

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 83 (1992)

Heft: 23

Artikel: Reparieren oder Ersetzen? : Ein theoretisches Modell hilft beim Entscheid

Autor: Zumbrunn, Werner

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-902904>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 19.02.2026

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

Reparieren oder Ersetzen?

Ein theoretisches Modell hilft beim Entscheid

Werner Zumbrunn

Der Ingenieur hat häufig die Frage zu beantworten, wann ein bestimmtes Objekt (ein Gerät, eine Anlage oder ein Bauwerk) aus energetischen Gründen durch ein neues ersetzt werden soll. Dieselbe Frage stellt sich vor jeder grösseren Reparatur. Um sie beantworten zu können, sind Kenntnisse von der im Objekt investierten grauen Energie, von den für den Betrieb notwendigen Leistungen und über den technischen Fortschritt erforderlich. Zusammen mit einer speziell entwickelten Theorie erlauben sie, die gestellten Fragen zu beantworten.

L'ingénieur doit souvent répondre à la question concernant le remplacement d'un objet déterminé (appareil, installation, ouvrage), pour des raisons énergétiques, par un neuf. La même question se pose également avant toute grande réparation. Pour y répondre, il faut savoir combien d'énergie grise est investie dans l'objet, quelles sont les puissances nécessaires pour son fonctionnement et quel est le progrès technique du passé. Conjointement avec une théorie spécialement développée, ces connaissances permettent de répondre aux questions posées.

Im Hinblick auf die Schadstoffbelastung der Luft, den Treibhauseffekt, die Abhängigkeit von ausländischen Energiequellen und den Nachholbedarf der wenig industrialisierten Länder wird die rationelle Verwendung von Energie für die hoch industrialisierten Länder immer wichtiger. Wegen des Fehlens einer von allen akzeptierten Strategie nimmt der Energiekonsum und damit die Emission von Treibhausgasen laufend zu, und der Zeitpunkt massiver staatlicher Eingriffe in den Energiemarkt ist nicht mehr fern. Dann wird eine Wirtschaft im Vorteil sein, die bereits an einen rationellen Einsatz der Energie gewohnt ist.

Ein wichtiger Teilaspekt der rationellen Verwendung von Energie ist der Entscheid über Ersatz oder Reparatur defekter Objekte (Geräte, Anlagen, Bauwerke usw.). Auch die Wahl des Zeitpunktes eines Ersatzes von noch funktionstüchtigen Objekten hat einen grossen Einfluss auf den Energieverbrauch. Diese Wahl wird heute meistens aufgrund falscher oder zu stark vereinfachter Annahmen getroffen.

Modellbeschreibung

Die nachfolgend dargestellte Theorie schafft die Grundlagen, welche es dem Hersteller, Energieberater oder Konsumenten erlauben, bessere Entscheide zu fällen. Voraussetzung ist, dass die für den Energieverbrauch der Objekte massgebenden Daten bekannt sind. Leider sind sie das meistens nicht. Die vorliegende Arbeit ist deshalb auch als Anreiz für Hersteller und Konsumentenorganisationen gedacht, die richtigen und wichtigen Objektdaten zu sammeln.

Notwendige Daten

Die für die Anwendung des Modells notwendigen Daten lassen sich in drei Gruppen einteilen:

1. Graue Energie: Mit grauer Energie W wird die für Herstellung, Vertrieb, Transport, Montage, Demontage, Recycling, Entsorgung usw. notwendige Energie bezeichnet. Für viele Objektkategorien liegen heute verlässliche Zahlen vor. Wenn sie fehlen, dann können sie behelfsmässig aufgrund des Preises geschätzt werden [1].

2. Energieverbrauch/Zeit: Während seiner Nutzungsdauer hat jedes Objekt einen bestimmten – meist mit dem Lebensalter zunehmenden – Energieverbrauch durch Zeit, im folgenden Leistungsaufnahme oder kurz Leistung $P(t)$ genannt. Sie setzt sich zusammen aus der Leistung für Unterhalt und Reparaturen sowie aus der für den Betrieb notwendigen Leistung; letztere steigt normalerweise mit zunehmendem Alter des Objekts infolge Abnahme des Wirkungsgrades an (siehe Bild 1). Während die im Neuzustand notwendige Leistung $P_0 = P(t=0)$ im allgemeinen bekannt ist, sind Daten über den zeitlichen Verlauf der Leistung meistens nicht erhältlich. Die Hersteller ermitteln oder publizieren sie nicht gerne – aus verständlichen Gründen. Sie werden deshalb oft nicht genügend beachtet, obwohl allein der Energieverbrauch für Reparatur und Unterhalt während der Nutzungsdauer des Objekts die graue Energie übertreffen kann [2].

3. Geschwindigkeit des technischen Fortschritts: Das Bestreben, neue Objekte durch Altstoffverwertung mit immer weniger Energieaufwand herzustellen (Senkung von W) und die Leistungsaufnahme der neuen Geräte zu senken (Reduktion von P_0) hat einen grossen Einfluss auf die Wahl des optimalen Zeitpunktes für den Ersatz alter Objekte und den Entscheid über Ersatz oder Reparatur. Für viele Kategorien von Objekten liegen Unter-

Adresse des Autors

Werner Zumbrunn, Dipl. El.-Ing. ETH,
Hallenweg 9, 4132 MuttENZ.

suchungen vor, welche Aufschluss über die Geschwindigkeit des technischen Fortschritts geben.

Fallunterscheidungen, entsprechend dem technischen Fortschritt

Das theoretische Modell und damit die Ermittlung all der genannten Daten dient der Beantwortung der folgenden, oft gestellten Fragen: «Ist der Ersatz eines noch funktionstüchtigen Objekts im momentanen Zeitpunkt sinnvoll? Ist umgekehrt bei einem defekten Objekt eine Reparatur noch gerechtfertigt?»

Wären die dem Modell zugrunde gelegten Parameter und ihre Zeitabhängigkeit für die zur Diskussion stehenden Objekte genau bekannt, so liessen sich die erwähnten Fragen grundsätzlich rechnerisch direkt beantworten. Da dies aber selten der Fall ist, drängt sich eine vereinfachende Triage aufgrund der Zeitabhängigkeit der Objektparameter auf. Diese Klassierung verhilft zudem dem Modell zu einer besseren Transparenz. Nachfolgend werden drei Kategorien unterschieden und untersucht:

- Kategorie 1: Es findet keine oder nur eine langsame technische Entwicklung statt. Der Einsatz von grauer Energie für die Herstellung neuer Objekte und die Leistungen sind über lange Zeit hinweg fast konstant geblieben.
- Kategorie 2: Die Technik schreitet voran; vor allem die Leistungsaufnahme nimmt kontinuierlich mit jeder neuen Generation von Objekten ab.
- Kategorie 3: Die Technik revolutioniert.

