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: 77 (1986)

Heft: 4

Artikel: Ökonomische Verluste bei Industrieverbrauchern infolge nicht gelieferter elektrischer Energie

Autor: Kornas, T.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904161

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: 11.07.2025

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

Ökonomische Verluste bei Industrieverbrauchern infolge nicht gelieferter elektrischer Energie

T. Kornas

Wird die Versorgung eines Industriebetriebes mit elektrischer Energie eingeschränkt, so treten Produktionsausfälle auf. Der Beitrag eines Mitarbeiters des Institutes für Energoelektrik der Technischen Hochschule Wrocław (Breslau) beschreibt ein Verfahren zur Bestimmung der dabei entstehenden Verluste und gibt Beispiele für einige Branchen.

Si l'approvisionnement en énergie électrique d'une entreprise industrielle est limité, des pertes de production en seront la conséquence. L'article d'un collaborateur d'un Institut de l'Ecole Polytechnique de Wrocław (Breslau) décrit un procédé permettant de déterminer les pertes pouvant en résulter et donne des exemples pour quelques branches particulières.

Adresse des Autors
Dr. Ing. *Tadeusz Kornas*,
ul. Benedyktyńska 17 m. 23,
50-350 Wrocław/Polen

1. Einleitung

Falls in einem Land der Zuwachs des Bedarfs an elektrischer Energie grösser ist als die von den Kraftwerken verfügbare Leistung, entsteht die Gefahr eines Mankos in der elektrischen Energieversorgung. In diesem Fall ergibt sich unter anderem die Notwendigkeit, die Leistungsaufnahme bei den Verbrauchern planmässig zu beschränken, um die Leistungsbilanz im elektrischen Energieversorgungssystem ins Gleichgewicht zu bringen. Die Beschränkungen sollen vor allem bei Industrieunternehmungen eingeführt werden. Diese zur Minderung des Leistungsmankos getroffene Strategie führt zu ökonomischen Verlusten für die Volkswirtschaft.

Die bisher angewandten Massnahmen zur Beschränkung der Leistungsaufnahme stellen im Hinblick auf die Minimierung der durch die nicht gelieferte Energie verursachten Kosten keine optimale Lösung dar. Die erwähnten Leistungsbegrenzungen beruhen meistens auf Ausschaltungen solcher Verbraucher elektrischer Energie in Industrieunternehmen, deren Ausserbetriebsetzung den grundlegenden Fertigungsprozess nicht stört.

Im vorliegenden Beitrag wird ein Verfahren zur Bestimmung der ökonomischen Verluste dargestellt, die infolge der nicht an die Industriebetriebe gelieferten elektrischen Energie entstehen. Die Kosten dieser Verluste werden für die Chemieindustrie, für Kupfererzgruben und für das Kupferhüttenwesen berechnet. Dabei wird eine Methode zur Ermittlung des sogenannten ökonomischen Äquivalents der nicht gelieferten elektrischen Energie angewandt. Vergleicht man diesen Wert für verschiedene Industrieunternehmen miteinander, so kann diejenige Reihenfolge der Abschaltung der verschiedenen Verbraucher oder Fertigungsabteilungen bzw. -linien bestimmt werden, die mit den geringsten Kosten verbunden ist. Zur richtigen Anwendung dieses Verfahrens ist eine detaillierte Analyse des Herstellungsprozesses in bezug auf seine Empfindlichkeit auf Mangel an elektrischer Energie erforderlich.

2. Verfahren zur Bestimmung der Kosten der Verluste

Mit zunehmender Begrenzung der Leistungsaufnahme bis zu einer bestimmten Grenzleistung P_G nimmt die Produktion eines Industrieunternehmens ab. Die Kosten der dadurch verursachten Produktionsverluste stellen üblicherweise eine stetige Funktion dar. Wenn jedoch eine für jeden Industriebetrieb zu ermittelnde Grenzleistung P_G überschritten wird, treten ausser Produktionsverlusten mehrfach grössere technologische Verluste auf, die sogar mit der Zerstörung von Werkstoffen und Produktionsanlagen verbunden sind. Diese Verluste wachsen nach Überschreitung von P_G plötzlich sehr stark an und stellen daher eine unstetige Funktion dar. Wird beim Auftreten eines Energiemangels in den dafür vorgesehenen Betrieben die Leistung bis zur Grenzleistung P_G begrenzt, so treten nur Produktionsverluste auf.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Kosten der Verluste hat das Zeitintervall zwischen dem Auftreten des Energiemangels im Versorgungssystem und der Einführung der Leistungsbegrenzung in den dafür vorgesehenen Industrieunternehmen. Es besteht die Möglichkeit, die Produktionsprozesse dieser Betriebe auf die vorgesehenen Ausschaltungen vorzubereiten, um zusätzliche Verluste zu vermeiden. Diese treten auf, wenn das Zeitintervall zu kurz ist.

