

Technische Energetik

Ostwaldsymposium

Berlin, 26./27. November 2004

Gliederung

- Faszination Energie
- Naturwissenschaftliche Grundlagen der Ostwaldschen Energetik
- Entwicklung der Exergie und der Wärmewirtschaft
- Die Umgebung
- Verallgemeinerungen

Faszination Energie - Bilder



Fratzscher

Faszination Energie – Musik, Literatur

Musik

Hector Berlioz: Gesang der Eisenbahnen

1846 Eröffnung der Strecke Lille – Paris

Arthur Honegger: Mouvement symphonique

1923 Pacific 231

Science Fiction Literatur

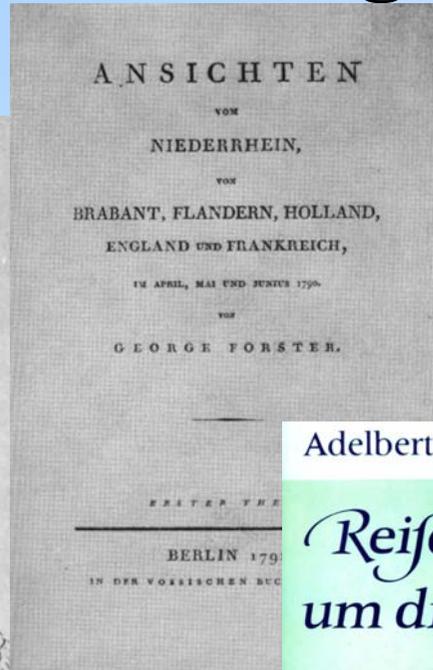
Stanislaus Lem: Sterntagebücher 1978

Ausnutzung kindlicher Energie

Gerhard Branstner: Vom Himmel hoch 1982

Entlaufenes perpetuum mobile

Faszination Energie - Geschichte



Faszination Energie - Philosophie

Karl Marx

Das Kapital

Friedrich Engels

Dialektik der Natur

Henry Adams

Soziale Energie

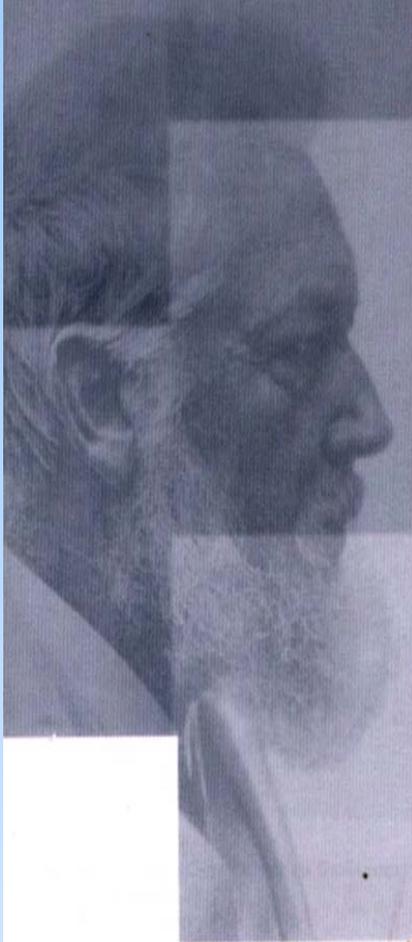
Wilhelm Ostwald

Die Energie und ihre Wandlungen

Antrittsvorlesung, Leipzig 1887

Ostwald

1853 - 1932



Wilhelm Ostwald

– Grundlagen der Energetik

Energetischer Imperativ

Vergeude keine Energie, verwerte sie!

Perpetuum mobile II. Art

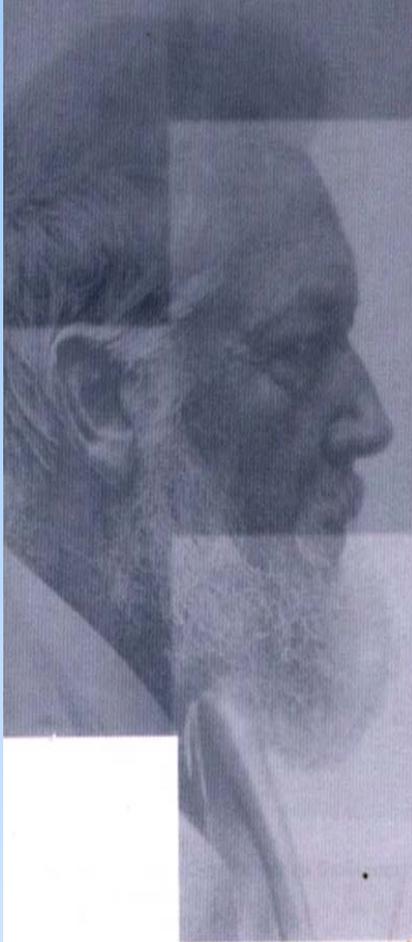
nutzbare Energie

Umgebung

Entwicklung kann erreicht werden in stationär durchströmten **offenen Systemen** durch Zufuhr von **nutzbarer Energie**.

