Optimale Produktion unter Berücksichtigung schwankender Energiepreise

Jan Busse, M.Sc.

Universität Hildesheim
Institut für Betriebswirtschaft und Wirtschaftsinformatik
Abteilung Betriebswirtschaft und Operations Research

3. Juni 2019
41. Sitzung des Arbeitskreises Informationstechnologie

Produktionsfaktor Energie

- Anteil des industriellen Energieverbrauchs am weltweiten Energieverbrauch $\approx 54\,\%$
  - Beispiele für eine energieintensive Produktion:

Papier

Chemie

Eisen und Stahl

Luftfahrt

- Strombedarf des europäischen Industriesektors steigt kontinuierlich mit $\approx 0{,}3\,\%$ pro Jahr
- Europäisches Klima- und Energiepaket 2020:
  - Senkung der Treibhausgasemissionen um 20 % im Vergleich zu 1990
  - 20 % der Energie aus erneuerbaren Quellen
  - Verbesserung der Energieeffizienz um 20 %

Produktionsfaktor Energie

- Anteil des industriellen Energieverbrauchs am weltweiten Energieverbrauch $\approx 54\,\%$
  - Beispiele für eine energieintensive Produktion:

Papier

Chemie

Eisen und Stahl

Luftfahrt

- Strombedarf des europäischen Industriesektors steigt kontinuierlich mit $\approx 0{,}3\,\%$ pro Jahr
- Europäisches Klima- und Energiepaket 2020:
  - Senkung der Treibhausgasemissionen um 20 % im Vergleich zu 1990
  - 20 % der Energie aus erneuerbaren Quellen
  - Verbesserung der Energieeffizienz um 20 %

Produktionsfaktor Energie

- Anteil des industriellen Energieverbrauchs am weltweiten Energieverbrauch $\approx 54\,\%$
  - Beispiele für eine energieintensive Produktion:

Papier

Chemie

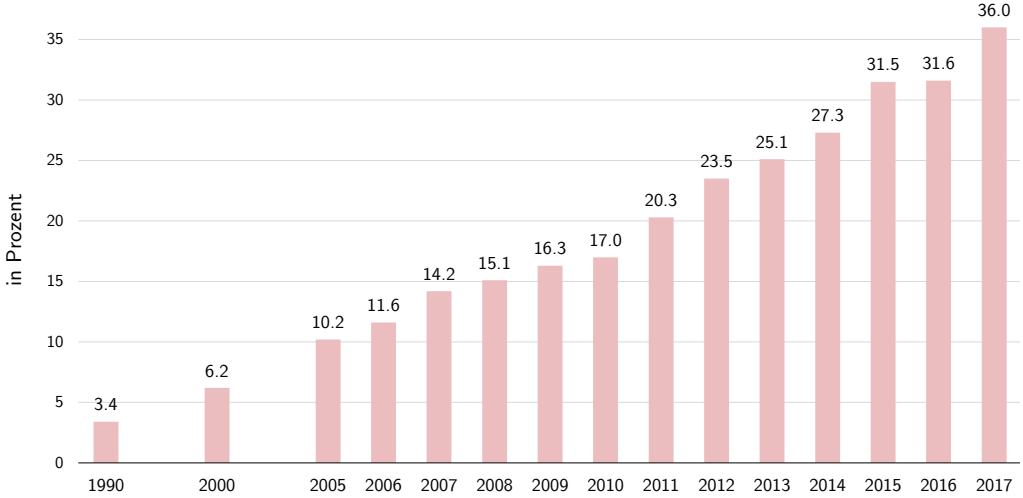
Eisen und Stahl

Luftfahrt

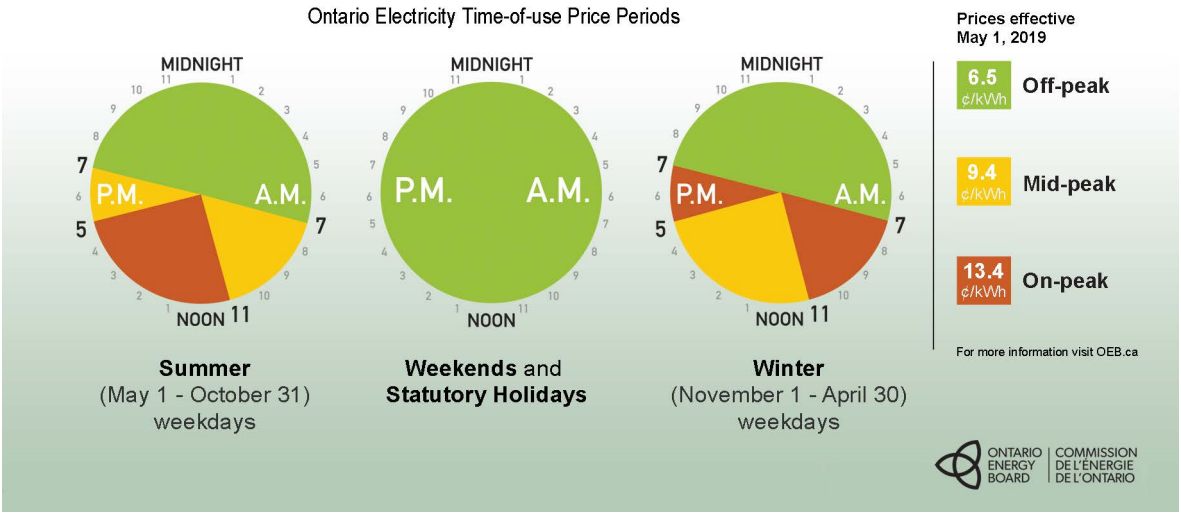
- Strombedarf des europäischen Industriesektors steigt kontinuierlich mit $\approx 0{,}3\,\%$ pro Jahr
- Europäisches Klima- und Energiepaket 2020:
  - Senkung der Treibhausgasemissionen um 20 % im Vergleich zu 1990
  - 20 % der Energie aus erneuerbaren Quellen
  - Verbesserung der Energieeffizienz um 20 %

Strommarkt in Deutschland

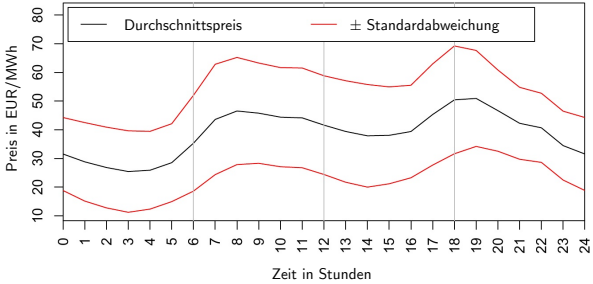
Anteil des aus erneuerbaren Energien erzeugten Stroms [BMWi2018]

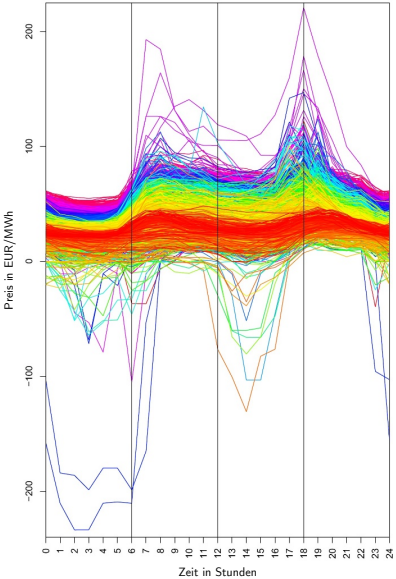


Time-of-use (TOU)-Tarife in Ontario, Kanada



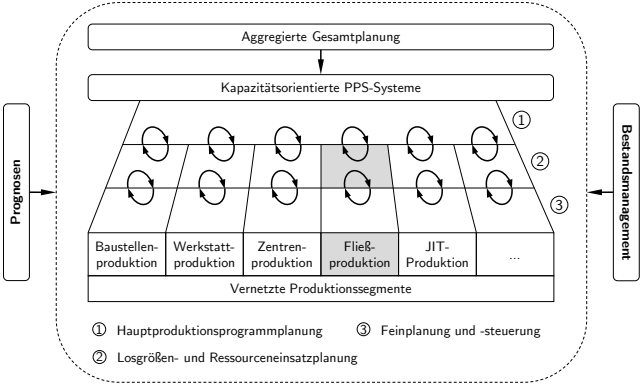
Strombörsenpreise der EPEX SPOT im Zeitraum 2011-2016





Planungszeitraum und Abgrenzung von der Produktionssteuerung

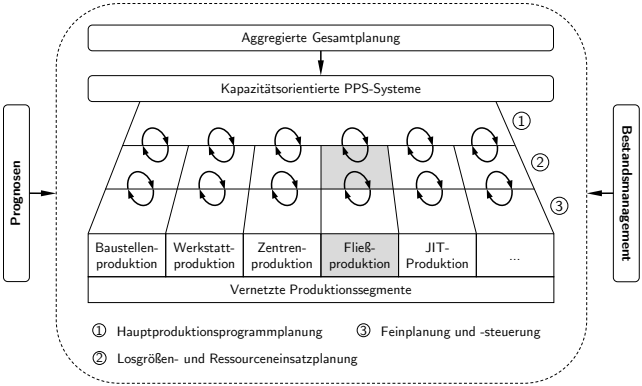
- Analyse einer Flow Shop-Umgebung
- Einordnung der energiekostenorientierten Planung in PPS-Modell nach *Drexl et al. (1994)*, *Tempelmeier (2015)*: Losgrößen und Ressourceneinsatzplanung
- mittelfristiger Planungszeitraum von 4-12 Wochen, Periodenlänge variabel (typisch: Schichten, Tage)
- hier: Planungszeitraum 1, 2 und 4 Wochen, Periodenlänge stündlich (Strompreise auf Stundenbasis)