Die Kosten der Produktionsverluste können wie folgt bestimmt werden:

- Für Fertigungslinien und Betriebsabteilungen, in denen *Zwischenprodukte* hergestellt werden, lassen sich die durch nicht gelieferte elektrische Energie entstehenden ökonomischen Verluste aus folgender Beziehung ermitteln:

$$K'_V = K_F - K'_W - K'_E + K'_Z \qquad (1)$$

wobei

K_F Fertigungskosten des Zwischenproduktes
K'_W Kosten der nicht verbrauchten Werkstoffe
K'_E Kosten der nicht gelieferten elektrischen Energie
K'_Z Zusatzkosten infolge des Produktionsstillstandes

Die Zusatzkosten K'_Z setzen sich zusammen aus Kosten, die mit
- der nach dem Stillstand wieder erforderlichen Inbetriebsetzung der Produktion,
- der durch die nicht gelieferte elektrische Energie verschlechterten Produktqualität sowie
- der unterbrochenen Kooperation

verbunden sind.

- Für Fertigungsstrassen und Produktionsabteilungen, in denen *Fertigerzeugnisse* hergestellt werden, können die Verluste aus folgender Gleichung bestimmt werden:

$$K_V = W - K_P - K_E + K_Z \qquad (2)$$

wobei

W Verkaufswert der (nicht produzierten) Fertigprodukte,
K_P Fertigungskosten der nicht verbrauchten Zwischenprodukte

Die Gleichungen (1) und (2) haben eher anschauliche als praktische Bedeutung. Zur Analyse der durch die nicht gelieferten elektrischen Energie verursachten Verluste ist die Aufstellung der Funktion Verlust = F (Unterbrechungsdauer) erforderlich, d.h. die Ermittlung der Abhängigkeit dieser Kosten von der Unterbrechungsdauer der Energielieferung.

Zur Ermittlung derartiger Funktionen muss die Struktur und die Organisation des technologischen Prozesses im analysierten Industrieunternehmen möglichst genau erfasst werden. Ebenfalls muss die Abhängigkeit der Dauer der Produktionsunterbrechung t_P von der Dauer der Unterbrechung der Energieversorgung t_E im Zusammenhang mit den Leistungsbegrenzungen bestimmt werden. Die Beziehung zwischen t_P und t_E kann in folgender Form dargestellt werden:

$$t_P = t_E + t_A(t_E) + t_B(t_E) \qquad (3)$$

wobei

t_A Inbetriebsetzungsdauer nach Wiederaufnahme der Versorgung mit elektrischer Energie
t_B Zeitraum nach Wiederaufnahme der Energielieferung, bis der Prozess die erforderlichen technischen Daten wieder erreicht.

Die Zeitdauer t_A beinhaltet die Anlaufzeit der Schleifring- und Synchronmotoren, die Einstellzeit der Parameter der Produktionsmaschinen sowie die Zeitverluste infolge des Weggangs des Bedienungspersonals von den Produktionsmaschinen während der Unterbrechung der Energieversorgung. Die Zeitdauer t_B ist stark von der Art des Produktionsprozesses abhängig: Bei thermischen Prozessen hängt sie vom Zeitpunkt der Unterbrechung und von der Zeitkonstanten dieses Prozesses ab; bei der Metallbearbeitung und bei spangebenden Fertigungen sowie bei mechanischen Prozessen ist die Zeit t_B nahezu Null.

