

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 93 (1975)
Heft: 15

Artikel: Energieeinsparung bei Prozessen der Stoffumwandlung
Autor: Grassmann, P.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-72713>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 02.04.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Energieeinsparung bei Prozessen der Stoffwandlung

Von Prof. Dr.Dr. h.c. P. Grassmann, Zürich¹⁾

DK 66:620.9

Die Aufgabe

Als Leitstern sei ein Satz von Prof. Dr. G. Eichelberg vorangestellt. 1932, also vor 42 Jahren, sagte er in einem Vortrag an der Christlichen Studenten-Konferenz in Aarau: «Bei der Endlichkeit unserer Mittel und der Enge des Erdballs werden wir, um die Not zu wenden, dazu kommen müssen, die Verantwortung einer Gesamtheit gegenüber als richtunggebend anzuerkennen, nicht nur in den sicher zahlreichen Fällen, wo sie sich mit dem Privatprofit deckt, sondern prinzipiell und im ersten Rang.»

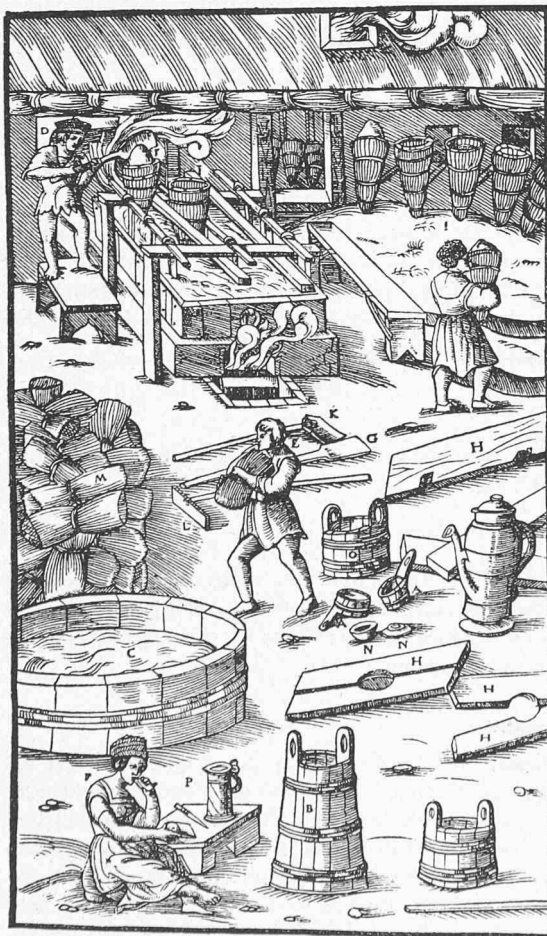
Eindampfprozesse als Beispiel

Wenden wir uns zunächst den «sicher zahlreichen Fällen» zu, wo der Privatprofit Anlass zur Verbesserung von Verfahren war. Als Beispiel diene das Eindampfen von Lösungen: Es wurde schon seit Urzeiten verwendet, um aus Sole Salz zu gewinnen, wurde weiterhin zu einem der Grundverfahren der

chemischen Industrie und wird heute wieder eingehend im Hinblick auf die Gewinnung von Süßwasser aus Meerwasser untersucht.

Bild 1 zeigt eine Anlage zur Gewinnung von Kochsalz, wie sie im Buch von *Georg Agricola* «De re metallica», erschienen in Basel 1556, abgebildet ist. Eingedampft wird auf einer offenen Pfanne, die von unten her beheizt ist. Eine entsprechende moderne Anlage, natürlich mit einer um etliche Größenordnungen gesteigerten Leistung, zeigt Bild 2. Die Anlage ist nicht nur viel sauberer und leichter bedienbar, sondern es wurde auch, und das ist ja das Thema des Vortrags, der Energiebedarf drastisch verringert. Für die Salzgewinnung mussten früher ganze Wälder umgelegt werden. In der Tat benötigte man für die Gewinnung von 1 kg Kochsalz aus der

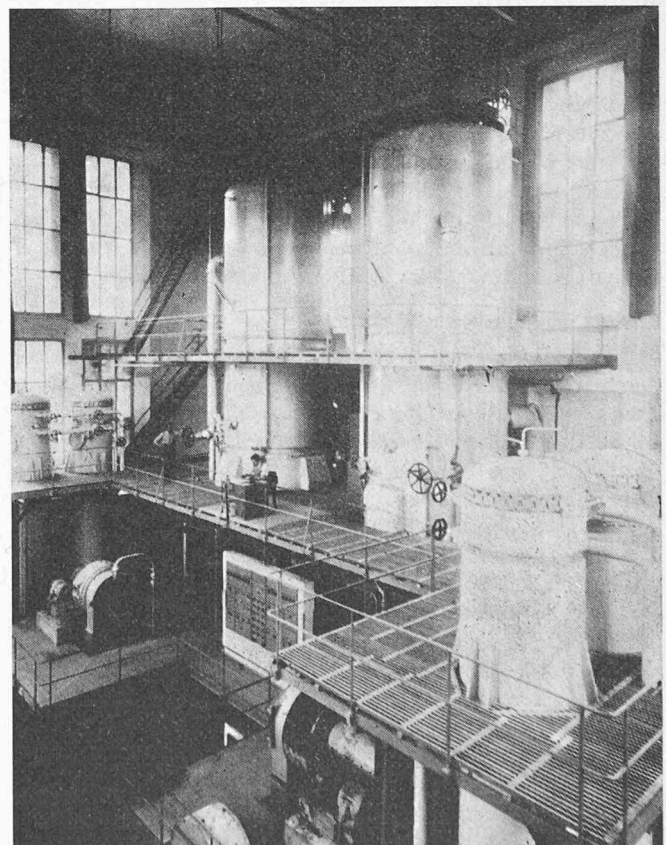
¹⁾ Nach einem Vortrag, gehalten an der SIA-Informationstagung «Technik für den Menschen» vom 23. Februar 1974 im Kongresshaus in Zürich.



