

Abschlussbericht für das Max-Buchner Forschungsstipendium 3325 „Methodik zur Bewertung der Flexibilität verfahrenstechnischer Produktionskonzepte im Kontext der Marktentwicklung“

Antragsteller: Dr.-Ing. Christian Bramsiepe (TU Dortmund, Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik)

Kurzfassung

Modulares Equipment bietet die Möglichkeit die Produktionskapazität einer Anlage sequentiell zu erweitern und damit auf die Entwicklung des Marktes zu reagieren. Insbesondere in unsicheren Märkten kann dies einen großen Vorteil darstellen. Unter welchen Randbedingungen dieser Ansatz einen Vorteil bietet, lässt sich jedoch nur ermitteln, wenn das Produktionsszenario über einen langen Zeithorizont beschrieben werden kann. Insbesondere für Mehrproduktanlagen stellt dies eine große Herausforderung dar, da zu dem Zeitpunkt der Kapazitätsfestlegung noch sehr wenige Informationen über die zu betreibenden Prozesse verfügbar sind. Zudem ist die Marktentwicklung einzelner Produkte einer Produktgruppe, die auf der Anlage produziert wird, genau wie bei der Monoproduktproduktion, noch nicht genau absehbar. Um den Vorteil der sequentiellen Anpassungen der Produktionskapazität durch eine sinnvolle Modulauswahl zu untersuchen, sind demnach Sensitivitätsuntersuchungen erforderlich, die sowohl die Prozessparameter als auch die Marktentwicklung berücksichtigen.

Basierend auf vereinfachenden Methoden der Produktionsplanung wurde im vorliegenden Projekt ein Tool zur Produktionsplanung entwickelt. Dabei wurde neben den bereits existierenden Ansätzen der Reihenfolge- und Losgrößenplanung auch eine Anpassung der Anlagenauslastung berücksichtigt was eine Besonderheit der kontinuierlichen Mehrproduktproduktion darstellt. Aufgrund hoher Rechenzeiten, die sich bereits bei relativ einfachen Problemen in der Produktionsplanung ergaben, wurde zunächst ausschließlich das Produktionsplanungsproblem beschrieben. Für spätere Untersuchungen wird vorgeschlagen, die Sensitivitätsstudien zur Modulauswahl für den Prozess und das Wirtschaftlichkeitsszenario separat durchzuführen.

Abstract

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde eine Methode implementiert, die für kontinuierlich betriebene Prozesse neben der reinen Produktionsplanung eine Anpassung der Anlagenauslastung erlaubt. Mit der Methode können dynamische Märkte und der Einfluss von Anlagenerweiterungen auf die Gesamtwirtschaftlichkeit betrachtet werden. Damit wurde die Grundlage gelegt, um Erweiterungsstrategien für Mehrproduktanlagen zu entwickeln, wobei Sensitivitätsstudien zur Identifikation von Parametern mit großem Einfluss auf die Gesamtwirtschaftlichkeit durchführbar sind.

Langfassung

Modulares Equipment bietet die Möglichkeit die Produktionskapazität einer Anlage sequentiell zu erweitern und damit auf die Entwicklung des Marktes zu reagieren. Insbesondere in unsicheren Märkten kann dies einen großen Vorteil darstellen. Um das Potential dieses Ansatzes zu untersuchen, wird eine Methode benötigt, die in frühen Phasen eines Entwicklungsprojektes eine Bewertung verschiedener Investitionsstrategien hinsichtlich der zu erzielenden Flexibilität erlaubt. Die Wahl der günstigsten Modulkombination bei Markteintritt ist dabei von großer Bedeutung, da von vorneherein spätere Erweiterungsschritte sowie die Möglichkeit der Kapazitätsanpassung berücksichtigt werden.

