



Technische  
Universität  
Braunschweig

Institut für Automobilwirtschaft  
und Industrielle Produktion



# Energieeffiziente Walzprogrammplanung

Karen Puttkammer

16. DoWoNO, 23. Mai 2014

# Agenda

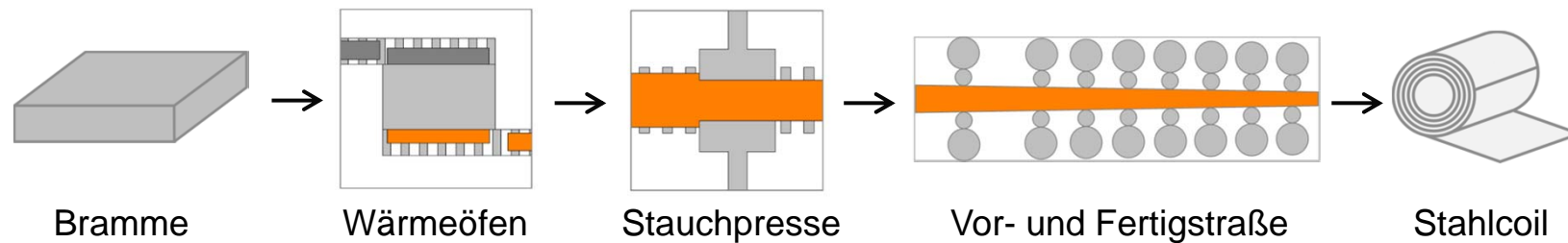
1. Einleitung
2. Eigenschaften des Warmwalzprozesses
3. Literaturüberblick
4. Modellierung
5. Lösungsansatz
6. Zusammenfassung und Ausblick



# 1. Einleitung

## Der Warmwalzprozess

- Einer der wichtigsten Prozesse in der Stahlproduktion
- Erster umformender Prozess eines festen Zwischenproduktes (Brammen)

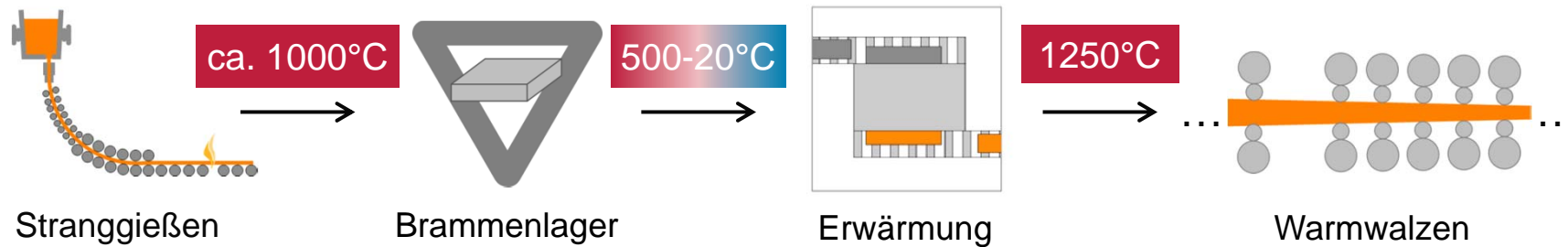


- Planungsaufgabe: Festlegung des Produktionsplans (Schedule)
- Energieintensiver Prozess (Erwärmung der Brammen)
- Marktsituation: steigende Energiepreise und produktionsbezogene Überkapazitäten im Weltmarkt → starker Anreiz zur Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs

→ Ziel: Entscheidungsunterstützung für das Hot Strip Mill Scheduling Problem (HSMSP) unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs

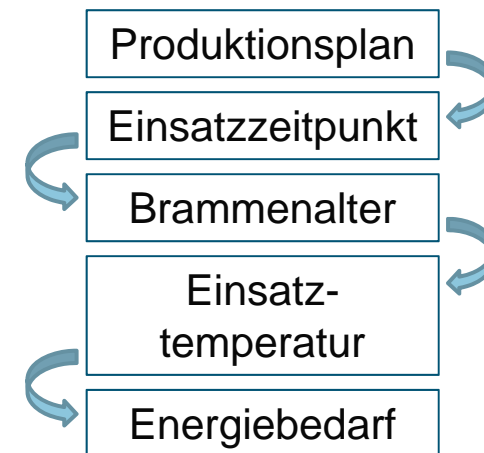
## 2. Eigenschaften des Warmwalzprozesses