Ostwald

1853 - 1932



Wilhelm Ostwald

Aufgabenstellung

nicht unmittelbar ersichtlich sei. Er hat durchaus recht, soweit es die bisher in den Vordergrund getretene Seite der Energetik anlangt. Diese ist so jung als bewußte Weltanschauung, und wie ich bekennen muß, noch so arm an aktiven Mitarbeitern (wenn auch nicht mehr arm an aufrichtigen Anhängern), daß sie noch nicht einmal imstande gewesen ist, die Ernte unter Dach zu bringen, welche auf dem Gebiete der physischen Wissenschaften für die Einsammlung reif ist; so ist zunächst kaum daran zu denken gewesen, auf die Urbarmachung

Ostwald, Die Forderung des Tages.

4

Aurel Stodola

Die Dampfturbinen

mit einem Anhang über die Aussichten
der Wärmekraftmaschinen und über die
Gasturbine.

Von

Dr. A. Stodola,

Professor am Eidgenössischen Polytechnikum in Zürich.

Dritte, bedeutend erweiterte Auflage.

Mit 434 Figuren und 3 lithographierten Tafeln.



Berlin.

Verlag von Julius Springer.

1905.

110. Das Perpetuum mobile zweiter Art und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik.

So oft Wärme als solche verschwindet, muß im Sinne des Energieprinzipes eine ihr äquivalente Energiemenge anderer Form, z. B. mechanische Arbeit, auftreten. Allein diese Umwandlung ist nicht unbeschränkt und nicht nach Willkür durchzuführen. Sie ist vielmehr in erster Linie an das Vorhandensein eines Temperaturgefälles und Wärmeabgabe an das tiefere Temperaturniveau gebunden. Der Wärmeinhalt des Meeres, der Atmosphäre, des ganzen Erdballs stellt einen ungeheuren Vorrat an Energie dar, und zahlreiche Erfinder haben sich mit dem Problem beschäftigt, diese Wärme, die dem Menschen kostenlos zur Verfügung steht, ohne Zuhilfenahme eines tieferen Temperaturniveaus, dessen Beschaffung eben praktisch unmöglich ist, in Arbeit umzuwandeln. Eine Maschine, die die Umwandlung der Wärme in Arbeit unter Abkühlung eines gegebenen Wärmebehälters ohne jede anderweitige Änderung der Umgebung zu vollbringen vermöchte, wird nach Ostwald Perpetuum mobile zweiter Art genannt.

Wenn auch die bezeichneten Wärmevorräte streng genommen nicht unendlich groß sind, so wird doch durch die stets auftretende Reibung und sonstige Verlustquellen immer wieder mechanische Arbeit in Wärme zurückverwandelt und die von Ostwald gewählte Bezeichnung erscheint berechtigt.

424

Anhang. Die Aussichten der Wärmekraftmaschinen.

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik sagt nun aus, daß auch das Perpetuum mobile zweiter Art und zwar selbst bei Verwendung idealer, d. h. reibungsfreier, wärmeundurchlässiger Maschinen,¹⁾ unmöglich ist.

Die Begründung des Satzes ist nur eine mittelbare, d. h. die aus demselben gezogenen Folgerungen sind bis jetzt durch die Wirklichkeit



Gouy-Stodola-Gleichung

d. h. die in allen Teilen umkehrbare Zustandsänderung, erhalten wir das Maximum der Arbeit unter den gegebenen Verhältnissen. Bezeichnen wir diese mit L_0 , so ist

$$L_t = L_0 - PT_0 \dots \dots \dots (5)$$

$$\Delta L_v = T_u \Delta S_v = U_u = Q_u$$

was man in den Satz fassen kann:

Bei nicht umkehrbaren Vorgängen irgend welcher (auch chemischer) Art erleidet die Nutzarbeit eine Verringerung um das Produkt aus der stattgefundenen Zunahme der Entropie der am Prozeß beteiligten Körper und der Temperatur des wärmeableitenden Behälters, d. h. der Umgebung. — Wie aus der Ableitung hervorgeht, ist es hierbei ganz gleichgültig, in welchem Teil der Zustandsänderung die Zunahme erfolgte, ebenso ob sie auf einmal oder in Teilen zustande kam.

Nutzbare Arbeit,

Maximale Arbeit

$$L_0 = H + T_0(S' - S) \dots \dots \dots (8a)$$

und hier ist nochmals daran zu erinnern, daß S und S' ebenso wie H nur vom Anfangs- und Endzustand, nicht aber von den Zwischenzuständen abhängen; es folgt mithin der wichtige Satz:

Bei gegebenem Anfangs- und Endzustande des Arbeitskörpers, also auch bei chemischen Umwandlungen, erhalten wir für den beschriebenen Prozeß die maximale Nutzarbeit, wenn jede nicht umkehrbare Zustandsänderung vermieden wird. Die Größe dieser Nutzarbeit ist unabhängig von der Art des rein umkehrbaren Prozesses, durch welchen die Umwandlung vollzogen wird.

Fot. 25/6. se.