Setzt man Gl. (3) in Gl. (1) ein, so kann der zeitliche Verlauf der Verluste wie folgt beschrieben werden:

$$K'_V(t_E) = (K_F - K'_W)\frac{t_P}{T_r} - K'_E\frac{(t_E + t_A)}{T_r} + K'_Z(t_E) \qquad (4)$$

wobei

T_r reelle Arbeitszeit der Betriebsabteilungen im analysierten Betrachtungszeitraum

Für Produktionsanlagen, die für Abschaltungen infolge Leistungsmangels nicht in Erwägung gezogen werden können, lässt sich Gleichung (4) wie folgt darstellen:

$$K'_V(t_E) = \left(K_F - K'_W\right)\frac{t_P}{T_r} - K'_E\frac{(t_E + t_A)}{T_r}\cdot\left(1-\beta\right) + K'_Z(t_E) \qquad (5)$$

worin β den Anteil der Produktionsanlagen darstellt, der eine stetige Versorgung mit elektrischer Energie erfordert.

Die Summe der ökonomischen Verluste von einzelnen Produktionsabteilungen oder Fertigungslinien ergibt die gesamten Verlustkosten für jeden Betrieb:

$$K_V(t_E) = \sum_{i=1}^{n} K'_{V_i}(t_E) \qquad (6)$$

Für eine optimale Strategie zur Minderung des Leistungsmangels im Energieversorgungssystem ist die Ermittlung des ökonomischen Äquivalents der nicht gelieferten elektrischen Energie empfehlenswert, mit dem die zu erwartenden Verluste pro Einheit der nicht gelieferten elektrischen Energie k_E in einem Industrieunternehmen bestimmt werden können. Diese Kennziffer k_E kann für Produktionsabteilungen bzw. für Fertigungslinien aus folgender Definitionsgleichung ermittelt werden:

$$k'_E = \frac{K'_V(t_E)}{\Delta E} \qquad (7)$$

worin $\Delta E = \Delta P \cdot t_E$ die nicht gelieferte elektrische Energie während der Minderung der Leistungsaufnahme um ΔP darstellt.

Gemäss der optimalen Strategie während des Auftretens von Energiemangel sollten Abschaltungen in erster Linie in den Produktionsabteilungen mit den kleinsten Werten von k'_E vorgenommen werden. In diesem Fall sind die dadurch bedingten Verluste minimal. In einigen Spezialfällen kann dieses Verfahren allerdings nicht angewandt werden, etwa bei Kooperationsverpflichtungen, nach denen bestimmte Produkte unbedingt hergestellt werden müssen, oder bei Vorzugsprodukten.

Insgesamt beträgt die ökonomische Kennziffer für Industrieunternehmen

$$k_E = \frac{\sum_{i=1}^{n} K'_{V_i}(t_E)}{\Delta E} \qquad (8)$$

Für praktische Zwecke kann der Koeffizient k_E durch folgendes Näherungsverfahren bestimmt werden: Verwendet man die dargestellten Gleichungen unter der Annahme $t_P = t_E$ $K'_Z = 0$ und $K_Z = 0$, so lässt sich das wirtschaftliche Äquivalent der nicht gelieferten elektrischen Energie für je-

den Industriebetrieb wie folgt ermitteln:

$$k_E = \frac{W - K_W - K_E}{E} \qquad (9)$$

wobei E die nicht verbrauchte elektrische Energie ist.

Der im elektrischen Energieversorgungssystem auftretende Leistungsmangel sollte nach Möglichkeit zwischen den verschiedenen, vorher ausgewählten Industriebetrieben optimal aufgeteilt werden. Mit Hilfe des Optimierungsverfahrens kann die wirtschaftlich günstigste Lösung ausgewählt werden. Ziel ist dabei die Minimierung der gesamten Verluste. Ausgewählt wird diejenige Variante, deren Wert der Zielfunktion am geringsten ist. Eine solche Optimierung wird als wirtschaftliche Leistungsmangelverteilung bezeichnet. Sie hat die «wirtschaftlichste» Aufteilung des bestehenden Leistungsmangels auf die in der Volkswirtschaft vorhandenen Industrieunternehmen zum Ziel. Für jeden Industriebetrieb «i» muss dabei die Abhängigkeit der Verlustkosten vom Leistungsmangel bekannt sein:

$$K_{Vi} = F_i(P_i) \qquad (10)$$

Die gesamten Verluste erhält man durch Summierung über alle Industrieunternehmen:

