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: 73 (1982)

Heft: 10

Artikel: Stromrationierung in Krisenzeiten : ein mathematisches Modell als Entscheidungshilfe

Autor: Ambühl, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904966

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: 15.07.2025

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

denen und Entwicklung neuer Systeme, Nichtverträglichkeiten unter Wahrung wirtschaftlicher Aspekte zu vermeiden, bedarf der Mithilfe aller.

Literatur

[1] *Feist K.-H.:* Probleme und Grenzen der Erdungstechnik in Höchstspannungsnetzen. Siemens-Publikation, Drehstrom-Hochspannungsübertragung, S. 38 bis 46.

[2] *Gampenrieder Richard:* Die Bestimmung des Umgebungsreduktionsfaktors durch Vergleich von gemessenen mit berechneten Beeinflussungsspannungen. Elektrizitätswirtschaft Jg. 75(1976), Heft 19, S. 619...620.

[3] *Gampenrieder Richard:* Das Problem der einpoligen Erdkurzschlußströme in Höchstspannungsnetzen. Elektrizitätswirtschaft Jg. 73(1974), Heft 22, S. 653 bis 657.

[4] *Dennhardt Alfred:* Weiterentwicklung der elektrischen Systeme vom Gesichtspunkt der elektrischen Beeinflussungstechnik. Elektrizitätswirtschaft Jg. 63 (1964), Heft 22, S. 769...773.

[5] *Busch H.-G., Gampenrieder R., Hass D., Pels-Leusden G., Zimmermann H.:* Zur Zukunft der Drehstrom-Höchstspannungs-Übertragung in Deutschland – Modelluntersuchungen. Bericht 31–13 zur Cigre-Tagung 1978.

[6] *von Sanden Dieter:* Mehr als nur telefonieren – neue Leistungen des Telefons. Siemens-Zeitschrift 53(1979), Heft 1, S. 6...10.

[7] *Kuhnert Ekkehard:* Gedanken zur elektromagnetischen Verträglichkeit und den Grenzen des Wachstums. Bull. SEV/VSE 71(1980)2, 26. 1. 80, S. 51...53.

Adresse des Autors

R. Gampenrieder, Dipl.-Ing., Bayernwerk Aktiengesellschaft, Blutenburgstrasse 6, D-8000 München 2.

Stromrationierung in Krisenzeiten: Ein mathematisches Modell als Entscheidungshilfe

Von M. Ambühl

In Krisenzeiten kann die Elektrizitätsversorgung stark gestört sein, so dass die Nachfrage das Stromangebot deutlich übersteigt. In dieser Situation stellen sich im wesentlichen zwei Fragen: Wie soll die knappe Energie möglichst «optimal» auf die Verbrauchergruppen verteilt werden, und wie kann die Elektrizitätsnachfrage entsprechend beeinflusst werden? Hierzu wird ein mathematisches Modell vorgestellt, das als Entscheidungshilfe – als eine Art Planspiel – gedacht ist.

En temps de crise, l'approvisionnement en électricité peut être fortement perturbé, entraînant une demande dépassant largement l'offre d'électricité. Dans cette situation, se posent deux questions essentielles: Comment distribuer le peu d'énergie disponible de manière optimale aux divers groupes de consommateurs et comment influencer en conséquence la demande d'énergie? Un modèle mathématique destiné à faciliter la prise de décision – du type du jeu d'entreprise – est présenté dans ce but.

1. Einleitung

1.1 Problembeschreibung

Weite Bereiche unseres privaten und öffentlichen Lebens hängen von einer gesicherten Elektrizitätsversorgung ab. In Krisenzeiten kann diese ernsthaft gestört sein. Eine Krisensituation kann z.B. durch kriegerische Handlungen, durch politische Wirren, durch grossen Mangel an Brennstoffen usw. verursacht werden.

Diese Arbeit befasst sich nur mit denjenigen Krisen, die durch Ereignisse verursacht werden, die ausserhalb der energiepolitischen Alltagsdiskussion liegen.

Im folgenden soll untersucht werden, wie in einer solchen, sehr ernsthaften Krise, in der die Nachfrage wesentlich grösser als das Angebot ist, die knappe Energie möglichst «optimal» auf die Verbraucher verteilt werden kann.

