



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Automobilwirtschaft
und Industrielle Produktion



Energieeffiziente Walzprogrammplanung

Karen Puttkammer

16. DoWoNO, 23. Mai 2014

Agenda

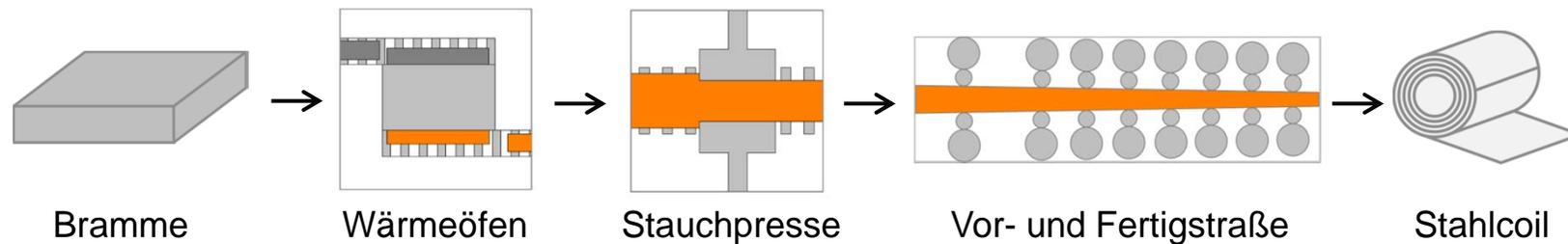
1. Einleitung
2. Eigenschaften des Warmwalzprozesses
3. Literaturüberblick
4. Modellierung
5. Lösungsansatz
6. Zusammenfassung und Ausblick



1. Einleitung

Der Warmwalzprozess

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

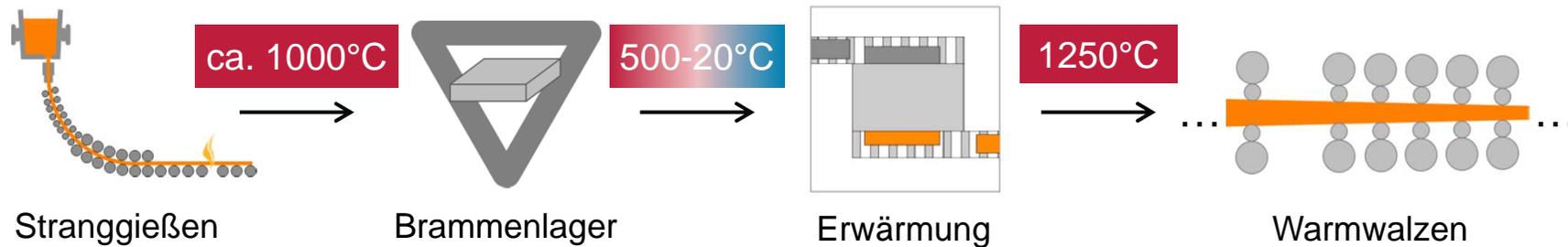


- Planungsaufgabe: Festlegung des Produktionsplans (Schedule)
- Energieintensiver Prozess (Erwärmung der Brammen)
- Marktsituation: steigende Energiepreise und produktionsbezogene Überkapazitäten im Weltmarkt → starker Anreiz zur Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs

