



1 Einführung

Eine Aufgabe der Betriebswirtschaftslehre umfasst die Planung der Produktion von der strategischen Ausrichtung bis zur operativen Umsetzung. Diese Arbeit bezieht sich auf die Einplanung von Aufträgen in Fertigungsprozessen und ist somit in die operative Produktionsplanung und -steuerung einzuordnen. Dabei werden Zielsetzungen wie die Erzielung termingerechter Lieferungen, minimaler Umlaufbestände, kurzer Durchlaufzeiten vom Bestelleingang bis zur Auslieferung an den Kunden und maximaler Ressourcennutzung verfolgt.¹ In dieser Arbeit wird das zuerst genannte Ziel einer Optimierung der Termineinhaltung betrachtet.

Bei kundenspezifischen Aufträgen ist die Einhaltung der durch den Auftraggeber gestellten Liefertermine nicht nur entscheidend für die Kundenzufriedenheit, sondern auch für die Planung aller vorausgehenden Prozesse. Bei einer Produktion auf Lager hingegen gilt es den Lagerbestand so zu bestimmen, dass einerseits Kundenwünsche weitgehend unmittelbar befriedigt werden können und andererseits die Lagerbestände nicht zu hoch werden, sodass auch hier die Optimierung von intern gesetzten Lieferterminen für die Wiederproduktion von Lagerware relevant ist.²

In diesem Kapitel werden dem Leser die Inhalte dieser Arbeit vorgestellt. Insbesondere erfolgen dabei eine Beschreibung der hier untersuchten Problem- und Zielsetzungen sowie eine Einordnung in die bereits publizierte Literatur. Der Aufbau dieser Arbeit mit ihren grundlegenden Forschungsfragen wird ebenfalls dargelegt.

1.1 Problem- und Zielsetzung

Die grundlegende Idee und somit Aufgabenstellung dieser Arbeit ist es herauszufinden, ob es Vorteile bringt, Lot Streaming bei mehreren Lieferterminen pro Auftrag, auch als Lieferterminvektoren bezeichnet, anzuwenden. Unter Lot Streaming versteht man die Aufteilung von Aufträgen mit mehreren identischen Einheiten in kleinere Teilaufträge, sog. Sublots, zur stufenüberlappenden Fertigung in Werkstatt- und Reihenfertigungsprozessen.³ Untersucht wird die Fragestellung, in wie weit es sinnvoll ist, das Lot Streaming-Konzept zur Aufteilung von Aufträgen in Teilaufträge zur stufenüberlappenden Fertigung bei mehreren Lieferterminen pro Auftrag anzuwenden, um die geforder-

¹ Vgl. Hopp / Spearman (2008), S. 516.

² Vgl. Hopp / Spearman (2008), S. 516 f.

³ Vgl. Reiter (1966).

ten Einheiten möglichst zielgerecht fertigzustellen. Hierfür werden zwei konkrete Zielsetzungen verfolgt, einerseits die Minimierung der zeitlichen Terminabweichung, andererseits die Minimierung der nicht termingerecht fertiggestellten Menge. Der abgebildete Fertigungsprozess beruht dabei auf dem Reihenfertigungsprinzip mit einer einheitlichen Auftragsreihenfolge für alle Maschinen, einem sog. Permutation Flow Shop. Das Lot Streaming-Konzept kann grafisch wie in Abbildung 1 gezeigt veranschaulicht werden, wobei ein Auftrag auf zwei Maschinen betrachtet wird. Dieser wird beispielsweise in zwei gleichgroße Teile gesplittet und stufenüberlappend gefertigt, wodurch der Fertigstellungszeitpunkt von 400 auf 300 Zeiteinheiten verkürzt werden kann.