### 2.1. Brammentemperatur und Energiebedarf



- Das Warmwalzen erfordert hohe Temperaturen
- Brammen verlassen Gießprozess mit hohen Temperaturen, kühlen jedoch während Transport und Lagerung ab
- Die Abkühlkurve ist eine regressive Funktion über die Zeit
- Produktionsplan, Einsatzzeitpunkt, Brammenalter, Einsatztemperatur und Energiebedarf hängen zusammen

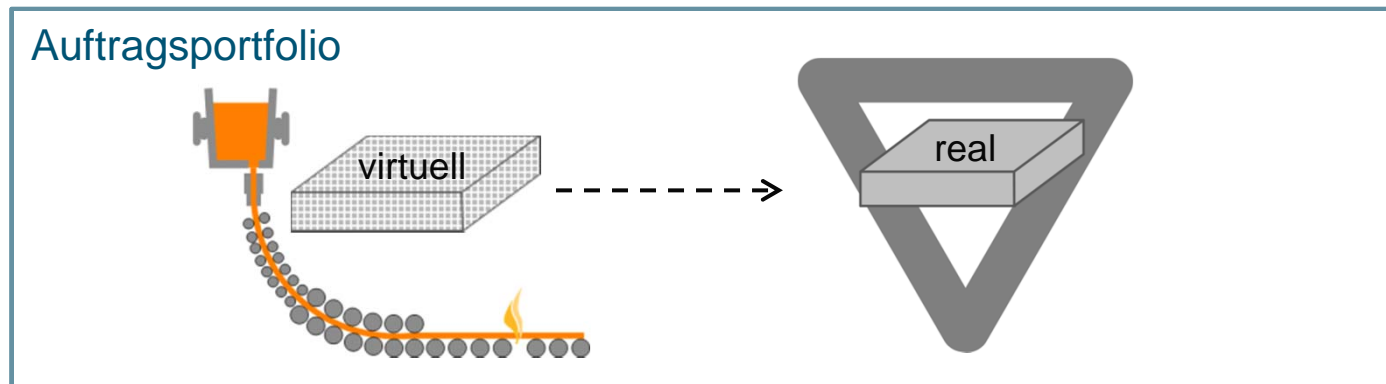
→ **Der Einsatzzeitpunkt jeder Bramme muss dynamisch in Abhängigkeit vom Produktionsplan modelliert werden**



## 2. Eigenschaften des Warmwalzprozesses

### 2.2. Auftragsportfolio

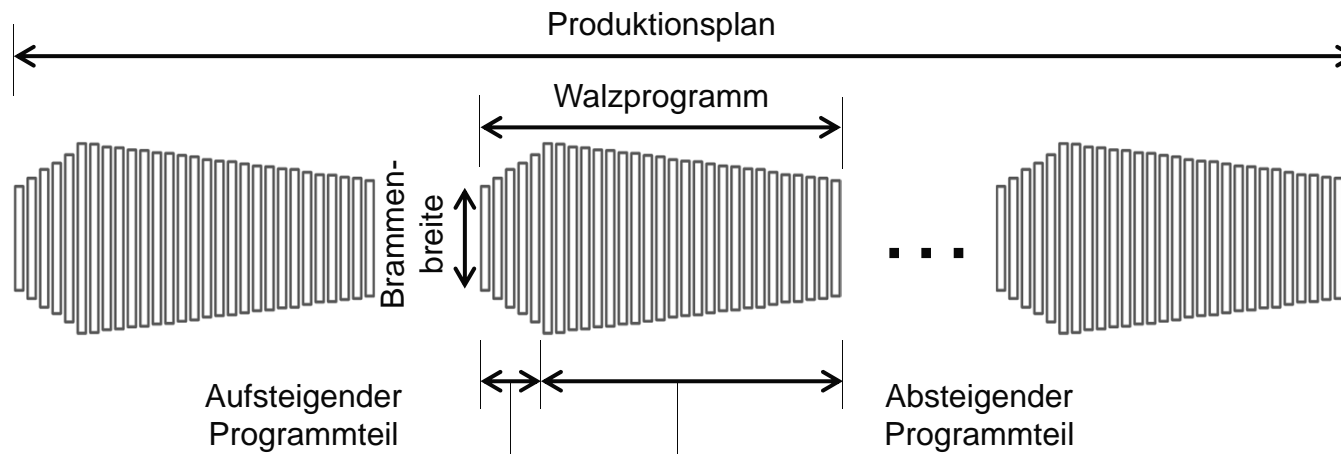
- Alle Brammen eines gegebenen Auftragsportfolios müssen verplant werden
- Zwei Brammenarten:
  - 1) Reale Brammen: warten im Brammenlager auf die Verarbeitung
  - 2) Virtuelle Brammen: noch nicht erzeugt, aber im Gießplan vorgesehen



