

ANWENDUNG EINES ENERGIEABNAHMEKORRIDORS AUF DER EBENE DER HAUPTPRODUKTIONSPROGRAMMPLANUNG

Robert Forstner,

Technische Universität Dresden, Deutschland

Thorsten Claus,

Technische Universität Dresden, Deutschland

Frank Herrmann,

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Deutschland

Die Grundlagen der modernen Forschung zur Produktionsplanung und –steuerung basieren häufig auf dem Planungskonzept von Drexl et al. [3], das wiederum die Leitlinien von Hax u. Meal [5] für eine hierarchische Planungsintegration aufnimmt. So war die Hauptforderung von Drexl et al. [3] die zusätzliche Berücksichtigung von limitierten Ressourcenauf mehreren hierarchischen Planungsebenen. Nach einer aggregierten, standortübergreifenden Vorplanung soll dabei die *kapazitierte Hauptproduktionsprogrammplanung* (HPPLAN) als zentrales Planungsmodul die Produktionsprogramme für Endprodukte unter Berücksichtigung der verfügbaren Kapazitäten in verschiedenen Produktionssegmenten eines Standortes bestimmen. Durch die Verwendung von Kapazitätsbelastungsfaktoren wird dabei auch die Produktion von Vorprodukten und die horizontale Verflechtung zwischen einzelnen Produktionssegmenten in die Problemlösung integriert. Zur Bestimmung der Produktionsprogramme der Endprodukteschlagen die Autoren dabei lineare Optimierungsmodelle vor, die Lagerhaltungskosten und ressourcenbezogene Kosten minimieren [3]. Ein lineares Optimierungsmodell für HPPLAN findet sich etwa in Günther u. Tempelmeier ([4], S. 151 f.) oder in Claus, Herrmann u. Manitz ([2], S. 7 ff.).

Die Grundüberlegungen von Hax u. Meal [5] und Drexl et al. [3] wurden im Laufe der Jahre auch um Energieaspekte im Bereich der Forschung zur energieeffizienten Produktionsplanung (EEPP) erweitert. So ist laut Biel u. Glock in den Jahren von 1993 bis 2012 nicht nur der globale Energieverbrauch um 50% gestiegen. Auch die Anzahl an jährlichen Veröffentlichungen zur EEPP – und ein damit verbundenes Interesse von Forschern – hat im selben Zeitbereich signifikant zugenommen (von unter 5 auf über 20) [1]. Da der Anstieg des globalen Energieverbrauches von 2015 bis 2040 auf weitere 28% – mit dem stärksten Anstieg von über 50% im asiatischen Bereich – prognostiziert wird [7], ist von einem anhaltenden Energiereisourcenproblem und einem damit verbundenen Interesse an EEPP auszugehen. Dies ist auch damit zu begründen, dass organisatorische Änderungen in der Produktionsplanung kostengünstiger umzusetzen sind als mögliche Investitionen in energieeffizientere Anlagen [1]. Für einen umfassenden Überblick zur Forschung im Bereich der EEPP sei ebenfalls auf Biel u. Glock [1] verwiesen.

Als Beitrag zur Forschung im Bereich der EEPP soll in dieser Arbeit ein Preismodell vorgestellt werden, das auf die Glättung des Energieverbrauchs eines produzierenden Großabnehmers über mehrere Perioden in einem Planungshorizont abzielt. Als Intention soll dabei das Interesse der Stromanbieter genannt werden, die mit unterschiedlichen Preismodellen versuchen, eine Stromnachfrage mit geringerer Volatilität zu induzieren. Dies erlaubt den Anbietern wiederum ihre Netzauslastungen und entsprechende Ausgleichskapazitäten gleichmäßiger zu planen [8].

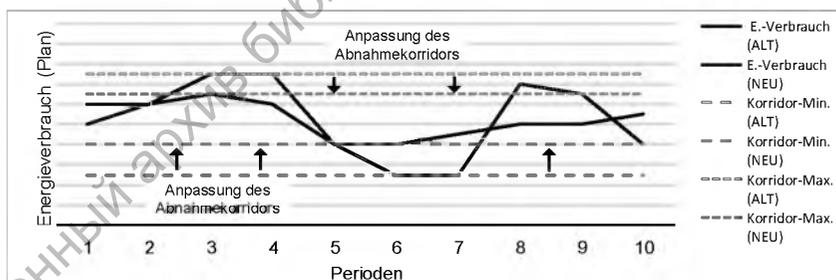


Abbildung 1: Minimierung eines Energieabnahmekorridors im Planungshorizont

Zur Glättung des Strombedarfs eines Unternehmens wird in dem vorgestellten Preismodell ein erlaubter Stromabnahmekorridor im Planungshorizont eingeführt. Der Energieverbrauch über alle Produktionssegmente und pro Periode muss dabei innerhalb der Grenzen dieses Korridors liegen. Wie in Abbildung