Kapazitiertes PPS-Modell nach Drexl et al. (1994) und Tempelmeier (2015)

Planungszeitraum und Abgrenzung von der Produktionssteuerung

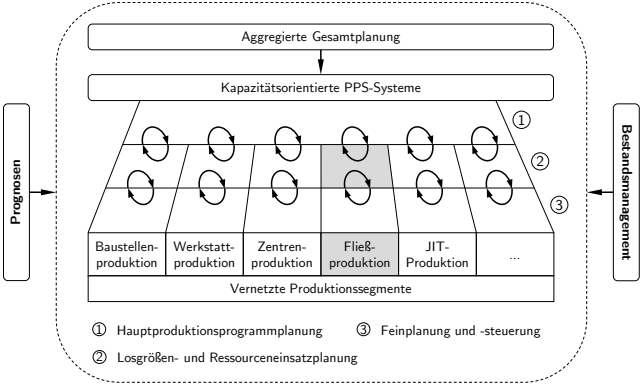
- Analyse einer Flow Shop-Umgebung
- Einordnung der energiekostenorientierten Planung in PPS-Modell nach *Drexl et al. (1994)*, *Tempelmeier (2015)*: Losgrößen und Ressourceneinsatzplanung
- mittelfristiger Planungszeitraum von 4-12 Wochen, Periodenlänge variabel (typisch: Schichten, Tage)
- hier: Planungszeitraum 1, 2 und 4 Wochen, Periodenlänge stündlich (Strompreise auf Stundenbasis)



Kapazitiertes PPS-Modell nach Drexl et al. (1994) und Tempelmeier (2015)

Planungszeitraum und Abgrenzung von der Produktionssteuerung

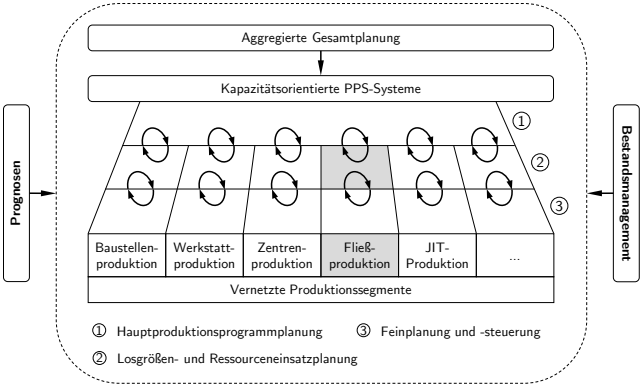
- Analyse einer Flow Shop-Umgebung
- Einordnung der energiekostenorientierten Planung in PPS-Modell nach *Drexl et al. (1994)*, *Tempelmeier (2015)*: Losgrößen und Ressourceneinsatzplanung
- mittelfristiger Planungszeitraum von 4-12 Wochen, Periodenlänge variabel (typisch: Schichten, Tage)
- hier: Planungszeitraum 1, 2 und 4 Wochen, Periodenlänge stündlich (Strompreise auf Stundenbasis)



Kapazitiertes PPS-Modell nach Drexl et al. (1994) und Tempelmeier (2015)

Planungszeitraum und Abgrenzung von der Produktionssteuerung

- Analyse einer Flow Shop-Umgebung
- Einordnung der energiekostenorientierten Planung in PPS-Modell nach *Drexl et al. (1994)*, *Tempelmeier (2015)*: Losgrößen und Ressourceneinsatzplanung
- mittelfristiger Planungszeitraum von 4-12 Wochen, Periodenlänge variabel (typisch: Schichten, Tage)
- hier: Planungszeitraum 1, 2 und 4 Wochen, Periodenlänge stündlich (Strompreise auf Stundenbasis)



Kapazitiertes PPS-Modell nach Drexl et al. (1994) und Tempelmeier (2015)

Berücksichtigung des Produktionsfaktors Energie

- Energiekostenorientierte Ablaufplanung → Implikationen für weitere Gebiete der Planung:
  - Bereitstellungsplanung
  - Antizipation von zukünftigen Betriebskosten
  - Kraftstoffmengenplanung
  - Personalplanung
  - Wartungsarbeiten
  - ...