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

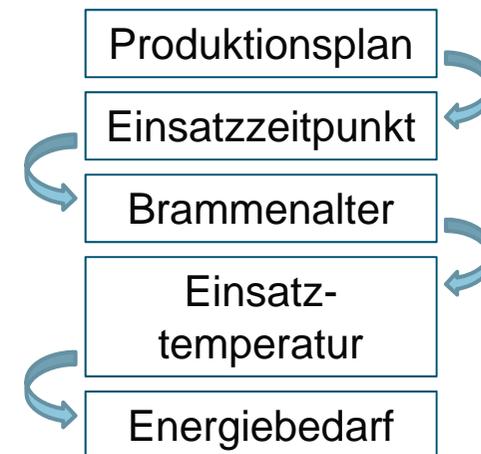
2. Eigenschaften des Warmwalzprozesses

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

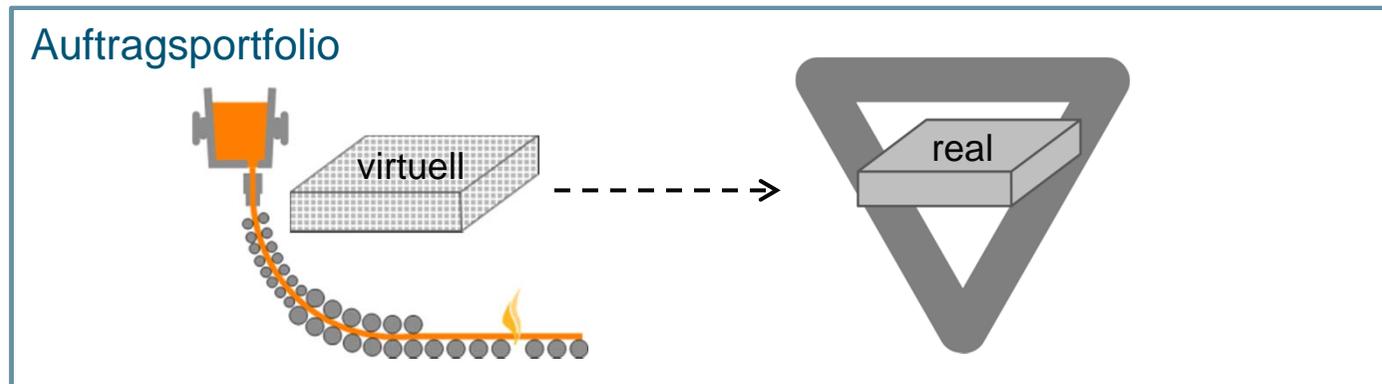
→ Der Einsatzzeitpunkt jeder Bramme muss dynamisch in Abhängigkeit vom Produktionsplan modelliert werden



2. Eigenschaften des Warmwalzprozesses

2.2. Auftragsportfolio

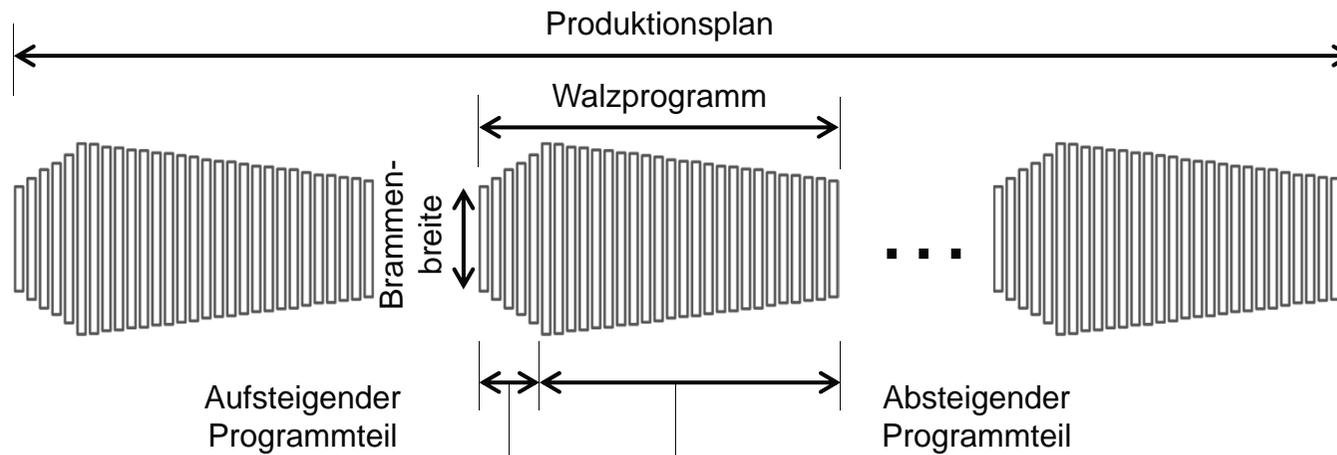
- Alle Brammen eines gegebenen Auftragsportfolios müssen verplant werden
- Zwei Brammenarten:
 - 1) Reale Brammen: warten im Brammenlager auf die Verarbeitung
 - 2) Virtuelle Brammen: noch nicht erzeugt, aber im Gießplan vorgesehen



- 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

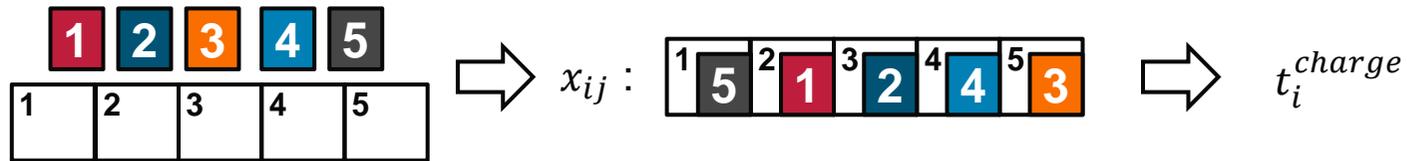
1. Energie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Regressive Abkühlfunktion (-) ▪ Aggregierte Abkühlannahmen Jia et al. 2012, Yadollahpour et al. 2009, Zhao et al. 2009 ▪ Nicht berücksichtigt Chen et al. 1998, Liu 2010, Tang et al. 2000, Tu et al. 2011, Wang/ Tang 2008 etc. 	
2. Virtuelle Brammen	<ul style="list-style-type: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