Da diese Triage nur zu einer groben Unterteilung der Fälle führt, kann ein wirklicher Fall nie genau einer der oben erwähnten Kategorien zugeordnet werden. Vor allem in Grenzfällen ist es deshalb sinnvoll, jeweils zwei dieser Fälle durchzurechnen.

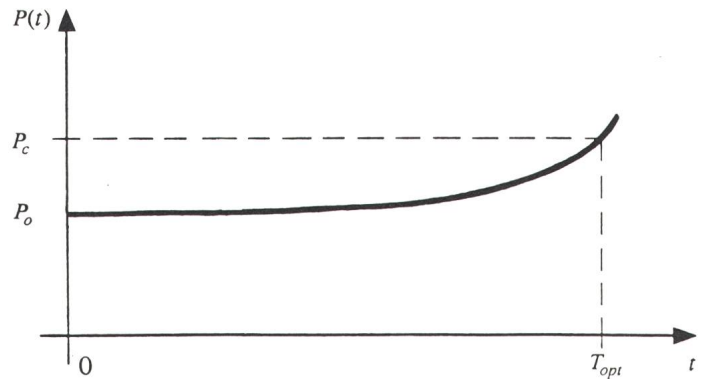
Kategorie 1: Objekte mit vernachlässigbarer technischer Entwicklung

Optimale Nutzungsdauer

Es gibt Gebiete, auf denen praktisch keine Weiterentwicklung erfolgt oder erfolgen kann, entweder weil der wirtschaftliche Druck fehlt oder weil der beste, theoretisch mögliche Wirkungsgrad bereits erreicht ist (zum

Bild 1
Bestimmung der Nutzungsdauer

$P(t)$ Leistung (Betrieb, Unterhalt, Reparatur) in Funktion der Nutzungszeit
 P_c Charakteristische Leistung
 t Nutzungszeit
 T_{opt} Optimale Nutzungsdauer



Beispiel Jahres- und Feuerungswirkungsgrad von Heizkesseln). In diesem Fall ist es das Ziel dieses Modells, die individuellen Nutzungsdauern einer Anzahl von Objekten des gleichen Typs so zu wählen, dass unter Berücksichtigung der grauen Energie ein minimaler Energieverbrauch durch Zeit des Ensembles resultiert. Vorausgesetzt wird, dass die grauen Energien aller Objekte des Ensembles gleich sind; diese Annahme trifft in der Praxis mit genügender Genauigkeit zu. Hingegen wird der zeitliche Verlauf der Leistung von Objekt zu Objekt verschieden sein. Unter diesen Annahmen ergibt sich für die energieoptimale Nutzungsdauer T_{opt} eines Objekts die folgende Beziehung (siehe auch Anhang):

$$P(T_{opt}) = P_c \quad (1)$$

Sie sagt aus, dass die Nutzung eines Objekts endet, wenn die Leistung $P(t)$ einen für das Ensemble charakteristischen Wert P_c erreicht hat. Bild 1 macht deutlich, auf welche einfache Art und Weise die Nutzungsdauer eines einzelnen Objekts mit dieser Beziehung ermittelt werden kann.

Es ist kein Zufall, dass die Nationalökonomien eine ähnlich lautende Vorschrift kennen; es ist die aus der sogenannten Wohlfahrtsökonomie bekannte Grenzkostenregel (Grenzkosten bedeuten die Kosten infolge einer zusätzlich produzierten Einheit) [3]. Sie hat den bestmöglichen Einsatz von Produktionsfaktoren und Gütern zum Ziel (Allokationseffizienz) und führt zur Maximierung des Gewinns eines Unternehmens oder einer Volkswirtschaft: *Die Produktionsausbringung ist optimal, wenn die Grenzkosten eines Produktionsfaktors dem durch den Markt vorgegebenen Preis des Produktionsfaktors entsprechen.*

Damit der Zusammenhang zwischen Grenzkostenregel und Beziehung (1) deutlicher wird, erweitern wir sie:

$$\begin{aligned} P(T_{opt}) &= \frac{d}{dt} \int_0^t P(\tau) d\tau \bigg|_{T_{opt}} \\ &= \frac{d}{dt} A(t) \bigg|_{T_{opt}} = P_c \end{aligned} \quad (1a)$$

Vorschrift (1) kann daher auch folgendermassen formuliert werden: *Die Nutzung eines Objekts endet, wenn der «Grenzenergieverbrauch» einen für das Ensemble charakteristischen Wert erreicht.*

Mit Gleichung (1) haben wir nun eine Vorschrift gefunden, mit deren Hilfe die optimale Nutzungsdauer T_{opt} eines Einzelobjekts bestimmt werden kann. Allerdings fehlt für die praktische Anwendung noch der charakteristische Wert P_c . Er kann aus einer Messung bestimmter Mittelwerte eines Ensembles gleicher Objekte bestimmt werden. Wir verwenden dabei eine Gleichung, die den Zusammenhang herstellt zwischen durchschnittlichem Verbrauch P_{med} , charakteristischem Wert P_c , grauer Energie W , Mittelwert der Nutzungsdauern T_{med} und Mittelwert der Energieverbräuche A_{med} ; letzterer entspricht dem Mittelwert der zeitlichen Integrale der Leistungen über die Nutzungsdauern (siehe Anhang):

$$P_{med} = P_c = (W + A_{med}) / T_{med} \quad (2)$$

Die Suche nach dem minimalen durchschnittlichen Verbrauch ist also identisch mit der Suche nach dem minimalen charakteristischen Wert P_c . Wir finden ihn, indem wir eine statistisch relevante Anzahl von Objekten über die Enden der energieoptimalen Nutzung hinaus betreiben und ihn

dann mit Hilfe einer numerischen Methode ermitteln.