$$K_{Vges} = \sum_{i=1}^{n} F_i(P_i) \qquad (11)$$

Das Ziel der optimalen Verteilung des Leistungsmangels besteht darin, die Gesamtverluste K_{Vges} zu minimieren, wobei als Nebenbedingung der globale Leistungsmangel vorgegeben ist:

$$P_g = \sum_{i=1}^{n} P_i = P_B - \sum_{1}^{l} P_{Ej} \qquad (12)$$

Führt man diese Optimierung durch, so zeigt sich, dass das Optimum bei gleichen Zuwachsverlustkosten aller Industrieunternehmungen liegt. Unter Zuwachskosten versteht man dabei die erste Abteilung der Verluste eines Betriebes nach dem Leistungsmangel. Die Verluste eines Industrieunternehmens bis zur Grenzleistung P_G stellen eine stetige Funktion dar, die fast immer konvex ist. Aus rechentechnischen Gründen ist es oft zweckmässig, diese Funktion durch eine Potenzfunktion anzunähern

$$K_{Vi} = a_i (P_i)^{m_i} \qquad (13)$$

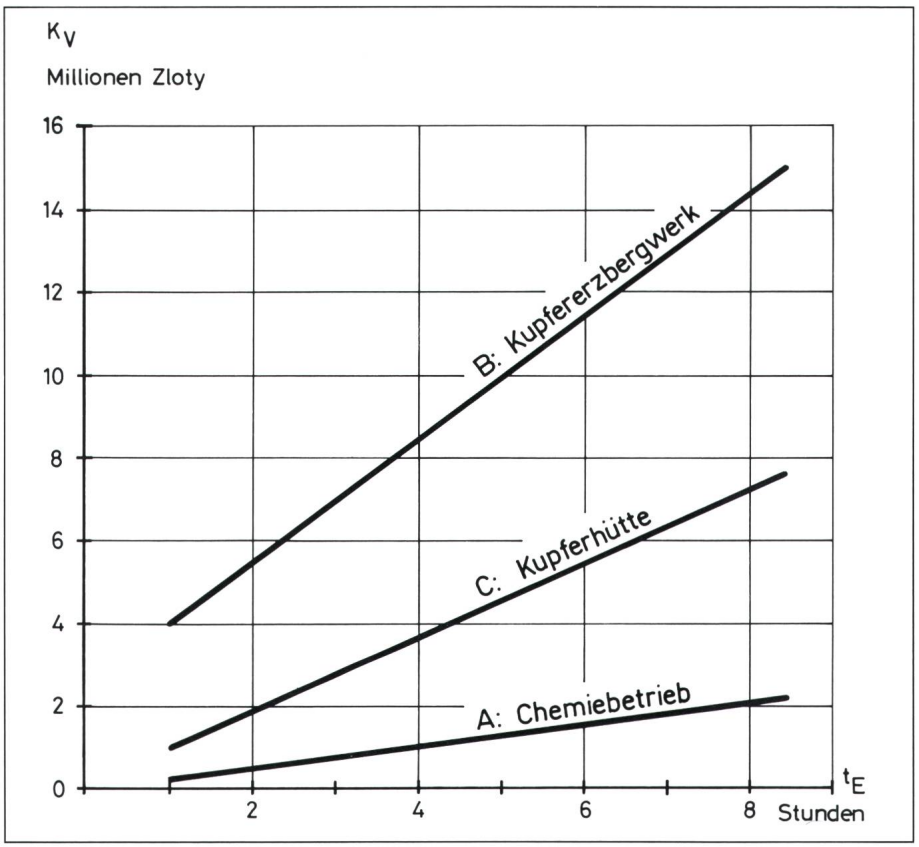

Fig. 1 Zeitlicher Verlauf der Verlustkosten K_V in einem Chemiebetrieb (A), in einem Kupfererzbergwerk (B) und in einer Kupferhütte (C)

