

Optimierung im Gebäude-Energiemanagement mittels gemischt-ganzzahliger linearer Programmierung

Sebastian Sigg

Seminar Energieinformatik

INSTITUT FÜR ANGEWANDTE INFORMATIK UND FORMALE BESCHREIBUNGSVERFAHREN



<https://www.ewe.de/~media/ewe/internet/images/stages/stages-1280x415/gk-energie/gk-strom-online12-1280x415.jpg?h=415&la=de-DE&w=1280>

Motivation



Inhalt

- Beschreibung der zur Optimierung nötigen Ausgangssituation
 - Optimierungspotential
 - Ausnutzung des von variablen Preisen und Emissionen
 - Realisierung

- Darstellung als gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem
 - Betrachtung der Kosten
 - Einbindung von Speichern
 - Betrachtung der CO₂ Emissionen

Problemstellung

- Zwei Ziele nach denen optimiert werden kann:

- **Stromkosten**
- **CO₂ Emissionen**

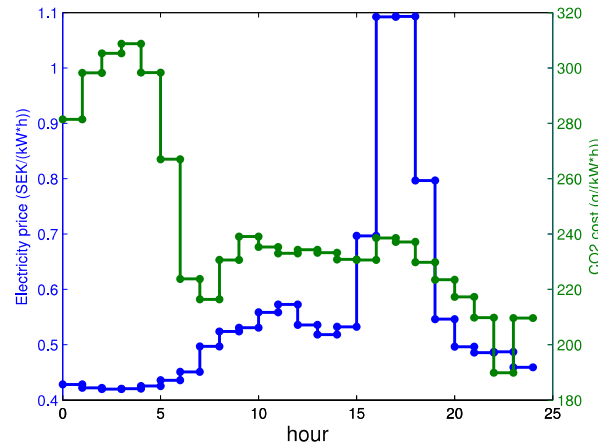


Abb. 1. Stromtarif und CO₂ Profil in Schweden am 05. 01. 2010. Abbildung entnommen aus [3].

- Betrachtet werden verschiedene Haushaltsgeräte
 - z. B. Waschmaschine, Trockner oder Spülmaschine (unterbrechbare Geräte)
- Ziel ist einen optimalen Zeitplan zu erzeugen, in dem alle Haushaltgeräte enthalten sind und die Kosten sowie Emissionen minimal sind.

Problemstellung

- Einige Restriktionen müssen berücksichtigt werden:
 - Abhängigkeiten zwischen Geräten
 - Nutzerpräferenzen