Vorgehensweise

Die Frage nach einer günstigen Markteintrittskapazität stellt sich in frühen Phasen der Entwicklung einer neuen Produktionsanlage. Somit ist eine zentrale Anforderung an die Modellierung, dass lediglich vereinfachende Produktionsplanungsansätze eingesetzt werden können. Komplexe Ansätze, die in der Regel in der Formulierung gemischt ganzzahliger Probleme resultieren, sind für diese Phase nicht geeignet, da die benötigte Datenbasis nicht zur Verfügung steht. Zudem ist eine Beschreibung des relevanten Zeithorizontes mit zu großem Rechenaufwand verbunden. Somit können lediglich Methoden eingesetzt werden, bei denen Heuristiken für die Reihenfolgeplanung eingesetzt werden.

Für die Ermittlung einer geeigneten Markteintrittskapazität muss zunächst eine geeignete Losgröße ermittelt werden. Der Begriff der Losgröße ist zunächst für die Batch-Produktion oder Stückgutfertigung definiert und beschreibt die Anzahl an Batches oder die Stückzahl eines Produktes, die hintereinander produziert wird. Auf die kontinuierliche Produktion übertragen beschreibt die Losgröße damit die Dauer der Produktion eines einzelnen Produktes bei festgelegter Produktionsrate. Für die Kapazitätsplanung wird das Optimum zwischen Lagerkosten und Produktwechselkosten gesucht. Abbildung 1 zeigt dieses Optimum schematisch in einem Diagramm.

