, Öl, Gas und Biomasse in einem kontrollierten Verbrennungsprozess. Dabei werden Brennstoff und Luft mit derselben Anfangstemperatur T_0 in eine Reaktionskammer (Kalorimeter) gebracht, und die Verbrennungsprodukte müssen genau auf die Temperatur T_0 heruntergekühlt werden. Die Wärme, die danach die Reaktionskammer verlässt, dividiert durch die Brennstoffmenge, ist der spezifische Heizwert des Brennstoffs. Es gibt einen oberen und einen unteren Heizwert. Die beiden Werte unterscheiden sich durch die Verdampfungswärme von H_2O . Die Tab. 2.1 gibt mittlere Heizwerte an.

Energiemengen, gemessen in Enthalpieeinheiten wie Joule (oder Kilowattstunden oder Tonnen von Kohle- oder Öl-Äquivalenten), reichen nicht aus, die Nützlichkeit eines Energieträgers zu charakterisieren. Energiequalität ist auch wichtig. Nach Karlsson [234] und van Gool [235] ist die Qualität von Energie definiert als

Qualität = Exergie/Enthalpie.

Exergie ist der Teil einer Energiemenge, der vollständig in physikalische Arbeit umgewandelt werden kann. Wie in Abschn. 1.1.3 ausgeführt, wird er im Gesetz von der Energieerhaltung ergänzt durch die nutzlose Anergie.

Beispiele für Exergie

1. Die kinetische Energie einer Masse m mit Geschwindigkeit \mathbf{v} ist zu 100 % Exergie. Gleiches gilt für die potenzielle Energie einer Masse in einem Gravitationsfeld.
2. Elektrische Energie ist zu 100 % Exergie.
3. Die in Kohle, Öl und Gas gespeicherte chemische Energie ist im Prinzip und Idealfall zu 100 % Exergie. Gleiches gilt für die aus Masseumwandlung gemäß $E = mc^2$ gewonnene Energie. Dem ist so, weil im Prinzip die Verbrennung fossiler Energieträger und die Energiegewinnung aus Masseumwandlung bei sehr hohen absoluten Temperaturen T erfolgen kann. Dann ist die Exergie E_X der Wärme Q , die eine zwischen einem Reservoir der absoluten Temperatur T und der Umgebung der absoluten Temperatur T_0 arbeitende Carnot-Maschine antreibt, gegeben durch den Carnot-Wirkungsgrad:

$$E_X = Q(1 - T_0/T) \rightarrow Q \text{ für } T \gg T_0.$$

Eine Carnot-Maschine ist eine idealisierte Wärmekraftmaschine, die reversibel, d. h. unendlich langsam, einen Arbeitszyklus durchläuft. Die Wirkungsgrade realer Wärmekraftmaschinen sind kleiner als $(1 - T_0/T)$.

4. Auch die Sonnenstrahlung besteht im Prinzip zu 100% aus Exergie. Karlsson [234] hat gezeigt, dass die Qualität quasi-monochromatischer, inkohärenter Strahlung im Frequenzbereich zwischen ω und $\omega + d\omega$, die senkrecht auf die Oberfläche eines schwarzen Körpers der Temperatur T_0 fällt, gegeben ist durch

$$\frac{\text{Exergie}}{\text{Enthalpie}} = 1 - T_0/T + [\exp(\hbar\omega/k_B T) - 1] \times \frac{k_B T_0}{\hbar\omega} \ln \frac{[1 - \exp(-\hbar\omega/k_B T)]}{[1 - \exp(-\hbar\omega/k_B T_0)]}. \quad (\text{A.23})$$

Hierbei ist

$$T = \hbar\omega / \{k_B \ln[(2\hbar\omega^3/c^2 P_E) + 1]\} \quad (\text{A.24})$$

die äquivalente Temperatur eines schwarzen Körpers, der pro Einheitsfläche die Leistung $P_E(\omega)d\omega$ im Frequenzbereich zwischen ω und $\omega + d\omega$ abstrahlt. Ist T die effektive Oberflächentemperatur der Sonne von 5777 K, und ist $T_0 = 288$ K, was der mittleren Oberflächentemperatur der Erde entspricht, dann liegt die Qualität der entsprechenden Schwarzkörperstrahlung sehr nahe bei 1 [234].

5. Ein Vielteilchensystem mit der inneren Energie U , Entropie S und dem Volumen V , das sich *nicht* im Gleichgewicht mit seiner Umgebung der Temperatur T_0 befindet, in der der Druck p_0 herrscht und mit der es Wärme und Arbeit – aber nicht Materie – austauschen kann, hat die Exergie [49,50]

$$E_X = (U - U_0) + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0). \quad (\text{A.25})$$

Hierbei sind U_0 , V_0 , und S_0 die innere Energie, das Volumen und die Entropie des Systems, wenn es mit seiner Umgebung ins Gleichgewicht gekommen ist.

6. In ein thermodynamisches System mit Volumen V und Druck p tritt in stetigem Strome Masse m mit der kinetischen Energie $m\mathbf{v}^2/2$ an einer Stelle ein; an anderer Stelle auf derselben Höhe z über einem Referenzpunkt im Gravitationsfeld mit der Beschleunigung g tritt sie wieder aus. Dieses System enthält bezüglich der Umgebung mit U_0 , V_0 , p_0 und S_0 die Exergie [49,50]

$$E_X = (U + pV - U_0 - p_0V_0) - T_0(S - S_0) + m\mathbf{v}^2/2 + mgz.$$

7. Ein Verbrennungsprozess produziert ein Vielteilchensystem der inneren Energie U und Entropie S , dessen Volumen V ist. Das System ist nicht im Gleichgewicht mit seiner Umgebung, in der die Temperatur T_0 und der Druck p_0 herrschen und mit der Wärme, Arbeit und Materie ausgetauscht werden können. Die Verbrennungsprodukte sind in der Brennkammer höher konzentriert als in der Umgebung. Grundsätzlich kann aus ihrer Diffusion in die Umgebung Arbeit gewonnen werden. Dieses Arbeitspotenzial trägt zur Exergie des Systems bei. Zur Berechnung dieser Exergiekomponente geht man davon aus, dass unmittelbar nach dem Verbrennungsprozess die Systemkomponenten durchmischt und bereits im thermischen und mechanischen Gleichgewicht mit der Umgebung sind, die Brennkammer aber noch nicht verlassen haben. Dann verlassen sie die Brennkammer und diffundieren. Besteht das System aus N verschiedenen Teilchensorten i , mit $n_i =$ Zahl der Teilchen der Sorte i , und sind μ_{i0} und μ_{id} die

chemischen Potentiale der Teilkomponente i im thermischen und mechanischen Gleichgewicht vor und nach der Diffusion, dann ist der Exergiegehalt des Systems (bei Vernachlässigung der kinetischen und potenziellen Energien) [49]

$$E_X = (U - U_0) + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + \sum_{i=1}^N n_i(\mu_{i0} - \mu_{id}). \quad (\text{A.26})$$

A.3 Aggregation

Annahmen

Die monetäre Bewertung eines Gutes oder einer Dienstleistung ist im Mittel umso höher (ungeachtet kurzzeitiger Fluktuationen), je mehr physikalische Arbeit und Informationsverarbeitung zu deren Produktion aufzuwenden ist.

Die monetäre Bewertung von Arbeitsleistung und Informationsverarbeitung ist in der Regel für verschiedene Komponenten der Wertschöpfung verschieden. Doch der über alle Komponenten der Wertschöpfung genommene Mittelwert bleibt während kurzer Zeitintervalle in guter Näherung konstant. Dabei ist ein kurzes Zeitintervall kleiner als die für Innovationsdiffusion charakteristischen Zeiten.

Entsprechendes gilt für die monetäre Bewertung eines Kapitalgutes gemäß seiner Kapazität, physikalische Arbeit zu leisten und Information zu verarbeiten.

A.3.1 Wertschöpfung

Die Kilowattstunde (kWh) wird als Einheit des Energieaufwandes zur Produktion eines Gutes oder einer Dienstleistung gewählt, und das Kilobit (kB) ist die Einheit der Informationsverarbeitung. (Ein Kilobit sind 1000 Ja-Nein-Entscheidungen, dargestellt z. B. durch das Ein- und Ausschalten von elektrischen Strömen.) Die Größen der Einheiten spielen keine Rolle, wenn für Wertschöpfung und Produktionsfaktoren dimensionslose, auf ein Basisjahr normierte Variablen verwendet werden.

Zeitreihen der Wertschöpfung in physischen Einheiten werden von keiner Statistik ausgewiesen. Darum müssen sie für die ökonometrische Praxis auf die von den Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen publizierten, inflationsbereinigten monetären Zeitreihen abgebildet werden. Dazu wird eine fiktive monetäre Einheit als Platzhalter für irgendeine real existierende Währung eingeführt. Wir nennen diese Einheit „Mark“. Wir verbinden das monetäre Maß der Wertschöpfung mit dem physischen Maß in fünf Schritten.

1. Die in Mark gemessene monetäre Wertschöpfung $Y_{mon}(t)$ des Wirtschaftssystems zur Zeit t wird unterteilt, und zwar in M ($\gg 1$) Teile $Y_{i,mon}$, die alle denselben monetären Wert μ Mark haben: $Y_{mon} = \sum_{i=1}^M Y_{i,mon} = M\mu$ Mark.

(Zeitliche Änderungen von $Y_{mon}(t)$ haben entsprechende zeitliche Änderungen $M(t)$ zur Folge; μ ist konstant und $\text{Mark} = Y_{mon}(t)/M(t)\mu$.)

2. Die zur Produktion von $Y_{i,mon}$ geleistete physikalische Arbeit wird durch den erforderlichen Energieeinsatz gemessen. Dieser schließt Energieumwandlungsverluste infolge von Reibung und thermodynamischen Effizienzbeschränkungen ein. Wir definieren:

$W_i \equiv$ Zahl der Kilowattstunden Primärenergie, die bei der Erzeugung von $Y_{i,mon}$ verbraucht werden.

$V_i \equiv$ Zahl der Kilobits, die bei der Erzeugung von $Y_{i,mon}$ verarbeitet werden.