- Verfügbarkeitszeitpunkt = Erzeugungszeitpunkt + Transportzeit zur Warmbandstraße
- **Virtuelle Brammen dürfen nicht vor ihrem Verfügbarkeitszeitpunkt eingeplant werden**

## 2. Eigenschaften des Warmwalzprozesses

### 2.3. Walzprogramme und Breitenprofil



- Der Produktionsplan enthält ein oder mehrere Walzprogramme
- Typisches Breitenprofil: Sargdeckelform
- Weitere Restriktionen:
  - max. Anzahl Brammen im aufsteigenden Programmteil
  - max. Breitensprung im aufsteigenden Programmteil
  - max. gewalzte Länge im gleichen Breitenbereich
  - max. Programmlänge

→ Nebenbedingungen müssen breitenbezogene Restriktionen abbilden

## 2. Eigenschaften des Warmwalzprozesses

### 2.4. Übergänge zwischen nacheinander geplanten Aufträgen

- Sicherstellen einer guten Qualität bzgl. Planheit
- Restriktionen:
  - max. Sprung im Härtegrad
  - max. Sprung der Walztemperatur
  - max. Sprung in der Dicke (Dickenzunahme/ -abnahme)

→ Nebenbedingungen müssen Restriktionen nacheinander geplanter Aufträge abbilden





### 3. Literaturüberblick

<b>1. Energie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Regressive Abkühlfunktion (-)</li> <li>▪ Aggregierte Abkühlannahmen Jia et al. 2012, Yadollahpour et al. 2009, Zhao et al. 2009</li> <li>▪ Nicht berücksichtigt Chen et al. 1998, Liu 2010, Tang et al. 2000, Tu et al. 2011, Wang/ Tang 2008 etc.</li> </ul>	
<b>2. Virtuelle Brammen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Im Auftragsportfolio enthalten Wang/ Tang 2008, Zhao et al. 2009</li> <li>▪ Nicht berücksichtigt Chen et al. 1998, Jia et al. 2012, Liu 2010, Tang et al. 2000, Yadollahpour et al. 2009 etc.</li> </ul>	
<b>3. Breitenprofil</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aufstieg berücksichtigt Tu et al. 2011, Yadollahpour et al. 2009</li> <li>▪ Aufstieg nicht berücksichtigt Chen et al. 1998, Jia et al. 2012, Liu 2010, Tang et al. 2000, Wang/ Tang 2008 etc.</li> </ul>	
<b>4. Übergänge</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hard Constraints Wang/ Tang 2008, Yadollahpour et al. 2009</li> <li>▪ Penalty-Cost-Ansatz Chen et al. 1998, Jia et al. 2012, Liu 2010, Tang et al. 2000, Zhao et al. 2009 etc.</li> </ul>	

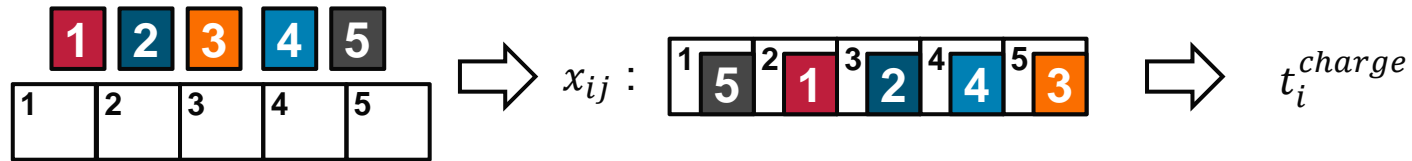
→ Ein Ansatz, der alle Anforderungen erfüllt, existiert nicht