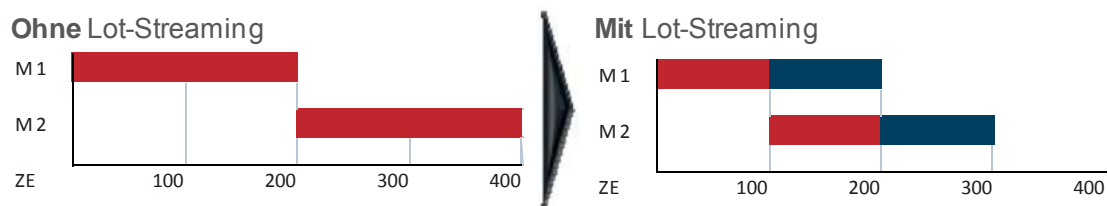


Abbildung 1: Grundkonzept des Lot Streaming

Motiviert ist diese Arbeit vor allem durch die praxisnahe Übertragbarkeit dieser Problemstellung, wenn ein Betrieb gleichartige Teile produziert und an unterschiedlichen Terminen an gleiche oder verschiedene Kunden auszuliefern hat. Ein solcher Fertiger wird sich zwangsläufig mit der Frage konfrontiert sehen, in welchen Losanzahlen und Losgrößen er alle Einheiten, welche in einer gegebenen Periode von einem Produkt gefordert sind, herzustellen hat, um die Zieltermine seiner Kunden bestmöglich einhalten zu können. Die Einhaltung dieser Fälligkeitstermine beeinflusst nicht nur subjektive Faktoren wie die öffentliche Wahrnehmung und das Image. Viele Unternehmen sind gewillt, Lagerhaltungs- und Kapitalbindungskosten in Kauf zu nehmen, um die Wunschtermine der Kunden einzuhalten.⁴ Vor allem in Just in Time-Produktionen ist die Minimierung der Verfrühung sowie der Verspätung, respektive die zeitliche Abweichung zwischen Fertigstellungs- und gefordertem Liefertermin, eine kritische Aufgabe.⁵ Somit liegen Zielkonflikte zwischen Lagerhaltungskosten, Aufwendungen für die Durchführung von Rüstvorgängen und den Strafkosten für die Nichteinhaltung von Lieferterminen vor, denen sich der Fertiger gegenüber gestellt sieht. Die vorliegende Untersu-

⁴ Vgl. Gordon / Strusevich / Dolgui (2011), S. 1.

⁵ Vgl. Chaudhry / Drake (2008), S. 356.



chung liefert einen Ansatz für die bestmögliche Lösung dieses Zielkonfliktes, wobei der Fokus nicht auf den Kosten, sondern auf Zeit- bzw. Mengenabweichungen liegt.

Dabei wird in dieser Arbeit vor allem untersucht, in wie weit das Lot Streaming-Konzept geeignet ist, die zeitliche Terminabweichung sowie die nicht termingerecht fertiggestellte Menge zu minimieren. Es werden folglich eine zeit- sowie eine mengenbezogene Zielkomponente betrachtet. Diese beiden separaten Zielsetzungen werden als ausgewählte Zielfunktionen aufgezeigt und können um eine Vielzahl anderer Performance-messgrößen, basierend auf der gleichen Problemstellung, ergänzt werden. In diesem Zusammenhang wird vor allem der Forschungsfrage nachgegangen, unter welchen Umständen ein Sublot mehrere Liefertermine bedient bzw. ein Liefertermin durch mehrere Sublots beliefert wird. Daran schließt sich der Gedanke an, dass die Aufteilung eines großen Loses in kleinere Teillose vor allem dadurch beeinflusst wird, in wie fern zusätzliche Aufwendungen anfallen. Konkret wird dabei Bezug auf den Rüstaufwand der Maschinen genommen, wobei unterstellt wird, dass eine konstante Rüstzeit pro Teillos anfällt, unabhängig von der Größe dieses Teilloses. Die Einflüsse der Rüstzeiten werden folglich in die Betrachtungen mit einbezogen. Außerdem wird untersucht, welchen Einfluss die Anzahl zu fertigender Aufträge hat, vor allem wenn diese um freie Kapazitäten auf den Maschinen und sich überschneidende Lieferterminfenster konkurrieren.

Die Beantwortung dieser Fragen erfolgt im Rahmen eines Dekompositionsansatzes mit zwei Stufen.⁶ Hierfür wird auf der ersten Stufe ein in der Lot Streaming-Forschung bislang selten anzutreffender Ansatz der Zuordnung von Auftrags-Sublots in sog. Einlastungspositionen verwendet.⁷ Diese erfolgt zunächst mit einer Reihe von Prioritätsregeln, welche auf die in dieser Arbeit aufgezeigte Problemstellung explizit ausgerichtet werden. In der zweiten Stufe erfolgt mit Hilfe eines analytischen mathematischen Verfahrens die Bestimmung der Anzahl Sublots pro Auftrag sowie ihrer jeweiligen Größen, welche konstant auf allen Fertigungsstufen bleiben. Dabei wird ein ebenfalls in der Literatur nur sehr selten anzutreffender Ansatz gewählt, bei dem Sublots auch „theoretisch“ durch den Fertigungsprozess hindurchgeführt werden und eine

⁶ Unter einem Dekompositionsansatz wird nachfolgend eine Methode verstanden, welche ein Problem zunächst in mehrere Teilprobleme zerlegt und separat löst, bevor diese Bestandteile anschließend wieder zusammengeführt werden. Über die Lösung der Teilprobleme soll das Gesamtmodell gelöst werden (vgl. Zimmermann (2008), S. 275).

⁷ Unter Einbezug von Lot Streaming untersuchen bislang nur Feldmann / Biskup (2005) und Tseng / Liao (2008) die Verwendung von Einlastungspositionen, wobei die genannten Autoren vollständige Aufträge in Positionen zuordnen, nicht jedoch deren Sublots.