→ Ein Ansatz, der alle Anforderungen erfüllt, existiert nicht

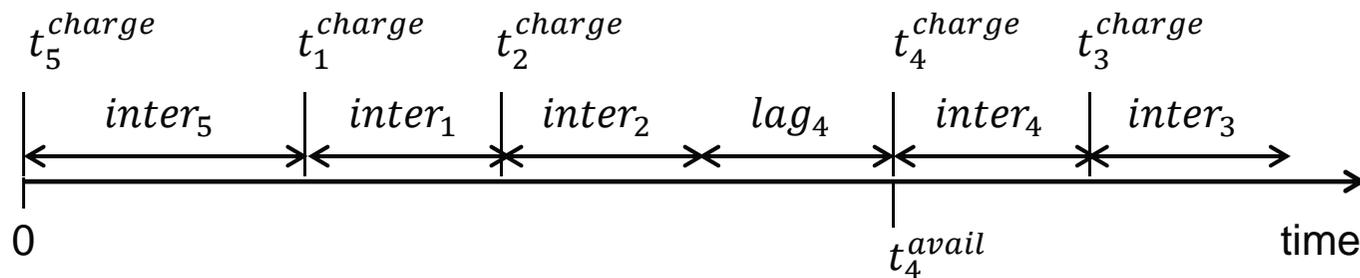
4. Modellierung

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



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;

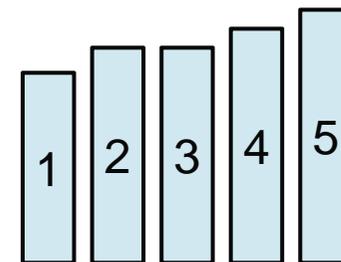
Return Best_Solution;

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

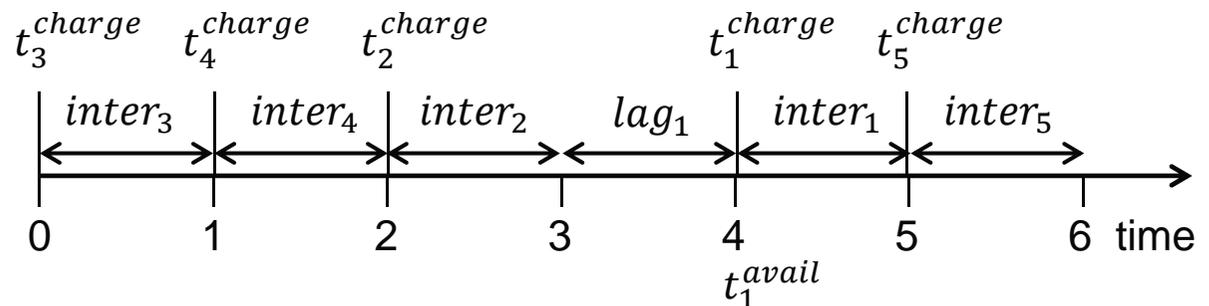
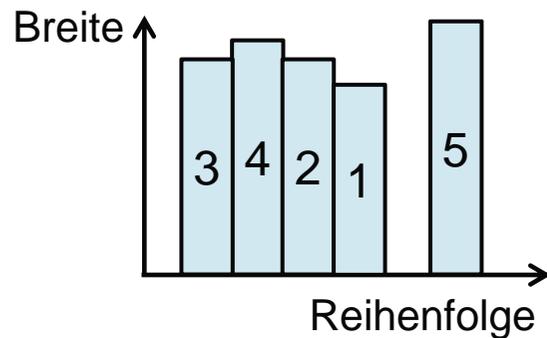
Setups	Lokale Suche I Kurzprogramme eliminieren
Energy	Lokale Suche II Reduktion der Verzögerungszeiten
Energy	Lokale Suche III Verschieben von Aufträgen mit hohem Energieverlust