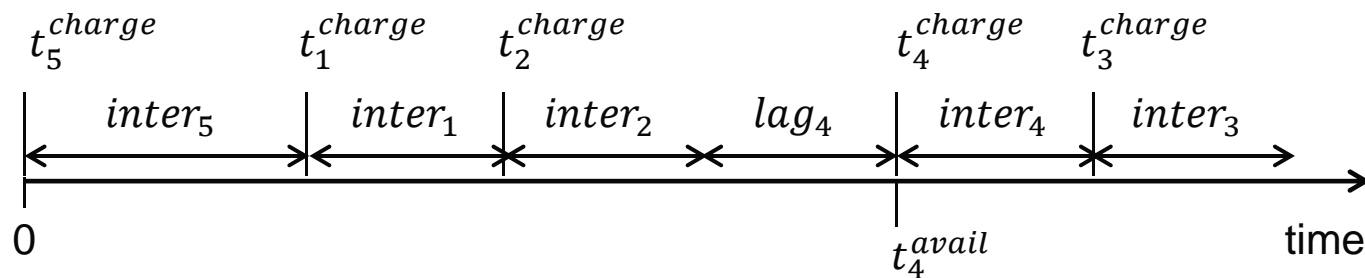
# 4. Modellierung

## 4.1 Modellierungsansatz

Modellierung als Zuordnungsproblem (n Aufträge auf n Positionen)



Zugrunde gelegte Zeitachse:



- $t_i^{charge}$  ... Einsatzzeitpunkt von Auftrag  $i$
  - $lag_i$  ... Verzögerungszeit verursacht durch Auftrag  $i$
  - $t_i^{avail}$  ... Verfügbarkeitszeitpunkt von Auftrag  $i$
  - $inter_i$  ... Einsatzzwischenzeit nach Auftrag  $i$
- } Entscheidungsvariablen  
 } Parameter

# 4. Modellierung

## 4.2 Zielfunktion

Minimierung der entscheidungsrelevanten produktionsbezogenen Kosten

- Rüstkosten
- Energiekosten

$$\text{Min } C_{total} = \underbrace{c_{setup} \cdot \sum_{j=1}^n \alpha_j}_{\text{Rüstkosten}} + \underbrace{c_{energy} \cdot \frac{\text{Nutzenergie} + \text{Verlustenergie}}{\text{Wirkungsgrad}}}_{\text{Energiekosten}}$$

$$\text{Min } C_{total} = c_{setup} \cdot \sum_{j=1}^n \alpha_j + c_{energy} \cdot \frac{\text{Nutzenergie} + \text{Verlustwärmestrom} \cdot \text{Zykluszeit}}{\text{Wirkungsgrad}}$$