Annahmen: Es sei angenommen, dass die Daten über den Konsum von elektrischer Energie in einem sogenannten Normaljahr (Jahr, in dem genügend Energie verfügbar war) bekannt sind, und zwar für jeden Sektor und jedes planungsrelevante Zeitintervall (Tag, Woche oder Monat). Unter einem Sektor versteht man in diesem Zusammenhang einzelne Wirtschaftssektoren, Verbrauchergruppen, wie z.B. Gewerbe, Industrie, Haushalte, öffentlicher Verkehr, öffentliche Beleuchtung, Spitäler usw.

Diese Abnehmergruppen können, falls notwendig und erwünscht, noch nach geographischen Gesichtspunkten unterteilt werden.

Gegeben sei ferner die gesamte elektrische Energie, die in einem bestimmten Planungszeitraum, z.B. im besonders kritischen Winterhalbjahr, verfügbar ist. Diese sei, wie erwähnt, kleiner als die im entsprechenden Zeitraum zur Verfügung stehende Energie im Normaljahr. Aus diesem Umstand heraus ergibt sich somit für jeden Sektor ein mehr oder weniger grosser *Energiemangel.*

Ausserdem seien Massnahmen zur Beeinflussung der Elektrizitätsnachfrage sowie deren Auswirkungen bekannt.

1.2 Problemlösungsidee

Das Problem, wie die knappe Energie möglichst «optimal» auf die Sektoren zu verteilen sei, soll in zwei Phasen gelöst werden.

In einer *1. Phase* (Kap. 2) soll für jeden Sektor eine «optimale Energieration» ermittelt werden. Da im realen Netz die Möglichkeit – das technische Instrumentarium – fehlt, die Energierationenverteilung, d.h. die Zuteilung der Energierationen an die einzelnen Verbrauchergruppen, vorzunehmen, soll in einer *2. Phase* (Kap. 3) untersucht werden, mit welchen Massnahmen die Nachfrage geeignet beeinflusst werden kann.

2. Optimale Energieration (1. Phase)

2.1 Problemlösungsmöglichkeiten

Das Energierationenproblem lässt sich natürlich auf verschiedene Arten lösen.

Eine *einfache Lösung* ist sicherlich folgende:

Man stellt jeder Verbrauchergruppe, jedem Sektor, im Krisenjahr den prozentual gleichen Anteil an elektrischer Energie wie im Normaljahr zur Verfügung.

Diese einfache Lösung ist aber nicht notwendigerweise auch die beste. Man könnte hier etwa die folgenden *Einwände* anbringen:

1. Es ist durchaus denkbar, dass ein Sektor – man denke z.B. an den öffentlichen Verkehr oder an das Spitalwesen – eine bestimmte, absolute Mindestenergiemenge braucht, um seine Funktion überhaupt noch ausüben zu können. Erhielte er weniger als die Minimalenergie, so stellte dies eine sinnlose Energiezuteilung dar.

2. Man kann sich auch leicht vorstellen, dass bestimmte Sektoren «lebensnotwendiger» sind als andere, dass man bei eben diesen wichtigeren Sektoren weniger Elektrizität einsparen kann und darf als bei anderen. So wird z.B. die Strassenbeleuchtung – an sich etwas sehr Nützliches – in Krisenzeiten sicherlich nicht gleich wichtig wie z.B. ein Notspital sein. Die

unterschiedliche Wichtigkeit ist in der einfachen Lösung nicht berücksichtigt.

3. Die einfache Lösungsvariante mit ihrer «proportionalen Kürzungsmethode» läuft ausserdem Gefahr, Sektoren, welche schon in Normaljahren Energie gespart haben, in Krisenzeiten eine gegenüber anderen Sektoren ungerecht kleine Energieration zuzuteilen.

4. Man darf annehmen, dass *kleine* Energiefehlmengen, die jeder Sektor in unterschiedlicher Grösse im Krisenjahr auf sich zu nehmen hat, wesentlich leichter, d.h. überproportional leichter, zu verkraften sind als *grosse* Energiefehlmengen, z.B. aufgrund geeigneter Ausnutzung von Sparmöglichkeiten, Einführung von Rationalisierungsmassnahmen usw.

Wir wollen diese vier Einwände berücksichtigen und der einfachen Lösungsvariante einen Modellansatz entgegenstellen, der ein sogenanntes *mathematisches Optimierungsmodell* (ein spezielles Operations-Research-Modell) beinhaltet.

2.2 Ein Energierationenberechnungsmodell

Dem 1. Einwand (Abschn. 2.1) wird durch Einführung einer sogenannten Mindestenergiemenge Rechnung getragen, dem 2. und 3. durch Einführung eines sogenannten Sektorwichtigkeitsfaktors, der die unterschiedliche Wichtigkeit, die politische und volkswirtschaftliche Bedeutung des Sektors charakterisiert. Der 4. Einwand schliesslich wird durch eine quadratische Zielfunktion berücksichtigt.

