

# Simulationsgestützte Termin- und Kapazitätsplanung in der Spezialglasfertigung

Carsten Ehrenberg

Abteilung für BWL und Unternehmensforschung  
Technische Universität Clausthal

Doktorandenworkshop Nordost  
31. Mai 2013, Magdeburg



# Agenda

- 1 Planungsproblem
- 2 Simulationsgestütztes Lösungsverfahren
  - Genetischer Algorithmus
  - Simulationsmodell
  - Modifikationen
- 3 Zusammenfassung und Ausblick

# Planungsproblem I

Spezialglasfertigung findet in einem **komplexen Produktionssystem** statt

- Kundenauftragsorientierte Serienfertigung in Werkstätten
- Heterogenes Produktportfolio
- Verschiedene Ressourcentypen mit beschränkter Verfügbarkeit
- Technologisch und organisatorisch bedingte Zeitbeziehungen
- Unsicherheiten durch stochastische Bearbeitungszeiten und Losgrößen



# Planungsproblem II

## Dynamisches, stochastisches Termin- und Kapazitätsplanungsproblem unter Zeit- und Ressourcenrestriktionen

- Prädiktive Planung basierend auf Schätzwerten stochastischer Problemparameter
- Validierung von Ablaufplänen mit Hilfe stochastischer Simulationsmodelle
- Rollierende Planung und Bewertung reaktiver Maßnahmen

# Modellierung als Scheduling-Problem I

## Job-Shop Scheduling Problem

- Maschinen  $\mathcal{M} = \{M_1, \dots, M_m\}$ , Aufträge  $\mathcal{J} = \{J_1, \dots, J_N\}$
- Auftrag  $J_j \in \mathcal{J}$  besteht aus  $n_j$  Operationen  $O_{ij}$  ( $i = 1, \dots, n_j$ ) mit vorgegebener Reihenfolge  $O_{1j} \rightarrow O_{2j} \rightarrow \dots \rightarrow O_{n_j j}$
- Operation  $O_{ij}$  mit Dauer  $p_{ij} \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$  wird auf Maschine  $\mu_{ij} \in \mathcal{M}$  ohne Unterbrechung bearbeitet
- Schedule  $S = (S_{ij})$  mit Startzeitpunkte der Operationen  $O_{ij}$  ist zulässig, wenn
  - $S_{ij} + p_{ij} \leq S_{i+1,j}$  für  $j = 1, \dots, N, i = 1, \dots, n_j - 1$
  - $S_{ij} + p_{ij} \leq S_{uv}$  oder  $S_{uv} + p_{uv} \leq S_{ij}$  für Operationen  $O_{ij}, O_{uv}$  mit  $\mu_{ij} = \mu_{uv}$

# Modellierung als Scheduling-Problem II

Interpretation als Spezialfall von  $PS|prec|f(S)$

- Operation  $O_{ij}$   $\Rightarrow$  Vorgang  $i \in V$ ,  $V := \{0, 1, \dots, n+1\}$   
mit  $n := \sum_{j=1}^N n_j$
- Maschine  $M_k \in \mathcal{M}$   $\Rightarrow$  Erneuerbare Ressource  $k \in \mathcal{R}$  mit  
Ressourcenkapazität  $R_k := 1$
- Zuweisung  $\mu_{ij} = M_{k'}$   $\Rightarrow$  Ressourceninanspruchnahme  $r_{ik'} := 1$ ,  
 $\sum_{k \in \mathcal{R}} r_{ik} = 1$
- Konjunktion  $O_{hj} \rightarrow O_{lj}$   $\Rightarrow$  Vorrangbeziehung  $S_l - S_h \geq p_h$
- Zielfunktionen  $\Rightarrow$  Mittlere Auftragsdurchlaufzeit  
 $\bar{F} := \sum_{i \in V'} S_i + p_i - r_i / |V'|$   
Gesamtbearbeitungszeit  $C_{max} := S_{n+1}$

# Gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell

**Zeitkontinuierliches Modell** mit binären Reihenfolgevariablen für jede minimal verbotene Menge  $F \in \mathcal{F}$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{falls Vorgang } i \text{ vor } j \text{ ausgeführt wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\text{Minimiere} \quad f(S) \quad (1)$$

$$\text{u. d. N.} \quad S_j - S_i \geq p_i \quad (\langle i, j \rangle \in C) \quad (2)$$

$$S_j - S_i + M(1 - y_{ij}) \geq p_i \quad (\langle i, j \rangle \in F, F \in \mathcal{F}) \quad (3)$$

$$S_i - S_j + My_{ij} \geq p_j \quad (\langle i, j \rangle \in F, F \in \mathcal{F}) \quad (4)$$

$$S_0 = 0 \quad (5)$$

$$S_i \geq 0 \quad (i \in V) \quad (6)$$

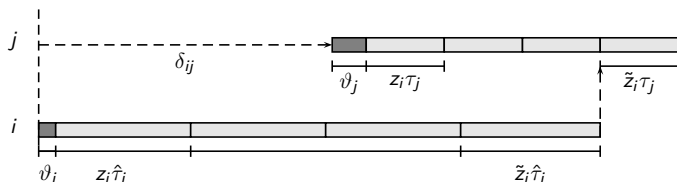
$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad (\langle i, j \rangle \in F, F \in \mathcal{F}) \quad (7)$$

$$\mathcal{F} := \{F \subseteq V : \sum_{i \in F} r_{ik} > R_k \text{ für mind. ein } k \in \mathcal{R} \text{ und } F \text{ ist } \subseteq\text{-minimal}\}$$

# Erweiterung 1: Zeitbeziehungen

Zwischen Vorgängen  $i, j \in V$  existieren organisatorisch oder technisch bedingte zeitliche Höchst- und Mindestabstände.

Vorgänge, die aufeinander folgende Operationen repräsentieren, können im Rahmen einer offenen Fertigung zeitlich überlappen, vgl. z. B. Fattahi et al., 2009.



Bearbeitungslosgröße  $q_i = 3z_i + \check{z}_i$ , Transportlosgröße  $z$ , Stückbearbeitungszeit  $\tau$ , Rüstzeit  $\vartheta$ , Ausschussquote  $\sigma$

$$S_j - S_i \geq \delta_{ij} \quad (\langle i, j \rangle \in C^o) \quad (8)$$

$$S_j - S_i \geq \delta_{ij} \quad (\langle i, j \rangle \in E) \quad (9)$$



## Erweiterung 2: Flexibilität

Vorgang  $i \in V$  kann auf einer beliebigen Ressource aus einer Teilmenge  $\mathcal{R}_i \subseteq \mathcal{R}$  aller Ressourcen durchgeführt werden, vgl. z. B. Brandimarte, 1993; Hurink et al., 1994.

$$z_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{falls Vorgang } i \text{ durch Ressource } k \in \mathcal{R}_i \text{ ausgeführt wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$S_j - S_i \geq \sum_{k \in \mathcal{R}_i} p_{ik} z_{ik} \quad (\langle i, j \rangle \in C) \quad (10)$$

$$S_j - S_i + M(1 - y_{ij}) \geq p_{ik} z_{ik} \quad (\langle i, j \rangle \in F, F \in \mathcal{F}, k \in \mathcal{R}_i) \quad (11)$$

$$S_i - S_j + M y_{ij} \geq p_{jk} z_{jk} \quad (\langle i, j \rangle \in F, F \in \mathcal{F}, k \in \mathcal{R}_j) \quad (12)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{R}_i} z_{ik} = 1 \quad (i \in V) \quad (13)$$

## Erweiterung 3: Ressourcenkapazitäten und -bedarfe

Vorgang  $i$  nimmt während der Ausführung Ressource  $k \in \mathcal{R}$  mit  $r_{ik} \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$  Einheiten in Anspruch. Zu jedem Zeitpunkt stehen  $R_k \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$  Einheiten der Ressource  $k \in \mathcal{R}$  zur Verfügung.

- Modellierung, vgl. z. B. Alvarez-Valdés/Tamarit, 1993

$$S_j - S_i + M(1 - y_{ij}) \geq p_i \quad (\langle i, j \rangle \in D) \quad (14)$$

$$S_i - S_j + My_{ij} \geq p_j \quad (\langle i, j \rangle \in D) \quad (15)$$

$$\sum_{i,j \in F, i \neq j} y_{ij} \geq 1 \quad (F \in \mathcal{F}) \quad (16)$$

$$\text{mit } D := \{\langle i, j \rangle : r_{ik} + r_{jk} > R_k\}$$

- Flussbasierte Modellierung, vgl. z. B. Artigues et al., 2003

## Erweiterung 4: Transporthilfsmittel und Pufferplätze

Werkstücke nehmen vor/während/nach der Durchführung von Vorgang  $i \in V$  Transporthilfsmittel und/oder Pufferplätze in Anspruch.