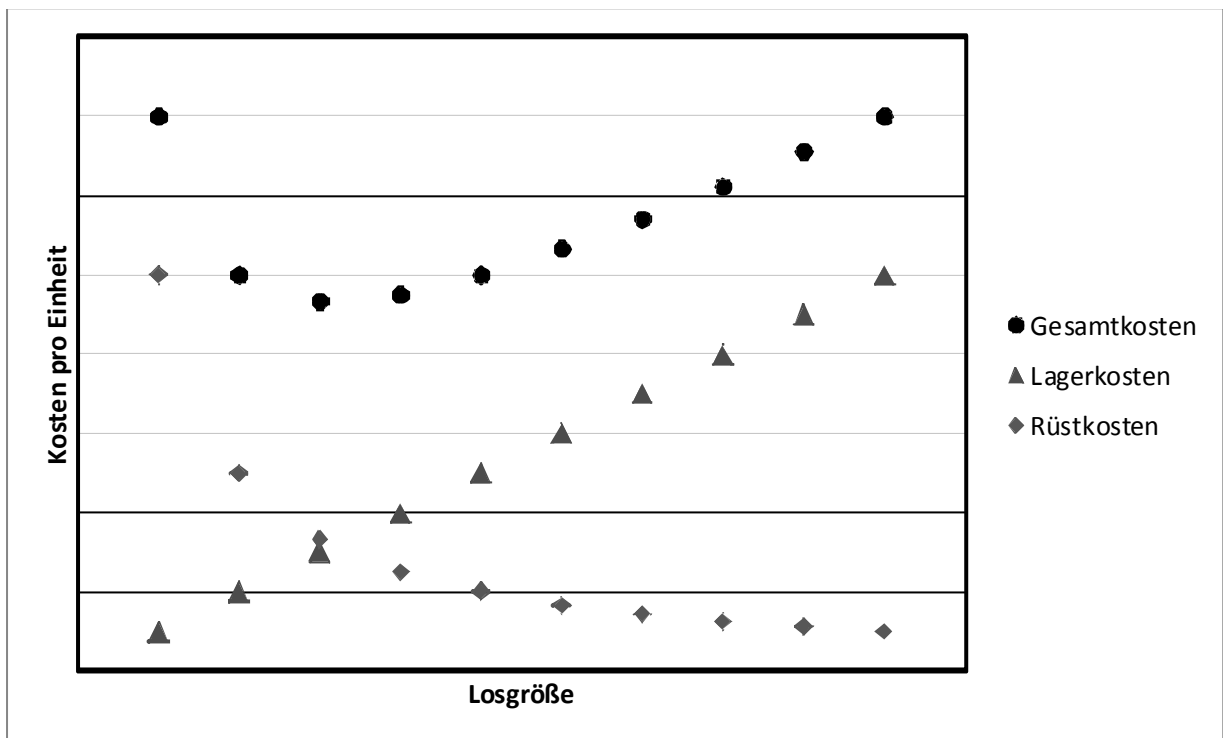


Abbildung 1: Bestimmung der ökonomischen Losgröße

Für die Ermittlung der ökonomischen Losgröße wird davon ausgegangen, dass die Kapazität der Produktionsanlage konstant und mindestens so groß ist, dass die Marktnachfrage jeder Zeit bedient werden kann. Es muss also zu jedem Zeitpunkt jedes Produkt auf Lager sein um verkauft werden zu können. Ist absehbar, dass der Lagerbestand eines Produktes während des betrachteten Zeithorizontes vollständig

ausverkauft wird, muss die Losgröße des entsprechenden Produktes verkürzt werden. Dies wird durch die Einführung eines Strafterms erreicht, der zu kleineren Losgrößen führt.

Nach Berechnung der optimalen Losgröße muss die Produktionsreihenfolge bestimmt werden. Hier können verschiedene heuristische Ansätze verfolgt werden. Beispiele für Regeln zur Reihenfolgeplanung sind die Wartezeitregel (das Produkt mit der längsten Wartezeit wird produziert) oder die dynamischer Wert Regel (das Produkt mit dem höchsten Produktwert wird produziert). Soll entgegen der klassischen Vorgehensweise bei der Bestimmung der ökonomischen Losgröße auch berücksichtigt werden, dass von einem Produkt der gesamte Bestand verkauft werden kann, so muss ebenfalls ein Strafterm eingeführt werden. Damit soll die Priorität eines ausverkauften Produktes bei der Bestimmung der Produktionsreihenfolge erhöht werden, sodass dieses Produkt als nächstes produziert wird. Abbildung 2 verdeutlicht die Vorgehensweise bei der Problemlösung bildlich.

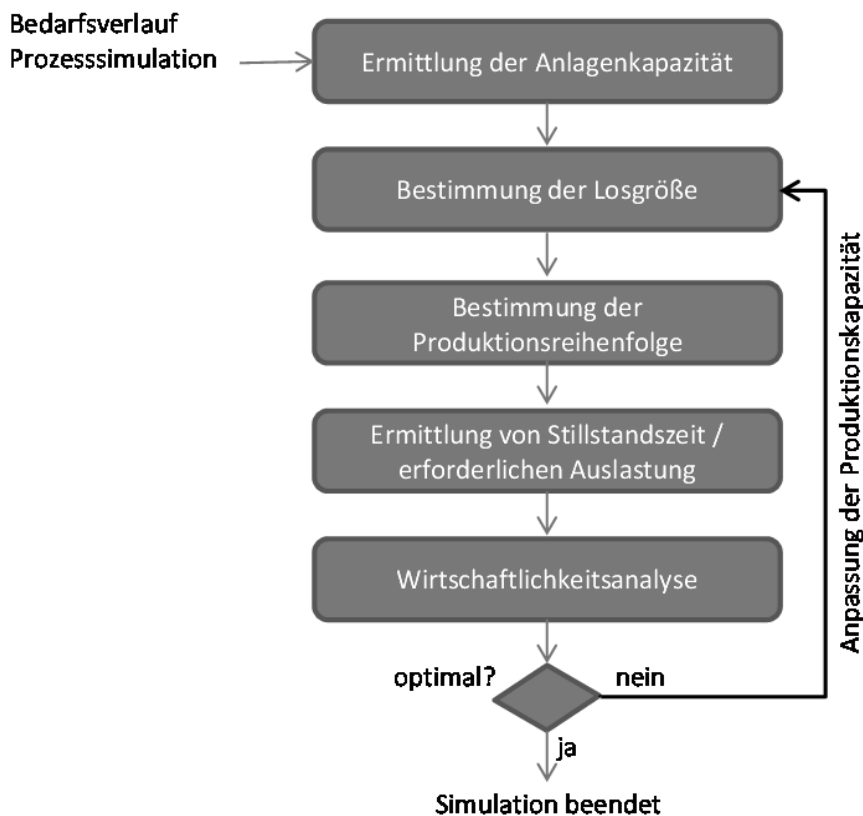


Abbildung 2: Lösungszyklus bei der Heuristiken basierten Produktionsplanung

Im vorliegenden Projekt wurde in einem ersten Schritt ein Produktionsplanungsansatz für einen konstanten Markt in der Programmiersprache VBA implementiert, bei dem die optimale Losgröße zunächst durch Anwendung der Silver-Meal Heuristik [2] ermittelt wurde. Dabei stellte sich heraus, dass dieses

