

# Vergleichende Untersuchung von Eröffnungs- und Verbesserungsverfahren für ein Produktionsplanungsproblem der chemisch-pharmazeutischen Industrie

*Birger Franck*

Universität Karlsruhe, Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research,  
Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe, e-mail: franck@wior.wiwi.uni-karlsruhe.de

**Zusammenfassung:** Das hier betrachtete Produktionsplanungsproblem der chemisch-pharmazeutischen Industrie ist durch Batchproduktion auf nicht-identischen parallelen Anlagen mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten gekennzeichnet. Ziel ist es, ausgehend von einem Produktionsprogrammplan und vorgegebenen Rezepturen einen kostenminimalen zulässigen Anlagenbelegungsplan zu finden. Für dieses  $\mathcal{NP}$ -schwere Problem werden zwei Heuristiken vorgestellt, die anschließend miteinander verglichen werden. Dabei stellt sich heraus, daß ein kapazitierter MRP-Ansatz (CMRP) zu sehr guten Ergebnissen führt.

**Summary:** We investigate a production scheduling problem occurring in chemical-pharmaceutical industry which is characterized by batch production with non-identical parallel facilities. These facilities require sequence dependent setup-times. The aim is to determine a cost minimal feasible schedule which depends on a Master Production Schedule and the recipes. We propose two heuristics for this  $\mathcal{NP}$ -hard problem. A competitive comparison proves that a capacitated MRP approach (CMRP) provides very well results.

## 1 Die Pipelineplanung im Gesamtkontext

Für die Produktion von pharmazeutischen Präparaten werden eigenproduzierte Wirkstoffe benötigt. Dadurch ergibt sich ein Produktionsprogrammplan für Wirkstoffe für einen Zeitraum von über zwei Jahren mit vierwöchigen Zeitperioden. Die Produktion der benötigten Wirkstoffe wird in der sogenannten Pipelineplanung für eine Zeitraum von zwei Jahren mit Zeitperioden von 8 Stunden (1 Schicht) geplant. Das Ergebnis der Pipelineplanung ist ein Anlagenbelegungsplan, der in der anschließenden Kesselbelegungsplanung für eine Zeitraum von drei Monaten und Zeitperioden von einer Stunde weiter detailliert wird.

## 2 Charakterisierung der Pipelineplanung

Der Name Pipelineplanung stammt von der linearen Produktstruktur (Pipeline), die für die Herstellung eines Wirkstoffes beginnend bei den Ausgangsstoffen vorliegt. In dieser Pipeline werden nur die Haupt-Produkte betrachtet, Zusätze und

Hilfsstoffe werden erst bei der Kesselbelegungsplanung beachtet. Aus dem gleichen Ausgangs- bzw. Zwischenprodukt können jedoch verschiedenen Zwischen- und Endprodukte hergestellt werden, so daß sich insgesamt eine divergente Produktstruktur ergibt. Die Inputkoeffizienten für die Umwandlung eines Zwischenproduktes in ein anderes sind fest vorgegeben. Da die Umwandlung jedoch auf verschiedenen Anlagen mit unterschiedlichen Kapazitäten vorgenommen werden kann (mehrere Modi), ist die insgesamt benötigte Menge eines Zwischenproduktes nicht im voraus bekannt, da die Anlagen immer vollständig gefüllt werden müssen (Batchproduktion). Die Batchgrößen sind von Anlage zu Anlage und von Produkt zu Produkt verschieden.

Bei der Umrüstung einer Anlage von einem Produkt auf ein anderes entstehen reihenfolgeabhängige Rüstzeiten. Die Produktionszeiten für ein Batch hängen vom Produkt und der Anlage ab. Die Anlagen, die eine Zusammenfassung von mehreren Kesseln, Filtern und Mühlen darstellen, werden mit einem von 4 verschiedenen Schichtmodellen betrieben. Durch die Zusammenfassung mehrerer Maschinen zu Anlagen ergibt sich die Möglichkeit von produktabhängiger überlappender und paralleler Produktion. Bei dem betrachteten Chemie-Unternehmen handelt es sich um ein internationales Unternehmen, das verschiedene Produktionsstandorte besitzt, zwischen denen Transporte anfallen. An jedem dieser Orte befindet sich ein Lager, dessen Kapazität vereinfachend als unbegrenzt angenommen wird.

