Semesterarbeit

Ablaufplanung einer Fertigungszelle

Lukas Finschi

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Institut für Operations Research
Clausiusstrasse 45
CH-8092 Zürich

5. Juli 1996

Kurzzusammenfassung

In dieser Semesterarbeit wird die Ablaufplanung einer Fertigungszelle, die sich aus Die-Bondern, Ofen, Wire-Bondern und Molds zusammensetzt, untersucht. Die Lösungsmethode besteht in einer Zerlegung des Problems in *Planungsmodule*, deren Beziehungen, v. a. was die Reihenfolge der zu planenden Aufträge betrifft, eingehend studiert werden; dies führt zur Einführung von entsprechenden Strukturen (Graphen) und dazugehörigen Zulässigkeitskriterien. Schliesslich werden auch nachträgliche, lokale Änderungen in der Planung untersucht.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung

1.1 Das Modell der Fertigungszelle

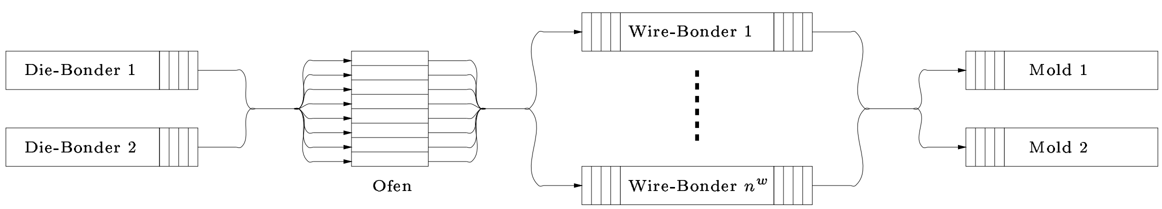
In dieser Semesterarbeit wird eine automatisierte Fertigungszelle *(Autoline)* betrachtet, wie sie von der Firma ESEC SA, Cham, angeboten wird. In einer solchen Autoline werden Chips auf Trägerelemente *(Leadframes)* montiert, wobei folgende Schritte gemacht werden:

- Auf den *Die-Bondern* werden die Chips zunächst auf die Leadframes geklebt,
- im *Ofen* (Curing Oven) wird die Chip-Leadframe-Verbindung gehärtet,
- auf den *Wire-Bondern* werden anschliessend die leitenden Verbindungen zwischen Chip und Leadframe angebracht, und
- zuletzt wird auf den *Molds* das fertig montierte Chip-Leadframe-Teil in Kunststoff eingegossen.

Maschinen gleichen Typs (d. h. z. B. die Wire-Bonder untereinander) sollen bezüglich ihren für die Planung relevanten Eigenschaften identisch sein.

Zwischen den vier Prozessschritten werden die Chip-Leadframe-Teile (oder kurz *Chips*) in *Magazinen* transportiert (etwa 200 Chips pro Magazin); der Transport wird durch einen *Roboter* ausgeführt, der die Magazine aus *Puffern* nimmt bzw. in Puffer ablegt (ausser beim Transport zum und vom Ofen). Die Puffer haben alle eine First-In-First-Out-Struktur bei einer Kapazität von zehn Magazinen. Der Ofen hat eine feste Anzahl *Ofenkammern*, die je ein Magazin aufnehmen können und auf die beliebig zugegriffen werden kann.

Die Autoline, wie sie hier betrachtet werden soll, umfasst je zwei Die-Bonder und Molds und mehrere Wire-Bonder (z. B. etwa zehn); die Anzahl Ofenkammern ist immer ein Vielfaches von vier (z. B. acht). Allerdings sind diese Mengenangaben für einige Betrachtungen und Ergebnisse dieser Arbeit nicht benutzt worden, wodurch eine grössere Allgemeinheit der Aussagen erreicht wurde.



Der zeitliche Ablauf der Fertigung einer Menge von Aufträgen wird durch die *Bearbeitungszeiten* und die *Umrüstzeiten* bestimmt, die von den jeweiligen Produktetypen abhängen. Die folgende Tabelle gibt typische Werte:

	Bearbeitungszeit pro Magazin	Umrüstzeit
Die-Bonder	ca. 4 bis 12 Minuten	ca. 5 bis 20 Minuten
Ofen	konstant 30 Minuten	keine
Wire-Bonder	ca. 40 bis 170 Minuten	ca. 10 bis 30 Minuten
Mold	ca. 12 bis 24 Minuten	bis zu 120 Minuten

1.2 Das Planungsproblem

Es soll im folgenden eine Menge von Aufträgen *(Jobs)* gegeben sein. Ein Job ist bestimmt durch die Anzahl Magazine und den Typ seiner Chips (nur ein Typ pro Job). Die Chip-Typen sind im Modell ausgedrückt durch Bearbeitungs- und Umrüstzeiten, d. h. für Die-Bonder, Wire-Bonder sowie Mold sollen zu jedem Job j_i die Bearbeitungszeiten (t_i^d, t_i^w sowie t_i^m) und für jedes Paar von Jobs (j_i, j_k) die Umrüstzeiten von j_i auf j_k ($t_{i,k}^d$, $t_{i,k}^w$ sowie $t_{i,k}^m$) gegeben sein.

Die Planungsaufgabe besteht darin, folgende Teilplanungen zu machen:

Die-Bonder-Planung: Weise jeden Job einem Die-Bonder zu, und bestimme für jeden Die-Bonder die Reihenfolge der Jobs, die er bearbeiten soll. Das Aufteilen von Jobs auf zwei Die-Bonder oder das Mischen von zwei Jobs auf dem gleichen Die-Bonder ist nicht erlaubt (Mischen von zwei Jobs j_i, j_k bedeutet, dass gewisse Magazine von j_i vor solchen von j_k bearbeitet werden und umgekehrt).

Ofen-Planung: Auf die Ofen-Planung wird im Rahmen dieser Semesterarbeit nicht speziell eingegangen, weil sie mit der Die-Bonder-Planung zusammengefasst werden wird. Allgemein muss die Reihenfolge der Magazine bestimmt werden, in der sie in den Ofen gelegt werden sollen.

Wire-Bonder-Planung: Bestimme für jeden Job, auf welche Wire-Bonder Magazine des Jobs gelegt werden sollen, sowie für jeden solchen Wire-Bonder, wie viele Magazine es sein sollen, und lege für jeden Wire-Bonder die Reihenfolge der Jobs fest, von denen Magazine auf ihm bearbeitet werden. Wiederum ist das Mischen von zwei Jobs auf dem gleichen Wire-Bonder nicht erlaubt.

Mold-Planung: Weise jeden Job einer Mold zu, und bestimme für jede Mold die Reihenfolge der Jobs, die sie bearbeiten soll. Das Aufteilen von Jobs auf zwei Molds oder das Mischen von zwei Jobs auf der gleichen Mold ist nicht erlaubt.

1.3 Modulare Planung und Lösungsansatz

Die Planungsaufgabe als Ganzes ist komplex, bestehen doch zahlreiche Abhängigkeiten zwischen den Teilplanungen: Nicht jede Kombination führt zu einer praktikablen Planung (Stichwort Dead-Lock), Veränderungen in einer Teilplanung haben Auswirkungen auf andere Planungsbereiche, und nicht jede Entscheidung, die in der Planung getroffen werden muss, ist gleich kritisch, d. h. gewisse Grössen beeinflussen das Gesamtergebnis stärker als andere.

In dieser Arbeit sollen die Grundlagen für eine mögliche *modulare Planung* gelegt werden: Die Planung wird in Teile *(Planungsmodule)* zerlegt, in denen nacheinander und in definierter Abhängigkeit voneinander Teilplanungen (die nicht den Teilplanungen aus 1.2 entsprechen müssen) ausgeführt werden. Ein solcher modularer Planungsansatz kann insbesondere ermöglichen, Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Planungsbereichen zu untersuchen und zu beschreiben, ausserdem bei gewissen Veränderungen der Planung deren Auswirkungen zu kontrollieren.

Die im folgenden diskutierte Aufteilung in Planungsmodule setzt zunächst bei den Molds an, d. h. der Wunsch ist, den Molds hohe Priorität in der modularen Planung zu geben. Die Motivation dafür basiert v. a. im Vergleich der typischen Werte von Bearbeitungs- und Umrüstzeiten: Vor allem im Vergleich mit den beiden Die-Bondern sind die beiden Molds weniger leistungsfähig, insbesondere aufgrund der grossen Umrüstzeiten. Zwar ist es möglich, dass gewisse Jobs vor den Molds aus dem Bearbeitungsprozess ausgeschieden werden (was wir hier nicht besonders betrachten), dennoch dürfte es sich lohnen, gerade im Hinblick auf die Umrüstzeiten den Molds besondere Beachtung zu schenken. So wird der erste Schritt in der modularen Planung eine teilweise Planung auf den Molds sein.

Als zweiter Schritt in der modularen Planung wird eine Planung auf den Wire-Bondern betrachtet, die gleichzeitig auch die (zuvor erst teilweise erfolgte) Moldplanung komplettieren wird. Als letzter Schritt wird die Planung der Die-Bonder und des Ofens ausgeführt. Eine Untersuchung, ob der zweite und dritte Schritt in umgekehrter Reihenfolge durchgeführt werden könnten, wurde schon aus Zeitgründen weggelassen; allerdings scheint eine solche Umkehrung auch sonst nicht unbedingt vorteilhaft zu sein: Einerseits sind die Die-Bonder erfahrungsgemäss recht unproblematisch innerhalb einer Planung, andererseits müssten im Fall, dass die Wire-Bonder zuletzt geplant werden, in beide Richtungen (nach hinten zu den Die-Bondern und zum Ofen und nach vorne zu den Molds) Bedingungen über Zulässigkeit und Optimalität beachtet werden, eine wohl eher problematischere Aufgabe.

2 Gruppen-Planung auf Molds

In diesem Abschnitt soll der erste Schritt der modularen Planung studiert werden. Es geht dabei um eine teilweise Planung der Jobs auf den Molds, die insbesondere die Voraussetzungen schaffen soll, dass (nach den nachfolgenden Planungsschritten) eine Planung vorliegen wird, die bezüglich den Umrüstzeiten auf den Molds gute Eigenschaften hat.

2.1 Definition von Gruppen und Gruppen-Planung

Der Kerngedanke ist die Bildung von *Gruppen*, die bezüglich der Umrüstzeiten auf den Molds zusammengehören. Um solche Gruppen definieren zu können, werden folgende plausible Annahmen an die Umrüstzeiten $t^m_{i,k}$ auf den Molds gemacht:

(T1) Für alle Jobs j_i gilt: $t^m_{i,i} = 0$.
Interpretation: Umrüsten zwischen Magazinen des gleichen Jobs (und deshalb gleichen Typs) kommt nicht vor.

(T2) Für alle Jobs j_i, j_k gilt: $t^m_{i,k} = 0 \Rightarrow t^m_{k,i} = 0$.
Interpretation: Wenn zwischen zwei Jobs in eine Richtung nicht umgerüstet werden muss, dann auch nicht in die Gegenrichtung.

(T3) Für alle Jobs j_i, j_k, j_ℓ gilt: $t^m_{i,\ell} \leq t^m_{i,k} + t^m_{k,\ell}$.
Interpretation: Umrüsten darf nicht schneller erfolgen, wenn der Umweg über einen dritten Job gemacht wird.

Es ist leicht zu sehen, dass mit den Annahmen (T1), (T2), (T3) (und wegen $t^m_{i,k} \geq 0$) durch $j_i \sim_m j_k :\Leftrightarrow t^m_{i,k} = 0$ eine Äquivalenzrelation definiert wird.

Definition 2.1 (Mold-Gruppen) *Die Äquivalenzklassen von $\sim_m$ heissen Mold-Gruppen.*

Die algorithmische Bestimmung der Mold-Gruppen ist sehr einfach. Folgender Algorithmus hat optimalen worst-case Aufwand $O(n^2)$, wobei n die Anzahl Jobs ist:

$J := \{j | j \text{ ein Job}\}$;
$G := \emptyset$;
WHILE $J \neq \emptyset$ **DO**
    wähle $j_i \in J$;
    $g_i := \{j_i\}$;
    FOR alle $j_k \in J$ **DO**
        IF $t^m_{i,k} = 0$ **THEN** $g_i := g_i \cup \{j_k\}$ **FI**;
    OD;
    $G := G \cup \{g_i\}$;
    $J := J \setminus g_i$;
OD;
$G = \{g_{i_1}, \ldots, g_{i_s}\}$ enthält als Elemente die Mold-Gruppen.

In der folgenden Definition soll man sich für die Mengen g_i die Mold-Gruppen aus obiger Definition 2.1 vorstellen, auch wenn für die Mengen g_i eine feinere Partitionierung gewählt werden kann.

Definition 2.2 (Mold-Gruppen-Planung) *Eine Mold-Gruppen-Planung (oder Gruppen-Planung auf den Molds oder kurz Gruppen-Planung) ist gegeben durch*

(i) Partitionierung der Menge aller Jobs in Mengen g_i, sodass für alle $j_k, j_\ell \in g_i$ gilt $t^m_{k,\ell} = 0$.

(ii) Zuteilung jeder Menge g_i zu einer Mold, sodass für je zwei Mengen g_{i_1}, g_{i_2}, die der gleichen Mold zugeteilt werden, gilt: für alle $j_k \in g_{i_1}$, $j_\ell \in g_{i_2}$ ist $t^m_{k,\ell} > 0$.

(iii) Für jede Mold eine Reihenfolge derjenigen g_i, die dieser Mold zugeteilt sind.