## 4. Modellierung

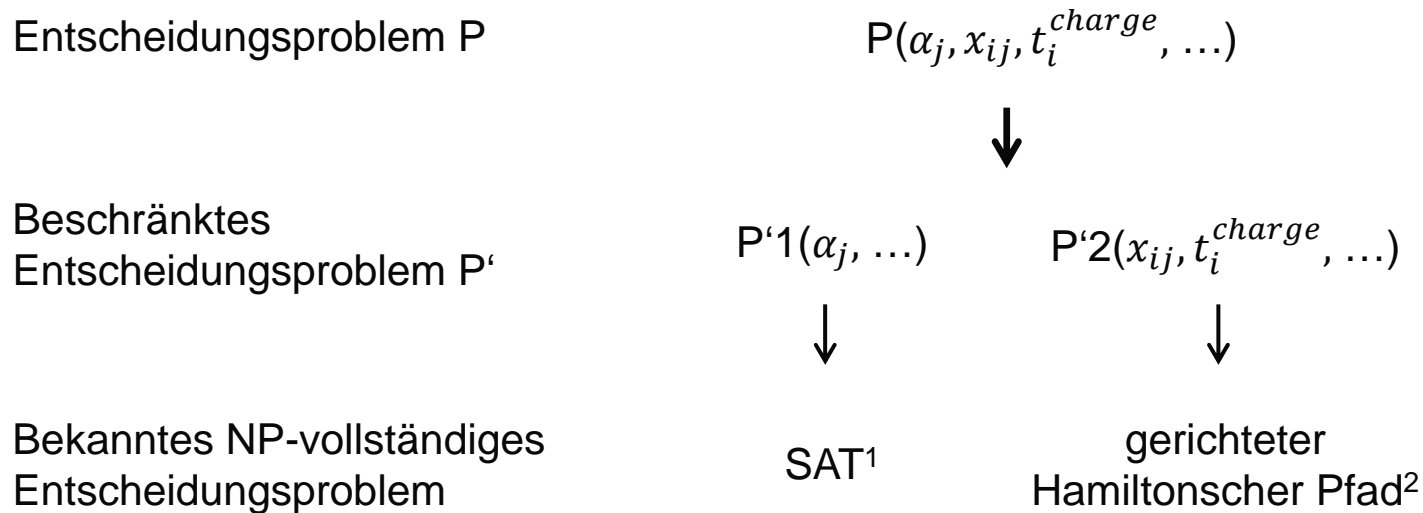
### 4.3. Nebenbedingungen

1. Zuordnungsbedingungen
2. Definition der Einsatzzeit und Verfügbarkeitsbedingung
3. Definition der Programmteile
4. Breitenrestriktionen
5. Sprünge zwischen benachbarten Aufträgen
6. Definition der stückweise linearisierten Nutzenergiefunktion
7. Modellinitialisierung
8. Binär- und Nichtnegativitätsbedingungen

# 4. Modellierungsansatz

## 4.4 Klassifizierung

- Linearisierung aller Nebenbedingungen möglich → MILP
- Binäre Entscheidungsvariablen → kombinatorisches Optimierungsproblem
- Formaler Komplexitätsnachweis über Nachweis der NP-Vollständigkeit des Entscheidungsproblems → Optimierungsproblem ist NP-schwer



→ Wie sieht ein geeignetes Lösungsverfahren aus?

# 5. Lösungsansatz

## 5.1 Lösung mit CPLEX

- Beobachtung: 20er Instanzen lassen sich nicht innerhalb von 3 Std. optimal lösen
- Solverunterstützung: Schranken, Priorisierung beim Branching, Startlösung

Veränderung der Rechenzeit	Min	Max	Durchschnitt
Angabe unterer und oberer Schranken	-44,3%	22,5%	-3,7%
Priorisierung der Zuordnungsvariablen	-43,5%	6,8%	-14,5%
Vorgabe einer konstruierten Startlösung	-4,5%	43,8%	13,1%

- Fazit: Maßnahmen wirken sich positiv auf die Rechenzeit aus, aber kein hinreichender Effekt um große Instanzen durch CPLEX lösen zu lassen

→ Anwendung heuristischer Lösungsverfahren notwendig

# 5. Lösungsansatz

## 5.2 GRASP-Heuristik

### GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure)

For k:=1 to Max\_Iterations

**Phase 1:**  
Konstruktion

**Konstruktion**

**Phase 2:**  
Lokale Suche

Rüsten **Lokale Suche I**  
Kurzprogramme eliminieren

Energie **Lokale Suche II**  
Reduktion der  
Verzögerungszeiten

Update Best\_Solution;

Energie **Lokale Suche III**  
Verschieben von Aufträgen  
mit hohem Energieverlust

End For;

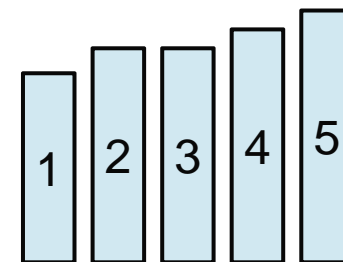
Return Best\_Solution;