Die Schöpferin A. Die Kufe B. Der Bottich C. Der Siedemeister D. Der Busche E.
Die Frau F. Holzpatel G. Bretter H. Korbe I. Schaufel K. Rechen L.
Stroh M. Bcher N. Gefäß mit Blut O. Bierkanne P.

Bild 1 (links). Soleeindampfanlage nach *Georg Agricola*

Bild 2. Moderne Eindampfanlage (Escher-Wyss)



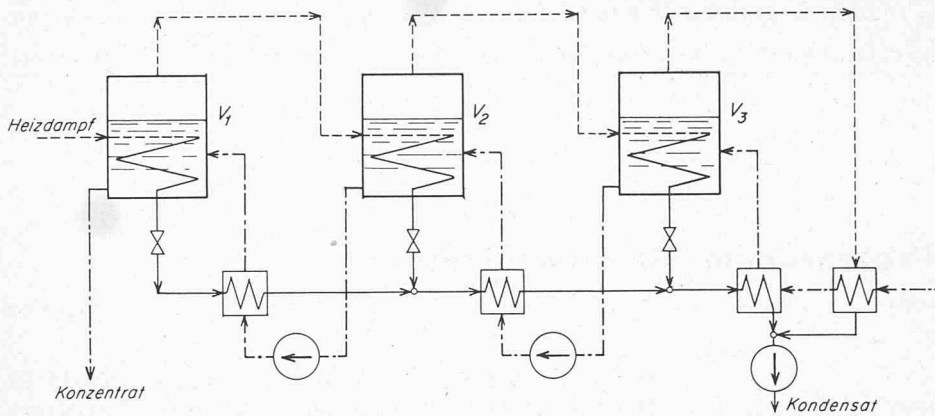


Bild 3. Mehrkörperapparat nach [3], bestehend aus drei hintereinandergeschalteten Verdampfern V_1 , V_2 und V_3

gesättigten Lösung über 1 kg trockenes Holz oder gut 4 kWh. Heute benötigen wir für denselben Zweck entweder zugeführt als thermische Energie, d. h. als Heizdampf, rund 0,4 kWh, also 1/10 oder, wenn wir elektrische Energie verwenden, etwa 0,1 kWh, also 1/40. Bei der letztgenannten Zahl ist aber folgendes zu beachten: Hinter jedem neuen Stromanschluss, hinter jeder Steckdose ist ein thermisches Kraftwerk verborgen, das einen Wärmestrom an die Umgebung abgibt, der etwa doppelt so gross ist wie entnommene elektrische Leistung.

Wodurch war diese grosse Energieeinsparung möglich? Zunächst durch einen grundlegenden Gedanken, der sich auf zwei verschiedene Arten verwirklichen lässt. Dieser Gedanke war, den bei der Verdampfung entwickelten Dampf weiter zu verwenden. Dazu kann man ihn entweder einem nachfolgenden Verdampfer zuleiten. Man gelangt damit zu dem in Bild 3 dargestellten Mehrkörperapparat. Da in jedem Apparat eine Temperaturdifferenz für die Wärmeübertragung vom kondensierenden Dampf auf die Lösung zur Verfügung benötigt wird, muss die Temperatur von Apparat zu Apparat abgesenkt werden. Dies ist möglich, wenn der Druck in dem jeweils nachfolgenden Apparat um ein bestimmtes Verhältnis niedriger ist als im vorhergehenden. Zusätzlich ist bei konzentrierten Lösungen noch die Siedepunkterhöhung zu berücksichtigen. In erster Näherung sinkt bei derartigen Anlagen mit n Stufen der Wärmebedarf auf ein n -tel der einstufigen Anlage ab [3].

Das zweite Verfahren ist die in Bild 4 gezeigte Brüdenverdichtung nach dem Wärmepumpenprinzip. Dabei wird der Brüden im Turbokompressor soweit verdichtet, dass er wieder als Heizdampf im gleichen Apparat dienen kann.

Energie und Exergie

Wie kommt man auf so gute Gedanken? Der Praktiker durch Intuition. Der theoretisch ausgebildete Ingenieur muss aber nicht auf eine Erleuchtung warten, sondern kann der Intuition recht kräftig nachhelfen. Er kann nämlich rein rechnerisch und ohne alle Intuition, also auch durch den Computer, ermitteln, wo die «Energie» bei der betreffenden Anlage verlorenght. Das Wort «Energie» wird hier im Sinne der Umgangssprache gebraucht. Thermodynamisch exakt wäre «Exergie». Sprechen wir nämlich von den Energiequellen der Erde, so meinen wir gar nicht den physikalischen Begriff der Energie, für den bekanntlich ein Erhaltungssatz gilt. Die Energie der Erde könnte sich also nur verringern, wenn ihre Energieabgabe in den Weltraum grösser wäre als die ihr von der Sonne zugestrahle Energie. Auf beide Vorgänge haben wir aber auch jetzt noch kaum einen Einfluss.