t_E Unterbrechungsdauer der Elektroenergieversorgung

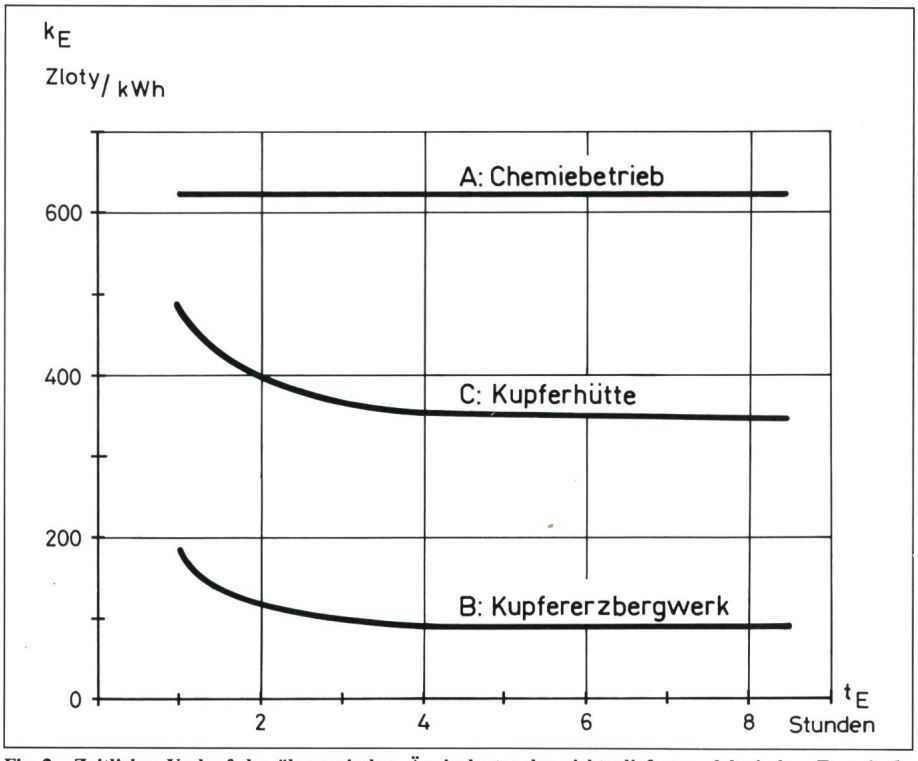

Fig. 2 Zeitlicher Verlauf des ökonomischen Äquivalentes der nichtgelieferten elektrischen Energie k_E für: Chemiebetrieb (A), Kupfererzbergwerk (B) und Kupferhütte (C)

Bei Nichtlinearitäten und Unstetigkeiten der Funktion $K_{Vi} = F_i(P_i)$ kann zur Lösung der Optimierungsaufgabe die dynamische oder die konvexe Programmierung benutzt werden.

3. Bestimmung der Verluste bei industriellen Stromverbrauchern

Die ökonomischen Verluste infolge der Lieferungsbeschränkungen während des Leistungsmangels wurden für den Kupfererzbergbau, das Kupferhüttenwesen und die Chemieindustrie ermittelt. Dabei wurde eine ausführliche Identifizierung der Produktionsprozesse im Hinblick auf Arbeitsweise und Arbeitsbedingungen der wichtigsten Verbraucher von elektrischer Energie durchgeführt. Für die analysierten Industriebetriebe wurden der zeitliche Verlauf der auftretenden Verluste $K_V = F(t_E)$, der zeitliche Verlauf des ökonomischen Äquivalents der nicht gelieferten elektrischen Energie $k_E = F(t_E)$ und die Abhängigkeit der Kosten der Verluste vom Leistungsmangel $K_V = F(P)$ bestimmt.

Zum Vergleich sind diese Zusammenhänge in den Figuren 1 bis 3 für einen Chemiebetrieb (A), für ein Kupfererzbergwerk (B) sowie für eine Kupferhütte (C) grafisch dargestellt. Aus diesen Diagrammen geht unter anderem hervor, dass

- der Wert des analysierten Äquivalentes $k_E = F(t_E)$ für $t_E > 4$ Stunden fast konstant bleibt, was für Vergleichsuntersuchungen eine wesentliche Bedeutung hat;
- der Wert K_V mit zunehmendem Leistungsmangel bzw. zunehmender Leistungsbeschränkung auch gewachsen ist.