Größe von 0 Einheiten aufweisen können.⁸ Weil folglich die im Rahmen des mathematischen Modells auf der zweiten Stufe ermittelte Lösung stark von der Zuordnung der Einlastungspositionen in der ersten Stufe abhängig ist, wird das Verfahren in einen meta-heuristischen Optimierungsprozess in Form eines Genetischen Algorithmus integriert und die beiden Stufen werden mehrfach durchlaufen, um einen bestmöglichen Wert für die genannten Zielsetzungen zu erreichen.

Die genannten Forschungsfragen werden in einer Reihe numerischer Untersuchungen im Anschluss behandelt, wobei verschiedene Probleminstanzen mit verschiedenen Produktanzahlen und Rüst dauern berücksichtigt werden, um die genannten Fragestellungen in verschiedene Richtungen evaluieren zu können. Insbesondere die Auswirkungen auf die Zuordnung von Sublots zu Lieferterminen werden in diesem Zusammenhang analysiert. In allen Untersuchungen wird den Fragen nach der Qualität einzelner Prioritätsregeln hinsichtlich des Zielfunktionswerts und dem zusätzlichen Verbesserungspotenzial durch die vorgestellte Meta-Heuristik nachgegangen.

Die grundlegenden Forschungsfragen dieser Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Ist der Einsatz von Lot Streaming geeignet, um den Zielfunktionswert zu verbessern, wenn mehrere Liefertermine pro Auftrag betrachtet werden?
2. Wenn ein Sublot mehrere Liefertermine bedienen kann und ein Liefertermin durch mehrere Sublots bedient werden kann, wie erfolgt sinnvollerweise die Zuordnung?
3. In wie weit wird die Bildung von Sublots durch Rüstprozesse und die Anzahl von Aufträgen im System beeinflusst?
4. Ist die Verwendung von Einlastungspositionen für Sublots ein geeignetes Verfahren und wie lässt sich eine solche Einlastung idealerweise durchführen?

Diese Fragestellungen werden in den entsprechenden Abschnitten dieser Arbeit, vor allem in Abschnitt 3.3 sowie Abschnitt 6.1.5, weiter konkretisiert und anschließend durch eine numerische Untersuchung beantwortet.

⁸ Dieser Ansatz wurde etwa von Dauzère-Pérès / Lasserre (1997) betrachtet.



Weil sich das hier vorgestellte Modell sehr vielseitig erweitern und ergänzen oder durch schärfere Ausprägungen der Restriktionen an andere Aufgabenstellungen anpassen lässt, werden explizit verschiedene Möglichkeiten zur weiteren Forschung aufgezeigt. Zudem erfolgt eine Einordnung der hier getroffenen Modellannahmen in den praktischen Kontext in Abschnitt 7.3. Die in dieser Arbeit herausgearbeiteten Ergebnisse werden abschließend in Form eines Fazits zusammengefasst, welches mit seinen Antworten den Kreis zu den hier formulierten Forschungsfragen schließt.

1.2 Einordnung in die Literatur

Das Prinzip des Lot Streaming wurde seit seiner Einführung durch Reiter im Jahr 1966⁹ in vielerlei Hinsicht erforscht. Vor allem wurden viele Untersuchungen zur Minimierung von durchlaufzeitbezogenen Zielfunktionen publiziert,¹⁰ jedoch nur etwa ein Dutzend Publikationen mit Einbezug von Zielfunktionen zur Minimierung von Terminabweichungen. Konkret wurde der Einfluss von Lot Streaming auf Terminabweichungen in der ersten Hälfte der 1990er Jahre von mehreren Autoren im Rahmen von Simulationsstudien zur Minimierung von Verfrühungen und Verspätungen untersucht,¹¹ bevor ab 2002 eine Reihe von Untersuchungen mit exakten, analytischen bzw. annähernd optimalen, heuristischen Methoden folgte.¹²

In allen Untersuchungen konnte – unabhängig von der Zielfunktion – nachgewiesen werden, dass die Aufteilung von Aufträgen in kleinere Teillose und die stufenüberlappende Fertigung dieser Sublots auf verschiedenen Maschinenstufen positive Auswirkungen auf den Zielfunktionswert haben kann und somit ein sinnvolles Konzept zur verbesserten Fertigung von Aufträgen darstellt. Die Option Sublots zu verwenden stellt folglich eine mögliche Erweiterung des Alternativenraums bei der Lösungsbestimmung dar. Mit dieser Arbeit wird den wenigen Untersuchungen mit Bezug zur Minimierung von Verfrühungen und Verspätungen ein neuer Ansatz hinzugefügt.

1.3 Aufbau und Vorgehensweise

Nach dieser Einleitung folgt in Kapitel 2 ein theoretischer Grundlagenteil, welcher insbesondere dazu beiträgt, ein Verständnis für die in dieser Arbeit verwendeten Begriff-

⁹ Vgl. Reiter (1966).