Bei der «Erschöpfung der Energiequellen der Erde» denken wir an etwas ganz anderes! Wir meinen nämlich denjenigen Anteil der Energie, der sich in mechanische oder elektrische

Arbeit umsetzen lässt. Wir betrachten z. B. nicht die riesige thermische Energie, die im Weltmeer gespeichert ist, sondern die *ausnutzbaren* Energievorräte an Kohle, Erdöl und Erdgas und die uns laufend zur Verfügung gestellten Energiearten, wie Wasserkraft, später vielleicht Sonnenenergie, Ebbe und Flut und geothermische Wärme. Hinter dieser noch vagen Vorstellung verbirgt sich eine thermodynamische Grösse, aber eben nicht die «Energie», sondern die «Exergie».

Um Beziehungen für sie abzuleiten, müssen wir eindeutig definieren, was wir unter «ausnutzbarer Energie» verstehen wollen. Offenbar meinen wir damit denjenigen Teil der Energie, den wir in Arbeit verwandeln können. Eine eindeutige Antwort darauf lässt sich geben, wenn wir zwei Voraussetzungen treffen [1, 2]:

1. dass der betreffende Prozess reversibel durchgeführt und
2. dass Wärme nur bei Umgebungstemperatur ausgetauscht wird.

Unter diesen Bedingungen wird sogleich klar:

1. Für elektrische Energie wird Energie = Exergie, denn in einer verlustlosen Maschine lässt sich elektrische Energie beliebig in Arbeit und wieder zurück verwandeln.
2. Die Exergie einer Wärmemenge Q , die bei der Temperatur T zur Verfügung steht, ist gleich der Arbeit, die mit Hilfe eines zwischen der Temperatur T und der Umgebungstemperatur T_u spielenden Carnotprozesses gewonnen wird. Es folgt also

$$E_Q = Q \frac{T - T_u}{T} = S(T - T_u)$$

Für die Exergie eines Massenstromes folgt (zur Ableitung vgl. z. B. [1], [2])

$$E_M = H - H_u - T_u(S - S_u)$$

Dabei sind H die Enthalpie und S die Entropie des Stoffes, wie er uns im betreffenden Massenstrom zur Verfügung steht und H_u und S_u die entsprechenden Werte für den Gleichgewichtszustand mit der Umgebung.

Exergieflussbilder

Mit diesen Gleichungen lassen sich Exergiebilanzen sowohl für die vollständige Anlage wie für jeden Apparat oder irgendeinen seiner Teile aufstellen. Würde sie reversibel und stationär arbeiten, so würde ihr als Ganzes wie auch jedem ihrer Teile ebensoviel Exergie zugeführt wie entnommen. Da aber alle unsere Apparate Irreversibilitäten aufweisen, geht Exergie verloren, z. B. wird Arbeit in Wärme verwandelt. Durch solche Exergiebilanzen lässt sich also eindeutig der Ort der thermodynamischen Verluste angeben.

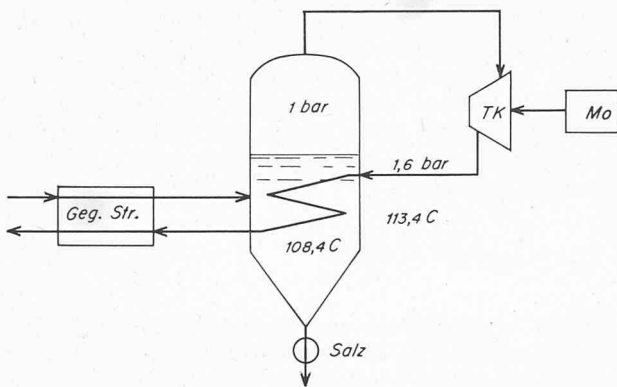


Bild 4. Eindampfapparat mit Brüdenverdichtung im Turbokompressor TK

Bild 5 zeigt das Exergieflussbild der einfachen Eindampf- anlage nach Bild 1. Man erkennt, dass die grössten Verluste bereits im Feuerraum auftreten, in dem die hochwertige chemische Energie in minderwertige Wärme verwandelt wird. Es ist dies eine Verlustquelle, die auch bei unseren modernsten thermischen Kraftwerken, besonders bei den Kernkraftwerken, eine beherrschende Rolle spielt. Entscheidend lässt sie sich verringern, wenn die immer sehr irreversible Verbrennung durch einen wenigstens im Prinzip reversibel durchführbaren Prozess ersetzt wird. Dies geschieht z. B. in der später zu besprechenden Brennstoffzelle.

Die wirtschaftliche Optimierung

Wäre es richtig und vertretbar, diesen Exergieverlusten den Kampf um jeden Preis anzusagen, also eine möglichst reversible Anlage zu schaffen? Die Antwort lautet nein! Das gilt sowohl, wenn wir an den von Eichelberg erwähnten «Privatprofit», wie auch an die «Verantwortung einer Gesamtheit gegenüber» denken.

Sprechen wir zunächst von der hinsichtlich des Privatprofits, d. h. wirtschaftlich, optimierten Anlage.

Die Exergiebilanzen moderner Eindampfanlagen zeigen, dass die grössten Verluste durch die Temperaturdifferenzen in den Wärmeaustauschern verursacht werden. Wenn bei der Süswassergewinnung aus Meerwasser durch Ausdampfen der tatsächliche Exergiebedarf etwa 10 mal höher ist als der theoretische, so liegt das zu einem guten Teil an den Temperaturdifferenzen in den Verdampfern. Diese Temperaturdifferenzen liessen sich durch Vergrösserung der Austauschflächen beliebig verkleinern. Die Anlage wird aber dadurch wesentlich teurer, d. h. die Kosten für Amortisation und Verzinsung steigen. Wirtschaftlich optimieren heisst die Gesamtkosten zu minimieren. Wie das geschieht, zeigt Bild 6. Aufgetragen sind die Kosten je kg Erzeugnis als Funktion des Produktes Wärmedurchgangszahl k mal Austauschfläche F . Dieses Produkt hat eine anschauliche Bedeutung: Es gibt den Wärmestrom in W an, der pro K Temperaturdifferenz durchgesetzt wird.