Maschinelle Standards können für die Messungen von W_i und V_i für alle auf dem Markt verkauften Güter und Dienstleistungen vereinbart werden, denn diese können im Prinzip als durch standardisierte Routineverfahren produziert angesehen werden. (Der Fehler bei der Übertragung dieser Messvorschriften auf den nicht-mechanisierten Teil der Landwirtschaft ist kleiner als der Gesambeitrag der Landwirtschaft zum BIP.)

3. Wir definieren die physische Wertschöpfung Y_{phys} des Wirtschaftssystems als

$$Y_{phys} = \sum_{i=1}^M Y_{i,phys} \equiv \sum_{i=1}^M W_i \cdot kWh \cdot V_i \cdot kB. \quad (\text{A.27})$$

Gemäß der Definitionen in Schritt 1 hat $Y_{i,phys}$ den monetären Wert μMark .

Die Einheit der physischen Wertschöpfung wird ENIN genannt, als Abkürzung von „Energie und INformation“. Sie ist definiert als der Mittelwert

$$ENIN \equiv \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M W_i \cdot V_i \cdot kWh \cdot kB = \zeta \cdot kWh \cdot kB, \quad (\text{A.28})$$

wobei

$$\zeta \equiv \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M W_i \cdot V_i \quad (\text{A.29})$$

ist, so dass gilt

$$Y_{phys} = M \cdot ENIN. \quad (\text{A.30})$$

Der Äquivalenzfaktor ζ ändert sich mit der Zeit t , wenn die monetäre Bewertung von Arbeitsleistung und Informationsverarbeitung sich derartig ändert, dass die Zahlen $W_i \cdot V_i$, die konstantem μ entsprechen, und die rechte Seite von Gl. (A.29) zeitabhängig werden.

4. Aus den obigen Gleichungen ergibt sich als Beziehung zwischen monetärer und physischer Wertschöpfung

$$\frac{Y_{mon}(t)}{Y_{phys}(t)} = \frac{M\mu \cdot \text{Mark}}{M \cdot ENIN} = \frac{\mu}{\zeta} \cdot \frac{\text{Mark}}{kWh \cdot kB}. \quad (\text{A.31})$$

Solange ζ konstant ist, herrscht Proportionalität zwischen Y_{phys} und Y_{mon} . Dann sind die monetären, inflationsbereinigten Zeitreihen der Wertschöpfung proportional zu den technologischen, in ENIN physisch aggregierten Zeitreihen.

5. Arbeitet man, wie in Abschn. 3.3 effektiv geschehen, mit dimensionslosen Variablen, die auf ihre Größen in einem Basisjahr t_0 normiert sind, ist die dimensionslose Wertschöpfung zur Zeit t

$$y(t) \equiv Y(t)/Y_0, \quad (\text{A.32})$$

mit $Y_0 = Y(t_0)$. Folglich ist die dimensionlose physische Wertschöpfung zur Zeit t

$$y_{phys}(t) \equiv \frac{Y_{phys}(t)}{Y_{phys}(t_0)}. \quad (\text{A.33})$$

Wegen Gl. (A.31) ist die monetäre Wertschöpfung im Basisjahr t_0

$$Y_{mon}(t_0) = \frac{\mu}{\zeta_0} \cdot \frac{\text{Mark}}{\text{kWh} \cdot \text{kB}} Y_{phys}(t_0), \quad \zeta_0 \equiv \zeta(t_0). \quad (\text{A.34})$$

Aus der Kombination der Gl. (A.31), (A.33) und (A.34) folgt, dass die dimensionslose Zeitreihe der monetären Wertschöpfung gleich ist der dimensionlosen Zeitreihe der physisch aggregierten Zeitreihe der Wertschöpfung, multipliziert mit dem Faktor $\frac{\zeta_0}{\zeta}$:

$$y_{mon}(t) \equiv \frac{Y_{mon}(t)}{Y_{mon}(t_0)} = \frac{\zeta_0}{\zeta} \frac{Y_{phys}(t)}{Y_{phys}(t_0)} \equiv \frac{\zeta_0}{\zeta} y_{phys}(t). \quad (\text{A.35})$$

Solange der Äquivalenzfaktor ζ als zeitunabhängig und gleich ζ_0 betrachtet werden kann, ist die dimensionslose monetäre Zeitreihe gleich der dimensionlosen physischen Zeitreihe. Wird der Äquivalenzfaktor ζ zeitabhängig, unterscheidet sich der Parameter $Y_0(t)$ der LinEx-Funktion (3.42) von seinem Wert $Y_0(t_0)$ im Basisjahr t_0 .

A.3.2 Kapital

Der Kapitalstock eines industriellen Wirtschaftssystems besteht aus allen Energiewandlungsanlagen und Informationsprozessoren samt aller Gebäude und Installationen, die zu ihrem Schutz und Betrieb nötig sind.

Die von den Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen publizierten Zeitreihen des Kapitalstocks eines Wirtschaftssystems setzen wir in Beziehung zur Kapazität dieses Kapitalstocks, Arbeit zu leisten und Information zu verarbeiten. Für die Aggregation des Kapitals in physischen Einheiten gehen wir wie bei der Wertschöpfung in fünf Schritten vor.

1. Der monetär (in inflationsbereinigten Mark) gemessene Kapitalstock, K_{mon} , wird in N ($\gg 1$) Einheiten $K_{i,mon}$ unterteilt, die alle den gleichen monetären Wert ν Mark haben: $K_{mon} = \sum_{i=1}^N K_{i,mon} = N\nu$ Mark. (Zeitliche Änderungen von $K_{mon}(t)$ haben entsprechende zeitliche Änderungen $N(t)$ zur Folge; ν ist konstant und $\text{Mark} = K_{mon}/N\nu$.)
2. Die Fähigkeit zur Arbeitsleistung pro Zeiteinheit wird in Kilowatt (kW) gemessen, und die Fähigkeit zur Informationsverarbeitung pro Zeiteinheit wird in Kilobits pro Sekunde (kB/s) gemessen. Wir definieren:
 S_i = Zahl der Kilowatt, die das voll ausgelastete Kapitalgut i mit dem monetären Wert $K_{i,mon}$ leistet.
 T_i = Zahl der Kilobits pro Sekunde, die das Kapitalgut i mit dem monetären Wert $K_{i,mon}$ verarbeitet.
 Die S_i entnimmt man den Maschinenbeschreibungen, und die T_i sind gegeben durch die Anzahl der Schaltprozesse pro Zeiteinheit, die die Energieflüsse in den voll ausgelasteten Maschinen durchlassen oder blockieren.
3. Wir definieren den physischen Kapitalstock K_{phys} des Wirtschaftssystems als

$$K_{phys} = \sum_{i=1}^N K_{i,phys} \equiv \sum_{i=1}^N S_i \cdot kW \cdot T_i \cdot kB/s. \quad (\text{A.36})$$

Gemäß der Definitionen in Schritt 1 hat $K_{i,phys}$ den monetären Wert ν Mark. Die Einheit des physischen Kapitals wird *ATON* genannt – Abkürzung für AuTomatiON. Definiert ist sie als der Mittelwert

$$ATON \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \cdot T_i \cdot kW \cdot kB/s = \kappa \cdot kW \cdot kB/s, \quad (\text{A.37})$$

mit

$$\kappa \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \cdot T_i, \quad (\text{A.38})$$

so dass

$$K_{phys} = N \cdot ATON. \quad (\text{A.39})$$

Der Äquivalenzfaktor κ ändert sich mit der Zeit t , wenn die monetären Bewertungen der Fähigkeiten, Arbeit zu leisten und Informationen zu verarbeiten, sich derartig ändern, dass die Zahlen $S_i \cdot T_i$, die konstantem ν entsprechen, *und* die rechte Seite von Gl. (A.38) zeitabhängig werden.

4. Die Beziehung zwischen monetärem und physischem Kapital ergibt sich aus den obigen Gleichungen zu

$$\frac{K_{mon}(t)}{K_{phys}(t)} = \frac{N\nu \cdot \text{Mark}}{N \cdot ATON} = \frac{\nu}{\kappa} \cdot \frac{\text{Mark}}{kW \cdot kB/s}. \quad (\text{A.40})$$

Bei konstantem κ herrscht Proportionalität zwischen K_{phys} und K_{mon} . Dann sind die monetären, inflationsbereinigten Zeitreihen des Kapitalstocks proportional zu den technologischen, in ATON physisch aggregierten Zeitreihen.

5. Arbeitet man, wie in Abschn. 3.3 effektiv geschehen, mit dimensionslosen Variablen, die auf ihre Größen in einem Basisjahr t_0 normiert sind, ist der dimensionslose physische Kapitalstock

$$k_{phys}(t) \equiv \frac{K_{phys}(t)}{K_{phys}(t_0)}. \quad (\text{A.41})$$

Wegen Gl. (A.40) ist der monetäre Kapitalstock zur Zeit t_0

$$K_{mon}(t_0) = \frac{v}{\kappa_0} \cdot \frac{Mark}{kW \cdot kB/s} K_{phys}(t_0), \quad \kappa_0 \equiv \kappa(t_0). \quad (\text{A.42})$$

Aus der Kombination der Gl. (A.40), (A.41) und (A.42) folgt, dass die dimensionslose Zeitreihe für den monetär aggregierten Kapitalstock gleich der dimensionslosen Zeitreihe für den physisch aggregierten und mit $\frac{\kappa_0}{\kappa}$ multiplizierten Kapitalstock ist:

$$k_{mon}(t) \equiv \frac{K_{mon}(t)}{K_{mon}(t_0)} = \frac{\kappa_0}{\kappa} \frac{K_{phys}(t)}{K_{phys}(t_0)} \equiv \frac{\kappa_0}{\kappa} k_{phys}(t). \quad (\text{A.43})$$

So lange der Äquivalenzfaktor κ als zeitunabhängig und gleich κ_0 betrachtet werden kann, ist die dimensionslose monetäre Zeitreihe gleich der dimensionslosen physischen Zeitreihe. Wird der Äquivalenzfaktor κ zeitabhängig, trägt das zur Zeitabhängigkeit des Technologieparameters a in der LinEx-Funktion (3.42) bei.

A.3.3 Arbeit und Energie

Der menschliche Beitrag zur Wertschöpfung besteht aus Routinearbeit und schöpferischem Gestalten. Erstere wird physisch gemessen, und zwar in geleisteten Arbeitsstunden pro Jahr (oder, ungenauer, in der Gesamtzahl der pro Jahr Beschäftigten). Letzteres besteht aus dem Einsatz nicht physisch messbarer Ideen, Erfindungen und Wertentscheidungen im Produktionsprozess; unsere Theorie ermittelt deren Beitrag quantitativ *ex post* als Wirken der *Kreativität* aus zeitlichen Änderungen von Technologieparametern. Teilweise kann auch der Energieeinsatz, besonders in der Informationstechnologie, als Proxy-Variable für das Bildungsniveau der Beschäftigten angesehen werden.