2.2 Finden einer Gruppen-Planung

Wir wollen nun Mold-Gruppen-Planungen studieren. Es seien dazu Mengen g_i gegeben, wie sie in Definition 2.2 auftreten, wobei wir uns zunächst gerade die Mold-Gruppen gemäss Definition 2.1 vorstellen; später werden wir ohnehin den Sprachgebrauch freier halten und in jedem Fall die Mengen g_i, die einer Mold-Gruppen-Planung zugrunde liegen, als Mold-Gruppen bezeichnen.

Die erste Beobachtung ist, dass für zwei verschiedene g_{i_1}, g_{i_2} und beliebige Jobs $j_{k_1}, j_{\ell_1} \in g_{i_1}$, $j_{k_2}, j_{\ell_2} \in g_{i_2}$ gilt $t^m_{k_1,k_2} = t^m_{\ell_1,\ell_2}$, wie man aus (T3) und der Eigenschaft in *(i)* von Definition 2.2 folgert. Deshalb kann man in offensichtlicher Weise Umrüstzeiten zwischen Mold-Gruppen definieren.

Wegen den grossen Umrüstzeiten auf den Molds kommen im Rahmen einer Planungsaufgabe, die umfangmässig etwa einer Tagesplanung entspricht, nur wenige Mold-Gruppen gemäss Definition 2.1 vor. Wenn nun zunächst für die Mengen g_i gerade die Mold-Gruppen nach Definition 2.1 gewählt werden, darf also davon ausgegangen werden, dass das Planungsproblem der Mold-Gruppen (im Sinne von Definition 2.2) bezüglich jeder Zielfunktion optimal gelöst werden kann (obwohl es sich im Prinzip um ein Travelling-Salesman-Problem handelt), nämlich sicher dadurch, dass alle Möglichkeiten durchgerechnet werden.

Die Wünsche, die durch Optimierung der Zielfunktion erfüllt werden sollten, sind

- geringe Gesamtumrüstzeit,
- kleine Anzahl Umrüstungen,
- (evtl.) ähnliche Endzeitpunkte der Arbeit auf den Molds, d. h. es soll nicht eine Mold viel früher mit der ihr zugeteilten Arbeit fertig sein als die andere.

Wenn die n^G Gruppen auf n^m Molds verteilt werden, muss zwischen den Gruppen genau $n^G - n^m$ Mal umgerüstet werden (oder, wenn man vor den jeweils ersten Gruppen jeder Mold umrüsten muss, genau n^G Mal), d. h. die Anzahl Umrüstungen kann klein gehalten werden, indem die Anzahl der Mengen g_i klein gehalten wird. Parallel dazu geht auch die Gesamtumrüstzeit: Eine feinere Partitionierung als die durch die Mold-Gruppen nach Definition 2.1 lohnt sich von der Gesamtumrüstzeit her nie.

Der Wunsch, feiner zu partitionieren, kann nur durch sehr ungleiche Beanspruchung der Molds erwachsen, insbesondere dann, wenn nur eine einzige Mold-Gruppe in der Planung auftritt; in einem solchen Fall sollte es genügen, eine Mold-Gruppe in zwei Mengen g_{i_1}, g_{i_2} aufzuteilen und g_{i_1}, g_{i_2} verschiedenen Molds zuzuteilen. Eine Aufteilung lohnt sich aber nur, wenn die dadurch entstehende zusätzliche Umrüstzeit nicht zu gross ist. Eine einfache Strategie ist wohl, zuerst zu entscheiden, welche Mold-Gruppe aufgeteilt werden soll (rechne dazu für alle Mold-Gruppen g_i je eine optimale Mold-Gruppen-Planung für aufgeteiltes g_i aus und wähle für die Aufteilung die Mold-Gruppe mit der kleinsten zusätzlichen Umrüstzeit) und dann erst zu entscheiden, welche Magazine der aufzuteilenden Gruppe auf welche Mold kommen sollen; im zweiten genannten Schritt wird versucht, die Abstände der Zeitpunkte, in denen die Molds mit der Arbeit fertig werden, zu minimieren, ein im allgemeinen schwieriges Problem (Knapsack-Problem), aber zumindest approximativ für unsere Zwecke durchaus zufriedenstellend lösbar.

2.3 Zeitliche Aspekte der Gruppen-Planung

In diesem Unterabschnitt sei eine Mold-Gruppen-Planung gegeben. Durch die Gruppen-Eigenschaften können bereits einfache Aussagen über den zeitlichen Ablauf auf den Molds gemacht werden.

Wir betrachten eine bestimmte Mold und die Gruppen $g_1, g_2, \ldots, g_s$, die auf diese Mold gehen, wobei die Numerierung dem zeitlichen Ablauf entspricht (g_1 zuerst, ... , g_s zuletzt). Weiter sei der Zeitpunkt, in dem die Mold mit der Arbeit der vorhergehenden Auftragsmenge fertig wird, also vor dem allfälligen Umrüsten auf den Typ der ersten Gruppe, mit t_0 bezeichnet.

Wir nehmen zunächst an, die Mold arbeite ohne Leerzeiten von t_0 an bis zur Fertigstellung von g_s. Dann kann für jede Gruppe g_i, $i \in \{1, \ldots, s\}$ der Zeitpunkt t_i angegeben werden, in dem ihr letztes Magazin auf der Mold fertig wird:

$$t_i = t_0 + \sum_{k=1}^{i} (t^m_{k-1,k} + \sum_{\substack{\ell \\ j_\ell \in g_k}} t^m_\ell)$$

wobei $t^m_{k-1,k}$ die Umrüstzeit von g_{k-1} nach g_k bedeutet (und mit g_0 die letzte Gruppe vor der betrachteten Planung bezeichnet ist). Entsprechend ist $t_{i-1} + t^m_{i-1,i}$ der Startzeitpunkt für das erste Magazin der Gruppe g_i.

Falls nun Leerzeiten auf der Mold auftreten, so verschieben sich die Zeitpunkte t_i entsprechend nach hinten, d. h. sie stellen nur noch früheste Zeitpunkte dar. Ebenso kann der Zeitpunkt t_0 später liegen, als er auf Grund der Planung der vorhergehenden Auftragsmenge liegen sollte, nämlich dann, wenn dort Verzögerungen auftreten.

Das Verhindern von Leerzeiten auf den Molds ist Sache der folgenden modularen Planungsschritte; es ist wohl auszuschliessen, dass man sich mit einer Mold-Gruppen-Planung, wie sie oben beschrieben wurde, zwingende Leerzeiten eingehandelt hat, d. h. die Möglichkeiten der weiteren Planung zu stark eingeschränkt hat; dann müssten entweder zuwenige Wire-Bonder vorhanden sein oder grosse Unterschiede zwischen den Gruppen bestehen, was ihr Verhältnis von durchschnittlicher Bearbeitungszeit auf Wire-Bonder bzw. Molds betrifft.

Zuletzt noch eine Bemerkung zur Frage, ob mit der Schaffung von Mold-Gruppen die Umrüstzeiten in der weiteren modularen Planung noch genug gut berücksichtigt werden können, oder ob nur noch Planungen möglich sind, die zwingend grosse Umrüstzeiten auf Die-Bonder und Wire-Bonder aufweisen. Die Umrüstzeiten auf Die-Bonder und Wire-Bonder sind durch Chip und Leadframe bestimmt, die Umrüstzeiten auf den Molds durch Leadframe und Magazin, wobei das Magazin durch das Leadframe bestimmt ist. Wenn wir nun zwischen zwei Jobs auf den Die-Bondern oder den Wire-Bondern nicht umrüsten müssen, so bedeutet das, dass Chips und Leadframes bezüglich dieses Verarbeitungsschrittes übereinstimmen; wenn nun auf den Molds solche Leadframes auch übereinstimmen (und daher auch die durch die Leadframes bestimmten Magazine), so wissen wir, dass die zu den Mold-Gruppen analoge Partitionierung der Jobs gemäss Die-Bonder- und Wire-Bonder-Umrüstzeiten je eine Verfeinerung der Mold-Gruppen darstellt. Analog könnte man untersuchen, inwiefern Bearbeitungs- und Umrüstzeiten grössenmässig zwischen Die-Bondern, Wire-Bondern und Molds korreliert sind; wenn z. B. kleine Umrüstzeiten auf den Die-Bondern oder Wire-Bondern kleine Umrüstzeiten auf den Molds implizieren, besteht grosse Hoffnung, dass der modulare Planungsansatz (oder hier speziell die Schaffung von Mold-Gruppen) ein recht angenehmes Verhalten auch bezüglich Bearbeitungs- und Umrüstzeiten zeigen.

3 Wire-Bonder-Planung und Job-Planung auf Molds

In diesem Abschnitt wird der zweite modulare Planungsschritt untersucht, nämlich die Planung der Wire-Bonder (magazinweise) und die jobweise Planung der Molds, wobei bereits eine Mold-Gruppen-Planung gegeben sei. Zuerst wird untersucht, welche Wire-Bonder-Planungen/Mold-Job-Planungen als zulässig zu bezeichnen sind, danach werden Kriterien für diese Zulässigkeit angegeben, die auf den *Jobgraphen* anzuwenden sind. Als Anwendung werden Allokationsstrategien *(Sperrstrategien)* betrachtet, die zu einer zulässigen Wire-Bonder-Planung/Mold-Job-Planung führen. Schliesslich werden Bemerkungen zur Behandlung der zeitlichen Aspekte gemacht.

3.1 Definition der Zulässigkeit

Zuerst nochmals der Begriff der Wire-Bonder-Planung und der Job-Planung auf den Molds:

Definition 3.1 (Wire-Bonder-Planung) *Eine Wire-Bonder-Planung (oder Wire-Bonder-Belegung oder Wire-Bonder-Allokation) ist gegeben durch* *(i) Für jeden Job j und jeden Wire-Bonder w_k eine Zahl $n_j^{w_k} \in \{0, 1, 2, \dots\}$, die angibt, dass $n_j^{w_k}$ Magazine von Job j auf Wire-Bonder w_k gelegt werden, wobei natürlich für jedes j die Summe aller $n_j^{w_k}$ über k summiert der Anzahl aller Magazine in j entsprechen muss.*

(ii) Für jeden Wire-Bonder w_k eine Reihenfolge der Jobs j mit $n_j^{w_k} \neq 0$.

Definition 3.2 (Mold-Job-Planung) *Eine Mold-Job-Planung (oder kurz Job-Planung) ist gegeben durch*

(i) Zuteilung von jedem Job zu einer Mold

(ii) Für jede Mold eine Reihenfolge derjenigen Jobs, die dieser Mold zugeteilt sind.

Wir wollen in diesem Unterabschnitt Wire-Bonder-Planungen und Mold-Job-Planungen betrachten und uns überlegen, welche Bedingungen erfüllt sein sollen, damit die Magazine von den Wire-Bondern auf die Molds gelegt werden können. Bei diesem Umlegen muss verschiedenes beachtet werden:

- Die Magazine dürfen auf den Molds nicht durchmischt werden (siehe Unterabschnitt 1.2).
- Die bereits gemachte Mold-Gruppen-Planung muss respektiert werden, d. h. jeder Job muss auf die durch die Gruppen-Planung festgelegte Mold gelegt werden, und auf einer Mold müssen Jobs $j_1 \in g_1$, $j_2 \in g_2 \neq g_1$ entsprechend der Reihenfolge der Gruppen abfolgen (j_1 vor j_2 genau dann wenn g_1 vor g_2).
- Das Legen der Magazine von den Wire-Bondern auf die Molds wird durch einen Roboter gemacht, der sich nach einer Mold-Job-Planung richtet, d. h. man kann ihm keine Reihenfolge der Magazine innerhalb eines Jobs vorgeben.

Beispiel einer Mold-Gruppen-Planung und Wire-Bonder-Planung, sodass die Magazine nicht von den Wire-Bondern auf die Molds gelegt werden können:

Wire-Bonder	1	2	3	4
Belegung	j_1^2	j_2^2	j_2^1	j_2^1
	j_1^1	j_1^1	j_1^2	j_2^2

Dabei bedeuten die oberen Indizes die Mold, auf die die Magazine gehen, und es seien als Mold-Gruppen gegeben $g_1^1 = \{j_1^1\}$, $g_2^1 = \{j_2^1\}$ und $g_1^2 = \{j_1^2, j_2^2\}$, wobei g_1^1 vor g_2^1 geplant ist. Dann können die Magazine gemäss oben gegebener Belegung (das in der Tabelle oben liegende Magazin muss vor dem unten liegenden Magazin auf die Molds gelegt werden) nicht auf die Molds gelegt werden. Würde aber z. B. die Belegung auf Wire-Bonder 4 durch j_2^2 *vor* j_1^2 ersetzt, wäre die Job-Planung j_1^1 *vor* j_2^1 *auf Mold 1,* j_2^2 *vor* j_1^2 *auf Mold 2* möglich. ●

Wir wollen uns den Prozess des Legens der Magazine von den Wire-Bondern auf die Molds vorstellen, wie wenn man die Magazine von einer Anzahl Stapel (hier die Wire-Bonder) auf eine Anzahl andere Stapel (hier die Molds) umlegen muss, wobei die Ausgangsstapel gegeben sind und die Zielstapel am Ende gewisse Bedingungen erfüllen müssen (nämlich: Einhaltung der Mold-Gruppen-Planung und kein Mischen der Jobs). Für die beiden folgenden Definitionen betrachtet man eine beliebige Situation während dieses Umlege-Prozesses:

Definition 3.3 (aktuelle Gruppe) *Die Gruppe g_i auf der Mold M_ℓ heisst die aktuelle Gruppe auf der Mold M_ℓ, wenn jedes Magazin, das als nächstes auf Mold M_ℓ gelegt werden kann, zur Gruppe g_i gehört, d. h. genau dann, wenn* (i) *alle Magazine, die gemäss Gruppen-Planung zu früheren Gruppen als g_i gehören, schon auf der Mold M_ℓ liegen,* (ii) *kein Magazin, das zu einer späteren Gruppe als g_i gehört, schon auf die Mold M_ℓ gelegt wurde und* (iii) *noch nicht alle Magazine der Gruppe g_i auf der Mold M_ℓ liegen.*

Offensichtlich ist für jede Mold, solange noch Magazine von den Wire-Bondern auf diese Mold zu legen sind, eine aktuelle Gruppe definiert.