Die Kosten für Amortisation und Verzinsung dürfen zumindest in einem beschränkten Bereich als lineare Funktionen dieses Produktes betrachtet werden. Dies ergibt die schräg nach rechts oben verlaufende Gerade. Die Exergieverluste und damit auch näherungsweise die Kosten für elektrische Energie bzw. für Heissdampf steigen linear mit der Temperaturdifferenz in den Verdampfern an. Da bei vorgegebenem Wärmedurchsatz diese Temperaturdifferenz proportional zu $1/kF$ ist, ergibt sich für die Energiekosten ein hyperbolischer Abfall. Die Summe beider Kosten ergibt jenes typische Minimum mit steiler linker und flacher rechter Flanke.

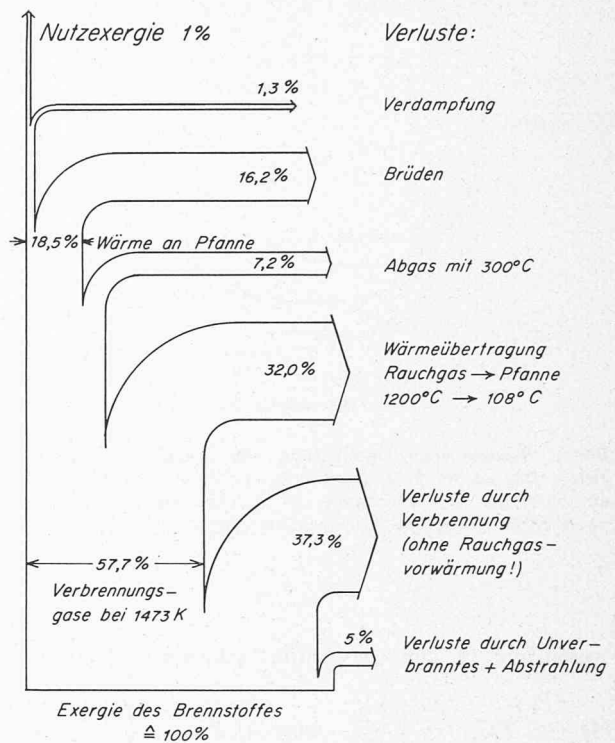


Bild 5. Mutmassliches Exergieflussbild der Anlage nach Bild 1

In mathematisches Gewand gekleidet und etwas verallgemeinert folgt zunächst für die Amortisationskosten

$$(1) \quad K_A = C_{A0} + C_{A1}(kF)^m$$

Die Betriebskosten der Anlage lassen sich ausdrücken durch

$$K_B = C'_{B0} + C'_{B1} \cdot \Delta T$$

Dabei stellt das Glied $C'_{B1} \Delta T$ den zusätzlichen Exergieverlust dar, der durch die endliche Temperaturdifferenz ΔT im Verdampfer bedingt ist. Da der zu übertragende Wärmestrom vorgegeben ist, ist $\Delta T = Q^*/(kF)$. Ist, wie beim Wärmeaustausch bei erzwungener Konvektion ohne Phasenänderung k von ΔT unabhängig, so folgt eine hyperbolische Abhängigkeit.

$$K_B = C'_{B0} + C'_{B1} Q^*/(kF)$$

Da besonderes bei Kondensation und Verdampfung k eine Funktion von ΔT ist, schreiben wir verallgemeinernd auch diesen Ansatz

$$(2) \quad K_B = C_{B0} + C_{B1} (kF)^{-n}$$

Das wirtschaftliche Optimum ist gekennzeichnet durch das Minimum der Gesamtkosten. Dabei interessieren uns hier nur die von kF abhängigen Kosten, so dass Arbeitslöhne, Kosten für Hilfsmaterial usw. in die beiden Konstanten C_{A0} und C_{B0} eingehen.

Das Minimum der Gesamtkosten $K = K_A + K_B$ als Funktion von kF ist gegeben durch

$$dK/d(kF) = 0$$

Führen wir die Differentiation unter Benützung der Gleichungen (1) und (2) durch, so folgt:

$$m C_{A1} (kF)^{m-1} - n C_{B1} (kF)^{-n-1} = 0$$

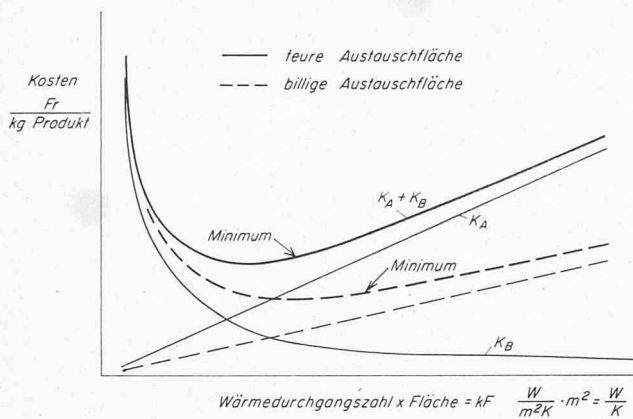


Bild 6. Schema einer Optimierung. Die strichlierten Kurven beziehen sich auf den Fall, dass die Kosten für die Austauschflächen auf 50 % der für Berechnung der durchgezogenen Kurven vorausgesetzten Werte erniedrigt werden konnten.