Ziel der Pipelineplanung ist es, einen Anlagenbelegungsplan zu erstellen, der die termingerechte Lieferung der Wirkstoffe sicherstellt und möglichst kostengünstig ist. Als Kosten sind anlagen- und produktabhängige Produktionskosten, reihenfolge- und anlagenabhängige Rüstkosten, produktabhängige Lagerungskosten, mengenabhängige Transportkosten sowie produktabhängige Kapitalbindungskosten zu beachten. Die Kapitalbindungskosten treten während der Produktion, des Transports und der Lagerung auf, also während der gesamten Zeit, während der sich die Produkte im Betrieb befinden.

### 3 Lösungsmöglichkeiten

Üblicherweise werden Produktionsplanungsprobleme, bei denen zum einen die Losgrößen bestimmt werden müssen und zum anderen ein Scheduling durchzuführen ist, in zwei sukzessiven Teilschritten gelöst. Grundvoraussetzung ist jedoch, daß zwischen den Teilproblemen (Losgrößen- und Anlagenbelegungsplanung) nur geringfügige Wechselwirkungen bestehen (Switalski 1989). Diese Voraussetzung ist jedoch hier nicht erfüllt, da vielfältige Interdependenzen zwischen der Losgrößen- und Anlagenbelegungsplanung bestehen:

- Der Durchsatz der verschiedenen Anlagen für die verschiedenen Produkte ist erst nach der Einplanung bekannt, da die reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten, die unterschiedlichen Bearbeitungszeiten sowie die mögliche überlappende und parallele Produktion einen großen Einfluß haben.

- Bei Durchführung der Losgrößenplanung ist die benötigte Produktionszeit und somit der Bedarfszeitpunkt für die Zwischenprodukte unbekannt, solange nicht festgelegt ist, auf welcher Anlage das Produkt produziert wird.
- Durch die Batchproduktion kann nicht genau die Menge produziert werden, die auch benötigt wird. Da die Batche unterschiedlich groß sind, ist auch nicht bekannt, wieviele Mengeneinheiten eines vorgelagerten Zwischenproduktes benötigt werden.

Eine andere Möglichkeit der Lösung dieses Produktionsplanungsproblems wäre eine Aggregation der Pipelineplanung. Dabei ist jedoch zu beachten, daß die Anlagen und Pipelines schon eine Aggregation darstellen, die nicht weiter fortgesetzt werden kann, ohne unzulässige Vereinfachungen vorzunehmen.

- Die Anlagen können unterschiedliche Produkte herstellen. Somit würde eine Aggregation zu einem Informationsverlust führen, der eine Einschränkung der Lösungsmöglichkeit bedingen würde.
- Die Batche sind unterschiedlich groß. Eine Aggregation würde eine Vereinfachung nötig machen, die bei der späteren Produktionsdurchführung zu Problemen führen kann.
- Die Produktionszeiten müßten vereinfacht werden. Eine in Frage kommende Maximumbildung hat jedoch zur Folge, daß Anlagenkapazitäten nicht richtig genutzt und die Zwischenprodukte zu lange gelagert werden.

Da also weder eine sukzessive noch eine aggregierte Planung in Frage kommen, wird man eine simultane Planung durchführen, die gleichzeitig die Losgrößenplanung, den Kapazitätsabgleich und die Reihenfolgeplanung durchführt (Schneeweiß 1989 S.259). Eine exakte Lösung der  $\mathcal{NP}$ -schweren Pipelineplanung (Lucks 1994) ist aufgrund des erforderlichen Problemumfanges nicht möglich. Aus diesem Grund wollen wir uns auf zwei heuristische Lösungsverfahren beschränken.

## 4 Integrierte Produktionsplanung (IPP)

Bei diesem Vorgehen wird für jeden Bedarf bestimmt, ob er vom Lager befriedigt werden kann. Bei notwendiger Produktion wird für jede mögliche Anlage ein möglichst später Einplanungstermin festgelegt. Da in der Regel mehrere Bedarfe gleichzeitig vorliegen, muß einer dieser Bedarfe ausgewählt und eine Anlage bestimmt werden. Dies geschieht über die Berechnung von Nutzenwerten (bedarfsspezifischer Nutzen – anlagenspezifische Kosten) für die verschiedenen Produktionsmöglichkeiten. Von diesen Werten wird das Minimum ausgewählt und ein Batch des zum Bedarf gehörigen Produktes auf der entsprechenden Anlage produziert. Falls der Bedarf gedeckt ist, wird der Sekundärbedarf ermittelt, ansonsten wird der Bedarf nur reduziert. Begonnen wird bei den Primärbedarfen an Wirkstoffen.