Definition 3.4 (aktiver Job) *Ein Job j auf der Mold M_ℓ heisst der aktive Job auf der Mold M_ℓ, wenn mindestens ein Magazin vom Job j schon auf die Mold M_ℓ gelegt wurde und mindestens ein Magazin vom Job j noch auf die Mold M_ℓ zu legen ist.*

Der folgende Graph stellt die Regeln dar, innerhalb derer das Legen der Magazine von den Wire-Bondern auf die Molds erfolgen muss (wobei mit n^w die Anzahl der Wire-Bonder bezeichnet sei):

Definition 3.5 (Zustandsgraph G_Z) *Der Zustandsgraph $G_Z = (V_Z, E_Z)$ ist definiert wie folgt:*

V_Z: $V_Z = \{u = (b_1^u, \ldots, b_{n^w}^u) | b_i^u \in \{0, \ldots, n^{w^i}\}, n^{w^i}$ *die Zahl der Magazine auf Wire-Bonder* $i\}$
Bedeutung des Zustandes u: Jede Zahl b_i^u gibt an, wie viele Magazine des Wire-Bonders i noch nicht auf die Mold gelegt wurden.

E_Z: $(u, v) \in E_Z$, *wenn die beiden folgenden Bedingungen gelten:*

(i) $\exists\ i \in \{1, \ldots, n^w\} : b_i^v = b_i^u - 1$ *und* $\forall j \neq i \quad b_j^u = b_j^v$

(ii) Das durch Übergang von Zustand u zu Zustand v auf die Molds gelegte Magazin m gehört zu einem Job j und einer Gruppe g_i auf Mold M_ℓ, wobei gilt:
Die aktuelle Gruppe auf Mold M_ℓ ist Gruppe g_i
und (entweder ist Job j auf Mold M_ℓ aktiv oder auf Mold M_ℓ ist kein Job aktiv)

Man beachte, dass für jeden Zustand u die aktuellen Gruppen und die aktiven Jobs (soweit Jobs aktiv sind) eindeutig feststehen, d. h. die Menge der Bogen E_Z ist wohldefiniert.

Offenbar ist der Zustandsgraph ein schlichter, zykelfreier Graph.

Ausgezeichnete Knoten im Zustandsgraph seien:

$$s := (n^{w^1}, \ldots, n^{w^{n^w}}), \quad t := (0, \ldots, 0)$$

Für das folgende sei eine beliebige Mold-Job-Planung P gegeben; dann definieren wir analog zur aktuellen Gruppe bzw. zum Zustandsgraphen:

Definition 3.6 (aktueller Job) *Der Job j auf der Mold M_ℓ heisst der aktuelle Job auf der Mold M_ℓ, wenn (gemäss Planung P) jedes Magazin, das als nächstes auf Mold M_ℓ gelegt werden darf, zum Job j gehört.*

Definition 3.7 (eingeschränkter Zustandsgraph G_Z^P) *Der durch eine Mold-Planung P eingeschränkte Zustandsgraph $G_Z^P = (V_Z, E_Z^P)$ ist definiert wie folgt:*

V_Z: *wie im Zustandsgraph*

E_Z^P: $(u, v) \in E_Z^P$, *wenn die beiden folgenden Bedingungen gelten:*

(i) $\exists\ i \in \{1, \ldots, n^w\} : b_i^v = b_i^u - 1$ *und* $\forall j \neq i \quad b_j^u = b_j^v$

(ii) Das durch Übergang von Zustand u zu Zustand v auf die Mold M_ℓ gelegte Magazin m gehört zu einem Job j auf Mold M_ℓ
und der aktuelle Job auf Mold M_ℓ ist Job j

G_Z^P entsteht also aus G_Z, indem alle Bogen weggelassen werden, welche die Planung P verletzen.

Die Definition der Zulässigkeit von Wire-Bonder-Planung und Mold-Job-Planung soll nun mit Hilfe von G_Z^P gefunden werden. Dazu geben wir eine Mold-Gruppen-Planung und eine Wire-Bonder-Planung vor und studieren folgende Bedingungen:

(a) Es gibt eine Job-Planung P auf den Molds, sodass es in G_Z^P eine Bogenfolge von s nach t gibt.

$(\tilde{a})$ Es gibt eine Job-Planung P auf den Molds, sodass in G_Z^P jede Bogenfolge, die in s beginnt, nach t fortgesetzt werden kann.

Die Bedingung (a) ist notwendig, um zur gegebenen Mold-Gruppen-Planung und zur Wire-Bonder-Planung eine Möglichkeit finden zu können, die Magazine gemäss unseren Regeln auf die Molds legen zu können, wobei man dabei eine Mold-Job-Planung P erhält.

Bei einer Job-Planung P gemäss Bedingung (a) ist aber noch nicht auszuschliessen, dass eine ungeschickte Reihenfolge der Magazine innerhalb eines Jobs trotz allem zu einem Dead-Lock führen kann. Die Bedingung $(\tilde{a})$ ist hinreichend, diese Dead-Lock-Möglichkeit auszuschliessen.

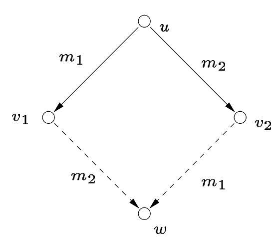
Nun kann man zeigen, dass (a) und $(\tilde{a})$ äquivalent sind, genauer:

Satz 3.8 (Nichtexistenz ungeschickter Magazinreihenfolgen innerhalb eines Jobs)
Gegeben sei eine Job-Planung P auf den Molds. Falls es eine Bogenfolge in G_Z^P von s nach t gibt, ist jede in s beginnende Bogenfolge nach t fortsetzbar.

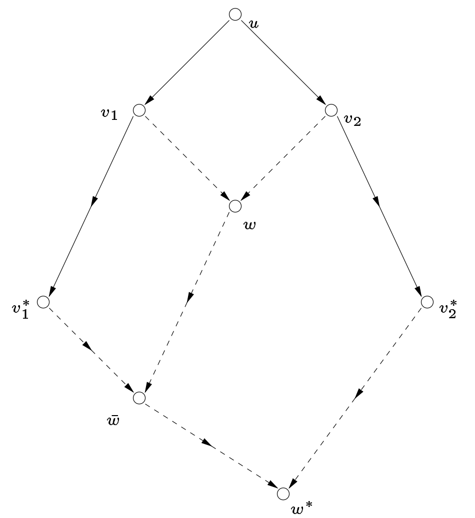
Beweis:
Bemerkungen: Es ist wohl möglich, den Beweis kürzer und einfacher zu führen. Da ich jedoch Ideen aus anderen Beweisen übernommen habe und so selbst nur Schritt *ii)* nachweisen musste, war für mich die Arbeit kleiner, als es scheinen mag. Im übrigen beachte man die in *ii)* und *iii)* jeweils dem Text folgenden Figuren.

i) Es gibt in G_Z^P keine unendlich lange Bogenfolge (denn jeder Bogen in einer Bogenfolge entspricht dem Legen eines Magazins von den Wire-Bondern auf die Molds; insgesamt gibt es aber nur endlich viele Magazine).

ii) Betrachte drei Knoten $u, v_1, v_2 \in V_Z$ mit Bogen $(u, v_1), (u, v_2) \in E_Z^P$, wobei $v_1 \neq v_2$. Dann gibt es einen Knoten $w \in V_Z$ und Bogen $(v_1, w), (v_2, w) \in E_Z^P$: Sei m_1 das beim Übergang von u zu v_1 auf die Molds gelegte Magazin, ebenso m_2 das (u, v_2) entsprechende Magazin. Dann kann in v_1 das Magazin m_2 und in v_2 das Magazin m_1 auf die Molds gelegt werden (womit offensichtlich beide Mal derselbe Zustand w erreicht wird); denn in u liegen m_1 und m_2 je zuvorderst auf ihrem Wire-Bonder, das im ersten Schritt nicht gewählte Magazin tut dies in v_1 bzw. v_2 immer noch und gehört auch immer noch zum gleichen aktuellen Job der betreffenden Mold (klar, falls m_1, m_2 nicht auf die gleiche Mold gehen; sonst: m_1, m_2 gehören zum gleichen Job, der also nach dem ersten Schritt aktuell bleibt, weil noch nicht alle seine Magazine auf die Molds gelegt wurden).



iii) Ein Knoten $u \in V_Z$ heisse kritisch, wenn es Knoten $v_1^*, v_2^* \in V_Z$ mit Bogenfolgen in E_Z^P von u nach v_1^* und von u nach v_2^* gibt, sodass es kein $w^* \in V_Z$ mit (evtl. leeren) Bogenfolgen von v_1^* nach w^* und von v_2^* nach w^* gibt. Es wird nun gezeigt, dass es in G_Z^P keinen kritischen Knoten gibt. Widerspruchsannahme: Es gebe einen kritischen Knoten u mit entsprechenden Knoten v_1^*, v_2^*. Offensichtlich ist $u \neq v_1^*$ und $u \neq v_2^*$. Seien v_1 bzw. v_2 die Knoten nach dem ersten Bogen der Bogenfolge von u nach v_1^* bzw. v_2^*. Wäre weder v_1 noch v_2 kritisch, so könnte u nicht kritisch sein (offensichtlich, falls $v_1 = v_2$; sonst: Sei $w \in V_Z$ wie in *ii)*, dann gibt es, da v_1 nicht kritisch ist, zu v_1^* und w ein $\bar{w} \in V_Z$ wie in der untenstehenden Figur, ebenso zu $\bar{w}$ und v_2^* ein $w^* \in V_Z$, welches, wie man aus der Figur erkennt, im Widerspruch steht zur Annahme, dass u kritisch ist). Sei also z. B. v_1 kritisch, dann kann mit den gleichen Überlegungen gezeigt werden, dass ein Nachfolger von v_1 kritisch ist, gewinnt also induktiv eine unendlich lange Bogenfolge von einem kritischen Knoten zum nächsten, ein Widerspruch zu *i)*.



iv) Gegeben sei eine Bogenfolge von s nach t und eine beliebige Bogenfolge beginnend in s: s ist gemäss *iii)* nicht kritisch, also können die beiden Bogenfolgen fortgesetzt werden bis in einen gemeinsamen Knoten, der offensichtlich t sein muss.

■

So kommen wir nun zur Definition der Zulässigkeit:

Definition 3.9 (zulässige Wire-Bonder-Planung) *Gegeben sei eine Mold-Gruppen-Planung. Eine Wire-Bonder-Planung heisst dann zulässig, falls es eine Mold-Job-Planung wie in der Bedingung (a) gibt.*

Definition 3.10 (zulässige Job-Planung) *Gegeben seien eine Mold-Gruppen-Planung und eine Wire-Bonder-Planung. Eine Mold-Job-Planung heisst zulässig, falls sie die Eigenschaft wie in Bedingung (a) besitzt.*

Wegen Satz 3.8 kann in den beiden Definitionen die Bedingung (a) durch $(\tilde{a})$ ersetzt werden.

Zum Begriff der Zulässigkeit ist hier zu bemerken, dass wir uns bis jetzt nicht um den verbleibenden modularen Planungschritt gekümmert haben, d. h. um die Frage, ob es in jedem Fall möglich ist, eine praktikable Planung von Die-Bonder und Ofen zu finden, welche die Wire-Bonder-Planung respektiert. Mehr dazu folgt in Abschnitt 4.

3.2 Kriterien für die Zulässigkeit

In diesem Unterabschnitt werden Graphen vorgestellt, auf welche Kriterien angewendet werden können, die entscheiden, ob eine Wire-Bonder-Planung bzw. eine Mold-Job-Planung zulässig ist oder nicht; dazu sei in diesem Unterabschnitt eine Mold-Gruppen-Planung fest vorgegeben.

Die zentrale Struktur ist der Jobgraph:

Definition 3.11 (Jobgraph G_J) *Gegeben sei eine Wire-Bonder-Planung. Der Jobgraph $G_J = (V_J, E_J)$ ist dann definiert wie folgt:*

V_J: $V_J = \{j \mid j \text{ ein Job}\}$

E_J: $(j_1, j_2) \in E_J$, *wenn mindestens eine der folgenden Bedingungen gilt:*

Gruppe: j_1 *gehört zur Gruppe* g_{i_1} *auf Mold* M_ℓ, j_2 *gehört zur Gruppe* $g_{i_2} \neq g_{i_1}$ *auf der gleichen Mold* M_ℓ *und* g_{i_1} *kommt gemäss Gruppen-Planung vor* g_{i_2}.