- Kumulative Ressourcen mit vorgegebener Kapazität  $R_k^\gamma$  ( $k \in \mathcal{R}^\gamma$ ), vgl. z. B. Neumann/Schwindt, 2003
- Flussbasierte Modellierung, vgl. z. B. Koné et al., 2013

$$r_k^\gamma(S, t) \leq R_k^\gamma \quad (k \in \mathcal{R}^\gamma, t \in T) \quad (17)$$



# Erweiterung 5: Bearbeitungsmodi

Vorgang  $i \in V$  kann in einem bestimmten Modus  $\mu \in \mathcal{M}_i$  mit Dauer  $p_{i\mu}$  und Ressourcenbedarfen  $r_{i\mu k}$  ( $k \in \mathcal{R} \cup \mathcal{R}^\gamma$ ) durchgeführt werden, vgl. z. B. Elmaghraby, 1977; Sprecher, 1994.

- Große Anzahl verschiedener Modi für Operationen (z. B. Parallelbearbeitung mit Aufsplitten von Operationen, ortsabhängige Allokation von Transporthilfsmitteln)
- Moduswechsel für Teiloperationen erlaubt



## Erweiterung 6: Nichtverfügbarkeitsperioden

Für eine erneuerbare Ressource  $k \in \mathcal{R}$  sind  $P_k := \{h_{k_1}, \dots, h_{k_n}\}$  Nichtverfügbarkeitsperioden zu beachten, vgl. z. B. Frank et al. 2001; Mauguière et al., 2005.

- Modellierungsansatz

$S_{k_p}^P$  repräsentiert den Beginn und  $p_{k_p}^P$  die Dauer von Periode  $h_{k_p} \in P_k$

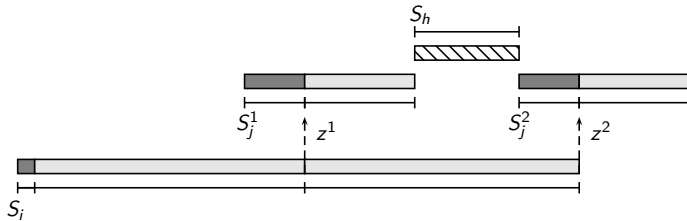
$$y_{ikp}^P := \begin{cases} 1, & \text{wenn } S_i < S_{k_p}^P \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$z_{ikp}^P := \begin{cases} 1, & \text{wenn Vorgang } i \text{ von Periode } p \text{ unterbrochen wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

- Nicht-Unterbrechbarkeit z. B. Rüstanteil
- Vermeidung von aus praktischer Sicht unzumutbaren Grenzfällen

# Erweiterung 7: Unterbrechbarkeit

Überlappung zwischen Vorgängen  $i, j \in V$  mit Unterbrechung von Vorgang  $j$



- Einplanbarkeit von Vorgang  $h$  zwischen Teiloperationen von Vorgang  $j$ , z. B. mit  $r_{jk} < 0$ ,  $r_{hk'} < 0$ ,  $k, k' \in \mathcal{R}^\gamma$ ,  $k' \neq k$  (Transporthilfsmittel)
- Reduzierung der Inanspruchnahme von Ressource  $k'' \in \mathcal{R}^\gamma$  (Pufferplatz)

# Lösungsverfahren I

- Exakte Lösung nur für kleine Probleminstanzen möglich
  - Praxisrelevante Instanzgrößen
    - Planungshorizont 1 bis 3 Wochen
    - Stundengenaue Planung
    - $|V| \approx 100$  bis 400
    - $|\mathcal{R}| \approx 20$  bis 50
    - $|\mathcal{R}^\gamma| \approx 3$  bis 5 (ohne Pufferplätze)
  - Auf Materialfluss- und Handlungsebene enthalten die vorgestellten Erweiterungen vereinfachende Annahmen
- ⇒ Heuristische Lösungsverfahren mit praktischer Anwendbarkeit