Der Produktionsfaktor Energie wird quantitativ durch die Enthalpiewerte der eingesetzten Energieträger und qualitativ durch deren Exergiegehalte gemessen. Der Anhang A.2 behandelt das ausführlicher.

A.4 Vergangenheit und Zukunft

A.4.1 Frühstadium der Industrialisierung

Wir bezeichnen eine Wirtschaft als „früh industrialisiert“ im Vergleich zu der eines in Abschn. 3.3.5 diskutierten hoch industrialisierten Landes, wenn in ihr der Einsatz von Kapital und Energie pro Kopf der Bevölkerung viel kleiner ist als im hoch industrialisierten System.

Betrachten wir ein früh industrialisiertes Wirtschaftssystem, in dessen Kapitalstock neben (von fossilen und solaren Energien angetriebenen) Maschinen auch von menschlicher Muskelkraft gehandhabte Werkzeuge sowie Nutztiere, deren Stallungen und die mit ihnen kombinierten Gerätschaften eine Rolle spielen.

Dann gelten bei Verwendung von $\beta = 1 - \alpha - \gamma$ die asymptotischen Randbedingungen

$$\alpha \rightarrow 0, \quad \text{sofern} \quad \frac{L/L_0}{K/K_0} \rightarrow 0, \quad \frac{E/E_0}{K/K_0} \rightarrow 0, \quad (\text{A.44})$$

$$\gamma \rightarrow 0, \quad \text{sofern} \quad \frac{L}{L_0} \rightarrow \frac{L_{max}}{L_0} \equiv c \frac{K_{min}}{K_0}. \quad (\text{A.45})$$

Gl. (A.44) folgt wieder aus dem Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs. Gl. (A.45) beschreibt die Annäherung an einen Zustand, den wir als den „Grenz-zustand der Manufaktur“ bezeichnen. In diesem Zustand ist der Einsatz der menschlichen Arbeit maximal, $L = L_{max}$, und zwar im Vergleich zu einem Zustand mit mehr Maschinen oben genannter Art, und der Kapitalstock ist minimal; c ist der zweite freie Technologieparameter.

Einfachste, faktorabhängige Produktionselastizitäten, die bei der Wahl von $P(E/L) = ac \frac{E/E_0}{L/L_0}$ für die in Gl. (3.22) frei verfügbare Funktion diesen Randbedingungen und den Differentialgleichungen (3.18)–(3.20) genügen, sind

$$\begin{aligned} \alpha &= a \frac{L/L_0 + E/E_0}{K/K_0}, \quad \gamma = -a \frac{E/E_0}{K/K_0} + ac \frac{E/E_0}{L/L_0}, \\ \beta &= 1 - a \frac{L/L_0}{K/K_0} - ac \frac{E/E_0}{L/L_0}. \end{aligned} \quad (\text{A.46})$$

(Der Parameter c bedeutete hier anderes als in (3.40)). Mit diesen Produktionselastizitäten liefern die Gl. (3.8) und (3.9) die einfachste LinEx-Funktion für ein früh industrialisiertes Produktionssystem als

$$Y_{fi}(K, L, E; t) = Y_0(t) \frac{L}{L_0} \exp \left[a \left(2 - \frac{L/L_0 + E/E_0}{K/K_0} \right) + ac \left(\frac{E/E_0}{L/L_0} - 1 \right) \right]. \quad (\text{A.47})$$

Vielleicht wäre das die Produktionsfunktion für Deutschland nach dem Jahr 1945 bei Verwirklichung des Morgenthau-Plans zur Reduzierung Deutschlands auf einen Agrarstaat geworden. Und vielleicht kann diese Funktion auch die Wertschöpfung eines Entwicklungslandes wie Kolumbien beschreiben.

A.4.2 Wirtschaft total digital

„Wirtschaft total digital“ meint das Produktionssystem einer Zukunft, in der (elektrische) Energie jederzeit in Fülle vorhanden ist und ein weltumspannendes, engmaschiges Internet immer perfekt arbeitet. Dieses System funktioniert schlussendlich ohne menschliche Routinearbeit L , wenn in Industrie 4.0 der Kapitalstock sich selbst hinreichend organisiert und erweitert, etwa so wie es das Erste Evolutionsprinzip der Produktionsfaktoren im Abschn. 3.3.1 beschreibt. Dabei tritt das ökonomische Gewicht des Kapitals, α , in dem Maße hinter dem der Energie, γ , zurück, in dem $\frac{K}{K_0} \rightarrow \infty$ und $\frac{E}{E_0} \rightarrow c \frac{K}{K_0}$ streben. (K_0, L_0, E_0 können durchaus von der Größenordnung der Faktorinputs hoch industrialisierter Länder der Gegenwart sein.)

Ob es unter den Beschränkungen des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik und des Raums der Biosphäre jemals zur „Wirtschaft total digital“ kommt, sei dahingestellt.

Unter Verwendung von $\alpha = 1 - \beta - \gamma$ ist diese Wirtschaft definiert als System mit den asymptotischen Randbedingungen

$$\beta \rightarrow 0 \text{ und } \gamma \rightarrow 1, \text{ wenn } \frac{E}{E_0} \rightarrow c \frac{K}{K_0} \rightarrow Z \gg 1. \quad (\text{A.48})$$

Die Randbedingung für β gilt, ähnlich wie zuvor in den hoch industrialisierten Ländern der Gegenwart, für den Zustand maximaler bzw. nunmehr totaler Automation. Diesen beschreibt $E/E_0 \rightarrow cK/K_0$. Des Weiteren sagt die Randbedingung für γ , dass ein riesiger Energieeinsatz, der einen riesigen, sich selbst vollautomatisch regenerierenden und erweiternden Kapitalstock produziert, als der einzige Produktionsfaktor verbleibt und das Wachstum bewirkt – ähnlich wie die Sonne das Leben auf der Erde.

Einfachste, faktorabhängige Produktionselastizitäten, die bei der Wahl der in Gl. (3.28) frei verfügbaren Funktion zu $R(E/K) = \frac{1}{c} \frac{E/E_0}{K/K_0}$ diesen Randbedingungen und den Differentialgleichungen (3.24)–(3.26) genügen, sind

$$\beta = a \frac{L/L_0}{E/E_0}, \quad \gamma = -a \frac{L/L_0}{E/E_0} + \frac{E/E_0}{cK/K_0}, \quad \alpha = 1 - \frac{E/E_0}{cK/K_0}. \quad (\text{A.49})$$

(Der Technologieparameter a hat wieder eine andere Bedeutung als zuvor. Der Technologieparameter c ist der Energiebedarf des total automatisierten, vollausgelasteten Kapitalstocks.)

Mit diesen Produktionselastizitäten liefern die Gleichungen (3.8) und (3.9) die einfachste LinEx-Funktion für das total digitalisierte Zukunftssystem zu

$$Y_{td}(K, L, E; t) = Y_0(t) \frac{K}{K_0} \exp \left[a \left(\frac{L/L_0}{E/E_0} - 1 \right) + \frac{1}{c} \left(\frac{E/E_0}{K/K_0} - 1 \right) \right]. \quad (\text{A.50})$$

Literatur

1. Goethe, J. W. von: Vorspiel zur Wiedereröffnung des Theaters in (Bad) Lauchstädt
2. Kümmel, R.: *The Second Law Of Economics – Energy, Entropy, And The Origins Of Wealth*. Springer, Heidelberg (2011)
3. Fukuyama, F.: *The End Of History And The Last Man*. Free Press, New York (1992)
4. Hägele, P.: *Freche Verse – physikalisch. Limericks über Physik und Physiker*, illustriert von Peter Evers, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden (1995) Kapitel Thermodynamik. Der zur Zeichnung gehörende Limerick lautet: „Die Zustandsfunktion Entropie – statistisch seit Boltzmanns Genie. Ich zähl Komplexionen, tu Stirling nicht schonen. Doch richtig versteh’ ich sie nie.“
5. Napp, V.: *Entropie und Entropieproduktion*. Erste Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien – Schriftliche Hausarbeit (theoretische Physik). Bayerische Julius-Maximilians-Universität (1994)
6. Schönwiese, C.-D.: *Klimatologie*. Ulmer UTB, 3. Aufl., Stuttgart (2008)
7. Wagner, H.-J., Koch, M. K., et al.: *CO₂-Emissionen der Stromerzeugung*. BWK **59**, 44–52 (2007)
8. Mauch, W.: *Kumulierter Energieaufwand – Instrument für nachhaltige Energieversorgung*. Forschungsstelle für Energiewirtschaft Schriftenreihe **23**, (1999); kombiniert mit Daten vom Öko-Institut Darmstadt (2006)
9. Stoller, D.: *Chinesische Solarzellen haben eine verheerende Umweltbilanz*. 2014. <http://www.ingenieur.de/Themen/Photovoltaik/Chinesische-Solarzellen-verheerende-Umweltbilanz>. Zugegriffen: 15. August 2015
10. Enzyklika *LAUDATO SÍ* von Papst Franziskus über die Sorge für das gemeinsame Haus, hrsg. vom Sekretariat der Deutschen Bischofskonferenz, Bonn (2015)
11. <http://www.kulturelleerneuerung.de>, Zugegriffen: 25.04.2017
12. Deutsche Physikalische Gesellschaft und Deutsche Meteorologische Gesellschaft: *Warnungen vor drohenden weltweiten Klimaänderungen durch den Menschen*. *Phys. Blätter* **43**, 347–349 (1987); s. auch: www.dpg-physik.de/dpg/gliederung/ak/ake/publikationen/dpгаufruf/1987/pdf
13. Deutsche Physikalische Gesellschaft: *Energiememorandum*. *Phys. Blätter* **51**, 388 (1995); s. auch: www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/stellungnahmen/mem_energie_1995.html
14. Bayerisches Landesamt für Statistik, <https://www.statistik.bayern.de/ueberuns/zeitreihen>, Zugegriffen: 25.04.2017
15. <http://www.skepticalscience.com/iea-co2-emissions-update-2010.html>