Queue: *Es gibt einen Wire-Bonder, auf dem ein Magazin* $m_1 \in j_1$ *vor einem Magazin* $m_2 \in j_2 \neq j_1$ *bearbeitet wird (dabei muss* m_1 *nicht notwendigerweise unmittelbar vor* m_2 *liegen!).*

Interpretationen für die Bogen (j_1, j_2) im Jobgraphen: Es gelten Relationen zwischen den Anfangs- und Endpunkten der Zeitintervalle, in denen j_1 bzw. j_2 aktiv sind:

- schwache Interpretation (gilt für alle Bogen, Typ *Gruppe* und Typ *Queue*):
  j_1 aktiv geworden bevor j_2 inaktiv geworden, d. h. das (zeitlich) erste Magazin von j_1 muss vor dem letzten Magazin von j_2 auf die Molds gelegt werden.
- starke Interpretation (gilt für Bogen vom Typ *Gruppe* sowie für Bogen vom Typ *Queue*, wenn j_1 und j_2 auf die gleiche Mold gehen):
  j_1 inaktiv geworden bevor j_2 aktiv geworden, d. h. das letzte Magazin von j_1 muss vor dem ersten Magazin von j_2 auf die Molds gelegt werden.

Definition 3.12 (starke und schwache Bogen) *Ein Bogen (j_1, j_2) im Jobgraph heisst starker Bogen, wenn die starke Interpretation gilt, d. h. genau dann, wenn j_1 und j_2 auf die gleiche Mold gehen; andernfalls heisst (j_1, j_2) ein schwacher Bogen.*

Es soll nun durch das Studium des Jobgraphen untersucht werden, wann die zugrundeliegende Wire-Bonder-Planung zulässig ist. Der Ansatz führt zu stark zusammenhängenden Komponenten des Jobgraphen und zum Begriff der Auflösbarkeit.

Definition 3.13 (Auflösbarkeit) *Eine stark zusammenhängende Komponente K des Jobgraphen heisst auflösbar, wenn folgendes gilt: Nimmt man alle Magazine von den Wire-Bondern weg, die nicht zu einem Job in K gehören, so gibt es für die verbleibende Wire-Bonder-Belegung eine zulässige Job-Planung P, wobei die neue Mold-Gruppen-Planung für die verbleibenden Jobs in offensichtlicher Weise von der ursprünglichen Gruppen-Planung induziert wird. Die Job-Planung P wird dann eine Auflösplanung der Komponente K genannt, das Legen der Magazine in K von den Wire-Bondern auf die Molds wird als Auflösen der Komponente K bezeichnet.*

Es ist leicht zu sehen, dass jede stark zusammenhängende Komponente, die keine zwei Jobs enthält, die auf die gleiche Mold gehen, auflösbar ist.

Definition 3.14 (Komponentengraph G_K) *Der Komponentengraph $G_K = (V_K, E_K)$ ist wie folgt definiert:*

V_K: $V_K = \{K \mid K$ *eine stark zusammenhängende Komponente im Jobgraph*$\}$

E_K: $(K_1, K_2) \in E_K$ *wenn es Jobs* $j_1 \in K_1, j_2 \in K_2$ *gibt mit* $(j_1, j_2) \in E_J$ *ein Bogen im Jobgraph.*

Der Komponentengraph wird also aus dem Jobgraphen durch Schrumpfung der stark zusammenhängenden Komponenten gewonnen, wobei keine Parallelbogen erzeugt werden sollen. Somit ist der Komponentengraph immer azyklisch.

Eine topologische Sortierung eines Graphen $G = (V, E)$ ist bekanntlich eine (bijektive) Numerierung $V \to \{1, 2, \ldots, |V|\}$ der Knoten, sodass jeder Knoten eine höhere Nummer trägt als seine Vorgänger; in einem azyklischen Graphen existiert immer eine topologische Sortierung.

Der folgende Satz bringt nun erste Aussagen über die Zulässigkeit:

Satz 3.15 (Zusammenhang von Zulässigkeit und Auflösbarkeit)
Gegeben seien eine Mold-Gruppen-Planung und eine Wire-Bonder-Planung. Folgende Aussagen sind dann äquivalent:

(i) Es existert eine zulässige Mold-Job-Planung.

(ii) Alle stark zusammenhängenden Komponenten im Jobgraph sind auflösbar.

(iii) Für jede topologische Sortierung der Knoten im Komponentengraph existiert eine (zulässige) Mold-Job-Planung, bei der die Komponenten gemäss der topologischen Sortierung eine um die andere jeweils vollständig aufgelöst werden (d. h. man kann alle Magazine von Komponente K_i auf die Molds legen, bevor Magazine von K_j mit $j > i$ auf die Molds gelegt werden müssen).

Beweis:
(i) ⇒ (ii): Gegeben sei eine zulässige Job-Planung aus *(i)* bzw. eine entsprechende Reihenfolge P, in der die Magazine von den Wire-Bondern auf die Molds gelegt werden können. Es sei K eine beliebige stark zusammenhängende Komponente des Jobgraphen und P_K die aus P induzierte Reihenfolge für die Magazine der Jobs in K. Die Reihenfolge P_K entspricht dann einer Auflösplanung, d. h. das Umlegen von Magazinen von den Wire-Bondern auf die Molds ist in Reihenfolge P_K möglich; zu zeigen ist, dass jederzeit das gemäss P_K nächste Magazin m auf die Molds gelegt werden kann: m muss zuvorderst auf seinem Wire-Bonder liegen (sonst würde es auch in P von einem noch nicht auf die Molds gelegten Magazin verdeckt), gehört zur aktuellen Gruppe g auf der betreffenden Mold (sonst wäre auch in P die gleiche Gruppe g aktuell, aber $m \notin g$), und falls auf der betreffenden Mold ein Job j aktiv ist, gilt $m \in j$ (sonst würde auch in P $m \notin j$ gelten).
(ii) ⇒ (iii): Gegeben sei eine topologische Sortierung P der Knoten im Komponentengraph. Es wird nun induktiv (in der Reihenfolge P) eine Komponente um die andere je mit einer aus *(ii)* gegebenen Auflösplanung auf die Molds gebracht. Die Induktionsvoraussetzung in jedem Schritt lautet: Bisher wurden genau die Magazine, die zu (nach P) früheren Komponenten gehören, von den Wire-Bondern auf die Molds gelegt. Induktionsschritt: Die Komponente K_i soll aufgelöst werden; dazu werden die Magazine in der gleichen Reihenfolge wie in der Auflösplanung von K_i auf die Molds gelegt. Wäre dies nicht möglich, müsste auf einem Wire-Bonder ein Magazin aus K_i hinter einem Magazin aus einer (nach P) späteren Komponente liegen (im Widerspruch zur Eigenschaft der topologischen Sortierung), oder wir hätten wie im Schritt von *(i)* nach *(ii)* einen Widerspruch.
(iii) ⇒ (i): klar. ■

Das Problem, eine zulässige Job-Planung zu finden, wurde also zurückgeführt auf das (an sich genau gleich schwierige) Problem, für eine gegebene stark zusammenhängende Komponente eine Auflösplanung zu finden. Kann aber die Komponentengrösse klein gehalten werden, ist das Finden einer Auflösplanung durchaus machbar, insbesondere mit den nun folgenden Kriterien.

Satz 3.16 gibt ein Kriterium, das für den Fall von zwei Molds entscheidet, ob eine bereits vorliegende Job-Planung zulässig ist (das Kriterium kann insbesondere auf Komponenten bzw. Auflösplanungen angewendet werden):

Satz 3.16 (Zulässigkeitskriterium für zwei Molds) *Gegeben sei ein Jobgraph mit zugrundeliegender Wire-Bonder-Belegung, und die Anzahl Molds sei zwei ($n^m = 2$). Weiter sei eine Job-Planung P gegeben: Die Bezeichnungen der Jobs sei $A_1, A_2, \dots, A_{n^A}$ für die erste Mold A und $B_1, B_2, \dots, B_{n^B}$ für die zweite Mold B, $n^A, n^B \in \{0, 1, 2, \dots\}$, wobei Jobs mit kleinen Nummern früher auf die jeweilige Mold kommen als Jobs mit grösseren Nummern.*
Dann gilt: P ist genau dann zulässig, wenn die folgenden beiden Bedingungen gelten:

(i) Es gibt keine starken Bogen (A_i, A_j) oder (B_i, B_j) mit $i > j$.

(ii) Es gibt keine zwei schwachen Bogen (A_{k_2}, B_{l_1}), (B_{l_2}, A_{k_1}) mit $k_1 < k_2$ und $l_1 < l_2$.

Satz 3.16 ist ein Spezialfall von folgendem Satz für eine beliebige Anzahl Molds:

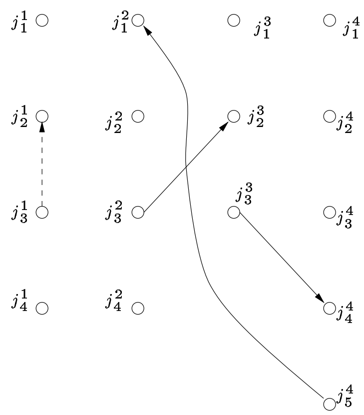
Satz 3.17 (Zulässigkeitskriterium für beliebige Anzahl Molds) *Gegeben seien ein Jobgraph mit zugrundeliegender Wire-Bonder-Belegung und eine Job-Planung P: Die Bezeichnungen der Jobs sei $j_1^k, j_2^k, \dots, j_{n_k}^k$ für die Mold M_k, $k \in \{1, \dots, n^m\}$, $n_k \in \{0, 1, 2, \dots\}$ die Anzahl Jobs auf Mold M_k, wobei innerhalb der gleichen Mold Jobs mit kleineren unteren Indizes früher auf die Mold kommen als Jobs mit grösseren unteren Indizes.*
Dann gilt: P ist genau dann zulässig, wenn die folgende Bedingung gilt:

Es gibt im Jobgraphen für kein $n \in \{1, 2, \dots\}$ Bogen der Form

$$(j_{b_{i_1}}^{i_1}, j_{a_{i_2}}^{i_2}), \dots, (j_{b_{i_{n-1}}}^{i_{n-1}}, j_{a_{i_n}}^{i_n}), (j_{b_{i_n}}^{i_n}, j_{a_{i_1}}^{i_1})$$

mit $a_{i_k} < b_{i_k}$ für alle $k \in \{1, \dots, n\}$, wobei $i_1, \dots, i_n$ alle verschieden und $i_k \in \{1, \dots, n^m\}$ für alle k.

Beispiel von unzulässigen Bogen:



Unzulässig ist der Bogen (j_3^1, j_2^1), ebenso sind die drei Bogen (j_3^2, j_2^3), (j_3^3, j_4^4), (j_5^4, j_1^2) unzulässig. ●

Beweis von Satz 3.17:
(⇒): Sei eine zulässige Job-Planung P gegeben. Widerspruchsannahme: Es gebe ein $n \in \{1, 2, \dots\}$ und Bogen $(j_{b_{i_1}}^{i_1}, j_{a_{i_2}}^{i_2}), \dots, (j_{b_{i_{n-1}}}^{i_{n-1}}, j_{a_{i_n}}^{i_n})$, $(j_{b_{i_n}}^{i_n}, j_{a_{i_1}}^{i_1})$ mit $a_{i_k} < b_{i_k}$ für alle $k \in \{1, \dots, n\}$, wobei $i_1, \dots, i_n$ alle verschieden und $i_k \in \{1, \dots, n^m\}$ für alle k. Falls $n = 1$, d. h. es gibt ein $i \in \{1, \dots, n^m\}$ und einen Bogen $(j_{b_i}^i, j_{a_i}^i)$ mit $a_i < b_i$ (Interpretation: $j_{b_i}^i$ muss vor $j_{a_i}^i$ bearbeitet werden), kann P offensichtlich nicht zulässig sein; falls $n > 1$: Für alle $k \in \{1, \dots, n\}$ sei mit t_1^k (bzw. t_2^k) der Zeitpunkt bezeichnet, in dem das letzte Magazin von $j_{a_{i_k}}^{i_k}$ (bzw. das erste Magazin von $j_{b_{i_k}}^{i_k}$) von den Wire-Bondern auf die Mold gelegt wird. Wegen P gilt für alle k: $t_1^k < t_2^k$; wegen den Bogen gilt $t_2^1 < t_1^2, \dots, t_2^{n-1} < t_1^n, t_2^n < t_1^1$, woraus der Widerspruch folgt:

$$t_1^1 < t_2^1 < t_1^2 < t_2^2 < \dots < t_1^n < t_2^n < t_1^1.$$

(⇐): Sei P gegeben, so dass im Jobgraph keine Bogen $(j_{b_{i_1}}^{i_1}, j_{a_{i_2}}^{i_2}), \dots, (j_{b_{i_{n-1}}}^{i_{n-1}}, j_{a_{i_n}}^{i_n})$, $(j_{b_{i_n}}^{i_n}, j_{a_{i_1}}^{i_1})$ existieren mit $a_{i_k} < b_{i_k}$ wie oben beschrieben. Es wird gezeigt, dass es jederzeit einen aktuellen Job gibt, der vollständig auf die Mold gelegt werden kann; dazu stellt man sich für jeden Zeitpunkt einen Teilgraphen des Jobgraphen vor, nämlich den von den noch nicht vollständig auf die Molds gelegten Jobs induzierten Untergraphen. Sei nun für einen beliebig gewählten Zeitpunkt der Teilgraph gegeben. Die aktuellen Jobs seien $j_{a_k}^k$ für $k \in \{1, \dots, n^m\}$. Falls es einen aktuellen Job gibt, in den kein Bogen von einem noch nicht aktuellen Job hineingeht, so können alle seine Magazine entweder direkt oder nach dem Legen von Magazinen, die zu anderen aktuellen Jobs gehören, auf die Molds gelegt werden; man beachte, dass nach Voraussetzung kein Bogen (j_b^k, j_a^k) mit $a < b$ existiert und deshalb die aktuellen Jobs auch wirklich zu den aktuellen Gruppen gehören. Es ist also zu zeigen, dass es einen solchen aktuellen Job gibt. Widerspruchsannahme: In jeden aktuellen Job geht ein Bogen von einem noch nicht aktuellen Job hinein, d. h. es gibt für alle $k \in \{1, \dots, n^m\}$ einen Bogen $(j_{b_{m(k)}}^{m(k)}, j_{a_k}^k)$ mit $b_{m(k)} > a_{m(k)}$. Dadurch ist eine Folge $1, m(1), m(m(1)), \dots$ mit Elementen in $\{1, \dots, n^m\}$ definiert, die also ab einem gewissen Index zyklisch ist; der Zyklus habe die Länge n, $n \in \{1, \dots, n^m\}$, und bestehe aus den Zahlen $i_k \in \{1, \dots, n^m\}$ für $k \in \{1, \dots, n\}$, sodass jedem k einer der Bogen

$$(j_{b_{i_1}}^{i_1}, j_{a_{i_2}}^{i_2}), \dots, (j_{b_{i_{n-1}}}^{i_{n-1}}, j_{a_{i_n}}^{i_n}), (j_{b_{i_n}}^{i_n}, j_{a_{i_1}}^{i_1})$$

mit $a_{i_k} < b_{i_k}$ entspricht, im Widerspruch zur Annahme, dass solche Bogen nicht vorkommen. ■

Aus Satz 3.17 folgt insbesondere, dass aus dem Jobgraph allein, d. h. ohne Kenntnis der genauen Wire-Bonder-Belegung, geschlossen werden kann, ob eine zulässige Job-Planung existiert oder nicht: Der Jobgraph enthält alle Information über die Zulässigkeit.