# Lösungsverfahren II

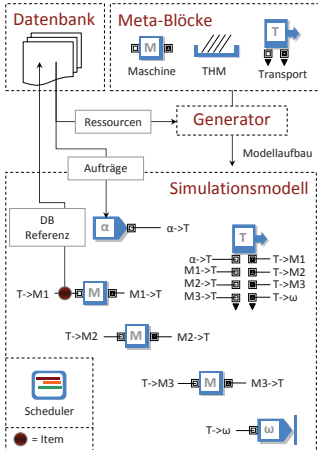
- Genetischer Algorithmus mit **Random Key-Repräsentation** (C++ API, vgl. z. B. Toso/Resende, 2012)

```
1:  $G := 1$ ,  $POP := \text{evolve}(n)$ 
2: Evaluiere Fitness für Individuen  $I \in POP$ 
3: while  $G < GEN$  und  $t \leq \bar{t}$  do
4:    $G = G + 1$ 
5:    $CHI := \text{crossover}(POP)$ 
6:    $CHI := \text{mutation}(CHI)$ 
7:   Evaluiere Fitness für Individuen  $I \in CHI$ 
8:    $POP := POP \cup CHI$ 
9:    $POP := \text{selection}(POP)$ 
```

- **Diskret-ereignisorientiertes Simulationsmodell** des Produktionssystems als **problemspezifischer Dekoder**, der Chromosom  $[0,1]^n$  auf Menge zulässiger Lösungen für Scheduling-Problem abbildet und Fitness berechnet

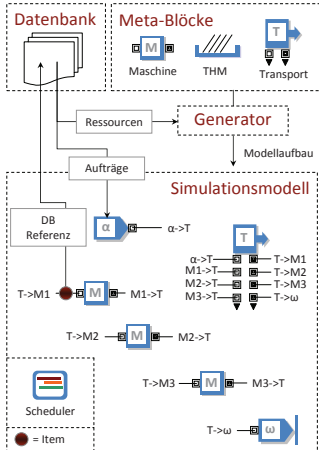


# Modellierung mit ExtendSim I



- Implementierung von Meta-Blöcken
- Teilautomatische Modellgenerierung
- Trennung von Modell und Daten
- Keine Block-Parametrisierung sondern Item-Parametrisierung

# Modellierung mit ExtendSim II



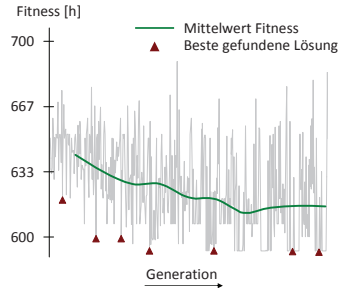
- OLE/COM-Automation
- Übergabe von Steuergrößen (z. B. Prioritätsregelwerte)
- Vorbelegung der Ressourcen (Ausgangssituation, Rescheduling)
- Globaler Scheduler verwaltet die Menge  $\mathcal{E}$  ressourcen- und zeit zulässig einplanbarer Vorgänge

# Simulationslaufzeit

- **Reduzierung der Einträge in Eventkalender** auf Basis problemspezifischer Erwägungen, z. B. Verringerung der Anzahl zu simulierender Items
  - Relevante Werkstücke für Operation  $i \in V$ 
    - Erste und letzte Werkstücke jeder Teiloperation
    - Werkstücke, die zur vollständigen Be- oder Entladung eines Transporthilfsmittels führen
    - Werkstücke, die Ausschuss darstellen
  - Grenzfälle
    - Ausschussquote  $\sigma_i = 0$  und  $q_i = z_i$
    - Transportlosgröße  $z_i = 1$
- Für „ausgewogene Instanz“ kann Reduzierung der simulierten Items um 75 - 85% erreicht werden
- **Laufzeitreduzierung** 50 - 60%

# Performance-Analyse

- Mittlere Verbesserungen im Vergleich zu praktisch angewendeten Dispatching-Regeln
  - Auftragsdurchlaufzeit  $\bar{F}$ : 11,27%
  - Gesamtbearbeitungszeit  $C_{max}$ : 4,63%
- Konvergenzverhalten
  - Auftragsdurchlaufzeit  $\bar{F}$ : 7,16%
  - Gesamtbearbeitungszeit  $C_{max}$ : 4,00%



# Modifikation I

Simulationsbasierte Dekodierung kann zu sog. „Deadlocks“ führen, d. h. Teilschedule  $S^C$  kann nicht erweitert werden

- Kumulative Ressourcen: es kann  $\mathcal{E} = \emptyset$  für alle Zeitpunkt  $t \geq t_2^*$  gelten, wenn z. B. zu  $t_1^*$  Operationen  $j \in \mathcal{E}$  mit  $r_{jk} > 0$  eingeplant wurden und zwischen  $t_1^*$  und  $t_2^*$  keine Operation  $i$  mit  $r_{ik} < 0$  ausgeführt wird ( $k \in \mathcal{R}^\gamma$ )
- Relevant für „knappe“ Ressourcenangebote
- Standardsimulationssoftware unterstützt effiziente Implementierung von Ausplanungsschritten nicht