In der Praxis tritt häufig der Fall auf, dass der charakteristische Wert P_c nicht bekannt ist oder nur mit grossem Aufwand ermittelt werden könnte. In solchen Fällen werden brauchbare Resultate erzielt, wenn anstelle der Mittelwerte die aktuellen Objektparameter eingesetzt werden. Weil die Objektparameter meistens keine grosse Standardabweichung haben, ist die Wahrscheinlichkeit gross, dass mit der Anwendung der folgenden Regel ein guter Entscheid gefällt wird.

Regel 1: Ein Objekt ist zu ersetzen, wenn die aktuelle Leistung grösser ist als der Quotient aus totalem Energieaufwand (graue Energie und kumulierter Energieverbrauch) und aktueller Objekt-nutzungsdauer.

Regel 1 hat grosse Bedeutung, solange die Hersteller, Konsumenten oder andere Organisationen keine gesicherten Mittelwerte für Nutzungsdauern und Energieverbräuche liefern können. Aus Gleichung (2) lassen sich noch weitere Erkenntnisse gewinnen:

Regel 2: Objekte mit der kleinsten Leistung sind energetisch nicht unbedingt die besten. Der kleinste durchschnittliche Verbrauch wird erreicht durch die optimale Kombination von grauer Energie, Energieverbrauch und Nutzungsdauer.

Das Betrachten nur einzelner Parameter kann demnach zu grossen Fehlern führen. Gerade bei qualitativ hochwertigen Objekten ist dies offensichtlich: Sie verlangen zwar einen grösseren Einsatz von grauer Energie, machen dies aber mehr als wett mit geringerer Leistung, geringerem Verbrauch für Reparaturen und Unterhalt sowie mit einem nur langsam abnehmenden Wirkungsgrad. Diese Effekte bewirken eine grosse Nutzungsdauer. Dies wiederum führt zu einem geringen durchschnittlichen Verbrauch.

Bei Objektkategorien, deren Leistungen sehr stark von der Intensität der Benutzung abhängen (Automobile etwa), stellt sich die Frage, welchen Einfluss die Häufigkeit der Benutzung auf die Konstruktion bzw. auf die Objektwahl haben soll. Auch hier gibt die Theorie eine Antwort. Nehmen wir an, eine Kategorie von Ob-

jekten sei für eine bestimmte Nutzung optimal ausgelegt. Wird das Objekt viel stärker genutzt, so ist seine Nutzungsdauer viel kürzer als die durchschnittliche. Dann zahlen sich aber Investitionen an grauer Energie, die im Hinblick auf eine optimale Nutzungsdauer gemacht worden sind, möglicherweise nicht aus; sie bedeuten eine Fehlinvestition. Eine Kategorie von Objekten, die für stärkere Nutzung ausgelegt worden ist, wird einen kleineren durchschnittlichen Verbrauch aufweisen. Nehmen wir als Beispiel ein Automobil mit verzinkter Karosserie: Wird es so stark genutzt, dass sein Leben lange vor dem Leben der Karosserie endet, so macht sich – auch energetisch – die Verzinkung nicht bezahlt. Ein Auto ohne besondere Rostschutzmassnahmen erfüllt in diesem Fall den Zweck genausogut und ist daher energetisch günstiger. Eine weitere Regel lautet also:

Regel 3: Ein für eine bestimmte Intensität der Benutzung optimales dimensioniertes Objekt ist nicht mehr das energetisch günstigste, wenn es weniger oder stärker als vorgesehen genutzt wird.

Natürlich weist ein Objekt, das unterdurchschnittlich genutzt wird, einen tieferen durchschnittlichen Verbrauch auf als ein durchschnittlich genutztes Objekt. Die obige Regel besagt nur, dass es für diesen Verwendungsfall ein Objekt gibt, das energetisch noch besser abschneidet.

Sorge tragen

Ein weiterer Punkt betrifft das «Sorge tragen». Häufig lassen sich ohne grossen Aufwand die Reparatur- und Unterhaltskosten tief halten. Dies führt zu einem langsameren Anstieg der Leistung, zu einer grösseren Nut-

zungsdauer und damit zu einem kleineren durchschnittlichen Verbrauch des Einzelobjekts. Dies wirkt sich vor allem dort aus, wo der Anteil an grauer Energie gross ist.

Regel 4: «Sorge tragen» bedeutet «Energie sparen».

Ersatz oder Reparatur?

Eine Schwierigkeit, die bisher verschwiegen worden ist, entsteht bei der Anwendung der Gleichung (1) dadurch, dass die Leistung keine monoton wachsende Funktion ist (siehe Bild 2). Reparaturen und Unterhaltsarbeiten bewirken einen kurzzeitigen, starken Anstieg und anschliessenden Abfall. Jedesmal wird der für das Ensemble charakteristische Wert überschritten. Von Gleichung (1) existieren also nicht nur eine, sondern mehrere Lösungen, und es gilt, den richtigen Zeitpunkt für den Ersatz eines Objekts herauszufinden. Zu diesem Zweck muss vor jeder grösseren Reparatur- und Unterhaltsarbeit mit Hilfe der folgenden Ungleichung geprüft werden, ob das Ende der Nutzung erreicht ist.

$$\{W_r + E[A(T_r, T)]\} / [E(T) - T_r] < P_c \quad (3)$$

- W_r : Energie, die für die Reparatur aufgewendet werden muss.
- T_r : Zeit zwischen Inbetriebsetzung und Reparatur.
- $E(T)$: Erwartungswert der totalen Nutzungsdauer des reparierten Objekts. Er kann infolge der Reparatur durchaus grösser sein als derjenige eines nichtreparierten Objekts. In vielen Fällen können aber die beiden Zeiten gleichgesetzt werden.
- $E[A(T_r, T)]$: Erwartungswert des Energieverbrauchs zwischen dem Reparaturzeitpunkt und dem erwarteten Nutzungsende.

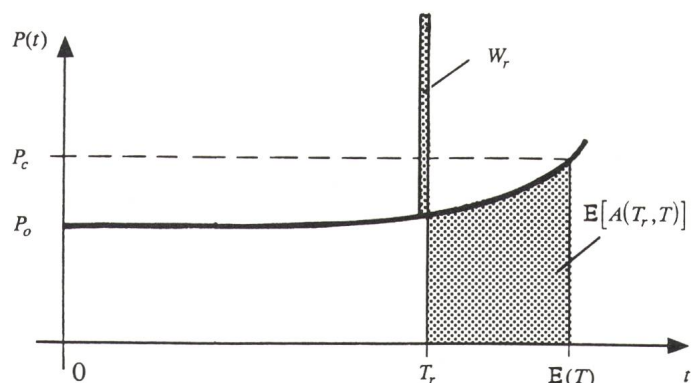


Bild 2
Verlauf
der Leistung
bei einer Reparatur
Bezeichnungen
siehe Text

Die Gleichung (3) sagt aus, dass eine Reparatur dann und nur dann vorgenommen werden soll, wenn die Summe von Energie für die Reparatur und kumuliertem Energieverbrauch bis zum Ende der Nutzung dividiert durch die Zeitspanne bis zum Ende der Nutzung kleiner ist als der für das Ensemble charakteristische Wert P_c .