16. Stern Review Report on the Economics of Climate Change, ISBN number: 0-521-70080-9, Cambridge University Press, 2007; <http://www.cambridge.org/9780521700801>.
17. Stern, N.: The economics of climate change. *Amer. Econ. Rev.* **98**(2), 1–37 (2008)
18. Deutscher Bundestag: Dritter Bericht der Enquete Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“, Drucksache 11/8030. Bonn (1990), S. 855
19. Proops, J.L.R., Faber, M., Wagenhals, G.: *Reducing CO₂ Emissions*. Springer, Berlin (1993)
20. US National Academy of Sciences: Climate change and the integrity of science. *Science* **328**, 689–690 (2010)
21. Rahmstorf, S.: Risk of sea-change in the Atlantik. *Nature* **388**, 825–826 (1997)
22. Rahmstorf, S.: Die unterschätzte Gefahr eines Versiegens des Golfstromsystems. <https://scilogs.spektrum.de/klimalounge/die-unterschaetzte-gefahr-eines-versiegens-des-golfstromsystems/> Zugegriffen 03.01.2018
23. Düren, M.: Understanding The Bigger Energy Picture. Springer Briefs in Energy (Open Access), <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57966-5>. Springer Nature, Cham (Schweiz) (2017)
24. von Buttlar, H.: Umweltprobleme. *Phys. Blätter* **31**, 145–155 (1975)
25. Berg, M., Hartley, B., Richters, O.: A stock-flow consistent input-output model with applications to energy price shocks, interest rates, and heat emissions. *New J. Phys.* **17**, 015011 (2015) (Open Access). <https://doi.org/10.1088/1367-2630/17/1/015011>
26. Solow, R. M.: The economics of resources or the resources of economics. *Amer. Econ. Rev.* **64**, 1–14 (1974)
27. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): *Global, Innovativ, Fair – Wir machen die Zukunft digital. Öffentlichkeitsarbeit*, Berlin (2017)
28. Ebeling W., Freund J., Schweitzer F.: *Komplexe Strukturen: Entropie und Information*. B. G. Teubner, Stuttgart (1998)
29. Stahl, A.: Entropiebilanzen und Rohstoffverbrauch. *Naturwissenschaften* **83**, 459 (1995)
30. <https://www.drogenbeauftragte.de/presse/pressekontakt-und-mitteilungen/2017/2017-2-qualitaet/ergebnisse-der-blick-studie-2017-vorgestellt.html> (Zugegriffen: 10.03.2018)
31. Eichhorn, W., und Solte, D.: *Das Kartenhaus Weltfinanzsystem*. Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt/M. (2009); insbes. S. 193
32. H.-G. Hilpert et al.: Aus fremder Quelle. Japans steiniger Weg ins 21. Jahrhundert. *Zeitschrift für japanisches Recht* **6**, 4. Jg., 139–156 (1998)
33. Samuelson, P. A.: *Volkswirtschaftslehre, Band I und Band II*. Bund-Verlag, Köln (1975)
34. Franz von Assisi: *Sonnengesang von Franz von Assisi*. In: Eininger, Ch. (Hrsg.) *Die schönsten Gebete der Welt*, S. 69. Südwest Verlag, München (1964)
35. Echnaton (Amenophis IV.): *Sonnengesang des Echnaton*. In: Eininger, Ch. (Hrsg.) *Die schönsten Gebete der Welt*, S. 94. Südwest Verlag, München (1964)
36. Sieferle, R. P.: *Das vorindustrielle Solarenergiesystem*. In: Brauch, H. G. (Hrsg.) *Energiepolitik*, S. 27–46. Springer, Berlin (1997)
37. Heinloth, K.: *Energie und Umwelt – Klimaverträgliche Nutzung von Energie*. B. G. Teubner Stuttgart, Verlag der Fachvereine Zürich (1993) S. 15; nach: E. Cook, *Scientific American* **225**, S. 135 (1971)
38. Kümmel, R.: *Energie und Kreativität*. B.G. Teubner, Stuttgart (1998)
39. Smil, V.: *Energy In World History*. Westview, Boulder (1994); zitiert nach [36].
40. Institut der deutschen Wirtschaft, Köln
41. Ayres, R. U.: *Information, Entropy, And Progress*. American Institute of Physics, New York (1994)
42. Ayres, R. U.: *Energy, Complexity And Wealth Maximization*. Springer International Publishing Switzerland (2016). Dieses Buch vertieft und erweitert – durchaus auch um Alternativen zu aktuellen physikalischen Theorien – die Themen von [41]
43. Gesamtverband Steinkohle: *Steinkohle 2014 – Herausforderungen und Perspektiven*. www.gvst.de/site/steinkohle/Internationale_Energie.htm.

44. The LTI Research Group (Hrsg.): Long-Term Integration Of Renewable Energy Sources Into The European Energy System. Physica-Verlag, Heidelberg (1998)
45. Kondo, J., Inui, T., Wasa, K. (Hrsg.): Proceedings of the Second International Conference on Carbon Dioxide Removal, Kyoto, 1994. Energy Conversion and Management **36**, Numbers 6–9 (1995)
46. Tolba, M. K. (Hrsg.): Our Fragile World – Challenges And Opportunities For Sustainable Development. EOLSS Publishers Co., Oxford UK (2001)
47. www.eolss.net
48. Hohmeyer, O., Ottinger, R. L. (Hrsg.): External Environmental Costs Of Electric Power. Springer, Berlin (1991)
49. Fricke, J., Borst, W. L.: Energie, Oldenbourg, München, Wien, 2. Aufl. (1984)
50. Baehr, H. D.: Thermodynamik, Springer, Berlin, 7. Aufl. (1989)
51. Foulds, L. R.: Optimization Techniques. Springer, Berlin (1981)
52. Blok, K.: Introduction to Energy Analysis. Techné Press, Amsterdam (2006). Dieses Buch vermittelt einen didaktisch gut aufbereiteten Einstieg in die Energieanalyse und verweist auf weiterführende Literatur
53. van Gool, W.: Energie En Exergie. Van Gool ESE Consultancy, Driebergen (1998)
54. Schüssler, U., Kümmel, R.: Schadstoff-Wärmeäquivalente als Umwelbelastungsindikatoren. ENERGIE, **Jahrg. 42**, 40–49 (1990)
55. Kümmel, R., Schuessler, U.: Heat equivalents of noxious substances: a pollution indicator for environmental accounting. Ecol. Econ. **3**, 139–156 (1991)
56. Steinberg, M., Cheng, H. C., Horn, F.: A system study for the removal, recovery and disposal of carbon dioxide from fossil fuel power plants in the US. BNL-35666 Informal Report, Brookhaven National Laboratory, Upton (1984)
57. Fricke, J., Schüssler, U., Kümmel, R.: CO₂-Entsorgung. Phys. Unserer Zeit **20**, 56–81 (1989)
58. Schüssler, U., Kümmel, R.: Carbon dioxide removal from fossil fuel power plants by refrigeration under pressure. In: Jackson, W. D. (Hrsg.), Proc. 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, S. 1789–1794. IEEE, New York (1989)
59. Hendricks, C. A., Blok, K., Turkenburg, W. C.: The Recovery of Carbon Dioxide from Power Plants. In: Okken, P. A., Swart, R. J., Zwerver, S. (Hrsg.) Climate and Energy, S. 125–142. Kluwer, Dordrecht (1989)
60. Schuessler, U.: Deponierung und Aufbereitung von CO₂. Phys. Unserer Zeit **21**, 155–158 (1990)
61. https://de.wikipedia.org/wiki/Kraftwerk_Schwarze_Pumpe. Zugegriffen: 9. August 2017
62. Kolm, H.: Mass Driver Up-Date. L5 News **5**, No. **9**, 10–12 (1980)
63. O'Neill, G. K.: The Colonization of Space. Phys. Today **September 1974**, 32–40 (1974)
64. O'Neill, G. K.: The High Frontier – Human Colonies In Space. William Morrow & Co., New York (1977)
65. O'Neill, G. K.: Unsere Zukunft im Raum. Hallwag, Bern (1978)
66. O'Neill, G. K.: The (Low) Profile Road to Space Manufacturing. Astronautics and Aeronautics **16**, Special Section, 18–32 (1978)
67. Steininger, K. W., Lininger, Ch., Meyer, L. H., Muñoz, P., Schinko, Th.: Multiple carbon accounting to support just and effective climate policies. Nature Climate Change **6**, 35–41 (2016), <https://doi.org/10.1038/nclimate2867>
68. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.: Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 bis 2016 nach Energieträgern. Stand 11.08.2017
69. Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi): Zahlen und Fakten Energiedaten. https://de.wikipedia.org/wiki/Energieverbrauch/cite_note-BMWi_Zahlen-9. Zugegriffen: 12. August 2017
70. Groscurth, H.-M., Kümmel, R.: The cost of energy optimization: A thermoeconomic analysis of national energy systems. Energy **14**, 685–696 (1989). (Diese Arbeit erweitert die Ener-