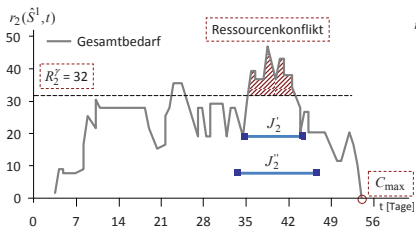
## Modifikation II

Relaxiere Nebenbedingungen (17) und stelle schrittweise Ressourcenzulässigkeit für Ressourcen  $k \in \mathcal{R}^\gamma$  her (vgl. Ehrenberg/Zimmermann, 2012)

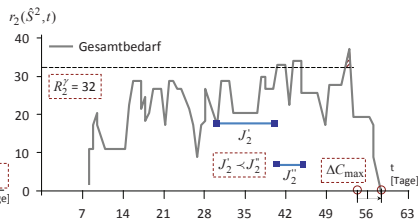
- Bestimme  $\hat{S}^m$  für Ressourcenrelaxation mit genetischem Algorithmus
- Prüfe, ob **Ressourcenkonflikt**  $r_k^\gamma(\hat{S}^m, t) > R_k^\gamma$  für mindestens eine Ressource  $k \in \mathcal{R}^\gamma$  und einen Zeitpunkt  $t \in T$  auftritt
- Bestimme Konfliktmenge  $F^m := J'_k \cup J''_k$
- Entzerre Konfliktmenge mit **disjunktiven Vorrangbeziehungen**  
 $CS^m := \{J'_k \prec J''_k \vee J'_k \succ J''_k\}$
- Schedule ist ressourcenzulässig, wenn  $F^m := \emptyset$

# Praxisinstanz I

- 12 Aufträge ( $|V| = 166$ ), 20 Maschinen ( $|\mathcal{R}| = 20$ )
- 3 Transporthilfsmittel ( $|\mathcal{R}^\gamma| = 3$ ),  $R_2^\gamma = 32$  Stück



(a) Konfliktmenge  $\{J_2', J_2''\}$



(b) Entzerrung der Konfliktmenge

Löse zwei Teilprobleme mit  $CS_1 := \{J_2' < J_2''\}$ ,  $CS_2 := \{J_2' > J_2''\}$

# Praxisinstanz II

- Betrachte Erweiterungen 1 bis 4; Ressourcenrelaxation als  $PS|temp|f(S)$  formuliert und exakt gelöst
- Zur Evaluierung des Ressourcenprofiles wird jeweils ein Simulationslauf benötigt

$m$	$C_{max}$ [h]	Laufzeit [sec] <sup>1</sup>		$\max_{t \in T} r_2(\hat{S}^m, t)$
		<b>Solve</b> ( $MIP^m$ )	<b>Simulate</b> ( $S^m$ )	
0	1282	35	4	67
1	1297	40	4	45
2	1401	46	5	38
3	1429	39	5	32

- Relaxationsbasierte Modifikation kann als eigenständiges Lösungsverfahren genutzt werden, wenn Ressourcenrelaxation „einfach“ zu lösen ist


---

<sup>1</sup>i7 X980; 3,33 GHz; 12GB RAM; Gurobi 5.5.0; ExtendSim 8.0.2










# Zusammenfassung und Ausblick

- Formulierung als erweitertes ressourcenbeschränktes Projektplanungsproblem
- Simulationsgestütztes Lösungsverfahren „GA“ mit relaxationsbasierter Modifikation
- Abbildung des Produktionsprozesses „Spezialglasfertigung“ mit diskret-ereignisorientiertem Simulationsmodell
- Erweiterung Testset
- Feinjustierung Lösungsverfahren

 Carsten Ehrenberg

---

 Technische Universität Clausthal  
 Institut für Wirtschaftswissenschaft  
 Abteilung für BWL und Unternehmensforschung  
 Julius-Albert-Str. 2  
 38678 Clausthal-Zellerfeld  
 Tel.: +49 (5323)/72-7626 Fax: +49 (5323)/72-7699  
 e-Mail: [carsten.ehrenberg@tu-clausthal.de](mailto:carsten.ehrenberg@tu-clausthal.de)