Die Ungleichung (3) vereinfacht sich für zwei interessante Spezialfälle, die wir nachfolgend betrachten wollen.

Reparatur neuer Objekte

Nach jedem Herstellungsprozess ist trotz Qualitätskontrolle ein kleiner Prozentsatz der neuen Objekte defekt. Die Frage ist nun, wieviel für die Reparatur dieser neuen Objekte aufgewendet werden darf. Für diesen Spezialfall sind $T_r = 0$ und $E(T) = T_{med}$, so dass sich Ungleichung (3) auf folgende reduziert:

$$W_r < W \quad (4)$$

Regel 5: Die maximale Energie, die für die Reparatur eines neu gefertigten Objekts aufgewendet werden darf, ist kleiner als die graue Energie des Objekts.

Maximal zulässige Reparaturenergie

Bei vielen Objekten ist die Leistung während langer Zeit ziemlich konstant und nimmt dann plötzlich stark zu. Diese Zunahme markiert das Ende der Nutzung. Wenn man noch voraussetzt, dass die Nutzungsdauern der reparierten und der nichtreparierten Objekte gleich sind, vereinfacht sich Ungleichung (3) zu:

$$W_r < (1 - T_r/T_{med}) W \quad (5)$$

Regel 6: Die maximal zulässige Reparaturenergie reduziert sich ausgehend vom Wert der grauen Energie linear mit der Zeit bis zum Wert Null am Ende der Nutzung.

Diese Regel ist uns aus dem Alltag, noch allgemeiner formuliert, bekannt: Je älter ein Objekt ist, desto weniger lohnt eine Reparatur.

Wirtschaftlichkeit

Die in diesem Kapitel verwendeten Worte wie «sparen» und «Kosten» deuten auf den engen Zusammenhang zwischen energetischer und wirtschaftlicher Betrachtungsweise hin.

Wenn man graue Energie als Investition und Leistungsaufnahme als Kapitalzinsen, Reparatur- und Unterhaltskosten vermindert um die Erlöse betrachtet, so können die abgeleiteten Regeln ohne weiteres für Wirtschaftlichkeitsrechnungen verwendet werden. Das Ziel ist natürlich, negative Durchschnittskosten zu erreichen, das heisst einen Gewinn zu realisieren. Eine analoge Zielsetzung existiert beispielsweise auch für Kraftwerke, die der «Energieproduktion aus erneuerbarer Energie» dienen.

Wichtig ist, dass man bei finanziellen Überlegungen, die einen grösseren Zeithorizont berücksichtigen müssen, mit teuerungsbereinigten Grössen arbeitet, das heisst eine dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnung durchführt. Eine starke Teuerung über längere Zeiträume bewirkt sonst, dass Objekte zu früh ersetzt werden.

Herkömmliche dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnungen benützen Erfahrungswerte für die Nutzungsdauern. Die hier vorgestellte Methode geht einen Schritt weiter: Sie erlaubt die Berechnung der wirtschaftlichsten Nutzungsdauer einer Kategorie von Objekten und die Bestimmung der optimalen Nutzungsdauer von Einzelobjekten. Sie stellt somit eine nützliche Ergänzung der bestehenden Wirtschaftlichkeitsrechnungen dar.

Auch beim Erstellen von sogenannten Treibhausbilanzen leisten die präsentierten Formeln gute Dienste [4]. Werden statt der grauen Energie das bei ihrem Einsatz erzeugte CO₂-Äquivalent der emittierten Treibhausgase und statt der Leistung die Emissionen im Betrieb verwendet, so geben die hergeleiteten Regeln wertvolle Hinweise für das zur geringsten Treibhausgasemission führende Verhalten. Diese Anwendung gewinnt an Bedeutung, weil wir langsam erkennen müssen, dass nicht die begrenzten fossilen Energieressourcen, sondern die Belastung der Lufthülle mit Treibhausgasen zum grösseren Problem zu werden droht.

Die wirtschaftliche, energetische oder Treibhausgas-Optimierung führt heute noch zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen; energie- und treibhausgasoptimale Objekte sind heute immer noch teurer als wirtschaftliche Objekte. Der Grund ist, dass die sozialen Zusatzkosten, welche durch die Emissionen verursacht werden, noch nicht vollständig von den Verursachern getragen werden. Es ist zu erwarten, dass in den nächsten Jahr-

zehnten mit zunehmender Treibhausproblematik diese externen Kosten in Form von Abgaben den Verursachern auferlegt werden. Dieser Vorgang wird die Lücke zwischen finanzieller und energetischer Wirtschaftlichkeit immer mehr schliessen.

Kategorie 2: Objekte mit kontinuierlicher technischer Entwicklung

Wenn die Technik Fortschritte macht, das heisst wenn die Leistungsaufnahme neuer Geräte Jahr für Jahr gesenkt werden kann, dann ist die energieoptimale Nutzungsdauer kürzer als die im vorangehenden Kapitel errechnete. In diesem Fall gehen wir für die Berechnung der Nutzungsdauer von einer konstanten Anzahl von gleichartigen Objekten aus. In jeder Zeitperiode muss eine bestimmte Anzahl Objekte ersetzt und eine gleich grosse Anzahl neu gebaut werden. Die Erneuerungsrate ist umgekehrt proportional der Nutzungsdauer, denn je kleiner die Nutzungsdauer ist, desto grösser muss die Anzahl der zu erneuernden Objekte sein, und umgekehrt. Wir nehmen an, dass alle zu einem bestimmten Zeitpunkt t' gebauten Objekte die gleiche Nutzungsdauer $T(t')$, die gleiche graue Energie $W(t')$ und die gleiche Leistung $L(t')$ haben. Die Leistung wird während der vorläufig unbekannten Nutzungsdauer als konstant angenommen und entspreche der durchschnittlichen Leistung während dieser Zeit. Diese Vereinfachung ist erlaubt, denn wie wir später sehen werden, ist die Nutzungsdauer nicht mehr durch die gegen das Ende meistens stark ansteigende Leistung begrenzt, sondern durch andere Parameter.