- gieoptimierungsstudie *Thermodynamic limits to energy optimization* von Groscurth, H.-M., Kümmel, R., van Gool, W.: Energy **14** 241–258 (1989), um die Kostenoptimierung.)
71. Groscurth, H.-M.: Rationelle Energieverwendung durch Wärmerückgewinnung. Physica-Verlag, Heidelberg (1991); hier wird das Modell *ecco* unter den Bezeichnungen *LEO I* und *LEO II* optimierungstechnisch spezifiziert.
 72. Groscurth, H.-M., Kümmel, R.: Thermoconomics and CO₂-Emissions. Energy **15**, 73-80 (1990) und [71], S. 124–130
 73. Kümmel, R., Groscurth, H.-M., Schüßler, U.: Thermo-economic analysis of technical greenhouse warming mitigation. Int. J. Hydrogen Energy **17**, 293–298 (1992)
 74. Bruckner, Th., Groscurth, H.-M., Kümmel, R.: Competition and synergy between energy technologies in municipal energy systems. Energy **22**, 1005–1014 (1997)
 75. Bruckner, Th., Kümmel, R., Groscurth, H.-M.: Optimierung emissionsmindernder Technologien. Energiewirtschaftliche Tagesfragen **47**, 139–146 (1997)
 76. Rissing, W.: Die CO₂/Energiesteuer – Chance oder Risiko für die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft? Energiewirtschaftliche Tagesfragen **43**, 299–306 (1993)
 77. Internationale Energie Agentur (IEA): Weltenergieausblick, Paris (1993)
 78. Faross, P.: Die geplante CO₂/Energiesteuer in der Europäischen Gemeinschaft. Energiewirtschaftliche Tagesfragen **43**, 295–298 (1993)
 79. Welsch, H., Hoster, F.: General-Equilibrium Analysis of European Carbon/Energy Taxation. Zeitschrift für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften **115**, 275–303 (1995)
 80. Lindenberger, D., Bruckner, Th., Groscurth, H.-M., Kümmel, R.: Optimization of solar district heating systems: seasonal storage, heat pumps, and cogeneration. Energy **25**, 591–608 (2000)
 81. Lindenberger, D., Bruckner, Th., Morrison, R., Groscurth, H.-M., Kümmel, R.: Modernization of local energy systems. Energy **29**, 245–256 (2004)
 82. Birnbacher, D.: Intergenerationelle Verantwortung oder: Dürfen wir die Zukunft der Menschheit diskontieren? In: Klawitter, J., Kümmel, R. (Hrsg.) Umweltschutz und Marktwirtschaft, S. 101–115. Königshausen & Neumann, Würzburg (1989)
 83. Daly, H.: When Smart People Make Dumb Mistakes. Ecol. Econ. **34**, 1–3 (2000)
 84. Rürup, B.: DER CHEFÖKONOM, Newsletter des Handelsblatt Research Institute, 23.02.2018
 85. Häring, N.: Mehr Energie! <http://research.handelsblatt.com/assets/uploads/AnalyseOekonomischeModelle.pdf>, Zugegriffen 26.02.2018
 86. https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Crude_oil_prices_since_1861.png; Zugegriffen: 3. Juli 2017
 87. Lindenberger, D., Weiser, F., Winkler, T., Kümmel, R.: Economic Growth in the USA and Germany, 1960-2013: The Underestimated Role of Energy. Biophys. Econ. Resour. Qual. (2017) 2:10; <https://doi.org/10.1007/s41247-017-0027-y>
 88. Kümmel, R., Strassl, W.: Changing energy prices, information technology, and industrial growth. In: van Gool, W., Bruggink, J.J.C. (Hrsg.) Energy and Time in the Economic and Physical Sciences, S. 175–194. North-Holland, Amsterdam (1985)
 89. Kümmel, R., Strassl, W., Gossner, A., Eichhorn, W.: Technical progress and energy dependent production functions. Z. Nationalökonomie – Journal of Economics **45**, 285–311 (1985).
 90. Murray, J., King, D.: Oil's tipping point has passed. Nature **481**, 433–435 (2012)
 91. Witt, U.: Beharrung und Wandel – ist wirtschaftliche Evolution theoriefähig?. Erträgen, Wissen, Ethik **15**, 33–45 (2004)
 92. Kümmel, R.: Wachstumskrise und Zukunftshoffnung. In: Görres Gesellschaft (Hrsg.) CIVITAS, Jahrbuch für Sozialwissenschaften **16**, S. 11–61, Grünewald, Mainz (1979)
 93. Valero, A., Valero, V.: Thantia – The Destiny Of The Earth's Mineral Resources. World Scientific, Singapore (2015).
 94. Bundesministerium für Wirtschaft: Energiedaten '95. Bonn (1996)
 95. Meadows, Denis, Meadows, Donella, Zahn, E., Milling, P.: Die Grenzen des Wachstums, dva, Stuttgart (1972)

96. Kümmel, R.: The Impact of Entropy Production and Emission Mitigation on Economic Growth. *Entropy* **18**, 75 (2016); <https://doi.org/10.3390/e18030075> (open access)
97. Hudson, E. H., Jorgenson, D. W.: U.S. energy policy and economic growth, 1975–2000. *Bell J. Econ. Manag. Sc.* **5**, 461–514 (1974)
98. Berndt, E.R., Jorgenson, D.W.: How energy and its cost enter the productivity equation. *IEEE Spectr.* **15**, 50–52 (1978)
99. Berndt, E.R., Wood, D.O.: Engineering and econometric interpretations of energy – capital complementarity. *Amer. Econ. Rev.* **69**, 342–354 (1979)
100. Jorgenson, D.W.: The role of energy in productivity growth. *Amer. Econ. Rev.* **74/2**, 26–30 (1984)
101. Nordhaus, W.: *A Question Of Balance: Weighting The Options On Global Warming Policies*. Yale University Press, London (2008)
102. Kümmel, R., Ayres, R.U., Lindenberger, D.: Thermodynamic laws, economic methods and the productive power of energy. *J. Non-Equilib. Thermodyn.* **35**, 145–179 (2010); <https://doi.org/10.1515/JNETDY.2010.009>
103. Denison, E.F.: Explanation of declining productivity growth. *Survey of Current Business August 1979, Part II*, 1–24 (1979)
104. Kümmel, R.: The impact of energy on industrial growth. *Energy* **7**, 189–203 (1982)
105. Tryon, F. G.: An index of consumption of fuels and power. *J. Amer. Statistical Assoc.* **22**, 271–282 (1927)
106. Binswanger, H.C., Ledergerber, E.: Bremsung des Energiezuwachses als Mittel der Wachstumskontrolle. In: Wolf, J. (Hrsg.) *Wirtschaftspolitik in der Umweltkrise*. S. 103–125. dva, Stuttgart (1974)
107. Solow, R. M.: Technical Change and the Aggregate Production Function, *The Review of Economics and Statistics* **39**, 312–320 (1957)
108. Solow, R. M.: Perspectives on growth theory. *J. Econ. Perspect.* **8**, 45–54 (1994)
109. Robinson, J.: The production function and the theory of capital. *Rev. Econ. Stud.* **21**, 81–106 (1953–54)
110. Robinson, J.: The measure of capital: the end of the controversy. *Econ. J.* **81**, 597–602 (1971)
111. Pasinetti, L.: Critique of the neoclassical theory of growth and distribution. *Moneta Credito (Banca Nazionale del Lavoro Quarterly Review)* **210**, 187–232 (2000)
112. Hesse, H., Linde, R.: *Gesamtwirtschaftliche Produktionstheorie, Teil I und Teil II*. Physica-Verlag, Würzburg-Wien (1976); insbesondere Teil I, S. 11–42 und Teil II, S. 9–30
113. Arrow, K.J., Chenery, H.B., Minhas, B.S., Solow, R.M.: Capital-Labor Substitution and Economic Efficiency. *Rev. Econ. Stat.* **43**, 225–250 (1961)
114. Uzawa, H.: Production Functions with Constant Elasticity of Substitution. *Rev. Econ. Stud.* **29**, 291–299 (1962)
115. Lindenberger, D.: *Wachstumsdynamik energieabhängiger Volkswirtschaften*. Metropolis, Marburg (2000)
116. Kümmel, R.: Energie und Wirtschaftswachstum. *Konjunkturpolitik* **23**, 152–173 (1977)
117. Tintner, G., Deutsch, E., Rieder, R.: A production function for Austria emphasizing energy. In: Altman, F.L., Kým, O., Wagner, H.-J. (Hrsg.) *On the Measurement of Factor Productivities*, S. 151–164. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen (1974)
118. Kümmel, R., Henn, J., Lindenberger, D.: Capital, labor, energy and creativity: modeling innovation diffusion. *Struct. Change Econ. Dynam.* **13**, 415–433 (2002)
119. Winkler, T.: *Energy and Economic Growth – Econometric Analysis with Comparisons of Different Production Functions by Means of Updated Time Series for Output and Production Factors from 1960–2013*. Master Thesis, Julius-Maximilians-University Würzburg, Faculty of Physics and Astronomy, 2016; als Discussion Paper elektronisch verfügbar.
120. Ayres, R. U., Warr, B.: *The Economic Growth Engine*. Edward Elgar, Cheltenham UK (2009)

121. Stresing, R., Lindenberger, D., Kümmel, R.: Cointegration of output, capital, labor, and energy. *Eur. Phys. J. B* **66**, 279–287 (2008); <https://doi.org/10.1140/epjb/e2008-00412-6>
122. Institut der deutschen Wirtschaft, Köln, für die 1970er- und 1992er-Daten; The CIA World Fact Book für die 2009er-Daten
123. <https://de.wikipedia.org/wiki/Weltenergiebedarf>
124. Kümmel, R., Lindenberger, D.: How energy conversion drives economic growth far from the equilibrium of neoclassical economics. *New Journal of Physics* **16**, 125008 (2014) <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/12/125008> (Open access, Special Issue “Networks, Energy and the Economy”).
125. Samuelson P. A., Solow, R. M.: A complete capital model involving heterogeneous capital goods. *Quart. J. Econ.* **70**, 537–562 (1956)
126. Grahl, J.: private Mitteilung
127. Paech, N.: Regionalwährungen als Bausteine einer Postwachstumsökonomie. *Zeitschrift für Sozialökonomie* **45/158–159**, 10–19 (2008)
128. Erhard, L.: Wohlstand für alle. Econ, Düsseldorf (1957)
129. Jaeger, W.: Paideia. Die Formen des griechischen Menschen. Walter de Gruyter, Berlin (1933)
130. Haesler, A. J.: Die Doppeldeutigkeit des Fortschritts in der „Philosophie des Geldes“. In: Binswanger, H. C., Flotow, P. von (Hrsg.) *Geld und Wachstum. Zur Philosophie und Praxis des Geldes*, S. 61–78, Weitbrecht, Stuttgart/Wien (1994)
131. Simmel, G.: *Philosophie des Geldes*. Duncker & Humblot, Leipzig (1900)
132. Schulze, G.: *Die Beste aller Welten*. Hanser, München/Wien (2003)
133. Gross, P.: *Die Multioptionsgesellschaft*. Suhrkamp, Frankfurt a. M. (1993)
134. Schmidt-Bleek, F.: *Das MIPS-Konzept. Weniger Naturverbrauch – mehr Lebensqualität durch Faktor 10*, Knaur, München (2000)
135. Weizsäcker, E. U. von, Hargroves, K., Smith, M.: *Faktor Fünf: Die Formel für nachhaltiges Wachstum*. Droemer, München (2010)
136. Huber, J.: *Nachhaltige Entwicklung*. Edition Sigma, Berlin (1995)
137. Braungart, M., McDonough, W.: *Einfach intelligent produzieren*. Berliner Taschenbuch Verlag, Berlin (2003)
138. Scheer, H.: *Solare Weltwirtschaft. Strategie für die ökologische Moderne*. Antje Kunstmann Verlag, München (1999)
139. Paech, N.: *Nachhaltiges Wirtschaften jenseits von Innovationsorientierung und Wachstum*. Metropolis, Marburg (2005)
140. Neiryneck, J.: *Der göttliche Ingenieur. Die Evolution der Technik*. Expert-Verlag, Renningen (2001)
141. Schumacher, E.F.: *Small Is Beautiful*. Abacus, London (1973)
142. Paech, N.: Postwachstumsökonomik – Wachstumskritische Alternativen zum Marxismus. Aus *Politik und Zeitgeschichte (APuZ)* **19–20**, 41–46 (2017)
143. Pigou, A. C.: *The Economics Of Welfare*. Macmillan and Co, London (1920)
144. Kapp, K. W.: *The Social Costs Of Private Enterprise*. Schocken Books, New York (1950)
145. Binswanger, H.C.: *Die Wachstumsspirale*. Metropolis, Marburg (2006)
146. Paech, N.: Grünes Wachstum? Vom Fehlschlagen jeglicher Entkopplungsbemühungen: Ein Trauerspiel in mehreren Akten. In: Sauer, T. (Hrsg.): *Ökonomie der Nachhaltigkeit – Grundlagen, Indikatoren, Strategien*. Metropolis-Verlag, Marburg, 161–181 (2012)
147. Paech, N.: *Mythos Energiewende: Der geplatze Traum vom grünen Wachstum*. In: Etscheid, G. (Hrsg.) *Geopferte Landschaften. Wie die Energiewende unsere Umwelt zerstört*, S. 205–228. Heyne, München (2016)
148. Santarius, T.: *Der Rebound-Effekt. Ökonomische, psychische und soziale Herausforderungen der Entkopplung von Energieverbrauch und Wirtschaftswachstum*. Metropolis, Marburg (2015)