¹⁰ Vgl. bspw. Trietsch / Baker (1993), Potts / Baker (1989) oder Baker / Pyke (1990).

¹¹ Vgl. Sassani (1990), Hancock (1991), Wagner / Ragatz (1994) sowie Kannan / Lyman (1994).

¹² Vgl. Yoon / Ventura (2002a), Yoon / Ventura (2002b), Chan / Wong / Chan (2004), Chan / Wong / Chan (2005), Chan / Wong / Chan (2008a), Chan / Wong / Chan (2008b) sowie Tseng / Liao (2008).



lichkeiten und grundlegenden Problembestandteile im Zusammenhang mit Mehrmaschinenumgebungen zu gewinnen. Dabei werden das Lot Streaming-Konzept ausführlich erläutert sowie Regeln zur Bestimmung von Fälligkeitsterminen und zur Priorisierung von Aufträgen auf Maschinen vorgestellt. Im Zusammenhang mit der Auflistung ausgewählter Zielsetzungen wird auch auf die Rechenkomplexität und die Wege zur Lösungsfindung eingegangen sowie ein Klassifikationsschema vorgestellt, welches vor allem für die Literaturlauswertung in Kapitel 3 dient.

In dieser Literaturlauswertung erfolgt eine strukturierte Einordnung von Publikationen hinsichtlich der untersuchten Problemstellungen. Offene Forschungsrichtungen, wie sie im Rahmen dieser Analyse aufgezeigt werden, fließen in Kapitel 4 in die Entwicklung eines neuen Modellansatzes für auftragsspezifische Lieferterminvektoren ein. In diesem Kapitel werden zunächst die Annahmen für das Modell ausführlich vorgestellt und im Anschluss ein zweistufiges Lösungsverfahren unter Einbezug eines gemischt-ganzzahligen Modells entwickelt.

In Kapitel 5 wird für dieses Modell ein heuristisches Verbesserungsverfahren in Form eines evolutionären Algorithmus entwickelt.

Die Eignung des Modells zur Minimierung der Terminabweichung von Aufträgen bzw. einer Minimierung der nicht termingerecht fertiggestellten Menge wird in Kapitel 6 in Form einer numerischen Untersuchung evaluiert, wobei verschiedene Testinstanzen vorgestellt und abschließend bewertet werden. In diesem Kapitel erfolgt auch die Beantwortung der im vorherigen Abschnitt genannten Forschungsfragen.

Kapitel 7 schließt mit einem Ausblick auf weitere Forschungsfragen an, welche auf dieser Arbeit basieren können, sowie einer Übertragung des Modells in einen praxisnahen Kontext, bevor in Kapitel 8 die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst werden.

Es wird hier darauf hingewiesen, dass die in der Literatur unterschiedlichen Ausprägungsformen der Notation zugunsten einer für diese Arbeit einheitlichen und somit konsistenten Bezeichnung vereinheitlicht werden. Zum leichteren Verständnis sowie zur Vergleichbarkeit der zitierten Literatur, welche fast ausschließlich in englischer Sprache erschienen ist, werden in dieser Arbeit die englischen Fachbegriffe verwendet.



2 Theoretische Grundlagen aus Scheduling und Lot Streaming

In diesem Kapitel wird ein grundlegendes Verständnis für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen geschaffen. Dabei wird insbesondere auf eine abgestimmte Begriffsdefinition eingegangen mit dem Ziel, die bisherigen Forschungsergebnisse in den Kontext dieser Arbeit einordnen zu können. Außerdem werden Vorgehensweisen erläutert, um das in Kapitel 4 vorgestellte Modell mit seinem Lösungsverfahren hinsichtlich der Alternativen zur Ermittlung von Zielfunktionswerten zu klassifizieren.

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden zunächst mögliche Ausprägungsformen und Eigenschaften von Produktionssystemen mit mehreren Maschinen vorgestellt. Da diese Arbeit einen Schwerpunkt auf Untersuchungen mit Fälligkeitsterminen legt, wird im Anschluss eine Reihe von Regeln zur Festlegung von Fälligkeitsterminen vorgestellt. Weil sich im Mehrproduktfall die Frage nach der Reihenfolgeplanung auf den Maschinen stellt, werden hierzu im dritten Abschnitt verschiedene Regeln zur Einplanung vorgestellt. Unter Zuhilfenahme der Aufteilung von Aufträgen in kleinere Sublots und ihrer stufenüberlappenden Fertigung, dem sog. Lot Streaming (LS), können Verbesserungen hinsichtlich der betrachteten Zielsetzung erreicht werden, worauf die Abschnitte 2.5 und 2.6 detailliert eingehen. Dieses Kapitel schließt mit einer Betrachtung der Rechenkomplexität der Problemstellungen und einer damit verbundenen optimierenden oder heuristischen Lösungsweise.