Problem für einen zeitlich nicht konstanten Bedarf keine befriedigende Lösung ergibt, da sich der Bedarf sämtlicher Produkte während des Betrachtungszeitraums ändert. Somit kann bei einem steigenden Markt und einer sequentiellen Produktionsplanung der zukünftige Marktbedarf nur für einen begrenzten Vorhersagezeithorizont betrachtet werden. Die Anwendung der Silver-Meal Heuristik führt in diesem Zusammenhang nicht unmittelbar zur optimalen Losgröße. Vielmehr wird ein Optimum unter der Annahme gefunden, dass in der betrachteten Periode alle Produkte in der gleichen Kapazität benötigt werden wie zu Beginn der Periode. Eine Bestimmung der optimalen Losgröße erfordert damit eine nachträgliche Optimierung der Losgrößen. Die Lösungen, wie Sie im Rahmen des vorliegenden Projektes in der ersten Form der Implementierung gewonnen wurde, kann somit als eine Initiallösung für eine spätere Optimierung verstanden werden.

Bei einem dynamischen Markt entspricht die Designkapazität der Anlage nicht dem aktuell vorherrschenden Marktbedarf, sodass die Anlage entweder nicht voll ausgelastet ist oder der Produktbedarf nicht vollständig bedient werden kann. Je nach den betrachteten Randbedingungen, z.B. ob der Bedarf eines einzelnen oder mehrerer Produkte zeitlich veränderlich sein soll, ergeben sich verschiedene Problemformulierungen. [1, 4, 5] geben eine Übersicht über die in Frage kommenden Problemstellungen. Jedoch wird auch bei diesen Problemen von einer festen Anlagenkapazität ausgegangen. Um die speziellen Eigenschaften der kontinuierlichen Produktion zu berücksichtigen wurde im Rahmen des vorliegenden Projektes daher eine Methodik zur Anpassung der Anlagenauslastung implementiert. Dies bietet zusätzlich zur Festlegung von Produktionsreihenfolge und Losgröße eine weitere Option der Optimierung. Hierzu wird für jedes der zu produzierenden Produkte eine Prognose des Bedarfs in der nächsten Periode durchgeführt. Wird für die Herstellung der entsprechenden Menge nicht die volle Anlagenkapazität benötigt, wird die Anlage gedrosselt. Ist zudem die im Lager vorhandene Menge ausreichend, um den Bedarf in der nächsten Periode zu decken, so wird die Anlage abgefahren. Da die Anpassung der Anlagenauslastung die optimale Losgröße verschiebt, war hier eine iterative Vorgehensweise erforderlich (siehe hierzu auch Abbildung 2). Die Komplexität, die mit der gleichzeitigen Bestimmung einer günstigsten Losgröße als auch einer optimierten Anlagenkapazität verbunden ist, erfordert jedoch eine Vielzahl an Iterationen.

Sobald die Anlage dauerhaft bei voller Kapazität betrieben wird und die Anlagenkapazität auch bei Anpassung der Losgröße nicht ausreicht, muss entweder ein neuer Anlagenstrang installiert oder die Anlage erweitert werden. Sowohl die Anpassung der Anlagenkapazität als auch die Anlagenerweiterung sind in den gängigen Methoden nicht vorgesehen. Daher war die Entwicklung eines angepassten Ansatzes erforderlich, der bei Produktionsplanung eine Planung unter Berücksichtigung mehrerer Produktionslinien erfordert. Ein erster Entwurf einer Produktionsplanungsmethodik für mehrere Produktionslinien konnte im Rahmen des vorliegenden Projektes entwickelt werden. Dabei wurde ein Entscheidungsbaumverfahren angewandt, welches eine Erweiterung des Anlagensetups berücksichtigt, wenn an festgelegten Zeitpunkten der Marktbedarf die Anlagenkapazität überschreitet.