149. Jevons, W. S.: *The Coal Question. An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal Mines.* Macmillan & Co, London & Cambridge (1865)
150. http://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu.de/templates/dateien/veroeffentlichungen/sondergutachten/sn2009/wbgu_sn2009.pdf.
151. <http://uba.co2-rechner.de>
152. Paech, N.: Nach dem Wachstumsrausch: Eine zeitökonomische Theorie der Suffizienz. *Zeitschrift für Sozialökonomie (ZfSÖ)* **47/166–167**, S. 33–40 (2010)
153. Ehrenberg, A.: *Das erschöpfte Selbst.* Campus, Frankfurt a. M. (2004)
154. Toffler, A.: *The Third Wave.* Bantam Books, New York (1980)
155. Ostrom, E.: *Die Verfassung der Allmende. Jenseits von Staat und Markt.* Mohr, Tübingen (1999)
156. Friebe, H., Rameg, T.: *Marke Eigenbau. Der Aufstand der Massen gegen die Massenproduktion.* Campus, Frankfurt a. M. (2008)
157. http://download.regionalwert-hamburg.de/downloads/Pressemappe_Regionalwert_AG_Hamburg_2016-12-09.zip
158. Kohr, L.: *Appropriate Technology. Resurgence* **8/6**, 10–13 (1978)
159. Illich, I.: *Tools for Conviviality.* Harper & Row, Cornell (1973)
160. Mumford, L.: *The Myth of the Machine.* Secker & Warburg, London (1967)
161. Daly, H.: *Steady-State Economics.* Island Press, Washington (1977)
162. Reif, F.: *Fundamentals Of Statistical And Thermal Physics.* McGraw-Hill, New York (1965)
163. Bedford-Stroh, H.: Vortrag am 13. Juni 2012 auf dem 1. Ökumenischen Kirchentag in Höchberg
164. Altmaier P.: Vortrag auf einer Enegiewendekonferenz der Thüringer Wirtschaft in Erfurt, zitiert von der Main-Post Würzburg am 6. November 2012
165. Kümmel, R.: *Energiewende, Klimaschutz, Schuldenbremse – Vorbild Deutschland?* In: Ostheimer, J., Vogt, M. (Hrsg.) *Die Moral der Energiewende*, S. 109–133. Kohlhammer, Stuttgart (2014).
166. Merkel, A.: *Energie und Rohstoffe für morgen – sicher, bezahlbar, effizient.* *Wirtschaft in Mainfranken* **02/2012**, S. 10–11 (2012)
167. NISA and JNES, 2011: *The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Pacific Earthquake and the seismic damage to the NPPs.* Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA), Japan Nuclear Energy Safety Organization (JNES), April 4, 2011, Japan; www.webcitation.org/5xuhLD1j7
168. Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS): *Fukushima Daiichi 11. März 2011 – Unfallablauf, Radiologische Folgen*, 2. Aufl. GRS, Köln (2013)
169. Heinloth, K.: *Die Energiefrage – Bedarf und Potentiale, Nutzen, Risiken und Kosten.* Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden (1997)
170. Krause, F., Bossel, H., Müller-Reißmann, K.-F.: *Energiewende – Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran.* S. Fischer, Frankfurt/M (1980)
171. *Die Energiewende: unsere Erfolgsgeschichte.* Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Referat Öffentlichkeitsarbeit (Hrsg.), Berlin (Januar 2017)
172. *Energiedepesche* 2, 26. Jahrg., Juni 2012, S. 18, und <https://tinyurl.com/leitstudie2011>.
173. Murphy, D., Hall, C.: *Year in review – EROI or energy return on (energy) invested.* *Ann. N.Y. Acad. Sci.* **1185**, 102–118 (2010)
174. *Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina: Bioenergie – Möglichkeiten und Grenzen; Kurzfassung und Empfehlungen.* Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, Halle/Saale, S. 11f, S. 8 (2010)
175. *Umweltbundesamt: Nationale Treibhausgas-Inventare 1990 bis 2015 (Stand 02/2017) und Schätzung für 2016 (Stand 03/2017)*
176. Icha, P.: *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990–2016.* *Climate Change* **15**, S. 10. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau (2017)

177. Wirth, H.: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland (Fassung vom 19.05.2015). Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg (2015). Dem noch unveröffentlichten englischsprachigen Manuskript dieser Studie wurde die Abbildung 5.1 entnommen.
178. Wirth, H.: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland (Fassung vom 21.10.2017). Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg (2017). Aktuelle Fassung abrufbar unter www.pv-fakten.de. Zugegriffen: 24.10.2017
179. Deutsche Physikalische Gesellschaft: Netzausbau im Rahmen der Energiewende. PHYSIKKonkret **18**, 1, Oktober 2013
180. IWR Pressedienst.de, Pressemitteilungen der Energiewirtschaft, Berlin. Zugegriffen: 17.10.2017
181. https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_größten_Kohlenstoffdioxidemittenten. Zugegriffen: 18.10.2017
182. https://de.nucleopedia.org/wiki/Liste_der_geplanten_Kernkraftwerke (Zugegriffen: 24.10.2017)
183. Lindenberger, D.: Volkswirtschaftliche Einordnung des Beitrags der Kohle zur Energietransformation. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* **67**, 19–22 (2017)
184. Energieagentur NRW, 2017
185. Korrespondenz Wasserwirtschaft **9**, Nr. 5, S. 269 (2016)
186. Kunkel, A., Schwab, H., Bruckner, Th., Kümmel, R.: Kraft-Wärme-Kopplung und innovative Energiespeicherkonzepte. *BWK* **48**, 54–60 (1996)
187. www.dbi-gti/power-to-gas-methanisierung.html Zugegriffen: 27.10.2017
188. Li, Sh., Gong, J.: Strategies for improving the performance and stability of Ni-based catalysts for reforming reactions. *Chem. Soc. Rev.* **43**, 7245 (2014)
189. Wang, P., Chang, A. Y., Novosad, V., Chupin, V. V., Schaller, R. D., Rozhkova, E. A.: Cell-Free syntheticbiology chassis for nanocatalytic photon-to-hydrogen conversion. *ACS Nano* **11**, 6739–6745 (2017). <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b01142>
190. *Der Spiegel*, 36/2017/S. 81
191. www.br.de/themen/wissen
192. Bundesamt für Migration und Flüchtlinge: Aktuelle Zahlen zu Asyl. Ausgabe September 2017. Siehe auch: Das Bundesamt in Zahlen 2017. (Zugegriffen in der Korrektur: 24.09.2018) Nürnberg. www.bamf.de
193. Bundesamt für Migration und Flüchtlinge: Schlüsselzahlen Asyl 2016. Siehe auch: Das Bundesamt in Zahlen 2017. (Zugegriffen in der Korrektur: 24.09.2018) Nürnberg. www.bamf.de
194. Deutsche Bundesbank: Vermögen und Finanzen privater Haushalte in Deutschland: Ergebnisse der Vermögensbefragung 2014. Monatsbericht, März 2016, S. 67
195. *Der Spiegel* 25/2017, S. 95
196. *Main-Post Würzburg*, 26. Juni 2017, S. 5
197. *Der Tagesspiegel*, 14.01.2018, Politik.
198. *Main-Post Würzburg*, 15. Dezember 2015, S. 8
199. *Main-Post Würzburg*, 24. Dezember 2015, „Zitat des Tages“
200. Diamond, J.: *Guns, Germs, and Steel*. W. W. Norton, New York (1999)
201. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*: Kosten der Migration, aktualisiert am 19.05.2018, <https://www.faz.net/aktuell/politik/78-milliarden-euro-fuer-fluechtlingspolitik-bis2022-15598121.html>. Zugegriffen (in der Korrektur): 22.05.2018
202. <http://www.auswaertiges-amt.de/de/aussenpolitik/laender/kolumbien-node>
203. *Mapa Ecologica de Colombia*, Editorial Educativo KINGKOLOR Ltda, 2002
204. *Der Marschall und die Gnade – Roman des Simón Bolívar*, Verlag Kurt Desch, München (1954). Das Zitat ist dem Klappentext dieses Buchs entnommen.
205. Nach dem Klappentext zu *Der General in seinem Labyrinth*, Kiepenheuer und Witsch, Köln (1989)