1. Inwiefern können mittelfristige Strompreisprognosen in ein Entscheidungsunterstützungssystem integriert werden?
2. Welchen Einfluss hat die Auftragsstruktur auf Ablaufpläne und die Energiekostenersparnis?
3. Welches Potential besteht im Vergleich zur Durchlaufzeitminimierung?

Berücksichtigung des Produktionsfaktors Energie

- Energiekostenorientierte Ablaufplanung → Implikationen für weitere Gebiete der Planung:
  - Bereitstellungsplanung
  - Antizipation von zukünftigen Betriebskosten
  - Kraftstoffmengenplanung
  - Personalplanung
  - Wartungsarbeiten
  - ...

1. Inwiefern können mittelfristige Strompreisprognosen in ein Entscheidungsunterstützungssystem integriert werden?
2. Welchen Einfluss hat die Auftragsstruktur auf Ablaufpläne und die Energiekostenersparnis?
3. Welches Potential besteht im Vergleich zur Durchlaufzeitminimierung?

Berücksichtigung des Produktionsfaktors Energie

- Energiekostenorientierte Ablaufplanung → Implikationen für weitere Gebiete der Planung:
  - Bereitstellungsplanung
  - Antizipation von zukünftigen Betriebskosten
  - Kraftstoffmengenplanung
  - Personalplanung
  - Wartungsarbeiten
  - ...

1. Inwiefern können mittelfristige Strompreisprognosen in ein Entscheidungsunterstützungssystem integriert werden?
2. Welchen Einfluss hat die Auftragsstruktur auf Ablaufpläne und die Energiekostenersparnis?
3. Welches Potential besteht im Vergleich zur Durchlaufzeitminimierung?

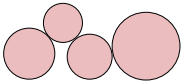
Berücksichtigung des Produktionsfaktors Energie

- Energiekostenorientierte Ablaufplanung → Implikationen für weitere Gebiete der Planung:
  - Bereitstellungsplanung
  - Antizipation von zukünftigen Betriebskosten
  - Kraftstoffmengenplanung
  - Personalplanung
  - Wartungsarbeiten
  - ...

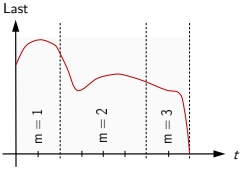
1. Inwiefern können mittelfristige Strompreisprognosen in ein Entscheidungsunterstützungssystem integriert werden?
2. Welchen Einfluss hat die Auftragsstruktur auf Ablaufpläne und die Energiekostenersparnis?
3. Welches Potential besteht im Vergleich zur Durchlaufzeitminimierung?

Modellstruktur (1/2)

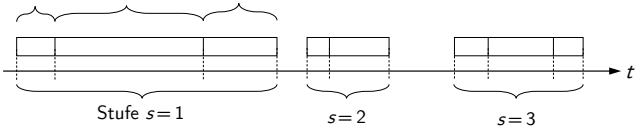
$j = 1, \ldots, J$ Aufträge



- Stufen (Maschinen), Mikroschritte
- Überspringen von Maschinen möglich
- maschinenspezifische Bearbeitungszeiten
- maschinenspezifisches Lastprofil



$m = 1, 2, 3$ Mikroschritte



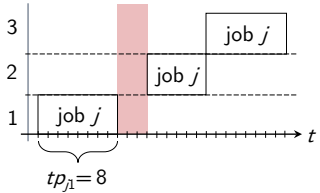
- Planungshorizont von vier Wochen mit Strompreisprognosen auf Stundenbasis

$s = 1, 2, 3$ Stufen (Maschinen)

- mittelfristiger Planungszeitraum
- Flow Shop
- Energiekostenminimierung (im Vergleich zur Durchlaufzeitminimierung)

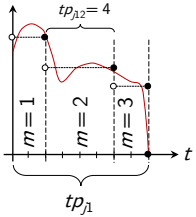
Modellstruktur (2/2)

Stufen/Maschinen



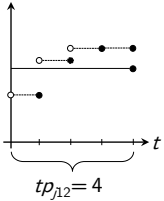
- auftragsspezifische Bearbeitungszeiten auf Stufe s
- Pausen zwischen aufeinanderfolgenden Stufen möglich
- Auslassen von Stufen, falls keine Bearbeitung erforderlich

Last



- auftragsspezische Lastprofile
- variierender Energiebedarf (An- und Abfahren, Bearbeitung)

Strompreis



- stündlich variierende Strompreise
- Anpassung der Strompreise an Periodenlänge möglich