Sowohl im Chemiebetrieb wie auch in der Kupferhütte treten Wärmeprozesse von zum Teil beträchtlicher Dauer auf. Unter der Voraussetzung, dass die Unterbrechungsdauer der Energielieferung wesentlich kleiner als die Zeitkonstante des Wärmeprozesses während der Ausschaltung ist, und dass das Zeitintervall zwischen aufeinanderfolgenden Ausschaltungen wesentlich grösser ist als die Zeitkonstante des Prozesses während der Einschaltung -, was in Wirklichkeit für viele Prozesse zutrifft - ergibt sich aus einer Berechnung der Temperaturänderungen dieser Wärmeprozesse infolge der Abschaltungen, dass in den analysierten Industriebetrieben die Temperaturen sich während der Aus- und Einschaltungen gegenüber dem Beharrungszustand nur unbeträchtlich ändern.

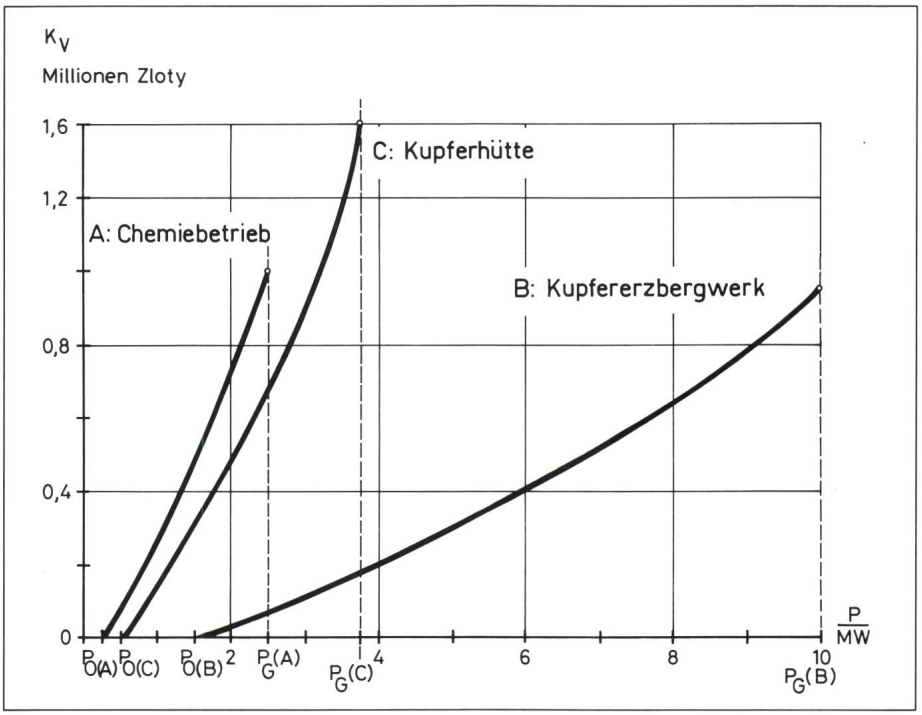

Fig. 3 Abhängigkeit der Verlustkosten vom Leistungsmangel P für t_E = 1 Stunde in: Chemiebetrieb (A), Kupfererzbergwerk (B) und Kupferhütte (C)

P_G Maximale Leistungsaufnahmebegrenzung, bis zu welcher nur Produktionsverluste auftreten.
P_O Leistungsaufnahmebegrenzung, bis zu der die Verlustkosten fast Null sind.

Diese Betrachtungen zeigen, dass es in diesen Betrieben während des Leistungsmangels zweckmässig ist, Rotationsabschaltungen der dazu vorgesehenen Produktionsabteilungen, Produktionsprozesse und Fertigungslinien vorzunehmen. In Verbindung mit anderen Industriebetrieben - um ungünstige Abschaltungen einzelner Produktionsabteilungen und Fertigungslinien zu vermeiden - kann ein solches Unternehmen zur Verminderung des Leistungsbezuges herangezogen werden. Bei zu grossen und zu lange dauerndem Leistungsmangel können diese Vorbeugungsmassnahmen allerdings ungenügend sein.

Darüber hinaus kann man in allen Industriebetrieben bestimmte Anlagen und Produktionseinrichtungen aussondern, deren Rotationsabschaltung infolge Leistungsmangels entweder nur geringe oder fast keine Verluste hervorruft. Die Ergebnisse eines solchen Verfahrens sind aus Figur 3 ersichtlich, wo bis zur Leistungsbegrenzung P_0 die Kosten der Verluste fast Null sind.