# 5. Lösungsansatz

## 5.3 Illustratives Beispiel

i	Breite [mm]	Masse [t]	$t_i^{cast}$	$t_i^{avail}$	$inter_i$ [h]	Technical parameters
1	1500	10	4	4	1	$\Delta w_{up}^{max} = 200 \text{ mm}$ $\dot{Q}_{lost} = 10 \text{ GJ/h}$ $\eta_c = 1$
2	1700	10	-30	0	1	
3	1700	10	-5	0	1	
4	1850	10	-5	0	1	
5	2000	10	-30	0	1	

- Nutzenergiefunktion [GJ/t]:  $f(age_i) = \begin{cases} 0.5 + 1 \cdot (age_i) & , \text{wenn } (age_i) \leq 20 \\ 10.5 + 0.5 \cdot (age_i) & , \text{wenn } (age_i) > 20 \end{cases}$
- Keine Transportzeit
- Kostenfaktoren:  $c_{setup} = 500$ ,  $c_{energy} = 5$
- Identische Dicke, Härte und Walztemperatur
- Hohe Werte der begrenzenden Parameter der weiteren Breitenrestriktionen



→ Relevante Nebenbedingungen: Sargdeckel und max. Breitensprung im aufsteigenden Programmteil



# 5. Lösungsansatz

## 5.3 Illustratives Beispiel

### Konstruktionsphase

While Lösung  $\neq$  vollständig

1. Bewertung unverplanter Aufträge
2. Beschränkte Kandidatenliste aufstellen (RCL)
3. Zufällige Auswahl eines Kandidaten
4. Schedule aktualisieren

End;

Konstruktion

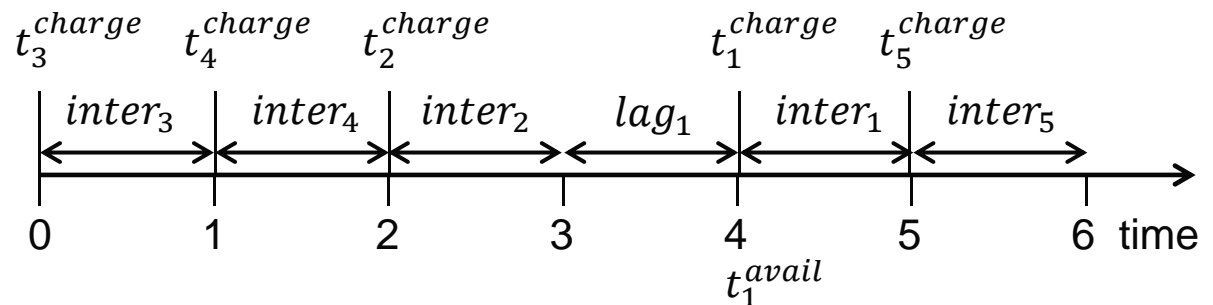
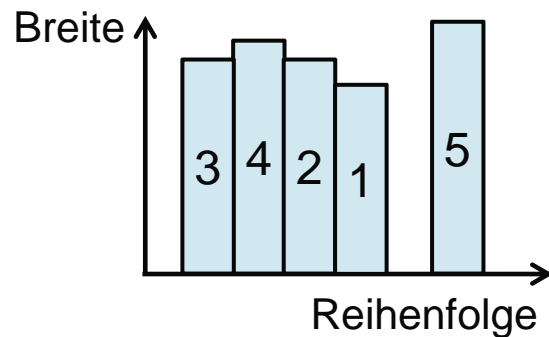
Setups	<b>Lokale Suche I</b> Kurzprogramme eliminieren
Energy	<b>Lokale Suche II</b> Reduktion der Verzögerungszeiten
Energy	<b>Lokale Suche III</b> Verschieben von Aufträgen mit hohem Energieverlust

# 5. Lösungsansatz

## 5.3 Illustratives Beispiel

### Konstruktionsphase

lt.	Auftrag i	Rüstkosten	Bewertete Verlustenergie	Bewertete Nutzenergie	Strafe für Breiten-sprung	$c(i)$	RCL	Auswahl
1	1	500	$5 \cdot (10 \cdot 6)$	$5 \cdot (5 \cdot 30)$	-	1550		{3}
	2	500	$5 \cdot (10 \cdot 2)$	$5 \cdot (1 \cdot 25)$	-	725	X	
	3	500	$5 \cdot (10 \cdot 2)$	$5 \cdot (1 \cdot 20)$	-	700	X	
	4	500	$5 \cdot (10 \cdot 2)$	$5 \cdot (1 \cdot 20)$	-	700	X	
	5	500	$5 \cdot (10 \cdot 2)$	$5 \cdot (1 \cdot 25)$	-	725	X	