Wärmelehre und Wärmewirtschaft

in Einzeldarstellungen

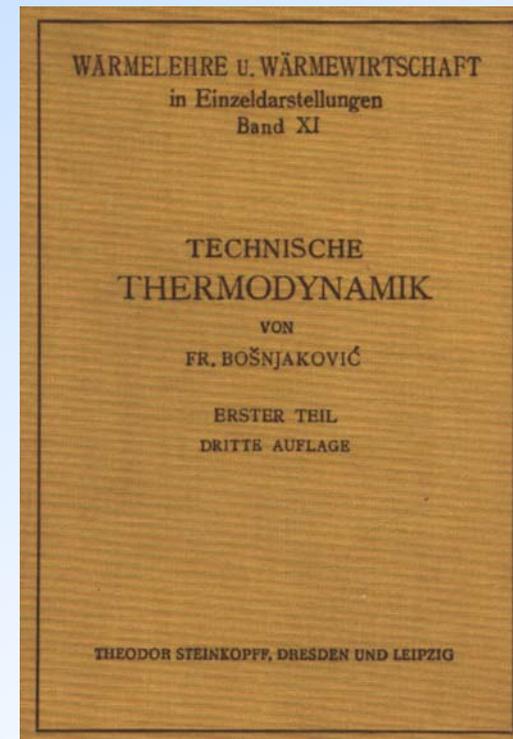
Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. W. Pauer

Band

- I. **Die Wärmewirtschaft in der Textilindustrie**
von Fedor Müller, Oberingenieur
X, 112 Seiten, mit 39 Abbild. (1926.) Preis DM 5.40, geb. DM 6.50. (Vergriffen)
- II. **Wärmewirtschaft in der Zuckerindustrie**
von Dipl.-Ing. K. Schiebl, Magdeburg. 2., völlig neubearb. Aufl. Mit einem Beitrag: Zucker-Wasser-Diagramme und ihre Anwendung von Prof. Dr.-Ing. Fr. Bošnjaković, Zagreb (Agram). XXI, 178 S. m. 83 Abb. u. 50 Zahlentafeln. 1 Mollier x-Diagramm für Zucker-Wasser-Lösungen. (1939.) Preis DM 12.50
- III. **Wärmewirtschaft im Eisenhüttenwesen**
von Dr.-Ing. Max Schlipköter, Gelsenkirchen
VIII u. 118 S., mit 55 Abb. u. 16 Zahlentaf. (1926.) Preis DM 6.30, geb. DM 7.40
- IV. **Die Grundlagen der Wärmeübertragung**
von Dr.-Ing. Friedrich Merkel, a. o. Prof. an der Techn. Hochschule Dresden
XII u. 234 S., mit 88 Abb. (1927.) Preis DM 12.—, geb. DM 13.50. (Vergriffen)
- V. **Wärmewirtschaft in der keramischen Industrie**
von Dr. Walter Steger, a. o. Prof. für Keramik an der Techn. Hochschule Berlin
IX u. 147 S., m. 48 Abb. u. zahlr. Tab. (1927.) Preis DM 7.20, geb. 8.50. (Vergriffen)
- VI. **Energiespeicherung**
von Dr.-Ing. W. Pauer, o. Prof. an der Techn. Hochschule Dresden
VIII u. 179 S., mit 57 Abb. (1928.) Preis DM 10.80, geb. DM 12.—. (Vergriffen)
- VII. **Wärmewirtschaft im Eisenbahnwesen**
von Dr.-Ing. Fr. Landsberg, Reichsbahnoberrat. Mitgl. d. Reichsbahndr. Berlin
X u. 207 S., mit 80 Abb. u. zahlr. Tab. (1929.) Preis DM 11.70, geb. DM 13.—
- VIII. **Wärmewirtschaft im Kesselhaus**
von Dipl.-Ing. E. Praetorius, Berlin
XXVIII u. 428 Seiten, mit 153 Abb. (1930.) Preis DM 25.—, geb. DM 26.50 (Vergriffen)
- IX. **Kraft und Wärme in der Landwirtschaft
und in landwirtschaftlich-industriellen Betrieben**
von W. Leder, Beratender Ingenieur. Wärmewirtschaftsstelle Oldenburg
X u. 222 S., mit 142 Abb. und 39 Tab. (1930.) Preis DM 5.—, geb. DM 6.—
- X. **Wärmewirtschaft in der Zementindustrie**
von Dr.-Ing. Hans Bußmeier, Dessau
VIII u. 81 S., m. 30 Abb. u. 34 Tab. (1931.) Preis DM 6.—, geb. DM 7.20. (Vergriffen)
- XI. **Technische Thermodynamik. 1. Teil**
von Dr.-Ing. Fr. Bošnjaković, o. Prof. an der Techn. Fak. der Univ. Zagreb
3. unveränderte Auflage. XII, 327 S., mit 249 Abb. u. einem Anhang: Aufgaben u. Lösungen u. 3. Tafeln. (1948.) Preis DM 17.—, geb. DM 18.—
- XII. **Technische Thermodynamik. 2. Teil**
von Dr.-Ing. Fr. Bošnjaković, o. Prof. an der Techn. Fak. der Univ. Zagreb
2., unveränderte Auflage. XII, 260 S., mit 235 Abb. u. einem Anhang: Aufgaben und Lösungen. Preis DM 18.—, geb. DM 19.—

VERLAG VON THEODOR STEINKOPFF, DRESDEN UND LEIPZIG

Wärmewirtschaft



Fran Bošnjaković



12.01.1902 – 1.10.1993

Fra

ARCHIV
FÜR WÄRMEWIRTSCHAFT
UND DAMPFKESSELWESEN

1

ZEITSCHRIFT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT

JAN. 1938
BD. 19

Im Auftrage des Vereines deutscher Ingenieure herausgegeben von Dr.-Ing. Kurt Schulz VDI
Schriftleiter: Dipl.-Ing. Rudolf Boye VDI / VDI-Verlag G.m.b.H., Berlin NW 7, Dorotheenstr. 40

Kampf den Nichtumkehrbarkeiten!