Mit i bezeichnen wir die i-te Periode – das i-te Zeitintervall – im Planungszeitraum, also z.B. je nach Feinheitsgrad den i-ten Tag, die i-te Woche oder den i-ten Monat, $i = 1, ..., i_0$, und mit s den Sektor s, $s = 1, ..., s_0$.

Gegeben sei

aus dem *Normaljahr:*

e_{is} = Energienachfrage im Normaljahr, Periode i, Sektor s, wobei

$$E = \sum_{i=1}^{i_0} \sum_{s=1}^{s_0} e_{is}$$

die Gesamtelektrizitätsenergienachfrage im Zeitraum von i_0 Perioden im Normaljahr ist;

für das *Krisenjahr:*

d_i = verfügbare Bandenergie im Krisenjahr, Periode i, wobei

$$D = \sum_{i=1}^{i_0} d_i$$

die Gesamtbandenergie für den Zeitraum von i_0 Perioden im Krisenjahr ist.

R Gesamtspeicherenergie für i_0 Perioden
λ_s Sektorwichtigkeitsfaktor, $\lambda_s > 0$, $\forall_s$
u_{is} Mindestenergiemenge, Periode i, Sektor s

All diese Grössen sind bekannt bzw. von den Entscheidungsträgern festgelegt.

Gesucht ist:

x_{is} = Energiemenge für den Sektor s, Periode i, im Krisenjahr.

Sei z_i die Speicherenergie für die Periode i, dann gilt die Beziehung

$$\sum_s x_{is} = d_i + z_i, \ \forall_i \qquad (1)$$

Das Problem lässt sich nun wie folgt als mathematische Optimierungsaufgabe formulieren:

$$\min \sum_{i=1}^{i_0} \sum_{s=1}^{s_0} \lambda_s (e_{is} - x_{is})^2$$

$$\text{bzgl.} \sum_{i=1}^{i_0} z_i \leq R \qquad (2)$$

$$z_i \geq 0, \ V_i$$

$$x_{is} \geq u_{is}, \ \forall_i, \ \forall_s$$

Mit Beziehung (1) wird (2) zu nachstehender Optimierungsaufgabe (OA):

$\min \sum_i \sum_s \lambda_s (e_{is} - x_{is})^2$	Quadratische Zielfunktion
bzgl.	Nebenbedingungen:
$\sum_i \left(\sum_s x_{is} - d_i\right) \leq R$	Es darf insgesamt nicht mehr als R aus dem Speicher entnommen werden
$\sum_s x_{is} - d_i \geq 0, \ \forall_i$	Keine Zuflüsse in den Speicher (Pumpen vernachlässigt)
$x_{is} \geq u_{is}, \ \forall_i, \ \forall_s$	Mindestenergiemenge

Bemerkungen zum Modell

1. Die Optimierungsaufgabe (OA) stellt eine nichtlineare konvexe Minimierungsaufgabe dar. Dieses Problem liesse sich mit einem «konventionellen» Optimierungsverfahren (Wolfe, Beale, Cottle-Dantzig, SUMT, Powell usw., siehe z.B. [1], [2], [3]) lösen. Nehmen wir nun aber beispielsweise an, der Planungszeitraum sei das Winterhalbjahr – i_0 wäre somit (mit einer Periodenlänge von einem Tag) gleich 180 – und die Verbraucher liessen sich in 15 Sektoren einteilen – s_0 wäre somit gleich 15 –, dann hätten wir eine Aufgabe mit 2700 Variablen und 2881 Restriktionen zu lösen. Also ein grosses Problem. In Anbetracht der Grösse einer realen Aufgabe und den damit verbundenen numerischen Schwierigkeiten ist vom Autor ein *spezieller Algorithmus* entwickelt worden, welcher auch eine grosse Aufgabe auf einem Computer sehr schnell löst. In [4] ist für ein *Testnetz* mit realen Daten einer Region eine Aufgabe mit 17 Sektoren und 180 Tagen mit Hilfe dieses Algorithmus in nur ca. 5 s CPU-Zeit gerechnet worden. Der Algorithmus ist in [7] beschrieben.

2. Das Modell liefert nur Unterlagen für eine *Grobplanung,* insbesondere ist die Leistungsproblematik nicht berücksichtigt, auf die mit Hilfe eines andern Modells eingegangen werden kann. Das Modell ist eine Art *Planspiel.* Es wird somit zweckmässig sein, das Modell verschiedene Male durchzurechnen, und zwar mit unterschiedlichen Eingabedaten, z.B. mit unterschiedlichen Sektorwichtigkeiten, deren Einfluss auf die Energiezuteilungen sich dann abschätzen lässt.