Parameter und Entscheidungsvariablen

Mengen und Indizes

$j \in \mathcal{J}$	Aufträge/Jobs, $\mathcal{J} = \{1, \ldots, J\}$
$s \in \mathcal{S}$	Stufen/Maschinen, $\mathcal{S} = \{1, 2, 3\}$
$m \in \mathcal{M}$	Mikroschritte, $\mathcal{M} = \{1, 2, 3\}$
$t, \tau \in \mathcal{T}$	diskrete Zeitpunkte, $\mathcal{T} = \{1, \ldots T\}$

Parameter

ec_{jsm}	Energiebedarf von Auftrag j auf Stufe s in Mikroschritt m [MW]
p_t	Strompreis zum Zeitpunkt t [€/MW]
Θ_{sj}	Stufen-Indikator, 1 falls Auftrag j auf Stufe s bearbeitet wird, 0 sonst
tp_{jsm}	Bearbeitungszeit von Auftrag j auf Stufe s in Mikroschritt m

Entscheidungsvariablen

TPE_{js}	Bearbeitungsende von Auftrag j auf Stufe s
TPE_{jsm}	Bearbeitungsende von Auftrag j auf Stufe s in Mikroschritt m
X_{jst}	1 falls Auftrag j auf Stufe s zum Zeitpunkt t fertiggestellt wird, 0 sonst

Modellformulierung (1/2)

MILP:

$$\min \quad Z = \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{\tilde{m} \in \mathcal{M}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\tau = t + \sum_{m=1}^{\tilde{m}-1} tp_{jsm}}^{t-1+\sum_{m=1}^{\tilde{m}} tp_{jsm}} p_\tau \cdot ec_{js\tilde{m}} \cdot X_{js,t-1+tp_{js}} \tag{1}$$

u.d.N.

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} X_{jst} = \Theta_{sj} \qquad \forall j, s \tag{2}$$

$$TPE_{js} = \sum_{t \in \mathcal{T}} t \cdot X_{jst} + TPE_{j,s-1} \cdot (1 - \Theta_{sj}) \qquad \forall j, s \tag{3}$$

Modellformulierung (2/2)

$$TPE_{js} \geq TPE_{j,s-1} + \sum_{m \in \mathcal{M}} tp_{jsm} \cdot \Theta_{sj} \qquad \forall j, s \geq 2 \tag{4}$$

$$TPE_{jsm} = TPE_{jsm-1} + tp_{jsm} \cdot \Theta_{sj} \qquad \forall j, s, m \geq 2 \tag{5}$$

$$TPE_{js} = TPE_{js|\mathcal{M}|} \qquad \forall j, s \tag{6}$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{\tau=t}^{t-1+\sum_{m \in \mathcal{M}} tp_{jsm}} X_{js\tau} \leq 1 \qquad \forall s, t \tag{7}$$

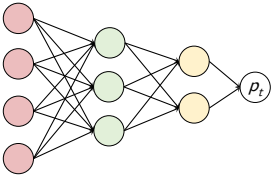
$$X_{jst} \in \{0, 1\} \qquad \forall j, s, t \tag{8}$$

$$TPE_{js} \geq 0 \qquad \forall j, s \tag{9}$$

$$TPE_{jsm} \geq tp_{jsm} \qquad \forall j, s, m \tag{10}$$

Szenarioerstellung und Parameterwahl

- Deep Feedforward Neural Network für stündliche Strompreise
  Datengrundlage EPEX SPOT (01/2011-09/2016)
- 730 Tage als Inputdaten, tageweise rollierendes Zeitfenster,
  Validierung für 1357 29-Tage-Prognosen
- exemplarischer Zeitraum: prognostizierte Strompreise
  01. Juni 2016 bis 28. Juni 2016



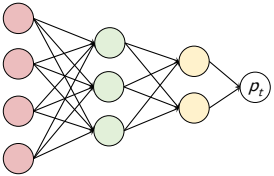
- Szenario $|\mathcal{T}|$-$|\mathcal{J}|$-C je 10 Instanzen: Zeitraum $|\mathcal{T}|$, Anzahl der Aufträge $|\mathcal{J}|$, Lastprofil/Bearbeitungszeit C, $C \in \{1, 2, 3\} \times \{a, b, c\}$:

Last [MW]		Bearbeitungszeit [h]	
Variante 1	$0.1 - 3$	Variante a	$1 - 10$
Variante 2	$3 - 6$	Variante b	$11 - 20$
Variante 3	$0.1 - 6$	Variante c	$1 - 20$

- Planungszeitraum $|\mathcal{T}| = 7, 14, 28$ Tage
  Anzahl der Aufträge: $|\mathcal{J}| = 10, \ldots, 70$
- Versuch einer exakten Lösung mit Solver: CPLEX mit Zeitlimit $t^{\text{lim}} = 4$ h (14.400 s)