Von F. BOŠNJAKOVIĆ VDI, Zagreb*)

Der Drang zur Veredelung und Vervollkommnung der Umgebung ist ein Merkmal der Kultur. Dieser Drang äußert sich beim Ingenieur wie beim Künstler auch in dem Bemühen, eine möglichst starke Wirkung durch möglichst geringe Aufwendungen hervorzubringen. Wie viel in der Energiewirtschaft in dieser Hinsicht noch zu tun ist, mag aus der Bemerkung hervorgehen, daß z. B. die Beheizung von Wohnräumen im theoretischen Falle mit etwa einem Zwanzigstel des heutigen Brennstoffverbrauches gedeckt werden könnte, denselben Wärmeschutz der Gebäude vorausgesetzt. Weiterhin darf nicht übersehen werden, daß ganze Maschinengattungen, die sich eines einfachen Betriebes erfreuen, — z. B. Strahlgebläse, Absorptionskältemaschinen, Wärmepumpen u. dergl. — nicht zur Geltung kommen können, weil ihre Prozeßführung heute noch so unvollkommen ist, daß der Energieverbrauch für viele Zwecke zu groß wird.

Die wissenschaftlichen Verfahren geben uns ein Hilfsmittel in die Hand, um die Ursachen der Energieverluste zu erkennen und um die Verlustherde aufzusuchen, die den Hauptanteil an dem Gesamtverlust einer Anlage haben. Wenn die Auffindung der Verlustherde gelingt, so hat man bereits einen Teil der Aufgabe gelöst, denn man kann den Ingenieur zur Bekämpfung dieser Verlustherde anregen, und er braucht nicht die Verbesserungen auf Geratewohl auszuführen.

Energieverluste und ihre Ursachen

Um zur Festsetzung der Verluste ein einwandfreies Maß zu erhalten, müssen wir Wege einschlagen, welche in der Wärmetechnik nicht ganz üblich sind. Es zeigt sich nämlich, daß der übliche Begriff der „Abwärmeverluste“ durchaus nicht als ein Maß für die Vollkommenheit der Wärmevorgänge dienen kann.

Erstens geht die Abwärme gar nicht verloren, sondern sie wird nur an die Umgebung abgeliefert und wird dort aufgespeichert, so daß sie uns jederzeit wieder zur Verfügung steht. Viel bedenklicher ist es jedoch, daß es wärmetechnisch vollkommene Prozesse gibt, die keiner Verbesserung mehr fähig sind und trotzdem eine große Abwärme aufweisen, und daß es daneben verlustreiche Prozesse gibt, die keine Abwärme haben und wohl einer gründlichen Verbesserung fähig wären. Wir führen hier nur zwei Beispiele an. Der vollkommene Carnotprozeß, der die vollkommenste Umwandlung der Wärme in Arbeit

ermöglicht, hat eine erhebliche Abwärme, die man aus den jeweiligen Temperaturen, zwischen denen der Carnotprozeß zu arbeiten hat, ermitteln kann. Bei einem Drosselvorgang dagegen, z. B. bei Abdröselung von Druckluft von 10 at und Umgebungstemperatur auf 1 at hat man bestimmt einen großen Arbeitsverlust zu verzeichnen, denn man hätte die Luft sich isotherm ausdehnen lassen können, und hätte dabei Arbeit gewonnen. Und trotzdem tritt beim Drosselvorgang keine Abwärme auf. Der übliche Begriff des „Abwärmeverlustes“ liefert also unter Umständen ein ganz widersinniges Ergebnis.

Als Verlust wollen wir deswegen im folgenden ausschließlich solche Energiemengen ansprechen, die bei einer sinnreicheren Führung des Prozesses entweder unter Erzielung der gleichen gewollten Wirkung hätten eingespart werden können, oder die beim gleichen Aufwand hätten mehr gewonnen werden können. Die für eine gewollte Wirkung naturgesetzlich bedingten Energiemengen — z. B. die Abwärme beim Carnotprozeß — wollen wir also nicht als Verlust buchen. Der Verlust soll nur in derjenigen Form der Energie angegeben werden, welche tatsächlich verloren ging. So werden wir sowohl von Heizwärmeverlusten als auch von Arbeitsverlusten oder auch von Kälteleistungsverlusten, nicht aber von Abwärmeverlusten sprechen. Wir werden uns immer bei den Heiz- und Kühlwärmern stillschweigend die zugehörigen Temperaturen hinzudenken.

Nun gibt es keinen Energieverlust, der nicht durch nichtumkehrbare Prozesse hervorgerufen worden wäre, und es gibt keinen nichtumkehrbaren Prozeß, der nicht einen Energieverlust nach sich ziehen würde. Leider ist diese Erkenntnis in den Ingenieurkreisen noch viel zu wenig Allgemeingut geworden.

Der Nichtumkehrbarkeitsgrad und der Gütegrad

Bezeichnen wir die theoretisch erzielbare Arbeit eines Prozesses mit L_{theor} , die wirklich geleistete mit L und den durch Nichtumkehrbarkeiten hervorgerufenen Arbeitsverlust mit $\Delta L = L_{theor} - L$, so wollen wir das Verhältnis $\Delta L : L_{theor} = \nu$ als den Nichtumkehrbarkeitsgrad des eben betrachteten Vorganges bezeichnen.