1 dargestellt, soll der Abnahmekorridor dabei nicht nur vom Stromanbieter strikt vorgegeben, sondern darüber hinaus auch seitens des produzierenden Unternehmens (unter Berücksichtigung weiterer Restriktionen wie Nachfragemengen und erlaubter Kapazitäten pro Periode) minimiert werden. Korrekturen des Energieverbrauches in Form von Verlagerungen in andere Perioden haben dabei jedoch auch Auswirkungen auf die pro Periode produzierten Produktmengen. Werden korridor-induzierte Vorverlagerungen durchgeführt, so werden Produkte verfrüht produziert und somit auf Lager gelegt. Eine Verschiebung auf spätere Perioden könnte Verspätungen von Fertigstellungsterminen zur Folge haben, dies ist allerdings im dargestellten Ansatz derzeit nicht zulässig. Für eine Umsetzung des Preismodells auf der Ebene der HPPLAN wäre somit hauptsächlich ein Ausgleich zwischen der Anhäufung von Lagerbestand, der Nutzung von Zusatzkapazität und der Gestaltung des Energieabnahmekorridors zu bestimmen.

Um bei der Korridorminimierung auch die wirtschaftlichen Interessen der strom-verbrauchenden Unternehmen zu berücksichtigen, legt das Preismodell einen umso niedrigeren Strompreis pro Verbrauchseinheit zugrunde, je geringer die bestimmte Breite des geplanten Stromabnahmekorridors ausfällt. Als Basis dient dabei ein Fixpreis pro Verbrauchseinheit ($E_{FixPreis}$), zu dem noch ein variabler Anteil addiert wird. Dieser zusätzliche Anteil besteht aus einem fixen Kostensatz pro Verbrauchseinheit ($E_{KorrBreiteKS}$), der mit der zu bestimmenden Korridorbreite ($E_{VerbrKorrBreite}$) multipliziert wird. Der so ermittelte Energiepreis pro Verbrauchseinheit wird wiederum mit dem gesamten Energieverbrauch im Planungshorizont ($E_{VerbrGes}$) multipliziert, um auch die gesamten Energiekosten zu berücksichtigen. Zur Umsetzung des beschriebenen Preismodells und zu dessen Integration in die Produktionsplanung kann das **lineare Optimierungsmodell** zur **HPPLAN** aus [4] um nachfolgende **Zielfunktion** erweitert werden. (Auf dieses Modell sei auch zur Erläuterung der weiteren Entscheidungsvariablen und Parameter verwiesen.)

$$\text{Minimiere } Z = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T h_k \cdot y_{kt} + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J co_t \cdot o_{jt}$$

$$+ (E_{VerbrKorrBreite} \cdot E_{KorrBreiteKS} + E_{FixPreis}) \cdot E_{VerbrGes}$$

Die ersten beiden Summanden minimieren dabei entsprechend dem Modell aus [4] die gesamten Lagerkosten und die genutzte Zusatzkapazität in allen Perioden. Der hinzugefügte Summand erweitert die ursprüngliche Zielfunktion um die Kosten für den gesamten Energiebedarf. Auf eine reine Integration des Energiepreises (nur mit fixen und variablen Anteil) wurde zunächst verzichtet, um eine geringere Gewichtung des Energiepreises (aufgrund dessen relativ nied-

rigen Niveaus) innerhalb der Zielfunktion zu vermeiden. Zudem wird der gesamte Energieverbrauch im Planungshorizont derzeit als konstanter Parameter verwendet, der basierend auf vorab geschätzten Energieverbräuchen ermittelt wird. Daraus folgt, dass im Entscheidungsmodell lediglich die Verteilung der Energieverbräuche auf einzelne Perioden bestimmt wird, nicht jedoch deren Gesamthöhe. Würde neben der *EVerbrKorrBreite* auch der *EVerbrGes* als Entscheidungsvariable definiert, so wäre eine multikriterielle Zielfunktion gegeben, die mit speziellen Lösungsverfahren zu behandeln wäre.