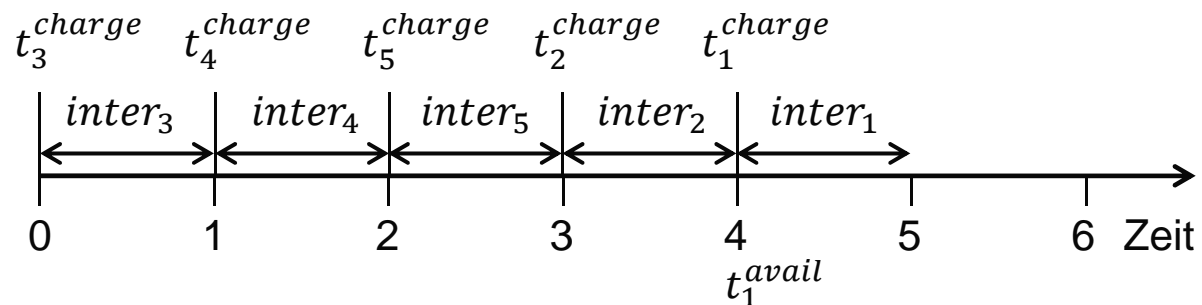
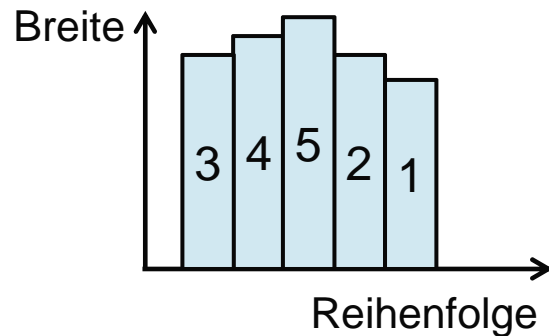
# 5. Lösungsansatz

## 5.3 Illustratives Beispiel

### Lokale Suche I: Kurzprogramme eliminieren

- Kurzprogramm: Programm mit weniger als drei Aufträgen
- Auftragsauswahl: letzter noch nicht betrachteter Auftrag im letzten Kurzprogramm
- Verschiebung: vorgelagerte Position
- Verbesserung:  $\sum_{j=1}^n \alpha_j (S') \leq \sum_{j=1}^n \alpha_j (S)$
- Suchstrategie: die erste verbessernde Nachbarlösung wird übernommen, Suche beginnt am Anfang des Schedule

Konstruktion	
Rüsten	<b>Lokale Suche I</b> Kurzprogramme eliminieren
Energie	<b>Lokale Suche II</b> Reduktion der Verzögerungszeiten
Energie	<b>Lokale Suche III</b> Verschieben von Aufträgen mit hohem Energieverlust



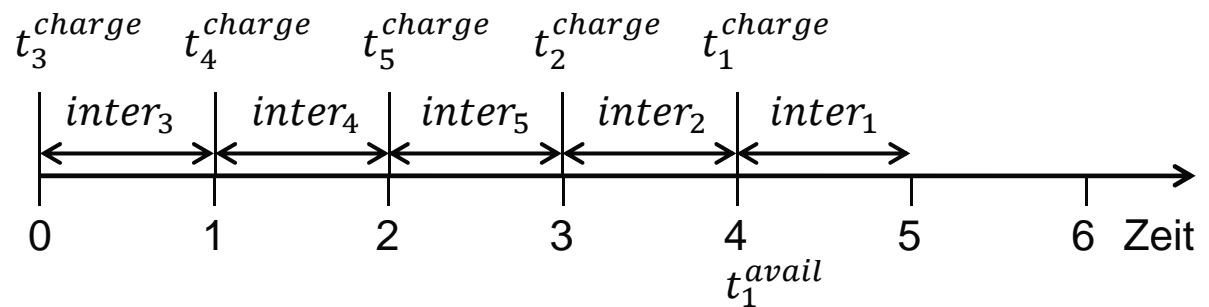
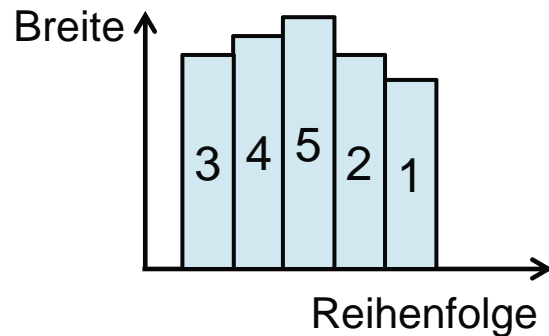
# 5. Lösungsansatz