2.1 Ausrichtung von Produktionssystemen

Ein Produktionssystem mit mehreren Maschinen, auch Shop genannt, wie es in dieser Arbeit verstanden wird, ist zunächst hinsichtlich der Bearbeitungsreihenfolgen einzelner Aufträge auf den jeweiligen Maschinen klassifizierbar.

Die systemseitigen Vorgaben für Bearbeitungsreihenfolgen der Aufträge auf den einzelnen Maschinen führen zu einer Reihe an Unterscheidungen. Diese lassen sich in die übergeordneten Kategorien Open Shops, Job Shops und Flow Shops untergliedern und sind wie nachfolgend aufgeführt definiert:



Open Shop (OS)

Open Shops sind Produktionssysteme mit einer Anzahl von M Maschinen, bei denen die Wahl der Maschinenreihenfolge für die Bearbeitungen der Aufträge beliebig erfolgen kann. Diese Reihenfolge ist somit Teil des Entscheidungsprozesses.¹³ Zudem ist es zulässig, dass ein Auftrag eine Maschine mehrmals besucht.

Job Shops (JS)

Werden Arbeitssysteme nach dem Verrichtungsprinzip angeordnet, wird von Werkstattproduktion oder Job Shops gesprochen.¹⁴ Diese zeichnen sich dadurch aus, dass jeder der J Aufträge eine vorgegebene Maschinenreihenfolge aus M Maschinen durchläuft, welche jedoch von Auftrag zu Auftrag verschieden sein kann.¹⁵ Eine Maschine kann dabei mehrere Bearbeitungen pro Auftrag ausführen. Job Shops sind folglich ein Spezialfall der Open Shops.

Flow Shops (FS)

In Flow Shops, auch Reihenfertigungssysteme genannt, werden alle J Aufträge auf den M Maschinen in einer einheitlichen Maschinenreihenfolge bearbeitet, wobei diese i. d. R. von 1 bis M nummeriert ist.¹⁶ Der Flow Shop ist folglich ein Spezialfall des Job Shops.

Über diese Eigenschaften hinaus gibt es noch eine Reihe von Sonderformen der oben aufgeführten Shops, die im Folgenden genannt werden:

¹³ Vgl. Potts / van Wassenhove (1992), S. 397.

¹⁴ Vgl. Günther / Tempelmeier (2005), S. 175.

¹⁵ Vgl. Glass / Gupta / Potts (1994), S. 379.

¹⁶ Vgl. Cetinkaya (1994), S. 1445.



Assembly Job Shop (AJS)

Unter einem Assembly Job Shop wird ein Produktionssystem verstanden, welches weitestgehend als Job Shop ausgelegt ist, am Ende jedoch eine Stufe aufweist, in welcher die einzelnen zuvor gefertigten (Teil-) Aufträge zusammengeführt werden.¹⁷

Mixed Shop (MS)

Ein Mixed Shop ist eine Kombination aus Open Shop und Job Shop bzw. Flow Shop, in dem für einige Aufträge vorgegebene Reihenfolgen gelten, für andere jedoch eine freie Wahl über die zu verwendenden Maschinen getroffen werden kann.¹⁸

Permutation Flow Shop (PFS)

Während in einem Flow Shop lediglich gefordert wird, dass alle Aufträge die Maschinen in der gleichen Reihenfolge zu durchlaufen haben, wird in einem Permutation Flow Shop zusätzlich gefordert, dass die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge auf allen Maschinen identisch ist. Die Anzahl der möglichen Schedules zur Einplanung der Aufträge auf den Maschinen wird dabei erheblich von $J!^M$ auf $J!$ reduziert.¹⁹ Diese Form des Shops wird in dieser Arbeit für die vorgestellte Modellierung in Kapitel 4 verwendet.

In jedem der oben genannten Produktionssysteme ist eine Reihe von Entscheidungen zu treffen, beginnend mit der Programmplanung als Festlegung der zu produzierenden Mengen. Diese wird gefolgt von der Auftragsgrößenplanung, welche einzelne gleichartige Produkte in Lose zusammenführt. Schließlich erfolgt die zeitliche Verteilung der Produktion mit der Bestimmung von Start- und Endterminen der Lose auf den jeweiligen Maschinen.²⁰ In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Festlegung der Losgrößen und der Durchlaufterminierung, folglich werden die Ergebnisse der Programmplanung als bereits gegeben betrachtet.

¹⁷ Vgl. Chan / Wong / Chan (2008b), S. 14852.

¹⁸ Vgl. Cetinkaya / Duman (2010), S. 1161.

¹⁹ Vgl. Nagano / Ruiz / Lorena (2008), S. 197. J bezeichnet hierbei die Gesamtanzahl Aufträge und M die Gesamtanzahl Maschinen.

²⁰ Vgl. Zelewski / Hohmann / Hügens (2008), S. 211.