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	



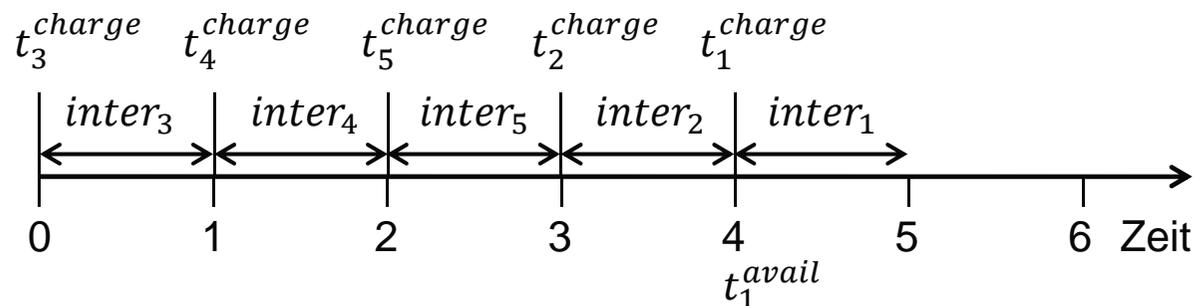
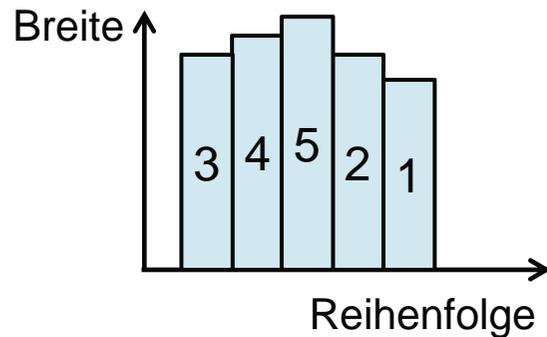
5. Lösungsansatz

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	Lokale Suche I Kurzprogramme eliminieren
Energie	Lokale Suche II Reduktion der Verzögerungszeiten
Energie	Lokale Suche III Verschieben von Aufträgen mit hohem Energieverlust

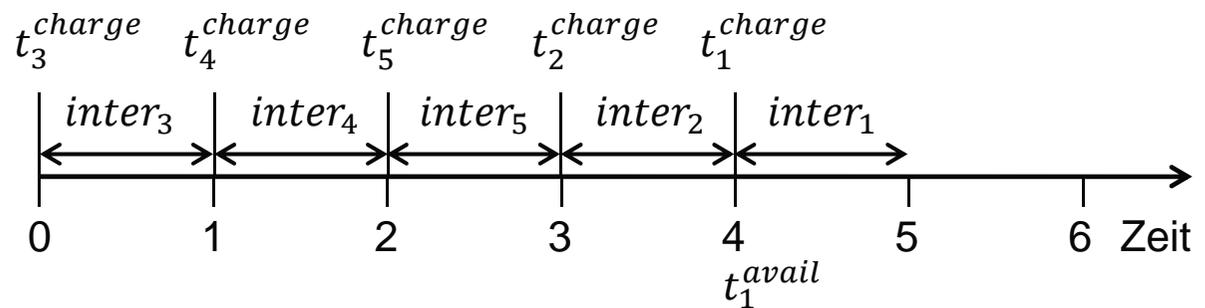
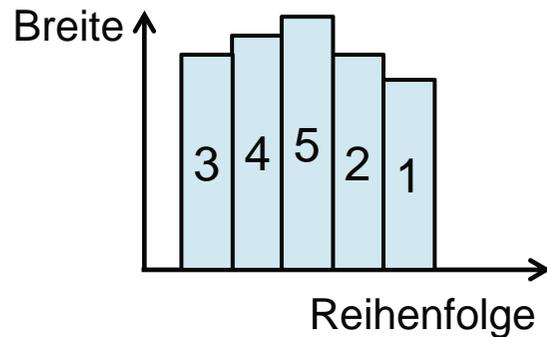
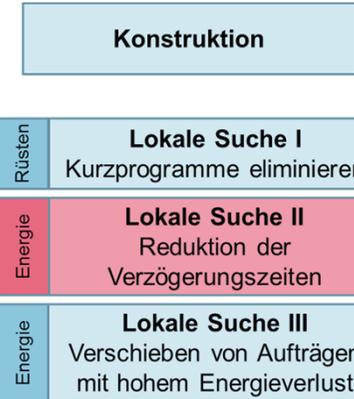


5. Lösungsansatz

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



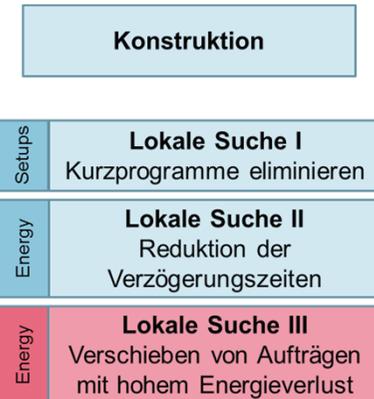
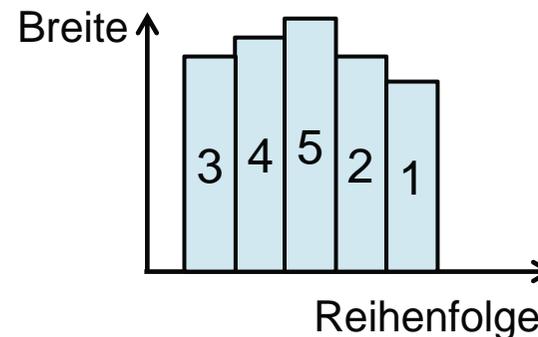
5. Lösungsansatz

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