Szenarioerstellung und Parameterwahl

- Deep Feedforward Neural Network für stündliche Strompreise
  Datengrundlage EPEX SPOT (01/2011-09/2016)
- 730 Tage als Inputdaten, tageweise rollierendes Zeitfenster,
  Validierung für 1357 29-Tage-Prognosen
- exemplarischer Zeitraum: prognostizierte Strompreise
  01. Juni 2016 bis 28. Juni 2016



- Szenario $|\mathcal{T}|$-$|\mathcal{J}|$-C je 10 Instanzen: Zeitraum $|\mathcal{T}|$, Anzahl der Aufträge $|\mathcal{J}|$, Lastprofil/Bearbeitungszeit C, $C \in \{1, 2, 3\} \times \{a, b, c\}$:

Last [MW]		Bearbeitungszeit [h]	
Variante 1	$0.1 - 3$	Variante a	$1 - 10$
Variante 2	$3 - 6$	Variante b	$11 - 20$
Variante 3	$0.1 - 6$	Variante c	$1 - 20$

- Planungszeitraum $|\mathcal{T}| = 7, 14, 28$ Tage
  Anzahl der Aufträge: $|\mathcal{J}| = 10, \ldots, 70$
- Versuch einer exakten Lösung mit Solver: CPLEX mit Zeitlimit $t^{\text{lim}} = 4$ h (14.400 s)

Ergebnisse

$|\mathcal{T}| = 7$ Tage, gemittelt je Szenario

	(a) Prognose				(b) Durchlaufzeit		
scenario	t_{cpu} [s]	$\varepsilon_{\text{mape}}$ [%]	ε_{mae} [€]	$\varepsilon_{\text{rmse}}$ [€]	Δ [%]	Δ_{abs} [€]	Δ_{quad} [€]
7d-10j-1a	13.40	2.95	50.28	52.20	**56.05**	954.46	977.86
7d-10j-1b	**22.65**	**1.55**	84.62	91.89	12.30	664.54	678.51
7d-10j-1c	17.13	2.22	74.02	77.10	34.60	1152.26	1177.34
7d-10j-2a	19.90	3.54	193.72	200.60	**47.28**	2552.81	2572.47
7d-10j-2b	**29.48**	**1.70**	274.08	279.90	11.15	1803.60	1838.41
7d-10j-2c	23.26	2.22	204.94	214.94	30.32	2800.51	2820.78
7d-10j-3a	16.54	3.53	137.49	144.49	**53.08**	2059.33	2109.06
7d-10j-3b	**26.20**	**1.48**	157.68	184.97	16.98	1749.39	1779.97
7d-10j-3c	21.02	2.32	147.91	160.64	31.03	1928.56	1956.90
7d-20j-1a	43.94	2.90	112.52	114.16	**37.63**	1472.72	1488.08
7d-20j-2a	74.13	2.70	325.34	334.28	32.12	**3826.49**	**3850.00**
7d-20j-3a	44.33	3.18	207.71	210.57	40.94	2691.07	2716.49
7d-30j-1a	293.14	2.51	156.93	160.24	23.02	1438.28	1457.15
7d-30j-2a	780.83	2.22	412.18	414.03	17.53	3246.44	3262.72
7d-30j-3a	446.69	2.41	288.18	292.86	23.19	2717.07	2734.20

Ergebnisse

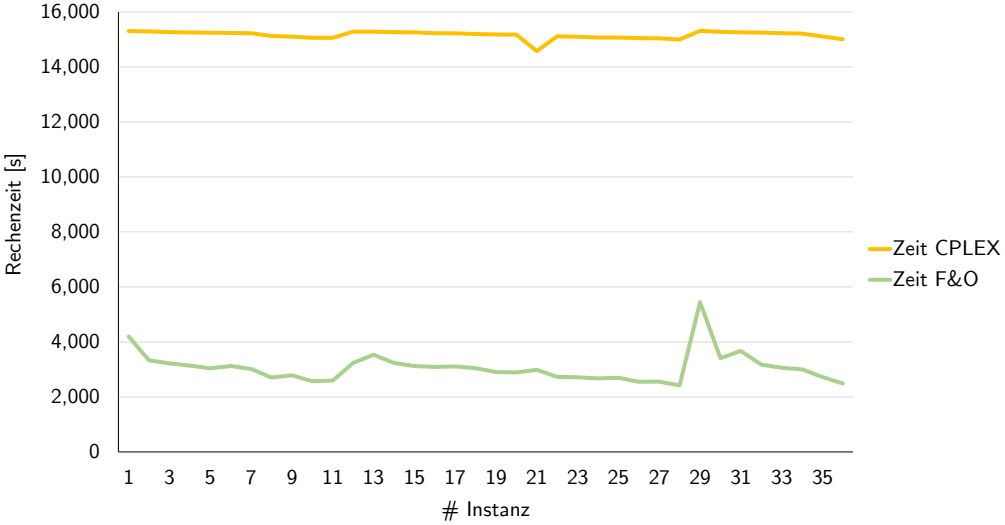
$|\mathcal{T}| = 28$ Tage, gemittelt je Szenario