Damit folgt für den wirtschaftlich günstigsten Wert von kF

$$(3) \quad (kF)_{\text{opt}}^{m+n} = \frac{n C_{B1}}{m C_{A1}} \quad \text{oder} \quad (kF)_{\text{opt}} = \left(\frac{n C_{B1}}{m C_{A1}} \right)^{\frac{1}{m+n}}$$

In unserem Fall ist sowohl m wie n näherungsweise gleich 1. Damit folgt

$$(4) \quad (kF)_{\text{opt}} = \sqrt{C_{B1}/C_{A1}}$$

Gelingt es, durch konstruktive Massnahmen oder durch Wahl billiger Werkstoffe die Kosten für die Austauschflächen – genauer gesagt für kF – zu halbieren, so ergeben sich die in Bild 6, gestrichelt dargestellten Kurven. Das Minimum liegt jetzt verständlicherweise bei einem höheren Wert von kF und – was in unserem Zusammenhang besonders wichtig ist – der durch ΔT bedingte zusätzliche Exergiebedarf verringert sich auf $1/\sqrt{2}$ oder 71%. Auch in anderen Fällen lässt sich durch Verbilligung der Austauschflächen der Exergiebedarf wesentlich verringern [4].

Dies sei ein Aufruf an die Konstrukteure! Gelingt es, billigere und wirksamere Austauschflächen herzustellen, so verringert sich damit der Exergiebedarf der optimierten Anlage. Hervorgehoben sei, dass die Lage des wirtschaftlichen Optimums eine Funktion des *Verhältnisses* der Preise von Apparaten zu denen von Energie ist. Sie ist also inflationsinvariant, jedoch nicht invariant gegenüber einem Ölboykott.

Die hier gewählten Funktionen, nämlich eine lineare Zunahme der Investitionskosten und eine hyperbolische Abnahme der Energiekosten mit der Optimierungsvariablen stellen recht brauchbare Näherungen nicht nur für diesen Fall dar. Sie sind es auch für den inversen, nämlich für die thermische Isolierung, gleichgültig, ob es sich dabei um die Berechnung der wirtschaftlichsten Isolierstärke eines Apparates oder eines Hauses handelt. In diesem Fall ist die Grösse der zu isolierenden Oberfläche F und die Temperaturdifferenz ΔT vorgegeben. Optimierungsvariable ist die Dicke d der Isolierschicht dividiert durch deren Wärmeleitfähigkeit λ . Haben wir uns einmal für ein bestimmtes Isolationsmaterial mit vorgegebenem λ entschieden, so sind einerseits die Investitionskosten in guter Näherung eine lineare Funktion der Isolierstärke d . Andererseits sind die durch die Wärmeabgabe nach aussen bedingten zusätzlichen Energiekosten dem Wärmestrom und damit $1/d$ proportional, so dass sich auch hier wieder eine hyperbolische Abhängigkeit ergibt. Die Diagramme sind also für beide Fälle weitgehend ähnlich.

Diese beiden inversen Fälle, Wärmeaustauscher und thermische Isolierung, werden durch dieselbe thermodynamische Gleichung beschrieben. Ganz allgemein gilt nämlich für den Exergieverlust ΔE^*_{verl} pro Zeiteinheit beim Übergang des Wärmestroms Q^* von einem Körper der Temperatur T_1 auf einen solchen der Temperatur T_2 (vgl. [2] S. 166) (T_u = Temperatur der Umgebung)

$$\Delta E^*_{\text{verl}} = Q^* \frac{T_u \Delta T}{T_1 T_2}$$

Dieser Verlust ist klein, wenn einer der Faktoren Q^* oder ΔT möglichst klein wird. Im Falle des Wärmeaustauschers ist der durchzusetzende Wärmestrom Q^* gegeben. Es muss also für ΔT der optimale Wert gewählt werden. Bei der thermischen Isolierung ist dagegen ΔT gegeben. Zu berechnen ist der optimale Wert von Q^* .

Die umweltgerechte Optimierung

Versetzen wir uns in eine Welt, in der die Preise aller Erzeugnisse sich nicht nach den heutigen Regeln von Angebot und Nachfrage eingespielt haben, sondern der Preis ein Mass für die Umweltschädigung darstellt, die mit der Herstellung des betreffenden Gutes verknüpft ist. Eine Optimierung auf der Grundlage dieser Preise würde dann weitgehend der Maxime Eichelbergs entsprechen, da bei ihr die «Verantwortung einer Gesamtheit gegenüber» als richtungsgebend anerkannt wird.

Leider kann noch niemand diese umweltgerechten Preise nennen. Um sie festzulegen, müssten Wertungen gesetzt, müssten die verschiedenen Arten der Umweltbelastung gegeneinander abgewogen werden. Damit stehen wir erst ganz am Anfang. Ist es doch erst soweit, dass von einigen wenigen dieses Problem erkannt wurde. Ich nenne hier Dr. Müller-Wenk, der in einem Aufsatz über «Die ökologische Buchhaltung» diese Fragen aufwirft [5], und O. Lindström, der beim Kem-Tek-2-Kongress in Kopenhagen im November 1971 dieses Problem behandelt hat [6]. So sind wir hier leider auf rohe Schätzungen angewiesen.

Ich vermute, dass auch bei dieser Art der Festsetzung die meisten Preisrelationen sich nicht allzusehr verändern würden. Sowohl bei der heutigen wirtschaftlichen wie bei einer zukünftigen umweltbewussten Festlegung setzt sich jeder Preis nämlich aus sehr vielen Teilbeträgen zusammen, stellt also für sich schon einen Mittelwert dar. So dürfte, wie schon Ing. H. Osann bemerkt hat, der Franken doch ein einigermaßen gerechtes Mass sein.