Der zeitliche Verlauf des Energieverbrauchs aller Objekte zusammen ist einerseits abhängig von der infolge der laufenden Erneuerung zu investierenden grauen Energie, andererseits abhängig vom Verbrauch aller vorher gebauten Objekte, die noch im Betrieb sind. Die durch die folgende Formel definierte Funktion $z(t')$ ist ein Mass für den Energieverbrauch.

$$z(t') = \frac{W(t')}{T(t')} + \int_{t'-T(t')}^{t'} \frac{L(\tau)}{T(\tau)} d\tau \quad (6)$$

Der Verlauf der Funktionen $W(t')$ und $L(t')$ ist meistens nicht genau bekannt. Wir nehmen deshalb an, dass es sich um Exponentialfunktionen

handelt, das heisst, dass die graue Energie und die Leistung der Neubauten von Jahr zu Jahr um einen bestimmten Prozentsatz gesenkt werden können. Diese Annahmen stimmen gut mit der Praxis überein, wie zum Beispiel die Stromverbrauchswerte neuer Elektrogeräte zeigen [5].

$$W(t') = W_o \exp(-\alpha t') \quad (7a)$$

$$L(t') = L_o \exp(-\beta t') \quad (7b)$$

Des weiteren nehmen wir an, dass die Nutzungsdauer keine Funktion der Zeit t' sei. Auf die Auswirkungen dieser Annahme wird weiter unten eingegangen. Die Nutzungsdauer T ist nun so zu wählen, dass der Energieverbrauch möglichst langsam zunimmt. Die Suche des Minimums von $z(t')$ führt auf folgende Gleichung:

$$\frac{W_o \exp(-\alpha t')}{L_o \exp(-\beta t')} = \frac{\beta T \exp(\beta T) - \exp(\beta T) + 1}{\beta} \quad (8)$$

Sie sagt aus, dass für die energieoptimale Nutzungsdauer T_{opt} einzig das Verhältnis von grauer Energie zu Leistung und die Schnelligkeit des technischen Fortschritts massgebend sind. Die Nutzungsdauer ist allerdings nur dann keine Funktion der Zeit, wenn das Verhältnis von $W(t')$ und $L(t')$ unabhängig von t' ist. Obwohl diese Voraussetzung für die Praxis nicht immer zutrifft, ergibt Gleichung (8) in jedem Fall eine brauchbare Näherung für die optimale Nutzungsdauer. In Bild 3 sind einige Werte dargestellt.

Durch Linearisierung kann die folgende, approximative Lösung von Gleichung (8) gefunden werden. Ihre Genauigkeit ist für viele Fälle hinreichend.

$$T \approx \sqrt{W_o / \beta L_o} \quad (9)$$

Es stellt sich nun noch die Frage, welchen Einfluss auf die optimale Nutzungsdauer ein unterschiedlicher zeitlicher Verlauf der Funktionen $W(t')$ und $L(t')$ hat. Dies ist von besonderem Interesse, wenn die Leistung $L(t')$ mit der Zeit abnimmt, dies aber mit einer wachsenden Investition von grauer Energie erkauft wird, oder aber die Investition von grauer Energie infolge Altstoffverwertung verhältnismässig schneller abnimmt als die Leistung.

α, β	W_o / L_o									
	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20
0,02	9,4	13,0	15,6	17,7	19,6	21,2	24,0	26,4	31,3	35,1
0,03	7,6	10,4	12,5	14,1	15,6	16,8	19,0	20,9	24,6	27,5
0,04	6,5	8,9	10,6	12,0	13,2	14,3	16,1	17,6	20,6	23,0
0,05	5,7	7,8	9,3	10,6	11,6	12,5	14,1	15,4	18,0	20,0

Bild 3 Nutzungsdauer in Jahren bei kontinuierlicher technischer Entwicklung

W_o/L_o Verhältnis von grauer Energie und durchschnittlicher Leistung, in Jahren

α, β Zeitliche Rate der Veränderung der grauen Energie und der Leistungsaufnahme durch technische Weiterentwicklung, in Jahren⁻¹

Eine Schätzung der Funktionen $W(t')$ und $L(t')$ für die Zukunft würde es mit Hilfe der Gleichung (6) erlauben, die Nutzungsdauer von Objekten vorauszusagen. Wir wollen uns hier aber nicht auf Spekulationen einlassen und beschränken uns auf die Interpretation von Gleichung (8) und Formel (9). Sie sagen aus, dass die energieoptimale Nutzungsdauer T_{opt} zunimmt, wenn das Verhältnis von grauer Energie zu Leistung zunimmt; nimmt das Verhältnis ab, so nimmt auch die Nutzungsdauer ab.

Für die Tätigkeit des Konstrukteurs ist dies eine entscheidende Aussage. Tendiert das Verhältnis von grauer Energie zu Leistung zu grösseren Werten, dann muss der Konstrukteur seine Neubauten für eine grössere Nutzungsdauer auslegen. Wenn er das nicht tut, so verschlechtert sich die Energiebilanz wegen des Energieaufwandes für Reparaturen oder Nichterreichens der vorgesehenen, optimalen Nutzungsdauer. «Sparmodelle» mit einem kleinen Verbrauch würden dann nicht viel besser, eventuell sogar schlechter, als «Normalmodelle» abschneiden. Hingegen kann ein Konstrukteur, der durch Verwendung von Altstoffen ein kleiner werdendes Verhältnis von grauer Energie zu Leistung erreicht, seine Neubauten für eine kürzere Nutzungsdauer auslegen.

Regel 7: Gelingt es dem Konstrukteur, für Neubauten die graue Energie verhältnismässig stärker zu senken als die Leistungsaufnahme, so kann er die Neubauten für eine im Vergleich zur alten Konstruktion kürzeren Nutzungsdauer auslegen.

Der Konsument oder der Energieberater muss sich nicht um Regel 7 kümmern. Für ihn ist nur das Resultat, ein kleiner durchschnittlicher Verbrauch, von Interesse; für diesen kann

mit Hilfe von Formel (9) ein Näherungswert angegeben werden:

$$P_{med} \approx \sqrt{\beta W_o L_o} + L_o \quad (10)$$

Demnach ist nicht immer das Objekt mit der kleinsten Leistung das energetisch günstigste. Entscheidend ist – bei bekannter Geschwindigkeit der technischen Entwicklung – die optimale Kombination von Leistung und grauer Energie.