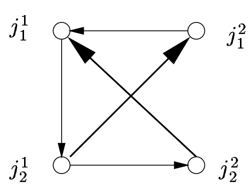
Das Suchen einer zulässigen Job-Planung erst nach erfolgter Wire-Bonder-Planung ist wohl wenig sinnvoll, es ist zweckmässiger, die Allokation der Wire-Bonder und die Job-Planung gleichzeitig vorzunehmen, und zwar in einer Weise, die Zulässigkeit garantiert. Dennoch ist es prinzipiell möglich, anhand des Jobgraphen eine Jop-Planung zu suchen (oder zu entscheiden, ob es eine gibt). Dazu wird zuerst der Komponentengraph gebildet und darin eine topologische Sortierung gewählt. Danach ist jede Komponente wieder als Jobgraph zu betrachten, für den je eine zulässige Job-Planung (also eine Auflösplanung) zu suchen ist: Sicherlich werden die Jobs nach Mold-Gruppen vorsortiert; danach ist jede Permutation innerhalb der Mold-Gruppen durchzuspielen und das Kriterium von Satz 3.16 bzw. 3.17 anzuwenden. Es ist durchaus möglich, dass durch geeignete Enumeration der Möglichkeiten ein effizienter Algorithmus gefunden werden kann, was aber hier nicht untersucht wurde.

Wir wollen zum Abschluss dieses Unterabschnitts nochmals den speziellen Fall von zwei Molds betrachten. Zuerst noch einmal das Beispiel, das nach der Definition der Job-Planung (Definition 3.2) gezeigt wurde.

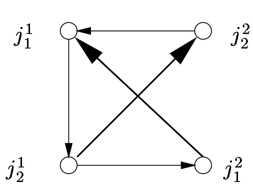
Beispiel Jobgraph-Kriterium:

Wire-Bonder	1	2	3	4
Belegung	j_1^2	j_2^2	j_2^1	j_2^1
	j_1^1	j_1^1	j_1^2	j_2^2

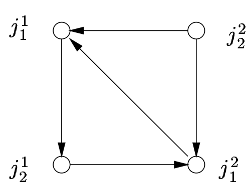
Mold-Gruppen: $g_1^1 = \{j_1^1\}$, $g_2^1 = \{j_2^1\}$ und $g_1^2 = \{j_1^2, j_2^2\}$, wobei g_1^1 vor g_2^1 geplant ist. Dies ergibt folgenden Jobgraphen, wobei durch die Anordnungen der Knoten zwei (unzulässige) Job-Planungen angedeutet werden; unzulässige Bogen werden dabei fett eingezeichnet:



bzw.



Ändert man die Belegung auf Wire-Bonder 4, indem sie durch j_2^2 *vor* j_1^2 ersetzt wird, erhält man folgenden Jobgraphen (man beachte, dass das Kriterium der Zulässigkeit nun erfüllt ist):



3.3 Anwendung: Sperrstrategien

In diesem Unterabschnitt sei eine Mold-Gruppen-Planung gegeben. Es werden nun die im letzten Unterabschnitt erarbeiteten Resultate über die Zulässigkeit angewandt, um eine Wire-Bonder-Planung und eine Mold-Job-Planung (gleichzeitig) zu entwickeln. Dabei gibt man sich eine Reihenfolge der Magazine vor und nimmt an, dass die Magazine in dieser Reihenfolge aus dem Ofen kommen; weiter stellt man sich vor, dass eine Allokations-Strategie vorliegt, die z. B. sagt, wie viele Wire-Bonder pro Job belegt werden sollen und welche Wire-Bonder jeweils am ehesten. Diese Strategie wird nun modifiziert mittels einer *Sperrstrategie*: Für jedes Magazin, das auf die Wire-Bonder gelegt werden soll, werden evtl. einige Wire-Bonder gesperrt und die bisherige Strategie auf die verbleibenden, nicht gesperrten Wire-Bonder abgewandt.

Zunächst soll der Fall eines einzigen Die-Bonders betrachet werden.

Weil die Magazine auf dem Die-Bonder jobweise bearbeitet werden, nehmen wir an, dass sie auch in dieser Reihenfolge (d. h. immer alle Magazine eines Jobs unmittelbar hintereinander) aus dem

Ofen genommen werden:

Satz 3.18 (Sperrstrategie für einen Die-Bonder) *Es gelte für die Reihenfolge der Magazine, wie sie aus dem Ofen genommen werden:*

i) Es kommen immer alle Magazine eines Jobs unmittelbar hintereinander (also kein Mischen von Jobs), und

ii) falls die Jobs j_{i_1} und j_{i_2} auf die gleiche Mold gehen und j_{i_1} zu einer früheren Gruppe gehört als j_{i_2} (gemäss Gruppenplanung), dann kommen die Magazine von j_{i_1} vor den Magazinen von j_{i_2} aus dem Ofen.

Dann gilt: Unabhängig davon, wie die Magazine auf den Wire-Bondern alloziert werden, existiert am Ende der Wire-Bonder-Allokation immer eine zulässige Job-Planung auf den Molds.

Beweis: Numerieren wir die Jobs aufsteigend in der Reihenfolge, wie sie aus dem Ofen kommen $(j_1, j_2, \dots)$, dann gibt es im Jobgraphen nur Bogen (j_{i_1}, j_{i_2}) mit $i_1 < i_2$ (für die Gruppen-Bogen gilt dies wegen Voraussetzung *ii)*, für die Queue-Bogen, weil für je zwei Jobs j_{i_1}, j_{i_2} mit Magazinen von j_{i_1} vor Magazinen von j_{i_2} auf einem Wire-Bonder nicht j_{i_2} vor j_{i_1} aus dem Ofen kommen kann). Also gibt es keine Zykeln im Jobgraphen, d. h. alle stark zusammenhängenden Komponenten bestehen nur aus einem Job und sind deshalb auflösbar. ■

Die Satz 3.18 entsprechende Sperrstrategie ist also eigentlich gar keine: Wenn von einer geeigneten Reihenfolge der Magazine nach dem Ofen ausgegangen wird, müssen nie Wire-Bonder gesperrt werden, es kann direkt die gegebene Allokations-Strategie eingesetzt werden. Es ist wichtig, zu bemerken, dass die Reihenfolge der Magazine, von der ausgegangen wird, nicht zwingend mit der tatsächlich eintretenden identisch sein muss, sondern nur eine Hilfe ist für die Konstruktion der Planung im zweiten modularen Planungsschritt; die tatsächliche Reihenfolge wird erst im letzten modularen Planungsschritt (ausgehend von der Wire-Bonder-Belegung) festgelegt (natürlich kann diese tatsächliche Reihenfolge nicht stark von der zuerst angenommenen abweichen).

Analog zu oben nun im folgenden der Fall mit mehreren Die-Bondern:

Satz 3.19 (Sperrstrategie für mehrere Die-Bonder) *Es gelte für die Reihenfolge der Magazine, wie sie aus dem Ofen genommen werden: Im Zeitpunkt, da ein Magazin m_i aus dem Ofen genommen wird, sind alle Magazine, die auf die gleiche Mold gehen wie m_i, aber zu einer früheren Gruppe gehören, bereits auf den Wire-Bondern alloziert.*
Dann gilt: Wenn kein Magazin $m_1 \in j_1$ auf einem Wire-Bonder alloziert wird, auf dem bereits ein Magazin $m_2 \in j_2 \neq j_1$ liegt, wobei von j_2 noch Magazine alloziert werden müssen (also später als m_1), dann kann kein Mischen von Jobs auf den Wire-Bondern auftreten, und wenn es nie zu einer Sperrung aller Wire-Bonder kommt, so liegt am Ende der Wire-Bonder-Allokation eine zulässige Wire-Bonder-Belegung vor.

Beweis: Sei für jeden Job j_i der Zeitpunkt, in dem das letzte Magazin von j_i aus dem Ofen genommen und auf die Wire-Bonder gelegt wird, mit t_i bezeichnet, wobei wir die Numerierung so wählen, dass $t_1 < t_2 < \cdots < t_n$ gilt. Dann gibt es im Jobgraphen nur Bogen (j_{i_1}, j_{i_2}) mit $i_1 < i_2$ (für die Gruppen-Bogen gilt dies nach der Voraussetzung im Satz, dass im Zeitpunkt t_{i_2} alle Magazine von früheren Jobs schon alloziert sind, d. h. insbesondere $t_{i_1} < t_{i_2}$; für die Queue-Bogen betrachtet man zwei Jobs j_{i_1}, j_{i_2} mit einem Magazin $m_1 \in j_{i_1}$ vor einem Magazin $m_2 \in j_{i_2}$ auf einem Wire-Bonder: Nach der Sperregel konnte m_2 erst nach dem Zeitpunkt t_{i_1} auf den Wire-Bonder gelegt werden, also gilt $t_{i_1} < t_{i_2}$ und somit $i_1 < i_2$). Also gibt es keine Zykeln im Jobgraphen, d. h. alle stark zusammenhängenden Komponenten bestehen nur aus einem Job und sind deshalb auflösbar. Dass kein Mischen von Jobs möglich ist, ist klar. ■

Bei geeigneter Wahl der Reihenfolge der Magazine nach dem Ofen, und wenn mit der Allokation jeweils nicht zuviele Wire-Bonder vom gleichen Job belegt werden, kann man leicht sicherstellen, dass bei der Sperrstrategie gemäss Satz 3.19 nie alle Wire-Bonder gesperrt werden müssen, also die Magazine vollständig alloziert werden können.

Die gezeigten Sperrstrategien sollen nur ein Beispiel für eine Anwendung der Zulässigkeitskriterien sein; wie eine Wire-Bonder-Planung und Mold-Job-Planung gefunden wird, wird im Rahmen der modularen Planung bewusst offen gelassen. Die modulare Planung gibt nur Bedingungen vor, die erfüllt sein müssen, und Grössen, die optimiert werden können (vgl. nächsten Unterabschnitt).

3.4 Optimierung der Planung

Bisher wurde nur die Zulässigkeit von Wire-Bonder-Planung und Mold-Job-Planung betrachtet, zeitliche Relationen kamen höchstens indirekt über die Reihenfolge-Bedingungen ins Spiel. Jetzt sollen eher zeitliche Aspekte betrachtet werden; allerdings wird das konkrete Formulieren einer Zielfunktion, die es zu optimieren gilt, nicht im Rahmen der modularen Planung gemacht, es werden lediglich die Grössen bezeichnet, die bei der Planung berücksichtigt werden sollen.