Die Maschinenbelegungsplanung hat zur Aufgabe, die Arbeitsgänge von Produktionsaufträgen nach den verfolgten Formalzielen²¹ dem Produktionssystem zuzuordnen und ist somit ein typisches Zuordnungsproblem. Dieses Zuordnungsproblem ist dreidimensional in dem Sinne, dass es festzulegen gilt, welcher Arbeitsgang in welchem Zeitraum ausgeführt werden soll. Ist die Zuordnung eines Arbeitsganges zu einer Maschine nicht gegeben, muss diese ebenfalls bestimmt werden. Hierbei hat eine Berücksichtigung der Formalziele, der Präzedenzbeziehungen zwischen den Aufträgen sowie der Verfügbarkeit der Aufträge und Maschinen zu erfolgen.²² Zudem kann eine Reihe von spezifischen Eigenschaften und Einschränkungen vorliegen, wie sie im nächsten Abschnitt aufgelistet werden.

2.2 Spezifische Eigenschaften von Produktionssystemen

Jedes Produktionssystem kann verschiedene Eigenschaften und somit Restriktionen enthalten, welche bei der Planung der Fertigung zu berücksichtigen sind. Sie beeinflussen den Entscheidungsraum bei der Optimierung der Zielsetzung. Nachfolgend werden für diese Arbeit relevante Begriffe vorgestellt und definiert, wobei die aufgezeigte Auswahl vor allem auf das in Abschnitt 2.5 vorgestellte Prinzip des Lot Streamings und die in diesem Zusammenhang erschienenen Forschungsarbeiten abzielt:

Zusammensetzung der Aufträge

In der Literatur werden in der Regel Fälle mit einem Produkt als auch Mehrproduktfälle untersucht, auch Aufträge oder Jobs genannt, welche in dem betrachteten Produktionssystem zu fertigen sind.²³ Jeder Auftrag ist dabei durch eine vorab definierte Anzahl identischer Einheiten gekennzeichnet. Die Gesamtanzahl Aufträge wird mit J angegeben.

Anzahl Maschinen

Neben einer Vielzahl an Untersuchungen für Ein-Maschinen-Probleme muss ein Shop-System mindestens zwei Arbeitsstationen aufweisen. Die

²¹ Unter Formalzielen werden bspw. Erfolgs-, Liquiditäts-, Service-, Zeit-, Kapazitäts- oder Lagerhaltungsziele verfolgt, welche zu extremieren, zu meliorisieren oder zu satisfizieren sind (vgl. Zelewski / Hohmann / Hügens (2008), S. 21).

²² Vgl. Zelewski / Hohmann / Hügens (2008), S. 427 - 431.

²³ Vgl. Feldmann / Biskup (2005), S. 3.



Literatur unterteilt vor allem in 2-, 3- oder beliebig große M -Maschinen-Probleme.

Intermitted Idling

Das Erlauben von Stillstandszeiten der Maschinen zwischen der Bearbeitung zweier Aufträge wird als Intermitted Idling (II) bezeichnet und ist am wenigsten restriktiv. Hingegen bezeichnet No Idling (NI) den Fall, dass eine Maschine die Aufträge durchgängig produzieren muss und keine Stillstandszeiten zwischen den einzelnen Sublots bzw. zwischen den Aufträgen erlaubt sind.²⁴

Wird als abgeschwächte Form der No Idling-Bedingung gefordert, dass eine Maschine nicht stillstehen darf, wenn ein Auftrag zur Bearbeitung verfügbar ist, wird von Non Delay Schedules gesprochen.²⁵ Stillstandszeiten können in diesem Fall nur auftreten, wenn kein Auftrag zur Bearbeitung verfügbar ist.

Preemption

Unter Preemption (prmt) wird die Möglichkeit verstanden, einen Auftrag, welcher bereits auf einer Maschine gefertigt wird, zu unterbrechen, z. B. um einen anderen Auftrag einzuschieben. In der Regel wird bei fast allen in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen Preemption ausgeschlossen, sodass alle Einheiten eines Loses bzw. Sublots ohne Unterbrechung auf den jeweiligen Maschinen bearbeitet werden.²⁶ Entfällt die No Preemption-Restriktion, kann unter Umständen ein besserer Einlastungsplan bezüglich der zu optimierenden Zielfunktion erreicht werden.²⁷

Bearbeitungszeiten je Operation

Die Bearbeitungszeiten für eine Einheit eines Auftrags auf den jeweiligen Maschinen werden für numerische Untersuchungen in der Regel als de-

²⁴ Vgl. Trietsch / Baker (1993), S. 1068.

²⁵ Vgl. Chan / Wong / Chan (2004), S. 475.

²⁶ Vgl. Hall et al. (2003), S. 342.