	(a) Prognose				(b) Durchlaufzeit		
scenario	t_{cpu} [s]	$\varepsilon_{\text{mape}}$ [%]	ε_{mae} [€]	$\varepsilon_{\text{rmse}}$ [€]	Δ [%]	Δ_{abs} [€]	Δ_{quad} [€]
28d-50j-1a	3448.81	12.02	941.07	944.76	60.55	4776.50	4811.58
28d-50j-1b	12896.37	4.03	1047.24	1050.72	20.95	5431.63	5465.08
28d-50j-1c	7879.05	6.26	968.81	972.10	35.43	5461.10	5476.33
28d-50j-2a	11663.39	8.83	2219.92	2224.42	52.39	13186.32	13204.09
28d-50j-2b	**15166.32**	3.11	2422.95	2428.69	15.73	12223.14	12269.95
28d-50j-2c	12081.66	4.76	2324.41	2344.71	29.49	14204.20	14265.54
28d-50j-3a	3148.54	12.95	1950.47	1952.65	63.42	9639.87	9666.72
28d-50j-3b	11064.42	4.23	2092.40	2102.79	22.24	11032.59	11079.26
28d-50j-3c	6429.67	6.06	1960.94	1966.13	34.88	11269.35	11290.64
28d-60j-1a	8099.59	10.86	1034.35	1035.19	57.00	5432.10	5437.55
28d-60j-1c	15147.76	4.98	1038.45	1042.63	29.73	6187.30	6195.35
28d-60j-2a	14919.85	8.00	2328.22	2329.81	46.86	13670.50	13678.60
28d-60j-2c	14045.76	4.38	2674.83	2685.19	22.75	13872.43	13895.91
28d-60j-3a	11632.40	10.22	2021.85	2025.13	54.76	10845.20	10867.44
28d-60j-3c	10266.67	5.37	2189.89	2199.76	29.86	12181.88	12252.20
28d-70j-1a	**15016.52**	9.25	1091.03	1091.62	49.71	5876.17	5884.52
28d-70j-1c	**15266.04**	4.50	1106.01	1111.91	26.54	6504.72	6521.69
28d-70j-2a	**14997.70**	6.48	2383.53	2385.13	40.22	14847.42	14867.06
28d-70j-2c	**15293.84**	3.66	2758.15	2772.00	19.29	14465.03	14530.29
28d-70j-3a	**15025.13**	9.28	2174.04	2177.95	49.37	11574.41	11584.66
28d-70j-3c	**15264.83**	4.42	2163.33	2173.39	26.95	13267.93	13326.46

Zwei heuristische Ansätze

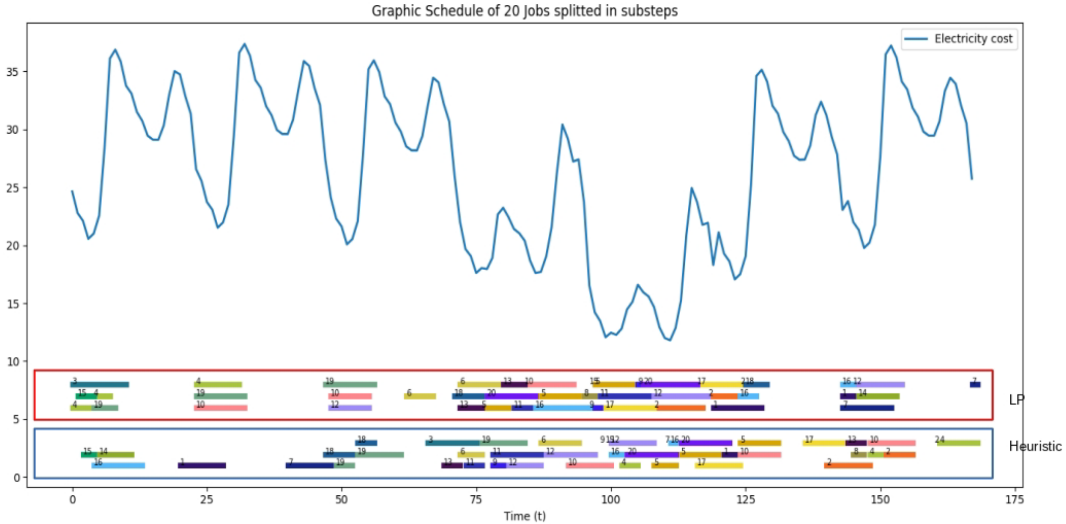
- Fix & Optimize-Ansatz
  - Dekompositionsstrategie, verwendet von Sahling (2010) für kapazitierte Losgrößenprobleme; vielversprechende Ergebnisse bei Rieck et al. (2014) für Location-Routing-Probleme
  - Idee: Unterteile den Planungszeitraum in separate Abschnitte (Subprobleme), löse die Subprobleme und setze die Lösungen der Subprobleme zu einer Gesamtlösung zusammen
  - Lösungsgüte: $\approx 20\,\%$ (≈ 45 min) der CPLEX-Zeit, Abweichung $< 0.1\,\%$
- Prioritätsregelverfahren
  - Unterschiedliche Varianten: auf-/absteigende Sortierung der Aufträge nach ihrem individuellen Gesamtenergiebedarf/ihrer Bearbeitungsdauer
  - geeignet: Priorisierung von Aufträgen mit hohem Gesamtenergiebedarf für strompreisgünstige Zeitintervalle
  - Lösungsgüte: ≈ 80 s, Abweichung $\approx 9\,\%$