Die *anlagenspezifischen Kosten* setzen sich aus den Produktions-, Kapitalbindungs-, Lagerungs- und Transportkosten zusammen, die bei einer Einplanung anfallen würden. Der *bedarfsspezifische Nutzen* ergibt sich aus eingesparten Kapitalbindungs- und Lagerungskosten sowie der Dringlichkeit bezogen auf die gesamte Produkzeit beginnend beim Ausgangsstoff.

Bei diesem Vorgehen werden alle bekannten Bedarfe gleichzeitig betrachtet (**sim-all**). Bei der Entscheidungsfindung, welcher Bedarf zu decken ist, wird dabei weder der Bedarfszeitpunkt noch die Dispositionsstufe der Produkte berücksichtigt. Dies hat negative Auswirkungen auf die Lösung. Am Ende der zwei Jahre liegt so häufig mehr als ein Batch eines Produktes auf Lager. Dies wiederum bedeutet unnötige Kosten sowie eine unnötige Kapazitätsinanspruchnahme und dadurch häufig eine unzulässige Lösung.

Diese Problematik tritt auf, weil Bedarfe mit einem späteren Bedarfszeitpunkt vor Bedarfen mit einem früheren Bedarfszeitpunkt gedeckt werden. Durch die Batchproduktion werden meistens zuviele Mengeneinheiten produziert, für die es dann keine Verwendung mehr gibt. Diese Schwäche des Verfahrens kann durch zwei Varianten, die bessere und häufiger zulässige Lösungen erzeugen (s. Kap. 6), etwas abgeschwächt werden:

- (i) Sortierung der Primärbedarfe zeitlich aufsteigend, bei gleichem Bedarfszeitpunkt nach Wirkstoffen. Anlagenbelegung und Stücklistenauflösung werden für jeden Primärbedarf gesondert durchgeführt (**suk-DD**).
- (ii) Alle Primärbedarfe werden in Gruppen mit gleichen Bedarfszeitpunkten zusammengefaßt. Diese Gruppen werden zeitlich aufsteigend sortiert. Für eine Gruppe wird eine gemeinsame Anlagenbelegung und Stücklistenauflösung durchgeführt (**sim-DD**).

## 5 Capacitated Material Requirement Planning (CMRP)

Bei mehrstufigen Mehrprodukt-Produktionsplanungsproblemen wird oft das Material Requirements Planning (MRP) zurückgegriffen. Dabei wird bei der Auflösung der Stückliste nach Dispositionsstufen vorgegangen. Kritikpunkte an MRP sind, daß Produktionskapazitäten nicht berücksichtigt werden und demzufolge häufig das sogenannte Durchlaufzeitsyndrom auftritt. Deshalb wird hier das Vorgehen von MRP und IPP miteinander verbunden. Dadurch können folgende Vorteile genutzt werden:

- Bedarfsmengen und -zeitpunkte nach einem Produkt sind bei der Einplanung vollständig bekannt,
- kein Durchlaufzeitsyndrom durch Verwendung tatsächlicher Bearbeitungszeiten,
- Beachtung der Anlagenkapazitäten,
- keine großen Lose, die sich von Stufe zu Stufe weiter vergrößern, da Planung mit Batchen.

Bei der Planung nach der CMRP-Methode wird wie bei MRP die Dispositionsstufe berücksichtigt. Bedarfe, die zu einer Dispositionsstufe gehören, werden zeitlich aufsteigend sortiert. Bei gleichem Bedarfszeitpunkt wird ein zweites Kriterium verwendet (z.B. Kapitalbindungskosten). Im Gegensatz zum IPP-Verfahren muß lediglich die Anlage bestimmt werden, da die Bedarfe nach der Sortierung abgearbeitet werden. Hierbei werden die anlagenspezifischen Kosten verwendet, die ähnlich wie beim IPP berechnet werden. Im folgenden wollen wir zwei Varianten betrachten:

- (i) Bei **CMRP1** wird für die Produktionskosten nur ein Batch berücksichtigt.
- (ii) **CMRP2** verwendet für die Produktionszeiten und -kosten alle benötigten Batches bei Produktion auf nur einer Anlage.