²⁷ Vgl. bspw. Kumar / Bagchi / Sriskandarajah (2000), S. 152.



terministisch gegeben und konstant angenommen. Exemplarische Ausprägungen für diese Prozesszeiten können dabei zunächst aus Verteilungsfunktionen ermittelt und anschließend als Parameter in den Untersuchungsrechnungen verwendet werden.²⁸

Nur vereinzelte Untersuchungen verwenden die Annahme von Deterioration Effects bzw. Learning Effects. Unter Deterioration Effects wird verstanden, dass die Prozesszeiten sich mit späterer Einlastung eines Auftrags verlängern, bspw. durch Abnutzung der Maschinen. Learning Effects gehen hingegen von zunehmender Bearbeitungsgeschwindigkeit mit späterer Einlastung eines Jobs aus, etwa durch Lerneffekte der beschäftigten Arbeiter.²⁹

Setups

Zeiten für das Rüsten einer Maschine, sog. Setups, werden in Attached Setups (aS) und Detached Setups (dS) unterschieden. Erstere können erst durchgeführt werden, wenn ein Auftrag (oder mindestens eine Einheit von diesem) die vorangegangene Fertigungsstufe $m - 1$ beendet hat und an der zu rüstenden Maschine m angekommen ist und diese auch verfügbar ist. Detached Setups können durchgeführt werden, sobald die entsprechende Maschine frei ist. Die physische Anwesenheit eines Loses ist nicht erforderlich.³⁰ Wird die Unterscheidung nach Aufträgen nicht gemacht und muss nur die Maschine verfügbar sein, so wird allgemein von Internal Setups gesprochen, wohingegen unter External Setups alle Rüstprozesse fallen, für welche die Maschine nicht verfügbar sein muss.³¹ Für die Maschinen kann allgemein unterschieden werden, ob ein Auftrag verfügbar sein muss für seinen Rüstvorgang, was als Non-Anticipatory Setup bezeichnet wird. Fälle, in denen ein Rüstprozess ausgeführt werden kann, wenn der Auftrag noch nicht verfügbar ist, nennen sich Anticipatory Setup.³² Setups können wie in Abbildung 2 gezeigt gegliedert werden. Die Fälle, in denen die Maschine grundsätzlich nicht verfügbar sein muss, werden als Job-

²⁸ Vgl. bspw. Kumar / Bagchi / Srisankandarajah (2000), Bukchin / Tzur / Jaffe (2002) oder Kim / Jeong (2009).

²⁹ Vgl. Gordon / Strusevich / Dolgui (2011), S. 1.

³⁰ Vgl. Sarin / Jaiprakash (2007), S. 4.

³¹ Vgl. Hopp / Spearman (2008), S. 162.

³² Vgl. Allahverdi et al. (2008), S. 987 f.



related Setups bezeichnet, sofern der Auftrag vorhanden sein muss, bzw. als Unrelated Setups, wenn der Auftrag nicht benötigt wird.

		Auftrag verfügbar?		Allgemeine Klassifikation
		Ja	Nein	
Maschine verfügbar?	Ja	Attached Setups	Detached Setups	Internal Setups
	Nein	Job-related Setups	Unrelated Setups	
Allgemeine Klassifikation		Non-anticipatory Setups	Anticipatory Setups	

Abbildung 2: Klassifikation von Rüstprozessen

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf attached Setups, welche pro Sublot anfallen (Sublot-attached Setups).

Buffer

In der Regel werden in der Literatur unbegrenzte Puffer (engl. Buffer) bzw. Lagerkapazitäten für unfertige Erzeugnisse zwischen einzelnen Produktionsschritten angenommen. Finden begrenzte Buffer Anwendung,³³ so hat dies vor allem an Engpassmaschinen Bedeutung. Es wird das Ziel verfolgt, dass einerseits vorherige Maschinen mit ihrer Produktion stoppen, um die Lagerbestände nicht zu groß werden zu lassen,³⁴ und andererseits sichergestellt, dass die Engpassmaschine kontinuierlich beschäftigt ist. Ein Buffer nach dem Engpass hingegen trägt dafür Sorge, dass der Engpass nicht blockiert wird.

³³ Sofern Buffer-Begrenzungen vorliegen, werde diese nachfolgend durch „Buf“ kenntlich gemacht. Es muss darauf geachtet werden, dass die Größe der limitierten Buffer angemessen zu der Anzahl Aufträgen sowie der Anzahl Maschinen im Shop gewählt wird, um nicht zu klein und nicht zu groß auszufallen.

³⁴ Vgl. Yoon / Ventura (2002a), S. 1305.



Blocking

Wird angenommen, dass keine bzw. nur begrenzte Buffer zwischen den Maschinen verfügbar sind, kann die Situation des Blocking auftreten. Hierunter wird das Blockieren der Maschine m verstanden, wenn der auf ihr befindliche Auftrag nicht auf die Maschine $m + 1$ übertragen werden kann, weil diese noch beschäftigt ist und der Buffer vor $m + 1$ voll ist.³⁵ Werden hingegen unbegrenzte Buffer erlaubt, wird Blocking ausgeschlossen und das auf Maschine m fertig bearbeitete Produkt wird in ein Zwischenlager aufgenommen, bis es auf Maschine $m + 1$ gefertigt werden kann.