Für unsere Optimierungen ist die Preisrelation Energiekosten zu Apparatekosten wesentlich. Nehmen wir an, dass sich diese Relation um den Faktor 2 ändert, wenn wir die Preise einmal nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten, das andere Mal im Hinblick auf die Umweltbelastung festlegen, so würde sich nach dem Wurzelgesetz die Lage des jeweiligen Optimums nur um $1:\sqrt{2}$ oder $1:1,4$ verschieben. Sicher, dieses Wurzelgesetz ist kein Naturgesetz, es stellt aber in vielen Fällen eine recht brauchbare Näherung dar. Tiefgreifende Änderungen sind also auf dem Gebiet der Wärmeökonomie im allgemeinen nicht zu erwarten.

Festzuhalten ist folgendes:

1. Das mathematische Kalkül der wirtschaftlichen Optimierung lässt sich auch auf die umweltgerechte Optimierung anwenden.
2. Es wäre verfehlt, nur die Umweltschädigung beim Betrieb der Anlage zu minimieren. Es müssen auch die mit dem Bau der Anlage verknüpften und auch allfällige bei ihrem Abwracken eintretende Umweltschädigungen in Rechnung gestellt werden.

Optimierung, eine Voraussetzung des Lebens

Diese hier immer wieder erwähnten Optimierungen mögen lebensfern erscheinen. Denken wir aber daran, dass jeder lebende Organismus in hervorragender Weise optimiert ist: Der Gehalt des Blutes an Blutkörperchen ist so eingestellt, dass der erforderliche Sauerstoff mit minimaler Pumparbeit an das Gewebe herangeführt wird. Bei der Verästelung der Luft- und Blutgefäße in der Lunge verhalten sich bei jeder Verzweigung die Durchmesser so, dass sich insgesamt ein minimaler Druckverlust ergibt [7]. Mit minimalem Baustoffaufwand werden die Kräfte im Knochen übertragen.

In Jahrtausenden wurde dies alles durch die langwierige «Trial and Error»-Methode der Mutation und Auslese entwickelt. Behaupten konnte sich nur, was bestens optimiert war. Optimierung ist also kein Werkzeug lebensfeindlicher Technik, sondern ist die Voraussetzung jedes Lebens.

Ausnützung von Abwärmern

Wir haben bisher von der Ausnützung der Wärme in der betreffenden Anlage selbst gesprochen. Tatsächlich ergibt sich natürlich sehr oft diese Möglichkeit z. B. zum Anwärmen von Verbrennungsluft oder allgemeiner gesagt der Ausgangsstoffe der Reaktion. Ist eine solche innere Wärmerückführung nicht durchführbar, so bieten sich folgende Ausweichmöglichkeiten an [8]:

- Erzeugung von Dampf (kompakte Bauweise, niedrige Anschaffungskosten, gute Regelbarkeit, jedoch Wärmeabfuhr nur bei der betreffenden Verdampfungstemperatur)
- Dampfüberhitzung
- Anwärmen eines Wärmeträgers (Wasser, Diphyl)
- Wärme für Produkttrocknung, Warmwasser, Raumheizung, Gewächshäuser.

Diese Möglichkeiten scheinen verlockend. Immer aber wird dadurch ein Prozess mit einem anderen gekoppelt. Nur

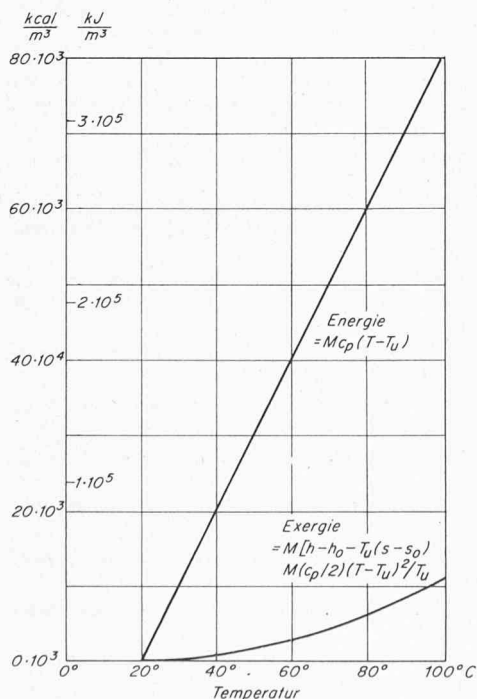


Bild 7. Energie und Exergie von warmem Wasser

selten fallen die Zeiten der Wärmeabgabe der einen Apparatur mit dem Bedarf auf der anderen Seite zusammen, die Temperaturen passen nicht, und die Stelle der Wärmeabgabe und des Wärmebedarfs liegen oft weit voneinander entfernt. Wie Bild 7 zeigt, ist die bei Temperaturen unter 100 °C anfallende Wärme eine so minderwertige Energieform, d. h. ihre Exergie ist so klein, dass ihr Transport vom wirtschaftlichen Standpunkt nur selten, vom umweltschützerischen Standpunkt auch nicht allzuoft vertreten werden kann.