Ergebnisse für 28d-50j-C mit einem Fix & Optimize-Ansatz



Visualisierung von optimaler und heuristischer Lösung (Prioritätsregelverfahren)

Instanz aus Szenario 7d-20j-2a



In each case: Bottom line: Machine #1, Middle line= Machine #2, upper line = Machine #3

Zusammenfassung

- Verkettung von Strompreisprognosen mit einer energiekostenorientierten Produktionsplanung
- Variierender Planungszeitraum (1, 2 und 4 Wochen)
- umfangreicher synthetischer Datensatz, praxisnahe Anwendung (energieintensive maschinelle Fertigung, Luftfahrtbranche)
- Gemischt-Ganzzahliges Optimierungsproblem
  - Exakte Verfahren
  - Heuristische Verfahren (Fix & Optimize, Prioritätsregelverfahren)
- Ergebnisse:
  - Strompreisprognosen generell geeignet: Fehler $\varepsilon_{\text{mape}} \in [1.48\,\%; 12.95\,\%]$
  - Im Vergleich zur Makespan-Minimierung Einsparpotential von bis zu 63.42 %: Aufträge mit kurzen Bearbeitungszeiten (Fall a)
  - hohe Lösungsgüte mit Fix & Optimize-Ansatz für große Instanzen
  - schnelles Prioritätsregelverfahren

Zusammenfassung

- Verkettung von Strompreisprognosen mit einer energiekostenorientierten Produktionsplanung
- Variierender Planungszeitraum (1, 2 und 4 Wochen)
- umfangreicher synthetischer Datensatz, praxisnahe Anwendung (energieintensive maschinelle Fertigung, Luftfahrtbranche)
- Gemischt-Ganzzahliges Optimierungsproblem
  - Exakte Verfahren
  - Heuristische Verfahren (Fix & Optimize, Prioritätsregelverfahren)
- Ergebnisse:
  - Strompreisprognosen generell geeignet: Fehler $\varepsilon_{\text{mape}} \in [1.48\,\%; 12.95\,\%]$
  - Im Vergleich zur Makespan-Minimierung Einsparpotential von bis zu 63.42 %: Aufträge mit kurzen Bearbeitungszeiten (Fall a)
  - hohe Lösungsgüte mit Fix & Optimize-Ansatz für große Instanzen
  - schnelles Prioritätsregelverfahren

Zusammenfassung

- Verkettung von Strompreisprognosen mit einer energiekostenorientierten Produktionsplanung
- Variierender Planungszeitraum (1, 2 und 4 Wochen)
- umfangreicher synthetischer Datensatz, praxisnahe Anwendung (energieintensive maschinelle Fertigung, Luftfahrtbranche)
- Gemischt-Ganzzahliges Optimierungsproblem
  - Exakte Verfahren
  - Heuristische Verfahren (Fix & Optimize, Prioritätsregelverfahren)
- Ergebnisse:
  - Strompreisprognosen generell geeignet: Fehler $\varepsilon_{\text{mape}} \in [1.48\,\%; 12.95\,\%]$
  - Im Vergleich zur Makespan-Minimierung Einsparpotential von bis zu 63.42 %: Aufträge mit kurzen Bearbeitungszeiten (Fall a)
  - hohe Lösungsgüte mit Fix & Optimize-Ansatz für große Instanzen
  - schnelles Prioritätsregelverfahren

Jan Busse, M.Sc.
Universität Hildesheim
Institut für Betriebswirtschaft und Wirtschaftsinformatik
Abteilung Betriebswirtschaft und Operations Research
Samelsonplatz 1, 31141 Hildesheim

Tel.: 05121 / 883-40516
E-Mail: busse@bwl.uni-hildesheim.de