Intermingling

Intermingling bezeichnet im Mehrproduktfall die Möglichkeit, zwischen der Produktion von Sublots eines Auftrags j die Fertigung von Sublots des Produkts j' einzuplanen. Um diese Option auszuschließen und die zusammenhängende Produktion von Sublots eines Produkts auf einer Maschine zu fordern, kann Non Intermingling als Restriktion gefordert werden. Für den Einproduktfall stellt sich die Frage nach Intermingling nicht.³⁶

Waiting

In bestimmten Shops wird die Forderung gestellt, dass Sublots bzw. ganze Aufträge durchgängig, d.h. über alle Produktionsstufen, ohne Wartezeiten zu produzieren sind, sprich die Startzeit auf einer Maschine m entspricht dem Fertigstellungszeitpunkt der Maschine $m - 1$ für das entsprechende Sublot. Diese Forderung wird als No Wait (noW) bezeichnet.³⁷ Andernfalls ist das Warten erlaubt, was als Waiting bezeichnet wird.

Mit dieser Begriffsaufzählung und -definition ist nun eine Grundlage für mögliche Ausprägungsformen und Restriktionen von Shopsystemen geschaffen, welche im Rahmen der Lot Streaming-Ansätze in Kapitel 3 eine große Bedeutung haben. Weil diese Arbeit

³⁵ Vgl. Sriskandarajah / Wagneur (1999), S. 705.

³⁶ Vgl. Feldmann / Biskup (2005), S. 3.

³⁷ Vgl. Sarin / Jaiprakash (2007), S. 7. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die gleichzeitige Forderung nach No Wait und No Idling sich nicht per se ausschließt, in vielen Fällen jedoch nicht umsetzbar sein wird.



einen Fokus auf Untersuchungen mit auftragsspezifischen Fälligkeitsterminen legt, werden im nächsten Abschnitt zunächst verschiedene Methoden zur Bestimmung dieser Fälligkeitstermine vorgestellt.

2.3 Ansätze zur Bestimmung von Fälligkeitsterminen für Aufträge

Um Zielfunktionen berechnen zu können, welche Terminabweichungen minimieren, sind zunächst die Fertigstellungstermine der Aufträge festzulegen. Hierbei ist grundlegend zu entscheiden, ob die Liefertermine durch ein Verfahren exogen bestimmt werden und somit als Dateninput für eine numerische Untersuchung dienen, oder ob die Bestimmung von Fälligkeitsterminen Bestandteil des Entscheidungsprozesses während der Planung ist. In die Praxis übertragen bedeutet dies, ob Due Dates bspw. durch die Kunden oder den Vertrieb für die Fertigung vorgegeben werden, oder ob die Produktionsplaner eigene Vorschläge für die Fälligkeitstermine mit den Kunden bzw. dem Vertrieb diskutieren können. Für diese Arbeit werden vorrangig Verfahren aufgezeigt, welche zur Entwicklung einer Datenbasis für numerische Untersuchungen dienen. Hierfür lassen sich verschiedene Ansätze und Verfahren wählen, welche im Hinblick auf die Literaturanalyse in Kapitel 3 sowie die in Abschnitt 4.1 aufgezeigten Modellansätze relevant sind und nachfolgend vorgestellt werden.

Es können entweder genaue Fälligkeitstermine, sog. Due Dates, oder Fälligkeitszeitfenster, sog. Due Windows, bestimmt werden.³⁸ Die Terminfestlegungen können exogen erfolgen, d.h. durch die Vorgaben der Auftraggeber, und somit fixen Charakter für die weiteren Planungen haben, oder endogen durch den Fertigungsplaner selbst festgelegt werden.³⁹ Die hierfür verwendeten Regeln zur Bestimmung der Fälligkeitstermine lassen sich einteilen nach ihrem Ausführungszeitpunkt in statisch oder dynamisch, oder nach dem mathematischen Vorgehen zur Errechnung in deterministisch oder stochastisch. Weiterhin wird unterschieden, ob sie für eines oder mehrere Produkte gelten.⁴⁰ Ziel dieser Regeln ist die Bestimmung von einem oder mehreren Parametern. Eine Handlungsempfehlung zur Auswahl von Regeln zur Bestimmung von Fälligkeitsterminen findet sich bspw. in Baker / Bertrand (1981).

³⁸ Im Folgenden wird zunächst nur Bezug auf Due Dates genommen, weil sich Due Windows aus den Due Dates herleiten lassen, worauf in Abschnitt 6.1.3 eingegangen wird.

³⁹ Vgl. Cheng / Gupta (1989), S. 158.

⁴⁰ Vgl. Cheng / Gupta (1989), S. 157.