Bemerkenswert ist, dass im Gegensatz zu Kategorie 1 (vorhergehendes Kapitel) nicht die Grösse der Leistung am Ende der Nutzung, sondern die durchschnittliche Leistungsaufnahme die energieoptimale Nutzungsdauer mitbestimmt. Deshalb ist die folgende Regel zu beachten, wenn die durchschnittliche Leistung vom Verhalten des Benutzers abhängig ist:

Regel 8: Eine unterdurchschnittliche Nutzung führt zu einer höheren energieoptimalen Nutzungsdauer, eine überdurchschnittliche Nutzung zu einer Verkürzung.

Sparen macht sich also «doppelt» bezahlt, erstens durch eine Reduktion des Verbrauchs und zweitens durch eine Verlängerung der Nutzungsdauer. Natürlich ist es günstiger, Regel 3 zu beachten und Objekte einzusetzen, die auf das Benutzerverhalten abgestimmt sind. Regel 8 hat aber ihre Bedeutung für diejenigen Fälle, in denen nachträglich eine vom Durchschnitt abweichende Leistung festgestellt wird.

Kategorie 3: Objekte, welche eine technische Revolution erfahren

Von Zeit zu Zeit gelingt es, zum Beispiel infolge einer Erfindung, den durchschnittlichen Verbrauch einer

neuen Generation von Objekten schlagartig zu senken. Dann stellt sich die Frage, ob die noch funktionstüchtigen, alten Objekte sofort ersetzt oder bis ans Ende ihrer Nutzungsdauern betrieben werden sollen. Im ersten Fall werden alle alten Objekte mit dem minimalen durchschnittlichen Verbrauch

$$P_{med,a} = (L_a + W_a/T_{med,a}) \quad (11)$$

sofort durch neue mit dem minimalen durchschnittlichen Verbrauch

$$P_{med,n} = (L_n + W_n/T_{med,n}) \quad (12)$$

ersetzt. Im zweiten Fall wird jedes alte Objekt bis an das Ende seiner geplanten Nutzung betrieben und erst dann durch ein neues ersetzt.

Die linke Seite der folgenden Ungleichung entspricht der durchschnittlichen Energie, die pro Objekt bei einem sofortigen Ersatz aller alten Objekte gespart werden kann:

$$\frac{1}{2} T_a [L_a - P_{med,n} + W_n(1/T_a - 1/T_n)] > 0 \quad (13)$$

Daraus folgt, dass alle alten Objekte sofort durch neue ersetzt werden müssen, wenn die Differenz zwischen der Leistung der alten Objekte und dem durchschnittlichen Verbrauch der neuen Objekte grösser ist als ein bestimmtes Mass, das durch die Nutzungsdauern der alten und neuen Objekte und die graue Energie der neuen Objekte gegeben ist. Wenn die Nutzungsdauern der alten und neuen Objekte gleich sind, vereinfacht sich Ungleichung (13) zu

$$L_a - P_{med,n} > 0 \quad (14)$$

Regel 9: Wenn die Nutzungsdauern der alten und der neuen Objekte gleich sind, und die Leistungsaufnahme der alten Objekte grösser ist als der durchschnittliche Verbrauch der neuen Objekte, so sind alle alten Objekte sofort zu ersetzen.

Anhand eines Beispiels soll die Ungleichung (13) illustriert werden: Es stellt sich die Frage, ob sich aus energetischer Sicht der Ersatz von (noch funktionstüchtigen) 100-W-Glühlampen durch Kompaktfluoreszenzlam-

pen (KFL) mit gleichem Lichtstrom lohnt.

$$\begin{aligned} \text{Glühlampe: } & L_a = 100 \text{ W} \\ & T_{med,a} = 1000 \text{ h} \\ \text{KFL: } & L_n = 20 \text{ W} \\ & W_n = 50 \text{ kWh} \\ & \text{(geschätzt, inkl. Entsorgung)} \\ & T_{med,n} = 8000 \text{ h} \end{aligned}$$

Aus Ungleichung (13) wird damit

$$\frac{1}{2} \cdot 1000 \text{ h} [100 \text{ W} - 26,25 \text{ W} + 43,75 \text{ W}] = 58,75 \text{ kWh} > 0$$

Der sofortige Ersatz aller alten 100-W-Glühlampen würde somit zu einer Energieeinsparung von rund 60 kWh pro Lampe führen.

Schlussfolgerungen

Die präsentierten Formeln und Regeln sind eine Hilfe für den Entscheid, ob ein Objekt ersetzt oder repariert werden soll. Allerdings bleiben sie toter Buchstabe, wenn es nicht gelingt, die für die Charakterisierung eines Objektes notwendigen Daten zu ermitteln. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es deshalb, Ingenieure – und unter ihnen vor allem die Energieberater – zu animieren, Daten über diejenigen Objekte zu sammeln und auszuwerten, die für den Energieverbrauch der Volkswirtschaft massgeblich sind. Besondere Aufmerksamkeit verdienen Daten, die Auskunft über Reparatur-, Unterhaltsaufwand und über die zeitliche Abnahme von Wirkungsgraden während der Nutzung geben.

Anhang

Berechnung der energieoptimalen Nutzungsdauer eines Objekts

Das Ziel ist, die individuellen Lebensdauern einer Anzahl n von Objekten des gleichen Typs so zu wählen, dass unter Berücksichtigung der grauen Energie ein minimaler Energieverbrauch/Zeit des Ensembles resultiert. Vorausgesetzt wird, dass die grauen Energien W aller Objekte gleich sind. Hingegen wird der zeitliche Verlauf der Leistung $P(t)$ von Objekt zu Objekt verschieden sein.