Folgende Grössen sollen bei der Wire-Bonder-/Mold-Gruppen-Planung berücksichtigt werden:

a) Zulässigkeit der Planungen
b) (kleine) Gesamtumrüstzeit auf den Wire-Bondern
c) (kleine) Anzahl Umrüstungen auf den Wire-Bondern
d) (Verhindern von) Rückstau in den Ausgangspuffern von Wire-Bondern
e) (Verhindern von) Leerzeiten auf den Molds
f) (Verhindern von) Leerzeiten auf den Wire-Bondern
g) (Verhindern von) Rückstau in den Ausgangspuffern der Die-Bonder
h) (ausgeglichene) Endsituation auf den Wire-Bondern

Zu den einzelnen Punkten:

a) Die Zulässigkeit wurde ausführlich in den vorangehenden Unterabschnitten behandelt.
b) Sicherlich soll die Summe aller Umrüstzeiten auf den Wire-Bondern eher klein gehalten werden. Als in die Zielfunktion einfliessende Grösse ist sie jeweils einfach aus der Wire-Bonder-Belegung zu berechnen, ihre Gewichtung in der Zielfunktion ist durch Simulation und Praxiserfahrung zu bestimmen.
c) Es kann sinnvoll sein, nicht nur auf die Gesamtumrüstzeiten zu achten, sondern auch auf die Anzahl der Umrüstungen: Einerseits bedeutet jedes Umrüsten ein entsprechendes Personalaufgebot, was u. a. Koordinationsaufwand mit sich bringt, andererseits ist jedes Umrüsten eine mögliche Fehlerquelle und deshalb zur möglichsten Qualitätssicherung eher zu vermeiden. Im weiteren gilt das unter *b)* zur Berechenbarkeit und Gewichtung Gesagte.
d) Das Verhindern von Rückstaus in den Ausgangspuffern der Wire-Bonder muss hohe Priorität haben und kann durchaus als Restriktion an die betrachteten Planungen benutzt werden. Ein Rückstau tritt dann auf, wenn die Magazine nicht genug schnell in die entsprechenden Mold-Puffer gelegt werden können, entweder weil diese selbst voll sind, oder weil die betroffenen Jobs auf ihrer Mold noch nicht aktuell sind. Beides weist darauf hin, dass auf den Wire-Bondern in einem gewissen Zeitraum zuviel für eine Mold und zu wenig für die andere Mold gearbeitet wurde (wenn nicht generell auf den Wire-Bondern Überkapazitäten bestehen oder gar die Jobs einer Mold in einer falschen Reihenfolge auf den Wire-Bondern bearbeitet werden, was wir hier beides nicht annehmen wollen). Wie weit der Jobgraph geeignet ist, solche Situationen erkennen zu lassen, oder ob dies auf Stufe der Magazine (Wire-Bonder-Belegung) studiert werden muss, muss die Praxiserfahrung zeigen (vgl. auch die Bemerkung weiter unten).
e) Leerzeiten auf den Molds entstehen (wenn kein Rückstau gemäss *d)* vorliegt), wenn der auf der entsprechenden Mold aktuelle Job j_i auf den Wire-Bondern zu spät bearbeitet wird oder (wie in *d)*) ein Job mit Magazinen vor den Magazinen von j_i diese in den Augangs-Puffern der Wire-Bonder zurückhält, weil er selbst noch nicht aktuell ist auf seiner Mold. Wenn wir wieder annehmen, dass die Jobs auf den Wire-Bondern je möglichst entsprechend der Reihenfolge auf der Mold bearbeitet werden, dann wurde hier für die Mold mit Leerzeiten in einem gewissen Zeitraum zu wenig gearbeitet (wir wollen ausschliessen, dass auf den Wire-Bondern generelle Unterkapazitäten bestehen). Weiter gilt das in *d)* über den Jobgraph Gesagte.

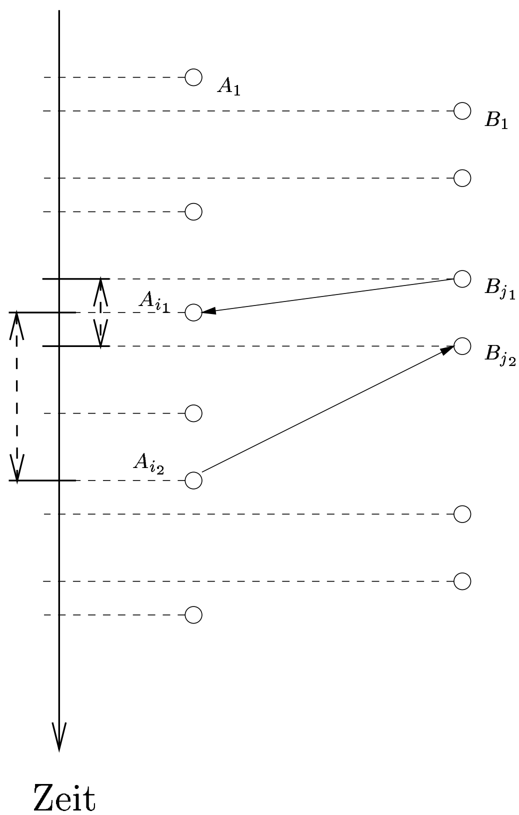
f) Leerzeiten auf den Wire-Bondern entstehen, wenn die benötigten Magazine nicht rechtzeitig aus dem Ofen kommen. Dies kann passieren, wenn ein Wire-Bonder-Eingangspuffer überläuft und einen Rückstau in den Ofen bzw. auf die Die-Bonder zurück verursacht und dadurch anderen Wire-Bondern den Nachschub an Magazinen unterbindet; oder die benötigten Magazine werden auf den Die-Bondern zu spät bearbeitet. Analog wie oben können wir als Grund eine zeitweise zu einseitige Produktion der Die-Bonder für einzelne Wire-Bonder annehmen. Wenn hier eine Fehlplanung auf den Wire-Bondern schuld sein kann, dann eine, wo bei der Wire-Bonder-Allokation die Arbeit, die gleichzeitig von den Die-Bondern geleistet werden kann, d. h. die Arbeit von ebensovielen Jobs wie es Die-Bonder gibt, auf zu wenige Wire-Bonder verteilt wurde.

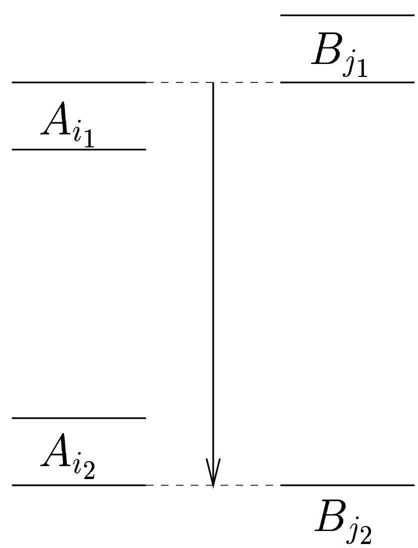
g) Zusätzlich zu dem in *f)* Gesagten müssen wir beachten, dass gleichzeitig jeder Die-Bonder an einem anderen Job arbeitet. Deshalb darf die Nachfrage der Wire-Bonder nicht zu einseitig sein, sondern sollte in einem gewissen Zeitraum mindestens eine der Anzahl Die-Bonder entsprechende Anzahl verschiedener Jobs beinhalten.

h) Es kann wünschenswert sein, dass die Wire-Bonder nicht allzu unterschiedliche Bearbeitungs-Endzeitpunkte haben. Es ist jedoch anzunehmen, dass dies bereits weitgehend durch die oben betrachteten Grössen berücksichtigt ist.

Wir wollen nun noch einen Zusammenhang zwischen den unter *d)* und *e)* beschriebenen Situationen und dem Jobgraphen herstellen, wobei wir uns auf den Fall von zwei Molds beziehen: In *d)* und *e)* liegt das Problem in einer einseitigen Arbeitsleistung der Wire-Bonder während eines gewissen Zeitraums zugunsten einer Mold, d. h. für eine Mold wird zuviel gearbeitet, während für die andere Mold zu wenig produziert wird. Wenn der betreffende Zeitraum genug gross ist, kann dies im Jobgraphen sichtbar werden:

Es seien die Jobs im Jobgraphen mit $A_1, A_2, \ldots, B_1, B_2, \ldots$ bezeichnet (wie in Satz 3.16) und der Jobgraph entsprechend angeordnet, wobei die Jobs entsprechend dem zeitlichen Ablauf auf den Molds gemäss einer Zeitskala plaziert werden (z. B. zum Zeitpunkt, in dem das letzte Magazin des Jobs auf den Molds fertig wird).





Nun betrachten wir Bogenpaare (B_{j_1}, A_{i_1}), (A_{i_2}, B_{j_2}), wo sich die Bogen nicht überkreuzen, also

z. B. $i_1 < i_2$ und $j_1 < j_2$. Im Zeitpunkt, in dem das letzte Magazin von A_{i_1} von den Wire-Bondern auf die Mold A gelegt wird, ist wegen des Bogens (B_{j_1}, A_{i_1}) der Job B_{j_1} zumindest teilweise auf der Mold B. Wegen des anderen Bogens kann das letzte Magazin von B_{j_2} erst auf die Mold B gelegt werden, wenn ein Teil der Magazine von Job A_{i_2} auf Mold A ist. Also fällt im gleichen Zeitraum für Mold A Arbeit von den Jobs A_{i_1} bis und mit A_{i_2} an, für Mold B aber höchstens Arbeit aus dem Bereich von B_{j_1} bis und mit B_{j_2}; wenn die erste Arbeitsmenge die zweite um zuviel übersteigt, kann dies Rückstau (wegen Mold A) oder Leerstehen (von Mold B) bedeuten.

Ob die Untersuchung des Jobgraphen auf solche unausgeglichenen Trapeze genügt, oder ob die Situationen aus *d)* und *e)* notwendigerweise mit genaueren, magazinweisen Belegungsplänen (und evtl. ähnlichen Überlegungen) studiert werden müssen, wird die Simulation und die Praxiserfahrung zeigen.

4 Die-Bonder- und Ofen-Planung

In diesem Abschnitt wir der dritte und letzte modulare Planungsschritt behandelt, die Planung von Die-Bondern und Ofen. Dabei werden wir im Rahmen der modularen Planung v. a. an den Zeitpunkten interessiert sein, in denen die Magazine aus dem Ofen genommen und auf die Wire-Bonder gelegt werden, denn dies ist die Schnittstelle zur bisher erfolgten Planung. Ausdrücken werden wir den dritten Planungschritt, was das Zulässigkeitsproblem betrifft, als Die-Bonder-Planung; die Ofen-Planung wird gewissermassen vernachlässigt.

Da die betrachteten Strukturen und die Aussagen in diesem Abschnitt grosse Ähnlichkeit zu jenen im letzten Abschnitt 3 haben, fassen wir die Darstellung knapper.

Im folgenden seien der erste und der zweite modulare Planungsschritt schon erfolgt, insbesondere soll eine Wire-Bonder-Planung vorliegen.

4.1 Zulässigkeit

Wir definieren nochmals, was eine Die-Bonder-Planung ist und werden dann den Begriff der Zulässigkeit für solche Planungen einführen und studieren.

Definition 4.1 (Die-Bonder-Planung) *Eine Die-Bonder-Planung ist gegeben durch*

(i) Zuteilung von jedem Job zu einem Die-Bonder

(ii) Für jeden Die-Bonder eine Reihenfolge derjenigen Jobs, die diesem Die-Bonder zugeteilt sind.

Wir wollen in diesem Unterabschnitt das Zulässigkeitsproblem des dritten modularen Planungsschrittes betrachten; tatsächlich werden wir es vom Ansatz her auf die Die-Bonder reduzieren, d. h. wir vergessen für den Augenblick, dass wir einen Ofen haben:

Definition 4.2 (zulässige Die-Bonder-Planung)
Eine Die-Bonder-Planung heisst zulässig, wenn gilt:
Es gibt eine Reihenfolge, in der die Magazine von den Die-Bondern auf die Wire-Bonder gelegt werden können, wobei das so bewegte Magazin jeweils das vorderste auf seinem Die-Bonder sein muss (d. h. unter allen Magazinen, die auf diesem Die-Bonder eingeplant sind und noch nicht auf die Wire-Bonder gelegt wurden, ist es das am frühesten auf dem Die-Bonder bearbeitete Magazin) und wobei durch diese Magazinbewegungen die vorgegebene Wire-Bonder-Belegung aufgebaut wird.

Man sieht leicht, dass es zu jeder im Sinne von Definition 4.2 zulässigen Die-Bonder-Planung eine Ofenplanung gibt, die unseren Erwartungen entspricht: Die Ofenplanung kann z. B. gerade so gemacht werden, dass die Magazine von den Die-Bondern in der gleichen Reihenfolge in den Ofen gelegt werden, wie sie gemäss der Definition 4.2 auf die Wire-Bonder gelegt werden können; dann sind die Magazine wegen der einheitlichen Verweildauer im Ofen von 30 Minuten auch in wieder derselben Reihenfolge bereit, um auf die Wire-Bonder gelegt zu werden. Umgekehrt ist es wenig sinnvoll, Die-Bonder-Planungen zu betrachten, die gemäss Definition 4.2 nicht zulässig sind, zu denen es aber Ofen-Planungen gibt, so dass das Ganze doch funktioniert (nämlich dank Parkieren von zu frühen Magazinen bzw. gegenseitigem Überholen im Ofen).

Wir wollen im folgenden den Sprachgebrauch so halten, als ob kein Ofen existieren würde und die Magazine direkt von den Die-Bondern auf die Wire-Bonder gelegt würden.

Analog zum Jobgraphen definieren wir den reduzierten Jobgraphen:

Definition 4.3 (reduzierter Jobgraph G_J^r) *Der reduzierte Jobgraph $G_J^r = (V_J, E_J^r)$ ist definiert wie folgt:*

V_J: $V_J = \{j \mid j \text{ ein Job}\}$

E_J^r: $(j_1, j_2) \in E_J^r$, *wenn die folgende Bedingung gilt:*

Queue: Es gibt einen Wire-Bonder, auf dem ein Magazin $m_1 \in j_1$ vor einem Magazin $m_2 \in j_2 \neq j_1$ bearbeitet wird (dabei muss m_1 nicht notwendigerweise unmittelbar vor m_2 liegen!).

Der reduzierte Jobgraph G_J^r entspricht also dem Jobgraphen G_J, ausser dass die Bogen nur durch die Queue-Bedingungen, nicht aber durch die Mold-Gruppen definiert sind.

Wieder können wir die Bogen charakterisieren:

- schwache Interpretation (gilt für alle Bogen $(j_1, j_2) \in G_J^r$):
  Das (zeitlich) erste Magazin von j_1 muss vor dem letzten Magazin von j_2 von den Die-Bondern auf die Wire-Bonder gelegt werden.
- starke Interpretation (gilt für Bogen $(j_1, j_2) \in G_J^r$, wo j_1 und j_2 auf dem gleichen Die-Bonder bearbeitet werden):
  Das letzte Magazin von j_1 muss vor dem ersten Magazin von j_2 von den Die-Bondern auf die Wire-Bonder gelegt werden.