Verfahrenstechnik und Energieveredelung

Die Verfahrenstechniker sind sich bewusst, dass ein beträchtlicher Teil der auf der Erde verfügbaren Exergie in den von ihnen geschaffenen Anlagen verbraucht wird. Sie haben deshalb schon sehr früh nach der Erschließung neuer Exergiequellen Ausschau gehalten [9] und sich in die Veredlungskette der Energien eingeschaltet. Die Aufbereitung des Erdöls durch Extraktion und Rektifikation in den Raffinerien war einer der Ausgangspunkte für die Entwicklung der Verfahrenstechnik, die Verflüssigung von Erdgas, seine Verschiffung über die Meere und seine Wiederverdampfung wurden im letzten Jahrzehnt grosstechnisch gelöst, die wirtschaftliche Aufarbeitung von Ölschiefern und Ölsand, von denen bekanntlich noch riesige Lager brachliegen, sowie die wirtschaftliche Kohlenverflüssigung sind Aufgaben der nächsten Zukunft. Bild 8 zeigt die physikalischen Möglichkeiten der Energieveredelung. Der konventionelle Weg Brennstoff → Wärme → mechanische Arbeit → elektrische Arbeit erfordert drei Umwandlungen. Jede bringt Verluste mit sich, jede erfordert einen Apparat und verteuert damit das Verfahren. Wenden wir uns noch kurz der «Direttissima», dem Brennstoffelement zu!

Das Brennstoffelement

Dem Brennstoffelement [10, 11, 12, 13] wird chemische Energie in Form eines Brennstoffes zugeführt, und es liefert unmittelbar elektrische Energie. Würden wir also Zink als

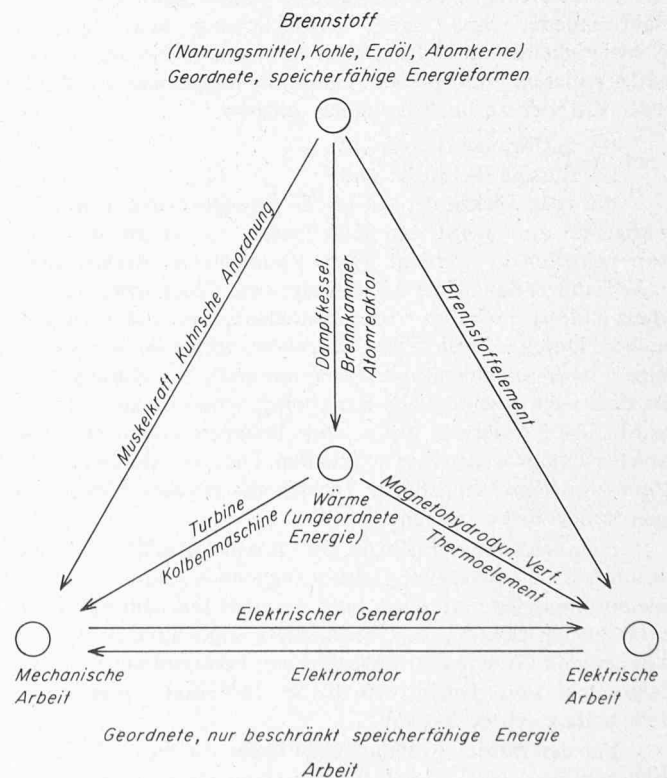


Bild 8. Die wichtigsten Wege der Energieumwandlung (nach [2])

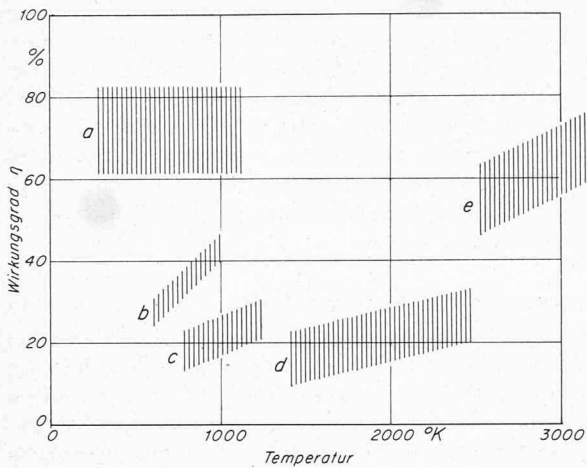


Bild 9. Wirkungsgrad und Temperaturbereich verschiedener Prozesse zur Umwandlung chemischer in elektrische Energie

- a Brennstoffelement
- b Dampfkraftwerk
- c Thermoelektrischer Wandler
- d thermionischer Wandler
- e Magneto-hydrodynamischer Wandler

Brennstoff gelten lassen, so wäre jede Taschenlampenbatterie ein Brennstoffelement. Da Zink sich vergleichsweise leicht aus den bei der Umwandlung im Brennstoffelement entstehenden Salzen wieder gewinnen lässt, wäre diese Gattung von Elementen vom Standpunkt des Gesamtwirkungsgrades übrigens gar nicht die schlechteste. Um zu brauchbaren Zellen zu gelangen, sind gasförmige oder flüssige Brennstoffe zu verwenden. Vergleichsweise weit entwickelt sind die Wasserstoff-/Sauerstoff-Zellen mit alkalischen Elektrolyten. Es handelt sich also um die Umkehr der Vorgänge in einer Zelle für die elektrolytische Wasserzersetzung. Dementsprechend glaubte man Anfang des Jahrhunderts, dass ihrer Verwirklichung keine grossen Schwierigkeiten im Wege stehen könnten. Diese liegen aber unter anderem im folgenden: Damit die Reaktionen an Anode oder Kathode zustande kommen, müssen

der gasförmige Brennstoff,
der flüssige Elektrolyt und

die feste Elektrode, die als Elektronen-Aufnehmer oder -Abgeber und meist als Katalysator zu dienen hat, zusammengebracht werden. Drei Raumgebiete stossen aber jeweils nur entlang einer Linie zusammen. Glücklicherweise ist diese «Linie» nicht im streng mathematischen Sinne zu verstehen. Durch Diffusion im Elektrolyten verbreitert sie sich zu einem zwar schmalen, aber immerhin endlichen Raumgebiet, so dass auch eine endliche Reaktionsgeschwindigkeit erreicht wird. Die Forderung bleibt aber bestehen, möglichst viele solcher Dreiphasengebiete zu schaffen. Dies wird durch die von *Justi* und *Winsel* eingeführte Technik der porösen Elektroden aus Raney-Nickel erreicht.