Es gibt aber eine Reihe von Vorgängen, deren Zweck es nicht ist, Arbeit zu erzeugen. Das sind z. B. die Vorgänge in Verdampfern, in Trocknern, in metallurgischen Öfen und bei chemischen Prozessen. In solchen Fällen ist der Mehrbedarf an Heizwärme wichtig, der durch die Nichtumkehrbarkeiten bedingt wird. Wir bestimmen hier den Nichtumkehrbarkeitsgrad in entsprechender Weise zu $\nu_Q = \Delta Q : Q_{theor}$, wobei $\Delta Q = Q - Q_{theor}$ ist.

*) Der vorliegende Aufsatz gibt auszugsweise den Inhalt zweier Vorträge wieder, die der Verfasser im November 1937 bei der Wärmetagung in Leipzig und anlässlich der Havranek-Gedächtnisfeier in Prag gehalten hat.

Exergie

technische Arbeitsfähigkeit, technisch freie Energie

availability

l'energie utilisable

работоспособность



Exergiebilanz

$$\int_1^2 \frac{T - T_U}{T} dq + w_{t12} = \Delta e + T_U \Delta s_v$$

Fratzscher

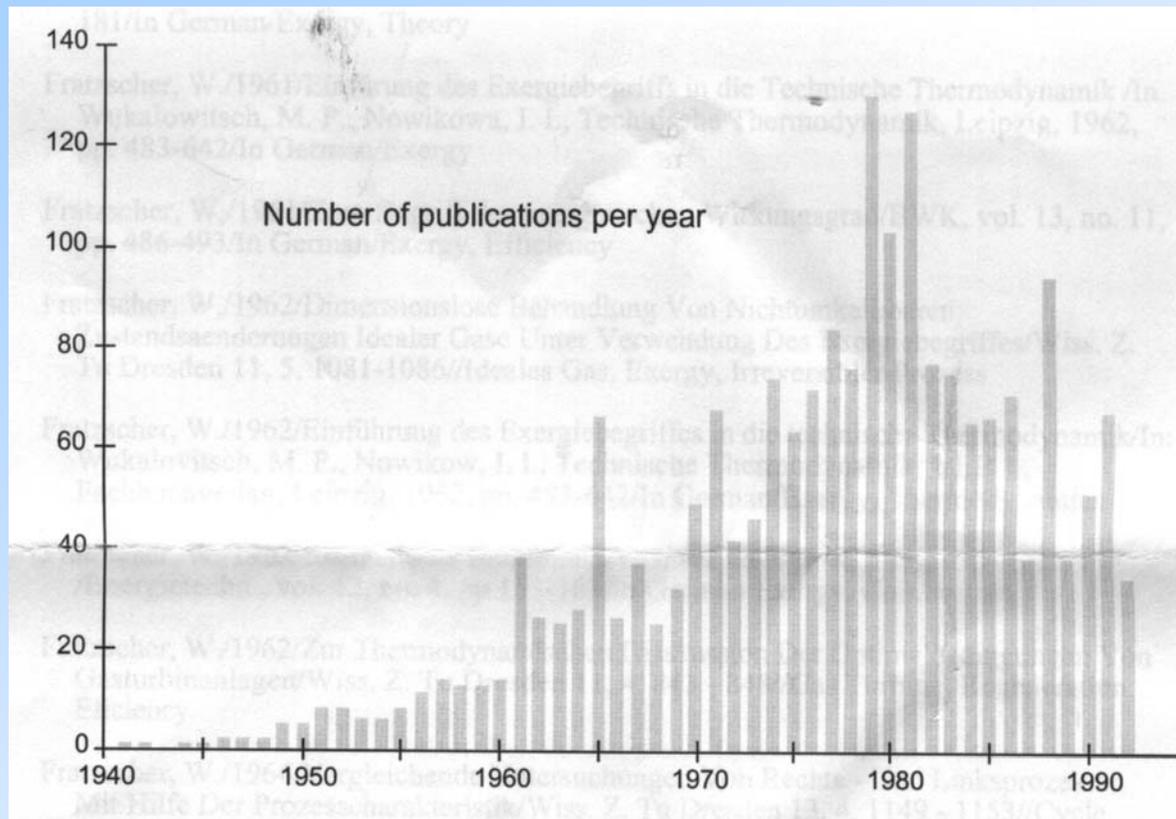
$$W = E + A$$

Energie = Exergie + Anergie

Definitionsgleichung

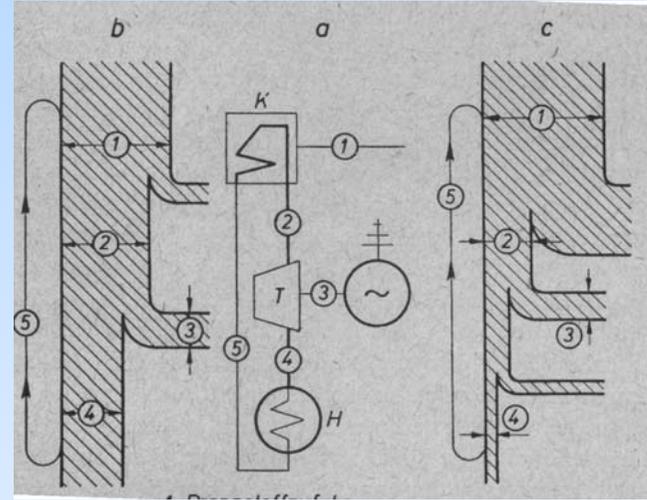
$$\Delta e = \Delta h - T_U \Delta s$$

Publikationsprofil

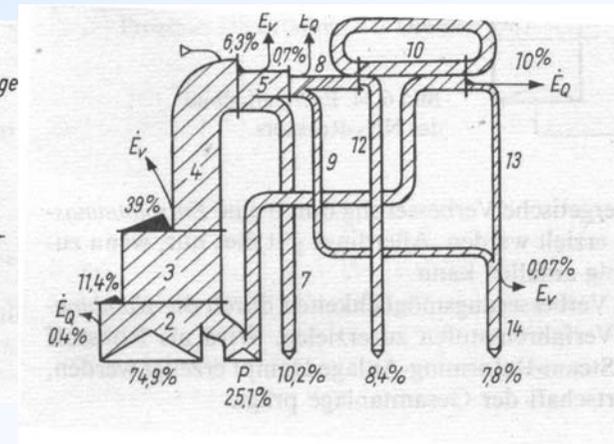
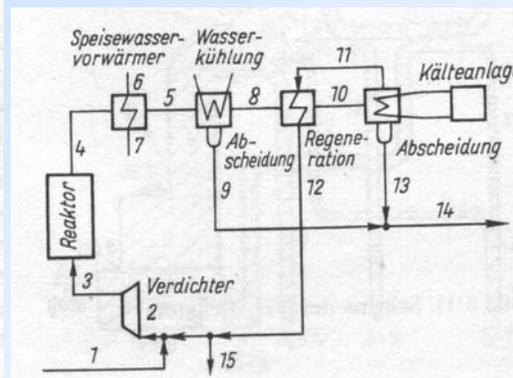
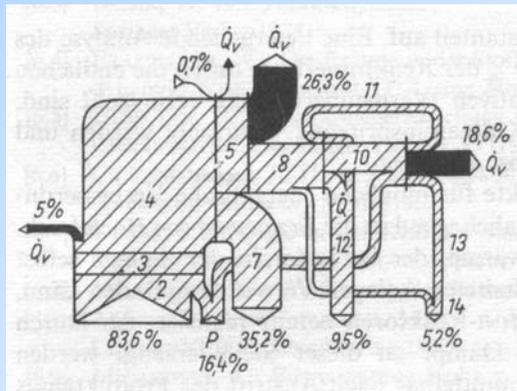