Analog zum Satz 3.17 gilt nun das folgende Zulässigkeitskriterium:

Satz 4.4 (Kriterium für Zulässigkeit einer Die-Bonder-Planung) *Gegeben seien ein reduzierter Jobgraph mit zugrundeliegender Wire-Bonder-Belegung und eine Die-Bonder-Planung P: Die Bezeichnungen der Jobs sei $j_1^k, j_2^k, \dots, j_{n_k}^k$ für den Die-Bonder D_k, $k \in \{1, \dots, n^d\}$, $n_k \in \{0, 1, 2, \dots\}$ die Anzahl Jobs auf Die-Bonder D_k, wobei innerhalb des gleichen Die-Bonders Jobs mit kleineren unteren Indizes früher auf die Wire-Bonder kommen als Jobs mit grösseren unteren Indizes.*
Dann gilt: P ist genau dann zulässig (im Sinne von Definition 4.2), wenn die folgende Bedingung gilt:

Es gibt im reduzierten Jobgraphen für kein $n \in \{1, 2, \dots\}$ Bogen der Form

$$(j_{b_{i_1}}^{i_1}, j_{a_{i_2}}^{i_2}), \dots, (j_{b_{i_{n-1}}}^{i_{n-1}}, j_{a_{i_n}}^{i_n}), (j_{b_{i_n}}^{i_n}, j_{a_{i_1}}^{i_1})$$

mit $a_{i_k} < b_{i_k}$ für alle $k \in \{1, \dots, n\}$, wobei $i_1, \dots, i_n$ alle verschieden und $i_k \in \{1, \dots, n^d\}$ für alle k.

Beweis: Der Beweis geht völlig analog zum Beweis von Satz 3.17, ausser dass hier Magazine auf die Wire-Bonder gelegt werden, dort von den Wire-Bondern weggenommen werden; dabei soll im Beweis-Teil *($\Leftarrow$)* ein Job j aktuell auf seinem Die-Bonder heissen, wenn das momentan vorderste Magazin auf diesem Die-Bonder zu Job j gehört. ■

Aus Satz 4.4 kann auch eine Satz 3.15 entsprechende Folgerung über die Existenz und Konstruktion von zulässigen Die-Bonder-Planungen gezogen werden; die Formulierungen sind völlig analog zum bereits Gesehenen, die Beweise einfach. Stattdessen wollen wir folgende wichtige Bemerkung machen:

Satz 4.5 (Existenz einer zulässigen Die-Bonder-Planung für $n^d \geq n^m$) *Sei mit n^d die Anzahl der Die-Bonder und mit n^m die Anzahl der Molds in der Autoline bezeichnet. Dann existiert im Fall $n^d \geq n^m$ immer eine zulässige Die-Bonder-Planung (nämlich die vorliegende Mold-Job-Planung).*

Beweis: Da der reduzierte Jobgraph nur Bogen aufweist, die im Jobgraphen auch vorhanden sind, und da sich die Kriterien von Satz 3.17 und Satz 4.4 völlig entsprechen, kann als zulässige Die-Bonder-Planung gerade die Mold-Job-Planung aus dem zweiten modularen Planungsschritt genommen werden (indem man allfällig überzählige Die-Bonder leer lässt). ∎

Da in der vorliegenden Autoline $n^d = n^m = 2$ ist, brauchen wir uns also um die Existenz einer zulässigen Die-Bonder-Planung keine Sorgen zu machen. Hingegen kann leicht ein (wohl ziemlich konstruiertes) Beispiel dafür angegeben werden, dass im Fall $n^d < n^m$ keine zulässige Die-Bonder-Planung existieren muss, auch wenn die bisherigen Planungsmodule Zulässigkeit aufwiesen:

Beispiel einer zulässigen Wire-Bonder-Belegung, zu der keine zulässige Die-Bonder-Planung existiert ($n^d < n^m$): Pro Mold sei ein Job j^k, $k \in \{1, \ldots, n^m\}$ mit zwei Magazinen gegeben, die auf den Wire-Bondern wie folgt liegen sollen:

Wire-Bonder	1	2
Belegung	j^1	j^{n^m}
	j^2	j^{n^m-1}
	$\vdots$	$\vdots$
	j^{n^m-1}	j^2
	j^{n^m}	j^1

Da wir pro Mold nur einen Job haben, ist die Wire-Bonder-Belegung natürlich zulässig. Hingegen muss es bei jeder Die-Bonder-Planung wegen $n^d < n^m$ einen Die-Bonder geben, auf dem mindestens zwei Jobs j^{k_1}, j^{k_2} mit $k_1 < k_2$ eingeplant werden; egal in welcher Reihenfolge die beiden Jobs auf den Die-Bonder gelegt werden, entsteht ein unzulässiger Bogen. ●

Um auch in den Fällen $n^d < n^m$ die Existenz einer zulässigen Die-Bonder-Planung garantieren zu können, kann beispielsweise verlangt werden, dass der reduzierte Jobgraph azyklisch ist. Konkret wird man diese Zykelfreiheit im zweiten modularen Schritt als zusätzliche Voraussetzung für die Zulässigkeit verlangen (man beachte, dass z. B. die in Unterabschnitt 3.3 gezeigten Sperrstrategien Wire-Bonder-Planungen mit zykelfreien reduzierten Jobgraphen erzeugen) und später die Die-Bonder-Planung mit Hilfe einer topologischen Sortierung des reduzierten Jobgraphen gewinnen.

4.2 Optimierung der Planung

Es ist nicht zu erwarten, dass im letzten modularen Planungsschritt für die Wahl der Die-Bonder-Planung noch viele Freiheiten bestehen; wir werden die Diskussion der Optimierung daher recht kurz halten.

Folgende Grössen sollen bei der Die-Bonder-Planung berücksichtigt werden:

a) Zulässigkeit der Planung
b) (kleine) Gesamtumrüstzeit auf den Die-Bondern
c) (kleine) Anzahl Umrüstungen auf den Die-Bondern
d) (Verhindern von) Rückstau in den Ausgangspuffern der Die-Bonder
e) (Verhindern von) Leerzeiten auf den Wire-Bondern
f) (ausgeglichene) Endsituation auf den Die-Bondern

Die Bemerkungen zu den einzelnen Punkten sind grundsätzlich ähnlich wie in Unterabschnitt 3.4. Zu den Punkten *d)* und *e)* sei noch folgendes beigefügt:

Jeder Wire-Bonder W_k habe aufgrund der vorhergehenden Auftrags-Planung einen erwarteten Zeitpunkt t_0^k, wo er mit der Arbeit der neuen Jobs beginnen kann. Ausgehend von t_0^k und der Wire-Bonder-Planung ergibt sich so eine Reihe von Zeitpunkten $t_1^k, t_2^k, \ldots$, in denen je ein Magazin auf dem Wire-Bonder erwartet wird (wenn das Magazin im betreffenden Zeitpunkt noch nicht auf dem Wire-Bonder ist, entstehen Leerzeiten und die folgenden Zeitpunkte verschieben sich); die Zeitpunkte, in denen die Magazine gemäss Die-Bonder-Planung auf die Wire-Bonder gelegt werden, sollen entsprechend mit $\tilde{t}_i^k$ bezeichnet sein. Man kann die Optimierung der Die-Bonder-Planung nun z. B. so auffassen, dass die maximale Differenz $\tilde{t}_i^k - t_i^k$ möglichst klein (bzw. negativ) gehalten werden soll. Dann ist es übrigens die beste Strategie, ein Magazin, das aus dem Ofen kommt, auf denjenigen Wire-Bonder zu legen (falls es mehrere Möglichkeiten gibt), wo das Magazin am frühesten bearbeitet wird. Für die Optimierung mag es dann genügen, neben dem reduzierten Jobgraphen (für die Zulässigkeit) noch die Tabelle mit den Zeitpunkten t_i^k zu benutzen, allerdings dürfte es zweckmässiger sein, auch die übrige Information über die bisher erfolgten Planungen zur Verfügung zu haben.

5 Änderung der Planung

In diesem Abschnitt wird nun untersucht, was bei gewissen Änderungen in der Planung für Aussagen machbar sind, d. h. wir werden von einer kompletten, zulässigen modularen Planung ausgehen und dann Änderungen vornehmen, die also eine Neuplanung erfordern; die Neuplanung soll dann mit möglichst kleinem Aufwand aus der bereits gemachten Planung hervorgehen.

Änderungen könnten z. B. sein:

- Ein zusätzlicher Job soll eingeplant werden.
- Ein bereits eingeplanter Job entfällt.
- Die Priorität eines Jobs in der Planung ändert, d. h. ein Job ist z. B. plötzlich dringend und soll möglichst rasch erledigt werden.

Wir wollen uns vor allem dem ersten Problem eines zusätzlichen Jobs widmen; die weiteren Probleme werden mit den dann bereits gemachten Überlegungen recht einfach zu behandeln sein.

Das prinzipielle Vorgehen wird sein, dass wir einen modularen Planungsschritt um den anderen betrachten und jeweils eine entsprechende Planungsänderung vornehmen, die sich auf die folgende Planung entsprechend stärker oder schwächer auswirkt; falls z. B. die Mold-Gruppen-Planung zu stark verändert wird, bleibt in der Folge kaum etwas anderes übrig, als vollständig neu zu planen, können hingegen die Mold-Gruppen in ihrer Ordnung erhalten werden, so ist zumindest im zweiten modularen Planungsschritt in der Regel nur eine kleine Veränderung nötig.

5.1 Einplanung eines zusätzlichen Jobs

Sei eine Auftragsmenge mit Jobs j_i vorgegeben sowie eine entsprechende zulässige Planung (vgl. Abschnitte 2, 3 und 4). Nun soll ein zusätzlicher Job j^* in die Planung aufgenommen werden; weiter können wir uns vorstellen, dass j^* zusätzlich eine Priorität gegeben ist, z. B. besondere Dringlichkeit.

Der erste Schritt ist die Mold-Gruppen-Planung. Entweder können wir den neuen Job j^* einer bereits bestehenden Mold-Gruppe zuteilen, oder j^* bildet eine neue Mold-Gruppe für sich. Es kann nun sein, dass eine Neuplanung der Mold-Gruppen notwendig wird, z. B. wegen den zeitlichen Auswirkungen durch den zusätzlichen Job oder wegen dessen Priorität. Um aber über die folgenden Planungsschritte noch etwas aussagen zu können, wollen wir annehmen, dass die bisherige Gruppen-Planung erhalten bleibt (bis auf die Grösse einer Gruppe; da der Fall, dass j^* eine Gruppe für sich bildet, besonders einfach sein wird und ohne Erwähnung in den folgenden Betrachtungen eingeschlossen werden kann, wollen wir ihn nicht explizit weiterverfolgen).

Wie im Unterabschnitt 2.3 können bereits nach der Einplanung von j^* in der Mold-Gruppen-Planung zeitliche Abschätzungen gemacht werden, wann j^* auf der Mold fertig sein wird.

Der interessante Schritt ist nun die Einplanung auf den Wire-Bondern. Wir beschränken uns auf den Fall von zwei Molds, was die Darstellung entsprechend vereinfacht. Seien die bisherigen Jobs wie in Satz 3.16 mit $A_1, A_2, \ldots, B_1, B_2, \ldots$ bezeichnet.

Wir machen nun folgenden Ansatz: Die bisherige Planung bleibe völlig unverändert, ausser dass der neue Job j^* bzw. seine Magazine zwischen bisherige Jobs eingeschoben werden. Zuerst wählen wir den Ort, an dem wir j^* in der Mold-Job-Planung einschieben wollen, danach betrachten wir die Möglichkeiten, auf den Wire-Bondern Magazine von j^* einzuschieben.

Wählen wir also zuerst den Einschubort von j^* in der Mold-Job-Planung: Wenn wir im ersten Planungsschritt j^* einer Mold-Gruppe g_i zugeteilt haben, müssen wir dies berücksichtigen; sei o. B. d. A. g_i eine Gruppe der Mold A, also $g_i = \{A_{p^-}, A_{p^-+1}, \ldots, A_{p^+}\}$ für $p^- \leq p^+$, dann sind als Einschuborte möglich: Ort p^- ($\equiv$ vor A_{p^-}), ..., Ort p^+ ($\equiv$ vor A_{p^+}), Ort $p^+ + 1$ ($\equiv$ nach A_{p^+}). Für die folgenden Überlegungen gehen wir davon aus, dass ein Ort k, $k \in \{p^-, \ldots, p^+ + 1\}$ gewählt worden ist.