Mit dem Ansatz, wie er im vorliegenden Projekt entwickelt wurde, ist es zwar noch nicht möglich, eine ökonomisch optimale Investitionsstrategie für einen sich ändernden Markt zu bestimmen. Jedoch konnte eine Grundlage geschaffen werden, gleichzeitig die Entwicklung des Marktes als auch die Prozessparameter zu betrachten und mittels Sensitivitätsanalyse zu untersuchen.

Untersuchungsergebnisse

Untersuchungen in vorangegangenen Projekten haben für kontinuierlich betriebene **Monoprodukt**-Anlagen gezeigt, dass die Wahl der Markteintrittskapazität einen großen Einfluss auf die Flexibilität der Produktion hat. Bei diesen Betrachtungen wurde davon ausgegangen, dass eine Lagerung des Produktes nur für das Ausgleichen kurzfristiger Schwankungen sinnvoll ist. Daher wurden Lagerkapazitäten nicht berücksichtigt. In **Mehrproduktanlagen** wird dagegen in jedem Fall ein Lager benötigt, da mehrere Produkte gleichzeitig verkauft werden müssen, aber immer nur ein Produkt gleichzeitig produziert werden kann. Somit müssen Lagerkapazitäten und die entsprechenden Kosten bei der Mehrprodukt-Produktion bezogen auf den Produktausstoß wesentlich größer sein, als bei der Monoprodukt-Produktion. Im Gegensatz zur Monoprodukt-Produktion muss das Lager somit in die Flexibilitätsbetrachtungen mit einbezogen werden.

Die Untersuchungen im Rahmen des vorliegenden Projektes haben gezeigt, dass die Kapazitäts-Flexibilität, die durch Erhöhung und Absenken der Anlagenauslastung erzielt werden kann, bei der Mehrprodukt-Produktion von wesentlich geringerer Bedeutung als bei der Monoprodukt-Produktion ist. Bei der Planung einer neuen Anlage sollte mit relativ geringen Losgrößen geplant werden, gleichzeitig aber ausreichend Lagerkapazität eingeplant werden. So lässt sich die benötigte Flexibilität erreichen.

Aufgrund der hohen Komplexität des Gesamtproblems ergaben sich für die Lösung des vereinfachten Problems mit Kapazitätsanpassung bei Programmierung in VBA Code bereits Rechenzeiten im Bereich mehrerer Stunden für ein einzelnes Szenario mit mehreren Produktionslinien. Die Anzahl der zu betrachtenden Parameter ist bei der Untersuchung von Mehrproduktprozessen zudem wesentlich größer als bei der Untersuchung einer Monoproduktproduktion. Daher wird vorgeschlagen, in Anlehnung an [3] eine sequentielle Vorgehensweise anzustreben. Dabei sollte zunächst eine Sensitivitätsanalyse des Prozesses durchgeführt werden mit dem Ziel, die Parameter zu identifizieren, die einen relevanten Einfluss auf die Anlagenkapazität und die Rüstzeiten und -kosten haben. Anschließend sollte mit einer ersten Kombination von Parameterwerten eine Optimierung des Produktionsplanungsproblems durchgeführt werden, um eine geeignete Investitionsstrategie zu identifizieren und eine günstige Modulkombination bei Markteintritt zu finden. Eine separate Untersuchung des Prozesses und des Wirtschaftlichkeitsszenarios erscheint bei der Betrachtung eines Mehrproduktszenarios mit zeitlich veränderlichem Markt damit zwingend erforderlich, da anderenfalls die Komplexität zu hoch und der Rechenaufwand nicht beherrschbar ist.