Wenn T_i die vorläufig unbekannte Nutzungsdauer und A_i das zeitliche Integral der Leistung eines Objektes i bezeichnen, so ist sein mittlerer Energieverbrauch/Zeit $P_{med,i}$:

$$P_{med,i} = \frac{W + \int_0^{T_i} P_i(t) dt}{T_i} = \frac{W + A_i(T_i)}{T_i} \quad (A1)$$

Der durchschnittliche Energieverbrauch/Zeit P_{med} je Objekt ist somit:

$$P_{med} = \frac{nW + \sum_{i=1}^n \int_0^{T_i} P_i(t) dt}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (A2)$$

Mittels Differentialrechnung werden die Bedingungen, die einen minimalen Energieverbrauch/Zeit ergeben, ermittelt. Es resultieren n Gleichungen:

$$P_i(T_i) = \frac{nW}{\sum_{i=1}^n T_i} + \frac{\sum_{i=1}^n \int_0^{T_i} P_i(t) dt}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (A3)$$

Die rechte Seite der Gleichung ist keine Funktion des Index i und daher eine für das Ensemble charakteristische Grösse P_c :

$$P_i(T_i) = P_c \quad (A4)$$

Mit den Abkürzungen

$$T_{med} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (A5)$$

für den Mittelwert der Nutzungsdauern und

$$A_{med} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \int_0^{T_i} P_i(t) dt \quad (A6)$$

für den Mittelwert der Energieverbräuche schreiben sich die Formeln (A3) und (A4):

$$P_i(T_i) = P_c = (W + A_{med})/T_{med} \quad (A7)$$

Dies entspricht aber gerade dem durchschnittlichen Energieverbrauch/Zeit P_{med} je Objekt des Ensembles:

$$P_{med} = P_c = (W + A_{med})/T_{med} \quad (A8)$$

Die Suche nach dem minimalen durchschnittlichen Energieverbrauch/

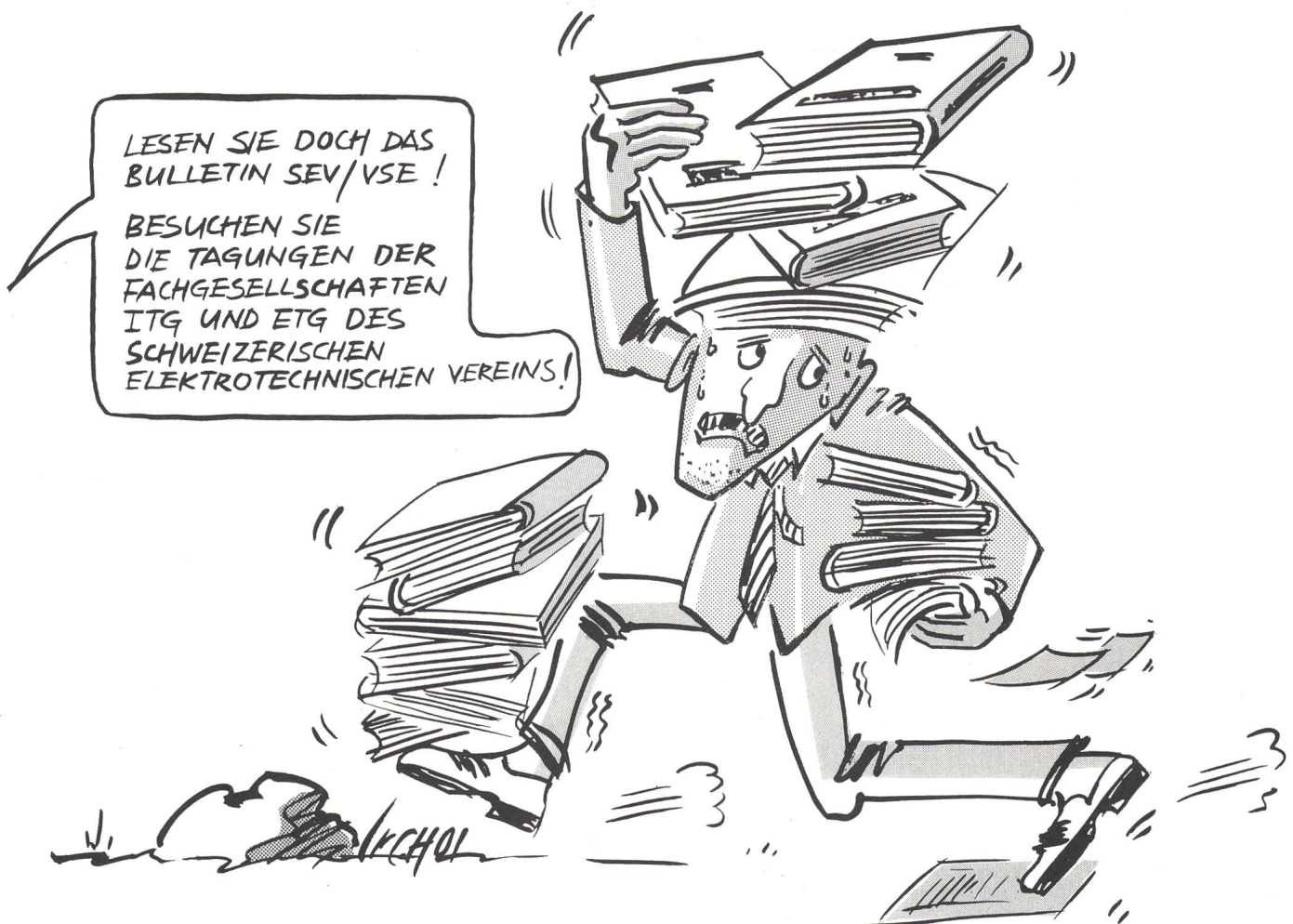
Zeit ist daher identisch mit der Suche nach der minimalen charakteristischen Leistung.