Anwendungen

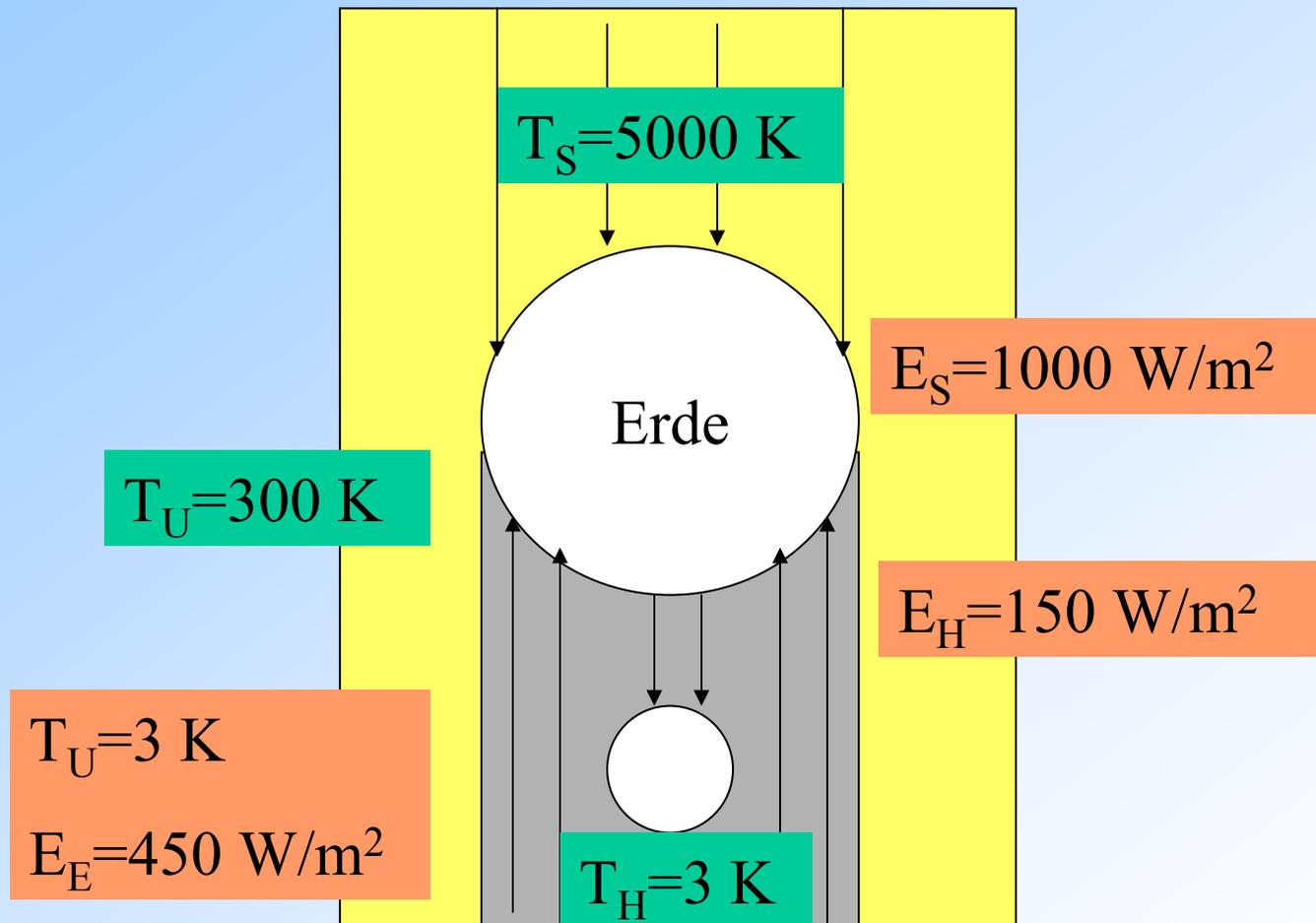
Heizkraftwerk



Ammoniakanlage



Energie und Umgebung



Wahl des Umgebungszustandes

- kybernetisch - wesentlich
- technisch - Ein-, Austrittszustand
- thermodynamisch - Gleichgewicht
- natürliche Umgebung – gehemmtes Gleichgewicht

Stoffliche Umgebung

Table 2.4 Conventional mean pressures of a gaseous reference species and standard chemical exergy at 298.15 K and 101.325 kPa

Chemical element	Chemical formula	Reference species			Standard chemical exergy of the element, kJ/mol
		Mole fraction in dry air	Conventional mean pressure in the environment, kPa*	Standard chemical exergy, kJ/mol	
Ar	Ar	0.009 33	0.906	11.69	11.69
C graphite	CO ₂	0.000 345	0.0335	19.87	410.26
D ₂	D ₂ O g	-	0.000 342	31.23	263.79
H ₂	H ₂ O g	-	2.2	9.49	236.09
He	He	0.000 005	0.000 485	30.37	30.37
Kr	Kr	0.000 001	0.000 097	34.36	34.36
N ₂	N ₂	0.7803	75.78	0.72	0.72
Ne	Ne	0.000 018	0.001 77	27.19	27.19
O ₂	O ₂	0.209 9	20.39	3.97	3.97
Xe	Xe	0.000 000 09	0.000 008 7	40.33	40.33
Atmospheric† nitrogen		0.789 8	76.705		

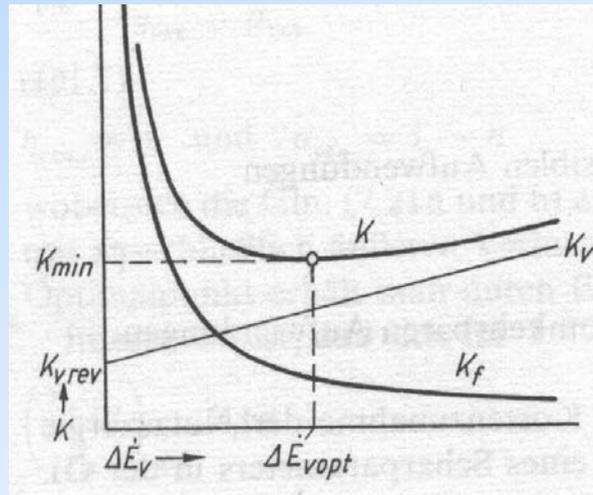
Tabelle 3.4. Beispiele für die Möglichkeit bzw. Unmöglichkeit der Definition von Bezugssubstanzen