206. <http://conflictoarmadointerno2009-1.blogspot.de/2009/05/cronologia-de-las-guerras-en-colombia.html>, und die dort angegebenen Quellen.
207. <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/126016/Colombia/25342/La-Violencia-dictatorship-and-democratic-restoration>
208. Caballero, A.: Los Irresponsables. El Tiempo (Bogotá), Lecturas Dominicales, Pagina 4, Octubre 29 (1972).
209. Echavarría, H.: Miseria y Progreso, Capítulo III: La Revolución Industrial en Colombia, p. 33-40. 3R Editores Ltda, Santafé de Bogotá (1997); s. auch <http://www.icpcolombia.org/archivos/biblioteca/49--2-Capitulo3>
210. Paech, N.: Befreiung vom Überfluss. Oekom, München (2013)
211. Dreier, W., Kümmel, R.: Zukunft durch kontrolliertes Wachstum. Regensberg, Münster (1977), 2. Aufl. 1978.
212. Pfister, Ch. (Hrsg.): Das 1950er Syndrom – Der Weg in die Konsumgesellschaft (Klappentext). Publikation der Akademischen Kommission der Universität Bern. Haupt, Bern (1995)
213. Murphy, D. J., Hall, C.A.S.: Adjusting the economy to the new energy realities of the second half of the age of oil. Ecol. Model. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.06.022> (2011)
214. Trainer, T.: The oil situation: some alarming aspects. thesimplerway.info/OilSituation.htm (Zugegriffen: 24.11.2017)
215. Bundesministerium der Finanzen: perSaldo, Ausgabe 4/1997, S. 6
216. zitiert nach [217]
217. Baron, R.: Competitive issues related to carbon/energy taxation. Annex I Expert Group on the UN FCCC, Working Paper 14. ECON–Energy, Paris (1997). Dieses Dokument erhielt R. K. als einer der beiden Vertreter des Heiligen Stuhls bei den Sitzungen der Subsidiary Bodies of the United Nations Framework Convention on Climate Change vom 20.–31. Oktober 1997 in Bonn.
218. Hannon, B., Herendeen, R.A., Penner, P.: An energy conservation tax: impacts and policy implications. Energy Syst. Policy **5**, 141–166 (1981)
219. Armington, K.: Energiepolitik in Europa: Hindernisse umweltpolitischer Reformen. In: [212], S. 377–389
220. Glaser, P.E.: Method and Apparatus for converting solar radiation to electrical power. United States Patent 3, 781, 647, December 23, 1973
221. Glaser, P.E.: Solar power from satellites. Physics Today **February 1977**, 30–38 (1977)
222. Hampf, D., Humbert, L., Dekorsky, Th., Riede, W.: Kosmische Müllhalde. Physik Journal **17**, 31–36 (2018)
223. Gerst, A.: Gebt eurem Traum eine Chance! Physik Journal **16**, 28–31 (2017)
224. National Space Security Office: Space-Based Solar Power as an Opportunity for Strategic Security. Phase 0 Architecture Feasibility Study, 10 October 2007; www.nss.org/settlements/ssp/library/nssso.htm. Zugegriffen: 15.11.2017
225. www.welt.de/article347436/Atlantis-Flug-beendet-gigantisch-teure-Raumfahrt.html, Zugegriffen: 14.11.2017.
226. Woodcock, G.: Solar power satellite study. L5 News, November 1978, S. 11
227. von Hoerner, S.: Population explosion and interstellar expansion. In: Scheibe, E., Süßmann, G. (Hrsg.) Einheit und Vielheit, Festschrift für Carl Friedrich v. Weizsäcker zum 60. Geburtstag, S. 221–247. Van den Houck & Ruprecht, Göttingen (1973)
228. Boulding, K.: The economics of the coming spaceship Earth. In: Jarret, H. (Hrsg.) Environmental Quality In A Growing Economy, S. 3–14. Resources for the Future, Baltimore MD (1966)
229. Heilbroner, R.: An Inquiry Into The Human Prospect. W. W. Norton, New York (1974)
230. Kammer, H.-W., Schwabe, K.: Thermodynamik irreversibler Prozesse. Physik-Verlag, Weinheim, (1986); S. 60.

-
231. Kluge, G., Neugebauer, G.: Grundlagen der Thermodynamik. Spektrum Fachverlag, Heidelberg (1993)
 232. Georgescu-Roegen, N.: The Entropy Law And The Economic Process. Harvard University Press, Cambridge Mass. (1971)
 233. Letters to the Editor. Recycling of Matter. *Ecol. Econ.* **9**, 191–196 (1994)
 234. Karlsson, S: The exergy of incoherent electromagnetic radiation. *Phys. Scr.* **26**, 329 (1982)
 235. van Gool, W.: The value of energy carriers. *Energy* **12**, 509 (1987)

Sachverzeichnis

A

ADP, 28
Aggregation
 der Wertschöpfung in physischen Einheiten, 207
 des Kapitals in physischen Einheiten, 209
 von Arbeit und Energie, 211
Agrargesellschaft, 31, 32
Albedo, 41, 199
Anergie, 17, 29
Annuität, 52
Äquivalenzfaktor, 209, 211
Arbeit, 33
 bei Veratmung, 28
Arbeitsleistung, 68, 75
Arbeitslosenquote, 185
Arbeitsteilung, 33
Arbeitswertlehre, 33
Atmung, 28
ATON, 210
ATP, 28
Auslastung, 92, 99
Automation, 25, 74, 93, 98
 maximale, 86

B

Bardeen, John, 34
Beschäftigung nach ökonomischen Sektoren, 91
Beschränkung, 1, 4
 der Produktionselastizitäten, 78
 Kapitalverkehr, 165

 technologische, 61, 93, 94, 97
 thermodynamische, 3
 weiche, 99
Bevölkerungsdichte, 12
Biomasse, 7, 147
Biosphäre, 6
BIP s. Bruttoinlandsprodukt
Bit, 19
Blackout, 151
Blaskoeffizient, 143
BLIKK-Medien-Studie, 20
Boden, 33
Bolivar, Simón, 171
Boltzmann-Konstante, 3
Brattain, Walter, 34
Bruttoinlandsprodukt (BIP), 17, 37, 60, 64, 67
 deutsches, 37
 pro Kopf
 Kolumbien, 169
 Rangliste, 160
Bruttoproduktionswert, 69
Bruttostromerzeugung, 48
Bruttostromverbrauch, 147
Bürgerkriege, 21, 166
 Kolumbiens, 171

C

Carnot Maschine, 205
Club of Rome, 138

- CO₂, 7
 Emissionen
 der Stromerzeugung, 149
 deutsche, 148
 Konsumprinzip, 48
 Länderanteile, 152
 Lebenszyklus, 8
 Produktionsprinzip, 48
 Konzentration, 13
 Rückhaltung und Entsorgung, 44
 CO₂-Emissionen, individuelles Budget, 117
 CO₂-Energie-Steuer, 51
- D**
 Dampfmaschine, 33
 Dampfturbine, 33
 Deponie, 42
 DESERTEC, 40
 Diamant-Wasser-Paradoxon, 60, 92
 Dienstleistungen, 90, 91
 Dieselmotor, 34, 43
 Diffusionsstromdichte, 198
 Digitalisierung, 25, 70
 Dinosaurier, 145
 Diskontsatz, 58
 Dualität, 96
 Duarte, Isaías C., 178
 Dynamit, 34
- E**
 Effekte, externe, 110
 Einstrahlung, solare pro m², 53
 ELN, 176
 Emissionen, 6, 7, 198
 Fukushima, 141
 Grenzwerte, 9
 Kohlendioxid, 11
 global 1990-2010, 13
 Quellen, 7
 Schadenspotenziale, 8
 Emissionsminderung, 40
 Endlagerung (Volumenbedarf), 45
 Energie, 3, 28
 Analyse, 42
 aus Sonne und Wind, 146
 einer Blitzentladung, 47
 Einheiten (Umrechnung), 203
 Flüsse, 6
 Konsum der Welt, 15
 Krise, 64
 Mengen, 36, 204
 Preis, 185
 Qualität, 205
 Sklaven, 34, 187
 Kosten, 35
 Zahl, 35
 Verbrauch (pro Kopf und Tag), 30
 Energie-Kohlenstoff-Steuer, 187
 Energiesteuer, 53, 55, 187
 Energieverwendung, rationelle, 48
 Szenarien, 54
 ENIN, 208
 Enthalpie, 204
 Entropie, 1, 3, 138
 aus Zustandssumme, 201
 Bilanz, 6
 Einheit, 19
 Entsorgung, 29
 Produktion, 4–6, 38, 108, 146
 Produktionsdichte, 197
 und Information, 19, 202
 Entschwefelung, 44
 Entsorgung radioaktiver Abfälle, 47
 Entstickung, 44
 Enzyklika Laudato Sí, 9, 18
 Erde, 5, 190
 Oberflächentemperatur, 199
 Erneuerbare-Energien-Gesetz, 150
 EROI, 147, 186
 Euler-Relation, 78
 Evolution, 5, 6
 Exergie, 17, 29, 34
 Analyse, 41
 der Sonnenstrahlung, 206
 Formen, 205
 Exnovation, 129
- F**
 Faktorkosten, 71
 in der BRD, 72
 FARC, 176
 Feudalismus, 177
 Feuer, 27
 Fortschritt, technischer, 58, 71, 73, 81
 Fotosynthese, 19, 28
 Fotovoltaik (Einspeisevergütung), 150
 Fukushima, 140
- G**
 G7-Länder, 85
 Gasturbine, 34
 GAU, 144

Geld, 105
 Gesamtnutzen, 60
 Gesellschaft, stationäre, 194
 Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs, 83
 Gewinnmaximierung, 94, 97
 Gleichgewicht, 94
 ökonomisches, 95
 thermodynamisches, 3, 4
 lokales, 5
 Glukose, 28
 Goldene Regel, 194
 Goldenes Zeitalter, 59
 Golfstrom, 14
 Gorbatschow, Michail, 38, 66
 Grenzen des Wachstums, 138
 Grenznutzen, 60
 Grenzwert, 44

H

Harrisburg, 143
 Hauptsatz der Thermodynamik
 Erster, 4, 17, 38
 Zweiter, 4, 6, 38
 technische Formulierung, 16
 Heizkraftwerk, 54
 Heizwert, 36, 205
 Hitzemauer, 15, 191, 193
 House Concurrent Resolution, 191