## 6 Vergleich von IPP und CMRP

Für den Vergleich der beiden Verfahren und deren Varianten wurden 431 zufällige Probleme erzeugt, von denen 418 gelöst werden konnten. Alle erzeugten Probleme enthalten 6 Wirkstoffe und 25 Zwischenprodukte, 15 Anlagen sowie 2 Produktionsorte. Als Bewertungskriterien werden der Mittelwert von der relativen Abweichung von der besten Lösung sowie der zugehörige Variationskoeffizient und der mittlere Rang verwendet. Hinsichtlich der Zulässigkeit und Güte der Lösungen ergibt sich folgendes Bild:

	zulässig	mittl. Abw.	Var. Koeff.	mittl. Rang
CMRP1	94,1%	1,06%	1,78	1,74
CMRP2	97,1%	1,09%	1,75	1,87
suk-DD	73,2%	4,88%	0,76	3,16
sim-DD	71,1%	4,88%	0,76	3,23
sim-all	8,9%	26,5%	0,45	4,96

Für die Produktionskosten, die ca. 3/4 der gesamten Kosten ausmachen, kann eine untere Schranke angegeben werden. Diese läßt sich sehr einfach berechnen, indem ohne Beachtung von Batchgrößen und Kapazitäten die minimal benötigten Mengeneinheiten jedes Zwischenproduktes mit dem günstigsten Produktionskosten bewertet werden. Die Abweichung von dieser unteren Schranke läßt sich anschließend in Überproduktion und zu teurer Produktion aufteilen. Hierfür ergibt sich folgendes:

	mittl. Abw. von unterer Schranke	Anteil davon Überproduktion	Anteil davon zu teure Prod.
CMRP1	30,2%	81,0%	19,0%
CMRP2	31,0%	78,7%	21,3%
suk-DD	33,5%	84,1%	15,9%
sim-DD	33,8%	84,0%	16,0%
sim-all	44,5%	85,7%	14,3%

Als Ergebnis läßt sich festhalten, daß das CMRP-Verfahren sowohl bzgl. der Güte als auch der Zuverlässigkeit besser ist als das IPP-Verfahren. Wenn man CMRP1 und CMRP2 zusammen anwendet, erhält man in 85% der Fälle die beste Lösung.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der betrachteten Pipelineplanung war eine sukzessive bzw. aggregierte Planung nicht möglich. Deshalb wurde eine simultane heuristische Planung durchgeführt. Hierbei erweist sich eine Berücksichtigung der Bedarfszeitpunkte und Dispositionsstufen bei der Lösungsgenerierung als erfolgsversprechend. Bei den hier vorgestellten Verfahren wurden bei der Planung sowohl alle relevanten Kosten als auch Interdependenzen berücksichtigt.

In weiteren Untersuchungen (Franck 1994) wurde versucht, die mit dem IPP- und CMRP-Verfahren erzeugten Lösungen zu verbessern. Dies geschah mit Simulated Annealing sowie drei verschiedenen Nachbarschaftstrukturen. Dabei konnten Verbesserungen von bis zu 15 % erzielt werden. Im Mittel waren es jedoch zwischen 1 % und 6 %.

Weitere Untersuchungen, die noch angestellt werden müssen, sollten die Verwendung von Losgrößenmodellen sowie die Übertragung von CMRP auf fertigungstechnische Produktionsplanungsprobleme überprüfen. Weiterhin sollten schärfere untere Schranken entwickelt werden, um die Güte der Verfahren besser abschätzen zu können. Bisher existiert nur für die Produktionskosten, die den größten Anteil an den Gesamtkosten bilden, eine untere Schranke.

## References

1. Franck, B. (1994): Vergleichende Untersuchung von Eröffnungs- und Verbesserungsverfahren für ein Produktionsplanungsproblem der chemisch-pharmazeutischen Industrie; Diplomarbeit am Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research, Universität Karlsruhe
2. Lucks, V. (1994): OR-Verfahren für die integrierte Produktionsplanung in der chemisch-pharmazeutischen Industrie; Entwurf einer Dissertation am Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research, Universität Karlsruhe
3. Schneeweiß, Ch. (1989): Einführung in die Produktionswirtschaft; 3. Aufl.; Springer Verlag, Berlin
4. Switalski, M. (1989): Hierarchische Produktionsplanung; Physica-Verlag, Heidelberg