## 5.3 Illustratives Beispiel

### Lokale Suche II: Reduktion der Verzögerungszeiten

- Auftragsauswahl: erster noch nicht betrachteter Auftrag mit positiver Verzögerungszeit
- Verschiebung: nachgelagerte Position,  $\sum_{j=1}^n \alpha_j (S') \leq \sum_{j=1}^n \alpha_j (S)$
- Verbesserung:  $C_{total}(S') < C_{total}(S)$
- Suchstrategie: die beste Nachbarlösung wird übernommen

	Konstruktion
Rüsten	<b>Lokale Suche I</b> Kurzprogramme eliminieren
Energie	<b>Lokale Suche II</b> Reduktion der Verzögerungszeiten
Energie	<b>Lokale Suche III</b> Verschieben von Aufträgen mit hohem Energieverlust



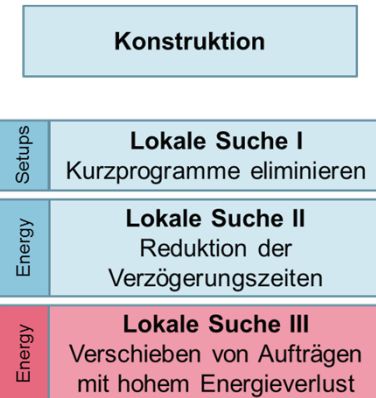
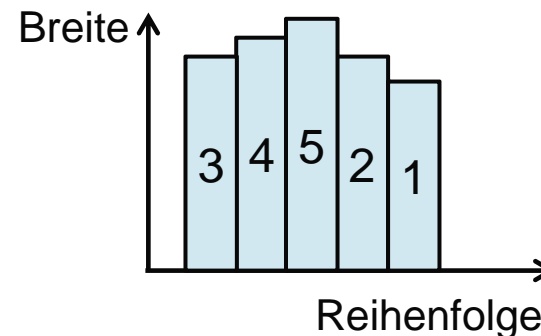
# 5. Lösungsansatz

## 5.3 Illustratives Beispiel

### Lokale Suche III: Verschiebung von Aufträgen mit hohem Energieverlust

- Auftragsauswahl: sortierte Auftragsliste, Sortierung nach absteigendem Energieverlust
- Verschiebung: vorgelagerte Position,  $lag_i(S') \leq lag_i(S)$ ,  $\sum_{j=1}^n \alpha_j(S') \leq \sum_{j=1}^n \alpha_j(S)$
- Verbesserung:  $C_{total}(S') < C_{total}(S)$
- Suchstrategie: die beste Nachbarlösung wird übernommen

Rang	Auftrag	Energieverlust
1	2	15 GJ
2	4	10 GJ
3	5	10 GJ
4	1	0 GJ
5	3	0 GJ



## 6. Zusammenfassung und Ausblick

### Zusammenfassung

- Planungsproblem: HSMSP unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs
- MILP- Modell (verursachungsgerechte Modellierung des stückbezogenen Energiebedarfs)
- Komplexitätsnachweis: NP-schwer
- Entwurf einer GRASP-Heuristik

### Ausblick

- Verfeinerung und Implementierung der GRASP-Heuristik
- Erarbeitung von Referenzwerten
- Durchführung einer Fallstudie

**Danke für die Aufmerksamkeit**

**Karen Puttkammer**

+49 531-391-2214

k.puttkammer@tu-braunschweig.de



Technische  
Universität  
Braunschweig