Hauptanwendungsgebiete der Brennstoffzellen sind die Raumfahrt, die Versorgung schwer zugänglicher automatischer, meteorologischer Stationen oder sonstige Einrichtungen, die nicht an ein elektrisches Überlandnetz angeschlossen werden können und für deren Stromversorgung Verbrennungsmotoren ungeeignet sind. Die grösste bisher entwickelte Brennstoffzellenanlage leistet 200 kW.

Für den Betrieb in Fahrzeugen bleibt der grosse Nachteil bestehen, dass der Wasserstoff in schweren Flaschen und allenfalls sogar auch noch der Sauerstoff mitgeschleppt werden

muss. Günstiger wären die mit Hydrazin und Luft betriebenen Zellen, die jedoch noch nicht genügend entwickelt scheinen. Günstig ist der hohe Wirkungsgrad der Brennstoffzellen (Bild 9).

Schlusswort

Die Verfahrenstechnik – treffender wäre die Bezeichnung Stoffwandlungstechnik – ist zwar noch eine junge Wissenschaft, und die Zahl der technisch angewandten Verfahren ist riesengross. So lässt sich natürlich noch sehr viel verbessern sowohl durch sorgfältigere Optimierung wie durch grundlegend neue Gedanken. Aber nur in Ausnahmefällen lässt sich der exergetische Wirkungsgrad verdoppeln. So bleibt als Ausweg nur sparsamerer Verbrauch.

Die Vereinigten Staaten, von vielen als Leitstern gewählt, können uns hier nicht Vorbild sein, wurde doch das amerikanische Wirtschaftsleben in einer Zeit ausgeformt, als Rohstoffe und Energiequellen in einem zunächst praktisch unbegrenzten Land im Überfluss zur Verfügung standen. Wir aber müssen wieder lernen, mit beschränkten Mitteln auf beschränktem Raum zu leben, müssen das, was an Energie und Rohstoffen fehlt, durch technischen Erfindungsgeist und sinnvolle Planung ersetzen.

Die Rohstoffbasis lässt sich verbreitern, z. B. durch Ausnutzung armer Lager oder Wiederverwendung von Abfallstoffen, wenn genügend Exergie zur Verfügung steht. Umgekehrt lassen sich neue Energiequellen erschliessen, wenn Rohstoffe zur Verwirklichung der erforderlichen Anlagen greifbar sind. Rohstoff- und Energiequellen lassen sich also in gewissem Umfang gegenseitig ersetzen.

Wichtig ist aber die dritte Säule: die menschliche Intelligenz. Sie lehrt uns aus dem Vorhandenen eine sinnvolle Welt zu gestalten. Je höher diese drei Säulen Rohstoffversorgung, Energiequellen und menschliche Intelligenz sind, desto geräumiger wird unser Lebensraum sein.

Literaturverzeichnis

- [1] *H. D. Baehr*: Thermodynamik, 3. Aufl. Berlin 1973, Springer Verlag.
- [2] *P. Grassmann*: Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik, 2. Aufl. Aarau 1970, Verlag Sauerländer.
- [3] *P. Grassmann* und *F. Widmer*: Einführung in die thermische Verfahrenstechnik, 2. Auflage. Berlin 1974, W. de Gruyter.
- [4] *P. Grassmann*: Berechnung der Vergrößerung der Austauschflächen und Ventilationsleistungen beim Übergang von der Wasser- auf Luftkühlung. «Wärme- und Stoffübertragung» 6 (1973), Nr. 3, S. 157–159.
- [5] *R. Müller-Wenk*: Die ökologische Buchhaltung, NZZ vom 4. 1. 1974, Nr. 4, S. 15.
- [6] *O. Lindström*: Value Flow Analysis in *G. Lindner* und *K. Nyberg* (Herausg.). Environmental Engineering. S. 383–391, Dordrecht, Holland 1973, D. Reidel Publ. Comp.
- [7] *P. Grassmann*: Plauderei eines Verfahreningenieurs über die menschliche Lunge. «Schweiz. Bauzeitung» 87 (1969), Nr. 38, S. 720–724.
- [8] *J. P. Fanaritis* und *H. J. Streich*: Heat Recovery in Process Plants. «Chem. Engng.» 80 (1973), Nr. 12, S. 80–88.
- [9] *P. Grassmann*: Die Erschliessung der Energiequellen der Erde. «Brennstoffe, Wärme, Kraft» 1 (1949), Nr. 1, S. 5–9.
- [10] *K. J. Euler*: Energie-Direktumwandlung heute. «VDI-Z» 114 (1972), Nr. 13, S. 949–952.
- [11] *F. v. Sturm*: Elektrochemische Stromerzeugung. Weinheim 1969, Verlag Chemie.
- [12] *H. H. v. Daehren* und *K. J. Euler*: Brennstoffelemente, 6. Aufl. VDI Verlag, Düsseldorf 1970.
- [13] *E. Justi* und *A. Winsel*: Kalte Verbrennung – Fuel Cells, Wiesbaden. Steiner.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *Peter Grassmann*, Institut für Verfahrens- und Kältetechnik, ETH Zürich, Sonneggstrasse 3, 8006 Zürich.