3. Die Entscheidungsträger, die Benutzer des Modells, müssen die Eingabedaten ermitteln bzw. schätzen. Selbstverständlich löst das Modell das «*Datenproblem*» nicht, es liefert in Abhängigkeit der Eingabedaten nur Aussagen über die *Auswirkungen* auf die Energierationen.

Der Benutzer muss den *Feinheitsgrad des Modells* selbst bestimmen. Er muss bestimmen, ob er nun die Energierationen pro Verbrauchergruppe für jeden einzelnen Tag oder nur für jeden Monat berechnen will. Es ist ihm überlassen, wie er die Verbraucher in verschiedene Sektoren aufteilen will, ob er eine feine oder grobe Unterteilung wählen will, ob er reale oder hypothetische Daten brauchen will oder nicht.

Ausserdem muss er – wie schon erwähnt – die Sektorwichtigkeiten wählen. So gesehen, lässt das Modell viele «Spielarten» zu.

4. Wie schon in Abschnitt 1.2 erwähnt, kann mit den in einem realen Netz existierenden Möglichkeiten das Energierationen*verteilungs*problem, die Zuteilung der Energierationen an die einzelnen Verbrauchergruppen, nicht gelöst werden. Die Berechnung der optimalen Energieration ist lediglich eine Planungsgrösse für das weitere Vorgehen (2. Phase, Kap. 3).

3. Nachfragebeeinflussung (2. Phase)

Es sei angenommen, dass in der 1. Phase (Kap. 2) die optimale Energieration für jeden Sektor s und jedes Zeitintervall i (Tag, Woche, Monat) berechnet wurde. In diesem Kapitel sei nun untersucht, wie die Elektrizitätsnachfrage so beeinflusst werden kann, dass die Nachfrage möglichst gleich der optimalen Energieration aus Kapitel 2 ist.

3.1 Massnahmenkatalog

Es sei unterstellt, dass man eine Reihe von Massnahmen, mittels deren man die Energienachfrage beeinflussen kann, und deren Auswirkungen kennt. In diesem Zusammenhang sei auf Studien hingewiesen, die Auswirkungen von Massnahmen auf den Energieverbrauch bzw. die Energienachfrage untersuchen (siehe [5], [6]). In unserem Katalog von Massnahmen seien z.B. marktkonforme und dirigistische, einschneidende und wenig wirksame, «gerechte» und weniger «gerechte» Massnahmen enthalten. Denkbar sind beispielsweise:

Gütliches Zureden (Sparappell), Einführung unterschiedlicher Tarifstrukturen, Verbot von bestimmten Anlagen und Geräten (z.B. von Freiluftheizungen), Abschalten von bestimmten Netzen.

In diesem Zusammenhang sind Arbeiten des Bundesamtes für Energiewirtschaft über Massnahmen zur Einschränkung des Elektrizitätsverbrauches erwähnenswert.

3.2 Ein Massnahmenwahlmodell

Grundsätzlich kann festgehalten werden: Jede Massnahme kann entweder ergriffen werden oder aber nicht. Damit steht man nun vor dem *Entscheidungsproblem,* welche Massnahmen ergriffen werden sollen, so dass die beeinflusste Nachfrage möglichst nahe an die optimale Energieration aus Kapitel 2 herankommt. Nachstehend sei nun ein Modell vorgestellt, mit dem man dieses Entscheidungsproblem untersuchen kann.

Gegeben sei ein Massnahmenkatalog mit Massnahmen

$m = 1, ..., m_0.$

Die Massnahme m habe auf die Nachfrage folgende Auswirkung:

$h_{mis} = e_{is} \cdot \varrho_{mis},$

wobei h_{mis} die beeinflusste Nachfrage, $\varrho_{mis} \leqq 1$ der Einflussfaktor und e_{is} die Normalnachfrage ist (m = Massnahme; i = Periode; s = Sektor). Das oben erwähnte Entscheidungsproblem wollen wir mittels einer *heuristischen Methode* lösen:

Die Massnahmen werden in k_0 verschiedene Prioritätsklassen eingeteilt, und zwar so, dass in der 1. Prioritätsklasse nur Massnahmen eingeteilt sind, die man noch ohne grössere Bedenken ergreifen könnte, und in der k_0-ten Prioritätsklasse nur solche, die man erst im äussersten Notfall ergreifen möchte. In jeder der k_0 Prioritätsklassen sollen sich höchstens drei Massnahmen befinden.