Eine Szenario-Analyse mittels Sensitivitätsanalysen (z.B. „Morris-one-at-a-time“) war aufgrund der hohen Rechenzeiten im Rahmen des vorliegenden Projektes nicht möglich. Allerdings konnte bei Implementierung eines vereinfachten Problems in MATLAB anstelle von VBA bereits eine signifikante Verkürzung der Rechenzeiten erreicht werden.

Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die in der Literatur dokumentierten Methoden nach aktuellem Erkenntnisstand, eine Beschreibung einer Mehrprodukt-Produktion in einem dynamischen Markt grundsätzlich erlauben. Eine Anpassung der Anlagenauslastung, die bei kontinuierlich betriebenen Anlagen einen zusätzlichen Freiheitsgrad bietet, wird dabei jedoch nicht berücksichtigt. Aufgrund hoher Rechenzeiten, die sich bereits bei relativ einfachen Problemen in der Produktionsplanung ergaben, konnte keine

gleichzeitige Betrachtung des Prozesses und des Wirtschaftlichkeitsszenarios durchgeführt werden. Stattdessen wird für spätere Untersuchungen vorgeschlagen, die Sensitivitätsstudien für den Prozess und das Wirtschaftlichkeitsszenario separat durchzuführen.

Basierend auf den Ergebnissen der im vorliegenden Projekt durchgeführten Untersuchungen kann in zukünftigen Arbeiten eine Methodik zur Identifikation der erforderlichen Flexibilität entwickelt werden. Es kann jedoch erwartet werden, dass die Kapazitäts-Flexibilität in Mehrproduktszenarien im Vergleich mit Monoprodukt-Anlagen eine wesentlich geringere Rolle spielt. Die Identifikation einer günstigen Markteintritts-Kapazität hingegen ist auch bei der Mehrproduktproduktion von großer Bedeutung und muss bereits in frühen Phasen der Planung festgelegt werden.

Zunächst müssen die benötigten Produktionsplanungsalgorithmen in einer Programmiersprache implementiert werden, die wesentlich kürzere Berechnungszeiten erlaubt als VBA. Erste Implementierungen lassen erwarten, dass eine deutliche Verkürzung der Rechenzeit durch den Wechsel von VBA auf MATLAB erzielt werden kann. Im Anschluss müssen in der Literatur verfügbare Methoden implementiert werden, die eine Bestimmung optimaler Losgrößen unter Berücksichtigung von Kapazitätslimitierungen in einem zeitlich veränderlichen Markt erlauben. Zudem wird eine Methode benötigt, die bei der Optimierung der Losgröße gleichzeitig eine Anpassung der Anlagenkapazität erlaubt. Hierzu werden weitere Iterationsschleifen benötigt, bei denen das wirtschaftliche Optimum bei Teillast ermittelt wird. Sind diese Methoden verfügbar, wird eine Optimierung der Wirtschaftlichkeit des Gesamtszenarios möglich, bei der die Installation von Überkapazitäten, also der Installation einer für den Markteintritt an sich zu großen Anlage, sinnvoll untersucht werden kann. Abschließend sollten Sensitivitätsstudien durchgeführt werden zur Identifikation von Parametern mit großem Einfluss auf die Gesamtwirtschaftlichkeit.

Literatur

- [1] Brahim, N., Dauzere-Peres, S., Najid, N. M., and Nordli, A. 2006. Single item lot sizing problems. *European Journal of Operational Research* 168, 1–16.
- [2] Edward A. Silver, Harlan C. Meal. 1973. A heuristic for selecting lot size requirements for the case of a deterministic time-varying demand rate and discrete opportunities for replenishment. *Production and Inventory Management* 14, 2, 64–74.
- [3] Haase, K. 1994. *Lotsizing and Scheduling for Production Planning*. Springer, Berlin.
- [4] Jans, R. and Degraeve, Z. 2007. Meta-heuristics for dynamic lot sizing: A review and comparison of solution approaches. *European Journal of Operational Research* 177, 1855–1875.
- [5] Karimi, B., Fatemi Ghomi, S., and Wilson, J. M. 2003. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. *Omega* 31, 365–378.