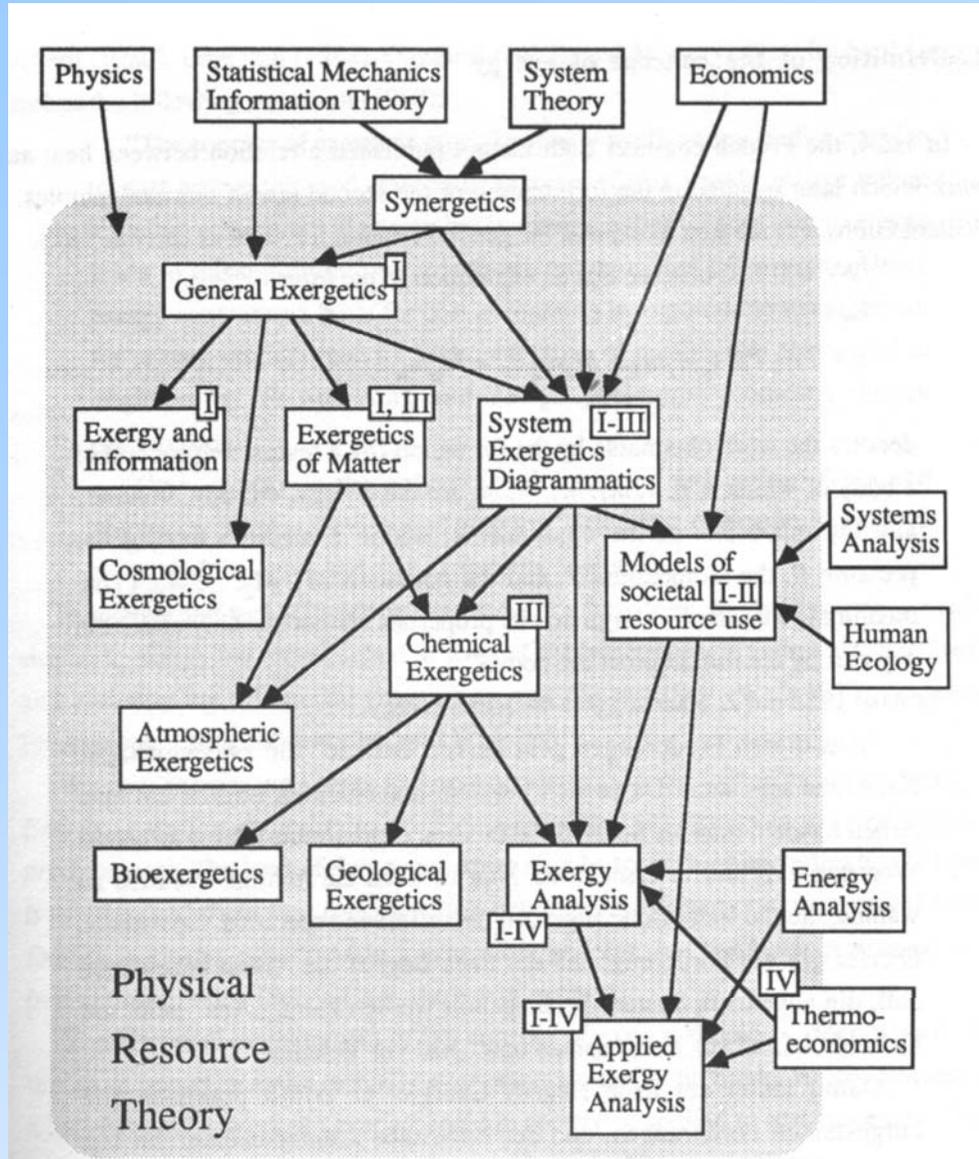
Beispiel	Komponenten im Stoffstrom	Komponenten in der Umgebung	Möglichkeit der Kombination bzw. Gleichung der Bezugsreaktion
1	N ₂	N ₂ , CH ₄	N ₂ = N ₂
2	CH ₄ , N ₂	N ₂	keine
3	H ₂ S	H ₂ O, SO ₂	keine
4	H ₂ S	H ₂ O, SO ₂ , H ₂	H ₂ S = SO ₂ + 3 H ₂ - 2 H ₂ O
5	H ₂ S	H ₂ O, SO ₂ , SO ₃	H ₂ S = H ₂ O + 4 SO ₂ - 3 SO ₃
6	CH ₄	CO ₂ , O ₂	keine
7	CH ₄	H ₂ O, CO ₂ , O ₂	CH ₄ = CO ₂ + 2 H ₂ O - 2 O ₂

Energietechnische Arbeitsmappe 2000		Chemische Exergie, chemische Elemente					2.4.6.2
Element	Molmasse ¹ in g/mol	Vorkommen der Bezugssubstanz	Bezugsreaktion	mol. Aktivität der Bezugssubstanz	zus. therm. Angaben in kJ/mol	chemische Exergie ² in kJ/mol	chemische Exergie in kJ/mol
Ag	107,9	Seewasser	AgCl ₂ ⁻ + e → Ag + 2 Cl ⁻	2,9*10 ⁻¹¹	-215,5 ³	47,5	70,2
Al	27,0	Erdkruste	½ Al ₂ SiO ₅ → Al + ½ SiO ₂ + ¾ O ₂	2*10 ⁻³	15,4 ⁴	930,7	888,4
Ar	39,9	Luft	Ar → Ar	8,94*10 ⁻³	11,69 ⁴	0	11,69
As	74,9	Seewasser	HAsO ₄ ²⁻ → As + ½ H ₂ O + 7/4 O ₂ + 2e	3,7*10 ⁻¹¹	-714,7 ³	462,4	494,6
Au	197,0	Seewasser	AuCl ₂ ⁻ + e → Au + 2 Cl ⁻	6,1*10 ⁻¹³	-151,17 ³	0	15,4
B	10,8	Seewasser	B(OH) ₃ → B + ¾ H ₂ O + ¼ O ₂	6,0*10 ⁻⁸	-968,84 ³	636,4	628,5
Ba	137,3	Seewasser	Ba ²⁺ + 2e → Ba	4,9*10 ⁻¹⁰	-561,0 ³	747,8	747,7
Bi	209,0	Seewasser	BiO ⁺ + e → Bi + ½ O ₂	1,1*10 ⁻¹²	-146,4 ³	286,9	274,5
½ Br ₂	79,9	Seewasser	Br ⁻ → ½ Br ₂ + e	1,0*10 ⁻⁵	-103,97 ³		50,6
C	12,0	Luft	CO ₂ → O ₂ + C	3,31*10 ⁻⁴	19,87 ⁴	393,5	410,3
Ca	40,1	Seewasser	Ca ²⁺ + 2e → Ca	3,6*10 ⁻⁵	-553,41 ³	813,6	712,4

Thermoökonomische Modellierung

$$K_v \approx f(\Delta E_v) \qquad K_f \approx f\left(\frac{1}{\Delta E_v}\right)$$





Exergetik (nach Wall)

ECOS-Konferenzen