Zur Einhaltung und Bestimmung des Energiekorridors wird das **Optimierungsmodell** aus [4] zudem um nachfolgende **Restriktionenerweiterung**. Zunächst wird dabei die Entscheidungsvariable für den Energieverbrauch pro Periode (*EVerbrPer_t*) bestimmt. Dazu wird analog zum Kapazitätsbelastungsfaktor ein **Energiebelastungsfaktor** (fE_{jkz}) für End- und Vorprodukte in einer Produktstruktur herangezogen, um die Energieverbräuche zur Produktion der Endprodukte sowie der Produktion von Vorproduktenentsprechend der Vorlaufperioden zu berücksichtigen. Zudem erfolgt die Verbrauchsermittlung derzeit kumuliert auf alle Produktionssegmente.

$$(1) EVerbrPer_t = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{z=0}^{Z_k} fE_{jkz} * x_{k,t+z}$$

Neben der Festlegung des Energieverbrauches pro Periode, ermöglichen die weiteren zusätzlichen Restriktionen die **Einhaltung des Korridors** und die **Ermittlung der *EVerbrKorrBreite***.

$$(2) EVerbrPer_t \geq EVerbrMinPer$$

$$(3) EVerbrPer_t \leq EVerbrMaxPer$$

$$(4) EVerbrPer_t - EVerbrMinPer \leq EVerbrKorrBreite$$

$$EVerbrMaxPer - EVerbrPer_t \leq EVerbrKorrBreite$$

Die vorgestellten Modellerweiterungen sollen im Rahmen der zukünftigen Forschung noch ergänzt werden. So kann etwa die Lösung der Korridorbreite auf ein Vielfaches einer Korridorbreiteneinheit eingeschränkt werden, um die Lösungsmöglichkeiten für komplexere Datenmodelle zu limitieren. Auch könnte eine weitere externe Vorgabe einer maximalen Energieabnahme pro Periode als Folge einer vertraglichen Vorschrift definiert werden. Zudem wird eine zeitabhängige Stückelung des Energieabnahmekorridors geprüft, sodass der Korridor auch auf schwankende Produktionsmengen optimal angepasst werden kann und nicht einheitlich für den gesamten Planungshorizont angenommen wird. Des Weiteren soll auch eine (planerische) Verletzung des Korridors berücksichtigt werden, die entsprechend mit Bestrafungskosten für eine Unter- oder Überschreitung der Korridor Grenzen belegt wird.

Außerdem soll in einem weiteren Forschungsschritt simulativ untersucht werden, ob der vorgegebene Energieabnahmekorridor im realen Betrieb, bei dem nach Materialbedarfsplanung (Material Requirement Planning, MRP) geplant wird, auch eingehalten werden kann. So wird derzeit vermutet, dass der vorgegebene Produktionsplan etwa in einer Werkstattfertigung zu Verspätungen bei Kundenaufträgen führt oder die simulativ ermittelten Energiebedarfe der Operationen pro Periode den vorgegebenen Korridor nicht einhalten werden. Zur Erstellung von entsprechenden Studien wird das angepasste Optimierungsmodell in eine Simulationsumgebung integriert, um die Ergebnisse eines HPPLAN-Planungslaufes als Vorgaben in simulativ abgebildeten Produktionsumgebung untersuchen zu können. Neben der Untersuchung der Korridorerefüllung können dabei als weitere mögliche Untersuchungsgegenstände von Langzeitstudien sowohl die Ausbalancierung des Korridors und der notwendigen Vorproduktion als auch der potentielle Einfluss des gesamten Energieverbrauches in der Zielfunktion herausgearbeitet werden, um die oben genannten Vermutungen zu bestätigen.

REFERENCES

1. Biel, K.; Glock, C. H. (2016). *Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning*. Computers & Industrial Engineering 101, 243–259.
2. Claus, T.; Herrmann, F.; Manitz, M. (Hrsg.) (2015). *Produktionsplanung und -steuerung*. Forschungsansätze, Methoden und deren Anwendung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
3. Drexl, A.; Fleischmann, B.; Günther, H.-O.; Stadtler, H.; Tempelmeier, H. (1994). *Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS-Systeme*. Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung 46, 1022–1045.
4. Günther, H.; Tempelmeier, H. (2016). *Produktion und Logistik*. 12. Aufl. Nordestedt: Books on Demand.
5. Hax, A. C.; Meal, H. C. (1973). *Hierarchical integration of production planning and scheduling*. Technical Report. Cambridge, MA: Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.
6. Jacobs, F. R.; Berry, W. L.; Whybark, D. C.; Vollmann, T. E. (2011). *Produktion Planning and Control for Supply Chain Management*. APICS/CPIM Certification Edition. New York: McGraw-Hill Education LLC.
7. U.S. Energy Information Administration (2017). *International Energy Outlook 2017*. Link: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf) (Zugriff 30.04.2018)
8. Behrangrad, M. (2015). *A review of demand side management business model in the electricity market*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 47, 270–283.