I

Immobilienblase, 23
 Industrie, 90, 91
 Industriegesellschaft, 23, 32
 Industrielle Revolution, 11
 Information, 69
 Einheit, 19
 Speicher, 70
 Transport, 69
 Überflutung, 20
 Verarbeitung, 68, 75
 Ware, 74
 Informationsgehalt einer Zufallsvariable, 202
 Integritätsbedingungen, 77, 78
 Internet, 19, 213
 Investition, 74
 IOM, 162

J

Jorgenson, Dale W., 71, 72

Joule (Einheit), 203
 Joule, John Prescott, 27

K

Kapazitätswall, 97
 Kapital, 33
 Auslastungsgrad, 74
 Finanzkapital, 23
 Geldkapital, 25
 Kapitalfluchtbremse, 22, 165
 Kapitalkoeffizient, 83
 Kapitalstock, 68
 Produktionsfaktor, 25
 Produktivkapital, 32
 Realkapital, 23
 Kapitalismus, 24, 37
 Katalysator, 155
 Kaufkraft der Lohnminute, 37
 Kausalität, bidirektionale, 66
 Kernenergie
 Ausbaupläne, 153
 Risiken, 140
 Kernfusion, 40
 Kernreaktor
 graphitmoderierter, 143
 wassermoderierter, 143
 Keynes, John M., 57
 KISS, 85
 Klima, 10
 Schutzpolitik, 145
 Verhandlungen, 21
 Klimakonferenz
 2015, 14
 2017, 153
 Kohleausstieg, 153
 Kohlendioxid, 28
 Konfuzius, 18
 Kosten
 Gefälle, 98
 Kostengebirge, 97
 Minimum, 97
 Senkung, 98
 Kostenanteil
 der Faktoren, 71
 Theorem, 71, 96
 Kraft-Wärme-Kopplung, 52
 Kreativität, 69, 74, 78

L

Lagrange-Multiplikator, 95
 Lagrange-Punkt L5, 190

- Landwirtschaft, 89, 91
 Lebenszyklus-Emissionen, 141, 146
 Legendre-Transformation, 96
 Leibniz, Gottfried, W., 61
 Leistung
 Dampfturbine, 34
 Mensch, 31
 Pferd, 31
 LinEx-Funktionen, 85, 212, 213
- M**
 Markt, 69
 Mechanismus, 74
 Marx, Karl, 37
 Marxismus, 32
 Materialien, 69
 Materialschleuder, 45, 190
 Maxwell-Relationen, 74, 77
 Mayer, Robert, 27
 Mehrwert, 37
 Merkantilismus, 32
 Methan, 7
 Methanisierung, 155
 Migrationsdruck, 155
 Moore's Law, 98
 Morgenthau-Plan, 212
- N**
 Nationalökonomie, klassische, 58
 Neoklassik, 58, 60
 Newton, Isaac, 61
 NIMBY, 146
 Nullsummenlogik, 102
 Nullsummenspiel, 104
- O**
 O'Neill, Gerard K., 190
 Ockam's Razor, 85
 Ökonomie, statische, 111
 Ölpreis, 62
 Ölpreisschock
 erster, 62
 negativer, 65
 zweiter, 64
 Ölsände, 153
 OPEC, 64
 Optimierung, 48
 CO₂-Optimierung, 49
 Energieoptimierung, 49
 Gewinnoptimierung, 61
 Kostenoptimierung, 49
 Nutzenoptimierung, 61
 Ottomotor, 34, 43
 Output, 63, 67
- P**
 Perpetuum mobile, 16
 Pfadintegral, 77, 80
 Phleggräische Felder, 193
 Photonen, 28
 Plünderung, 103
 Potenzial, chemisches, 198
 Preis, 59
 Kohle, Erdöl, Gas, 64
 Primärenergieverbrauch
 deutscher, 49
 weltweiter, 39
 Produktionselastizität, 71, 76–78, 98
 faktorabhängige einfachste, 86
 Mittelwerte, 88
 Produktionsfaktoren, 68
 Arbeit, 69
 empirische, 67
 Energie, 69
 Evolutionssprinzip, 70
 Kapital, 69
 klassische, 57
 Produktionsfunktion, 67, 71, 73
 allgemeine Form, 74, 78
 linear-homogene, 79, 80
 CES, energieabhängige, 81
 Cobb-Douglas, energieabhängige, 72, 81,
 85
 LinEx, 87, 98
 neoklassische, 80
 Produktionsmächtigkeit, 76, 77
 Produktionstiefe, 83
 erweiterte, 84
 Prometheus, 27
 Prosument, 121, 125, 180
 Prosumentenmanagement, 133
 Prozess, irreversibler, 5
 Pumpspeicherkraftwerke, 154
- R**
 Randbedingungen, 74
 asymptotische, 85, 86
 Rationalisierung, 70
 Raumstation, 191
 Rebound-Effekt, 113
 Regionalökonomie, 118
 Regionalversorgung Hamburg, 123

- Renovation, 129
Restrisiko, 142
Revolution
 Industrielle, 25, 85, 183
 Marginal-Revolution, 60
 neolithische, 29
Risiken
 eines GAU, 144
 fossiler Energieträger, 144
- S**
Samuelson, Paul A., 24, 32, 57
Satelliten-Sonnenkraftwerke
 Kosten, 192
 Leistung, 192
 Masse, 190
Schadstoff
 Rückhaltung, 41
 Wärmeäquivalent, 42
 von CO₂, 44
 von Kernbrennstäben, 46
 von NO_x, 44
 von SO₂, 44
Schattenpreise, 95
Schlupfvariable, 94
Schwarzgeld, 21
Shannon-Entropie, 202
Shockley, William, 34
SI Energieeinheiten, 203
Skalenerträge, konstante, 78
Sklaverei, 32
Smith, Adam, 24
Solarenergie, 40
Solarkonstante, 199
Solow, Robert M., 72
Solow-Residuum, 73, 81
Sonne, 6, 40
Sowjetunion, 65
SSE-Minimierung, 87
Staatsverschuldung
 Deutschland, 146
 USA, 186
Stefan-Boltzmann Gesetz, 199
Stoffströme, 38
Strahlungsgleichgewicht, 198
Strahlungsleistung, solare, 199
Strombinnenmarkt, 153
Stromerzeugung nach Energieträgern, 48
Strompreis, 151
 negativer, 151
Stromspeicher, 154
- Subsistenz, 118
 urbane, 123
Substitutionselastizität, 81, 82
Subvention, 53
Suffizienzprinzip, 117
System
 thermodynamisches offenes, 5, 16
 Wirtschaftssystem, 76
- T**
Technologieparameter, 78, 86
 Zeitabhängigkeit, 88
Teilchenstromdichte, 198
Temperaturkoeffizient, 143
Transistor, 18, 25, 34, 74, 98, 137
 sozialer Effekt, 156
Treibhaus, 200
Treibhauseffekt
 anthropogener, 9, 58, 200
 natürlicher, 198
Treibhausgas, 7, 10, 200
 Konzentration, 13
Tschernobyl, 144
Tsunami, 142
- U**
Umweltverschmutzung, 7, 18
Universidad del Valle, 138
Unordnung, 2
Unsichtbare Hand, 24
Unternehmer, 74
 repräsentativer, 73, 96, 98
- V**
Vermögensverteilung in Deutschland, 160
Vielteilchen
 System, 2
 mittlere Energie, 201
 Zustand, 3, 201
- W**
Wärme, 3, 29, 36
 Abstrahlung, 6, 200
 Kraftmaschinen, 25, 33
 Pumpen, 50
 Rückgewinnung, 50
 Speicher, 54
 saisonaler, 55
 Ströme, 38
 Stromdichte, 198
 Tauscher, 50

- Tod, 4
 - Wärmeemissionen, 15
 - Wachstum, 73, 88, 145
 - der Wertschöpfung, 87
 - Wachstumsgrenzen, 193
 - Wachstumsleichung, 76
 - Wachstumsraten, 76
 - Watt (Einheit), 204
 - Watt, James, 12, 24, 33
 - Weltbevölkerung, 156
 - Weltenergieverbrauch, 39
 - Weltraumindustrialisierung, 45, 190, 193
 - Wert, 59
 - Wertentscheidungen, 74
 - Wertparadoxon, 60
 - Wertschöpfung, 17, 25, 33, 37, 67, 74
 - Landwirtschaft, 60
 - nach Wirtschaftssektoren in G7-Ländern, 90
 - Wirkungsgrad
 - Carnot, 205
 - Mensch, 31
 - Pferd, 31
 - Wirtschaft
 - früh industrialisierte, 212
 - hoch industrialisierte, 85
 - Marktwirtschaft, 32
 - Planwirtschaft, 33
 - total digitale, 213
 - Unterbau, 69
 - Wirtschaftswachstum, 81
 - World Wealth Report, 22
- Z**
- Zeitalter, energetisches, 29
 - Zeitpräferenz, 58
 - Zentralbankgeld, 23
 - Ziele der Energiewende, 146
 - Zugkraft eines Pferdes, 31
 - Zukunftsdiskontierung, 58
 - Zustandsfunktion, 73
 - ökonomische, 74, 77
 - thermodynamische, 3, 204
 - Zustandssumme, 201



Willkommen zu den Springer Alerts

Jetzt
anmelden!

- Unser Neuerscheinungs-Service für Sie:
aktuell *** kostenlos *** passgenau *** flexibel

Springer veröffentlicht mehr als 5.500 wissenschaftliche Bücher jährlich in gedruckter Form. Mehr als 2.200 englischsprachige Zeitschriften und mehr als 120.000 eBooks und Referenzwerke sind auf unserer Online Plattform SpringerLink verfügbar. Seit seiner Gründung 1842 arbeitet Springer weltweit mit den hervorragendsten und anerkanntesten Wissenschaftlern zusammen, eine Partnerschaft, die auf Offenheit und gegenseitigem Vertrauen beruht.

Die SpringerAlerts sind der beste Weg, um über Neuentwicklungen im eigenen Fachgebiet auf dem Laufenden zu sein. Sie sind der/die Erste, der/die über neu erschienene Bücher informiert ist oder das Inhaltsverzeichnis des neuesten Zeitschriftenheftes erhält. Unser Service ist kostenlos, schnell und vor allem flexibel. Passen Sie die SpringerAlerts genau an Ihre Interessen und Ihren Bedarf an, um nur diejenigen Information zu erhalten, die Sie wirklich benötigen.

Mehr Infos unter: springer.com/alert