Die Einteilung der Massnahmen in diese eben beschriebenen Prioritätsklassen ist eine Frage der Bewertung, der Beurteilung, sie ist somit Sache der Entscheidungsträger. Eine solche Einteilung könnte beispielsweise aufgrund eines Kriterienplans – mit den Kriterien «Wichtigkeit», «politische Akzeptanz», «Realisierbarkeit» usw. – vorgenommen werden.

Der Reihe nach wird nun für jede Prioritätsklasse k ($k = 1, ..., k_0$) entschieden, welche Massnahmen ergriffen werden sollen. Das Entscheidungsproblem wird also *stufenweise,* d.h. prioritätsklassenweise, gelöst.

Sei $y_m \in \{0,1\}$ Entscheidungsvariable, mit

$$y_m = \begin{cases} 1 & \text{Massnahme } m \text{ wird ergriffen} \\ 0 & \text{Massnahme } m \text{ wird nicht ergriffen} \end{cases}$$

Sei ferner

$h_{is}^{(k)}$ die beeinflusste Nachfrage unter Berücksichtigung nur der gewählten Massnahmen aus den ersten k Prioritätsklassen (insbesondere ist $h_{is}^{(0)} = e_{is}, \forall_i, \forall_s$)

und

M_k die Menge der Massnahmen aus der Prioritätsklasse k

$\bar{x}_{is}$ die Lösung der Optimierungsaufgabe (OA) aus Kapitel 2. $\bar{x}_{is}$ ist somit die optimale Energieration

Für jede Prioritätsklasse k muss nun das folgende *ganzzahlige Optimierungsproblem* gelöst werden:

$$\left.\begin{array}{l} \min \sum_i \sum_s \left[\left\{ h_{is}^{(k-1)} \cdot \prod_{m \in M_k} (\varrho_{mis} \cdot y_m + 1 - y_m) \right\} - \bar{x}_{is} \right]^2 \\ \text{bzgl. } h_{is}^{(k-1)} \cdot \prod_{m \in M_k} (\varrho_{mis} \cdot y_m + 1 - y_m) \geq u_{is}, \forall_i, \forall_s) \\ y_m \in \{0,1\}, \forall_m \in M_k \end{array}\right\} \quad (3)$$

Bemerkungen zu (3)

1. Die Zielfunktion ist eine sogenannte pseudo-boolesche Funktion. Es sollen die quadrierten Differenzen zwischen der beeinflussten Nachfrage und der optimalen Energieration $\bar{x}_{is}$ minimiert werden, unter Einhaltung der Mindestenergiemengen-Restriktionen sowie der Ganzzahligkeitsbedingung.

2. Auf das Verfahren zur Lösung von (3) soll hier nicht näher eingegangen werden.

3. Zusammengefasst: Unterstellt man, dass man den Einfluss von bestimmten Massnahmen auf die Energienachfrage kennt, so kann mittels des beschriebenen Modells jedem Entscheidungsträger aufgrund seiner Massnahmen-Prioritätsklasseneinteilung, d.h. Präferenzordnung, gezeigt werden, welche Massnahmen ergriffen werden müssten und welche nicht, um eben die Nachfrage so zu beeinflussen, dass sie möglichst nahe bei der optimalen Energieration liegt.

Literatur

[1] *Kall, P.:* Math. Methoden des Operations Research, Teubner, 1976.
[2] *Luenberger, D.:* Introduction to Linear and Nonlinear Programming, Addison-Wesley, 1973.
[3] *Gill, P., Murray, W., Wright, M.:* Practical Optimization, Academic Press, 1981.
[4] *Rüst, L.:* Implementation eines Algorithmus für die Elektrizitätswirtschaft, Studienprojekt, Institut für OR der Universität Zürich, 1982.
[5] La demande d'éléctricité en Suisse. Analyse historique et perspectives, Schriftreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Nr. 9, 1980.
[6] Auswirkungen von möglichen Sparmassnahmen des Bundes auf die Elektrizitätsnachfrage, Schriftreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Nr. 10, 1980.
[7] *Ambühl, M.:* Ein Algorithmus für ein Rationierungsmodell, Manuskript, Institut für OR der Universität Zürich, 1982.

Adresse des Autors

Michael Ambühl, Dr.sc.techn., Institut für Operations Research der Universität Zürich, Weinbergstrasse 59, 8006 Zürich.