Abhängig vom Einschubort k in der Mold-Job-Planung untersuchen wir nun die Möglichkeiten, Magazine von j^* auf den Wire-Bondern einzuschieben. Dazu zunächst folgende Definitionen:

Definition 5.1 **(q_k^- und q_k^+)** *Sei E_J die Bogenmenge des Jobgraphen der bisherigen Planung.*

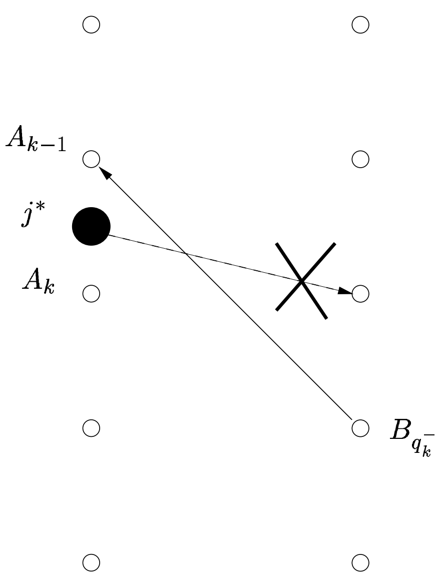
$$q_k^- := max\{\ell \mid \exists\, \tilde{\ell} < k : (B_\ell, A_{\tilde{\ell}}) \in E_J\}, \text{ wobei } max\emptyset := -\infty$$

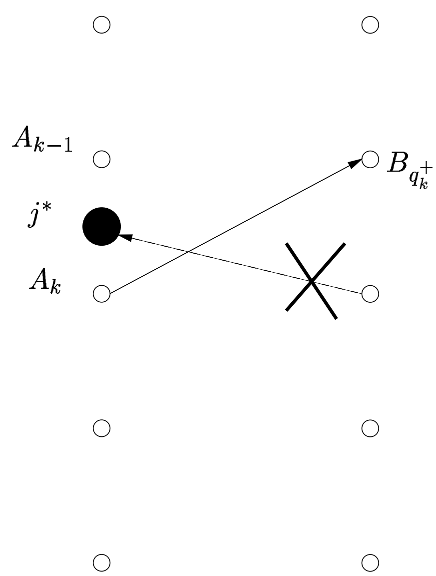
$$q_k^+ := min\{\ell \mid \exists\, \tilde{\ell} \geq k : (A_{\tilde{\ell}}, B_\ell) \in E_J\}, \text{ wobei } min\emptyset := +\infty$$

Der Sinn von q_k^- und q_k^+ ist aus folgenden Figuren ersichtlich: Wenn wir Zulässigkeit nach dem Einschieben von Magazinen von j^* auf den Wire-Bondern haben wollen, so müssen als notwendige Bedingungen erfüllt sein:

(i) Auf keinem Wire-Bonder darf ein Magazin von j^* vor einem Magazin eines Jobs B_j mit $j < q_k^-$ eingeschoben werden.

(ii) Auf keinem Wire-Bonder darf ein Magazin von j^* hinter einem Magazin eines Jobs B_j mit $j > q_k^+$ eingeschoben werden.





Man beachte übrigens, dass die Abbildungen $k \mapsto q_k^-$ und $k \mapsto q_k^+$ beide monoton steigend in k sind; um einen Job also z. B. möglichst früh auf die Wire-Bonder legen zu können, muss man k möglichst klein wählen (vgl. auch mit dem folgenden).

Wir definieren nun zuerst den Begriff des zulässigen Einschubplatzes auf einem Wire-Bonder, um nachher anzugeben, wie mit unserem Ansatz des Einschiebens zulässige Planungen entstehen.

Definition 5.2 (zulässiger Einschubplatz) *Es sei in der Mold-Job-Planung für den neuen Job j^* der Einschubort k gewählt worden. Sei ein beliebiger Wire-Bonder W_i betrachtet. Eine Stelle S zwischen zwei bisher auf dem Wire-Bonder W_i liegenden Magazinen (das soll auch die Stellen vor dem ersten bzw. hinter dem letzten Magazin einschliessen) heisst zulässiger Einschubplatz auf dem Wire-Bonder W_i, wenn auf W_i gilt:*

(i) Es gibt keinen Job, von dem vor und hinter S Magazine liegen.

(ii) Alle Jobs A_j mit Magazinen vor S erfüllen $j < k$.

(iii) Alle Jobs A_j mit Magazinen hinter S erfüllen $j \geq k$.

(iv) Alle Jobs B_j mit Magazinen vor S erfüllen $j \leq q_k^+$.

(v) Alle Jobs B_j mit Magazinen hinter S erfüllen $j \geq q_k^-$.

Die Bedingungen in Definition 5.2 sind alle notwendig für die Zulässigkeit der Job-Planung nach dem Einschieben eines Magazins von j^* an einem solchen Einschubplatz: *(i)* ist notwendig, um das Mischen von Jobs zu verhindern, *(ii)* und *(iii)* wegen den sonst entstehenden unzulässigen starken Bogen, *(iv)* und *(v)* wegen den sonst entstehenden unzulässigen Paaren von schwachen Bogen (vgl. Satz 3.16).

Falls es auf einem Wire-Bonder mehrere zulässige Einschubplätze gibt, so liegen diese offensichtlich hintereinander (wobei wir nur solche Einschubplätze betrachten, welche die Bedingung *(i)* in Definition 5.2 erfüllen).

Es gilt nun folgender Satz:

Satz 5.3 (Existenz eines zulässigen Einschubplatzes auf jedem Wire-Bonder) *Auf jedem Wire-Bonder gibt es einen zulässigen Einschubplatz.*

Beweis: Da der Jobgraph aus der bisherigen Planung zulässig ist, gilt $q_k^- \leq q_k^+$, wie man sich mit Hilfe von Kriterium 3.16 leicht überlegt. Sei ein beliebiger Wire-Bonder gegeben. Offensichtlich gibt es auf diesem Wire-Bonder Stellen zwischen Magazinen, welche die Bedingungen *(i)*, *(iii)* und *(v)* erfüllen (nämlich z. B. die Stelle hinter dem letzten Magazin); sei S die früheste aller solchen Stellen. Wir zeigen, dass S auch *(ii)* und *(iv)* erfüllt. Nach Wahl von S gibt es drei Möglichkeiten:

- S ist die Stelle ganz zuvorderst auf dem Wire-Bonder: Dann gelten *(ii)* und *(iv)* trivialerweise.
- S ist eine Stelle unmittelbar hinter einem Job A_j mit $j < k$: Dann ist *(ii)* erfüllt, weil sonst ein unzulässiger Bogen $(A_{\tilde{j}}, A_j)$ mit $\tilde{j} \geq k > j$ existieren würde, und *(iv)* ist erfüllt, weil sonst im Widerspruch zur Definition von q_k^- ein Bogen $(B_{\tilde{j}}, A_j)$ mit $\tilde{j} > q_k^+ \geq q_k^-$ existieren würde.
- S ist eine Stelle unmittelbar hinter einem Job B_j mit $j < q_k^- \leq q_k^+$: Dann ist *(iv)* erfüllt, weil sonst ein unzulässiger Bogen $(B_{\tilde{j}}, B_j)$ mit $\tilde{j} > q_k^+ \geq q_k^- > j$ existieren würde, und *(ii)* ist erfüllt, weil sonst im Widerspruch zur Definition von q_k^+ ein Bogen $(A_{\tilde{j}}, B_j)$ mit $\tilde{j} \geq k$ existieren würde.

■

Man erkennt nun leicht, dass weil durch das Einfügen von Magazinen von j^* an je einem zulässigen Einschubplatz auf beliebig vielen Wire-Bondern nur Bogen im Jobgraph neu entstehen, die in j^* beginnen oder in j^* enden, der durch das Einschieben neu entstandene Jobgraph das Zulässigkeits-Kriterium 3.16 erfüllt. D. h. wir können bei einem zusätzlichen Job j^*, nachdem in der Mold-Job-Planung ein Einschubort k gewählt wurde, für jeden Wire-Bonder W_i die Zahl der Magazine von j^* festlegen, die auf W_i gelegt werden sollen, sowie (unabhängig von den anderen Wire-Bondern) einen zulässigen Einschubplatz auf W_i bestimmen.

Falls wir (z. B. im Fall $n^d < n^m$) garantieren wollen, dass der Jobgraph oder der reduzierte Jobgraph durch das Einschieben zykelfrei bleibt, so muss dies für jedes Einschieben auf einem Wire-Bonder überprüft werden, und ein Einschieben auf einem Wire-Bonder kann die Zahl der zulässigen Einschubplätze auf einem anderen Wire-Bonder verringern (und sogar auf Null bringen). Falls man kann jedoch spezielle Voraussetzungen hat, nämlich einen (bisher) azyklischen Jobgraphen mit einer topologische Sortierung $j_1, j_2, \ldots$ für die bisherigen Jobs, die mit der Mold-Job-Planung verträglich ist (d. h. für alle j_{i_1}, j_{i_2} mit $i_1 < i_2$, die auf die gleiche Mold gehen, wird j_{i_1} vor j_{i_2} auf der Mold bearbeitet), verringert sich durch das Einschieben von Magazinen die Zahl der zulässigen Einschubplätze auf keinem Wire-Bonder auf Null; wenn man will, kann man sich im voraus beschränken auf je genau einen zulässigen Einschubplatz pro Wire-Bonder: Man wählt ein (mit der Gruppen-Planung verträgliches) k, sodass man den neuen Job j^* auf den Wire-Bondern am jeweils eindeutigen Platz hinter allen j_i mit $i < k$ und vor allen j_i mit $i \geq k$ einschiebt; der Jobgraph bleibt nach dem Einschieben azyklisch, eine mögliche topologische Sortierung, die mit der neuen Mold-Job-Planung verträglich ist, ist $j_1, \ldots, j_{k-1}, j^*, j_k, \ldots$ Übrigens können die in Unterabschnitt 3.3 gezeigten Sperrstrategien verwendet werden, um solche spezielle topologische Sortierungen für den Jobgraphen zu bekommen.

Mit den obigen Aussagen über die Möglichkeiten, einen zusätzlichen Job einzuschieben, ist der Planungs-Update im zweiten modularen Schritt, was die Zulässigkeit betrifft, befriedigend gelöst. Freilich werden durch das Einschieben die zeitlichen Relationen verändert; hier muss mit weiteren Planungsänderungen nachgebessert werden: Indem Magazine von bisherigen Jobs auf den Wire-Bondern neu plaziert werden, kann die Planung wieder optimiert werden (vgl. dazu die *lokalen Planungsänderungen* im nächsten Unterabschnitt).

Als letzter Schritt muss der zusätzliche Job j^* auf den Die-Bondern eingeplant werden. Da wir davon ausgehen können, dass ohnehin nicht viele Möglichkeiten bestehen, zur neuen Wire-Bonder-Belegung eine Die-Bonder-Planung zu machen, ist eine vollständige Neuplanung (wie bei der Erstellung des bisherigen Plans) durchaus angebracht.

5.2 Lokale Planungsänderungen

Wir wollen die Resultate aus dem letzten Unterabschnitt 5.1 auf allgemeinere Fälle übertragen, wobei wir die Betrachtungen auf den Bereich des zweiten modularen Planungsschritts konzentrieren.

Im letzten Unterabschnitt wurde gezeigt, wie ein zusätzlicher Job auf die Wire-Bonder gebracht werden kann. Genauso kann nun auch ein bisher schon eingeplanter Job innerhalb der Planung verschoben werden; z. B. stellt man sich vor, dass der Job zunächst aus der Planung entfernt wird (wobei die Planung natürlich zulässig bleibt) und dann wie ein neuer Job j^* wieder eingeplant wird, wobei z. B. die Priorität des Jobs neu gewählt wird.

Die Änderungen der Planung, bei denen nur ein einziger Job innerhalb der Planung ändert und alles andere fest bleibt, wollen wir als *lokale Planungsänderungen* bezeichnen; ebenso kann man Nachbarschaftsbegriffe einführen, wobei die *Umgebung einer Planung* gerade aus jenen Planungen besteht, die durch eine lokale Planungsänderung erreicht werden können. Weiter kann man den Begriff der lokalen Planungsänderung verfeinern, indem man verschiedene Stufen unterscheidet:

- lokale Planungsänderungen, die den Jobgraphen nicht verändern bzw. nicht vergrössern: Es werden von einem Job j Magazine von einem Wire-Bonder nur dann auf einen andern gelegt, wenn neben dem dortigen Einschubplatz bereits Magazine von j liegen (d. h. es werden lediglich Änderungen in der Anzahl Magazine pro Wire-Bonder gemacht, aber keine neuen Einschubplätze verwendet).
- lokale Planungsänderungen, welche die Mold-Job-Planung nicht verändern
- übrige lokale Planungsänderungen

Wie weit diese Begriffe für Planungsstrategien verwendet werden können, muss weiter untersucht werden; es bleibt im Rahmen dieser Semesterarbeit keine Zeit, dies zu tun.

6 Zusammenfassung

Nachdem im ersten Abschnitt das der Semesterarbeit zugrundeliegende Modell der Fertigungszelle, das Planungsproblem und die Motivation für die modulare Planung vorgestellt worden sind, wurde in den folgenden drei Abschnitten ein möglicher Ablauf einer solchen Planung eingehend diskutiert, wobei der Schwerpunkt bei Zulässigkeitsbetrachtungen lag. Nach dem Ansatz der Mold-Gruppen-Planung wurde anhand der Wire-Bonder-Planung und der Mold-Job-Planung das Instrumentarium entwickelt, welches für die restliche Diskussion immer wieder genutzt wurde: Zentral sind hier der Jobgraph und die dazugehörigen Zulässigkeitskriterien. Als letzter Planungsschritt wurde die Die-Bonder- und Ofen-Planung behandelt, wobei durch geeignete Reduktion des Problems auf die Die-Bonder praktisch die gleichen Aussagen wie beim zweiten Planungsschritt gemacht werden konnten. Im fünften Abschnitt schliesslich wurden Änderungen der Planung betrachtet, wobei vor allem lokale Planungsänderungen des zweiten Planungsschritts, studiert am Beispiel eines zusätzlichen Jobs, im Zentrum standen.

Diese Semesterarbeit wurde betreut von *Willi Dürig* und *Arlette Gaillard*, denen an dieser Stelle für die Anregungen und die fruchtbaren Diskussionen gedankt sei.