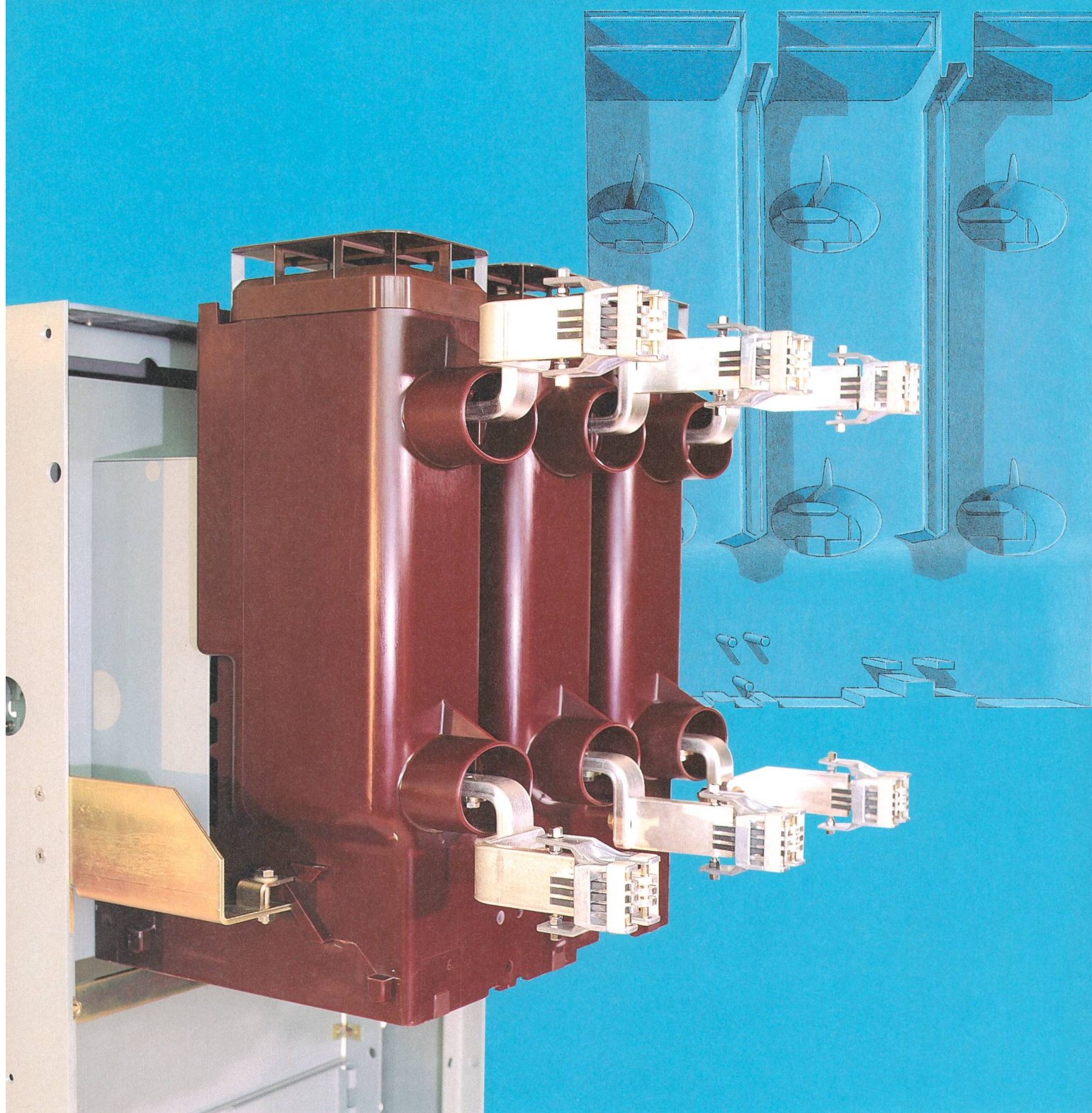
Literaturverzeichnis

- [1] D. Spreng: Wieviel Energie braucht die Energie? Verlag der Fachvereine an den schweizerischen Hochschulen und Techniken, Zürich, 1989.
- [2] J. Schröder: Zustandsbewertung grosser Gebäudebestände. Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 17, 27. April 1989, S. 449–459.
- [3] T. Thiemeyer: Grenzkostenpreise bei öffentlichen Unternehmen. Inaugural-Dissertation, Wirtschaft- und Sozialwissenschaftliche Fakultät der Universität Köln. Westdeutscher Verlag Köln und Opladen, 1962, S. 73.
- [4] P. Suter: Integrale Treibhausbilanz für Energiesysteme oder: Lohnt sich das Energiesparen? Gas, Wasser, Abwasser 1/92, S. 25–27.
- [5] K. Schläpfer: Ökologie in der Haushaltapparate-Branche. Bull. SEV/VSE 80(1989)6, S. 323–328.

Liste der wichtigsten Formelzeichen

W	Graue Energie (Herstellung, Vertrieb, Transport, Montage, Demontage, Recycling, Entsorgung usw.)
$P(t)$	Leistung (Energieverbrauch/Zeit) in Funktion der Nutzungszeit t
T	Nutzungsdauer
T_{opt}	Optimale Nutzungsdauer
A	kumulierter Energieverbrauch (zeitliches Integral der Leistung)
$E(X)$	Erwartungswert von X
P_{med}	Minimaler durchschnittlicher Energieverbrauch/Zeit, inklusive graue Energie (minimaler durchschnittlicher Verbrauch)
P_c	Charakteristische Leistung
$W(t')$	Graue Energie in Funktion des Zeitpunktes t' der Herstellung
$L(t')$	Durchschnittliche Leistung in Funktion des Zeitpunktes t' der Herstellung
$T(t')$	Nutzungsdauer in Funktion des Zeitpunktes t' der Herstellung
β	Zeitliche Rate, mit welcher die Leistungsaufnahme der Neubauten durch die technische Entwicklung gesenkt werden kann





Endlich ein Schalter aus einem Guss

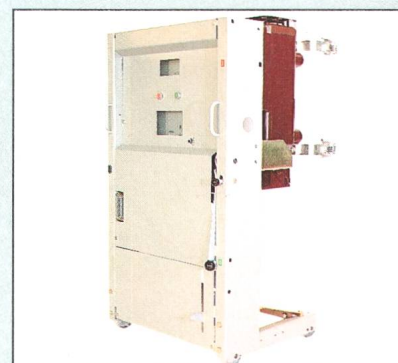
Im neuen Vakuumleistungsschalter HV 400 für 12 und 24 kV, 800 bis 2000 A, 16 und 25 kA sind alle Baugruppen im kompakten Giessharzgehäuse integriert.

Dieses multifunktionale Giessharzgehäuse übernimmt neben den Isolierfunktionen auch die Tragfunktionen für den Strompfad sowie für den neu entwickelten Einwellen-Federantrieb.

HV 400 steht für Zukunftstechnologie Vakuum, höchste Verfügbarkeit,

Wartungsfreiheit, grösste Sicherheit und volle Kompatibilität mit allen bisherigen Schaltern in den PA/PN-Zellensystemen von Sprecher Energie.

SPRECHER ENERGIE AG
Mittelspannungsanlagen
CH-5034 Suhr
Telefon: 064/33 77 33
Fax: 064/33 77 35



SPRECHER
ENERGIE