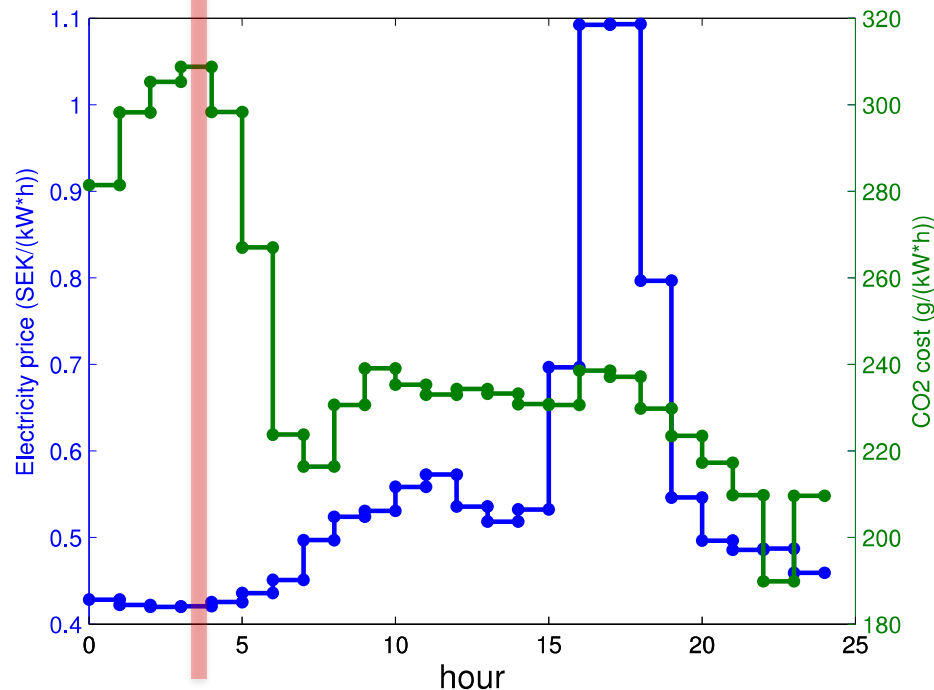


Abb. 1. Elektrizitätstarif und CO₂ Profil in Schweden am 05. 01. 2010. Abbildung entnommen aus [3].

Bilder:
http://images.clipartlogo.com/files/images/38/381721/washing-laundry-clip-art_f.jpg
<https://pixabay.com/de/symbol-der-waschmaschine-667712/>

Problemstellung

- Einige Restriktionen müssen berücksichtigt werden:
 - Abhängigkeiten zwischen Geräten
 - Nutzerpräferenzen

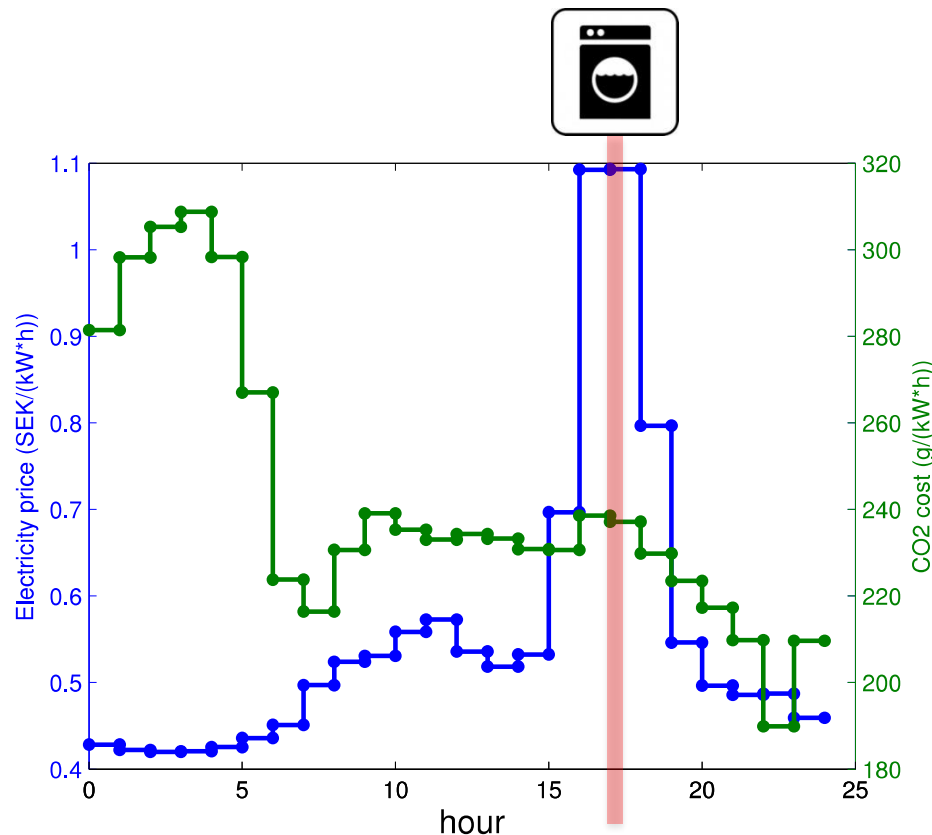


Abb. 1. Elektrizitätstarif und CO₂ Profil in Schweden am 05. 01. 2010. Abbildung entnommen aus [3].

Bilder:
http://images.clipartlogo.com/files/images/38/381721/washing-laundry-clip-art_f.jpg
<https://pixabay.com/de/symbol-der-waschmaschine-667712/>

Problemstellung

- Einige Restriktionen müssen berücksichtigt werden:
 - Abhängigkeiten zwischen Geräten
 - Nutzerpräferenzen

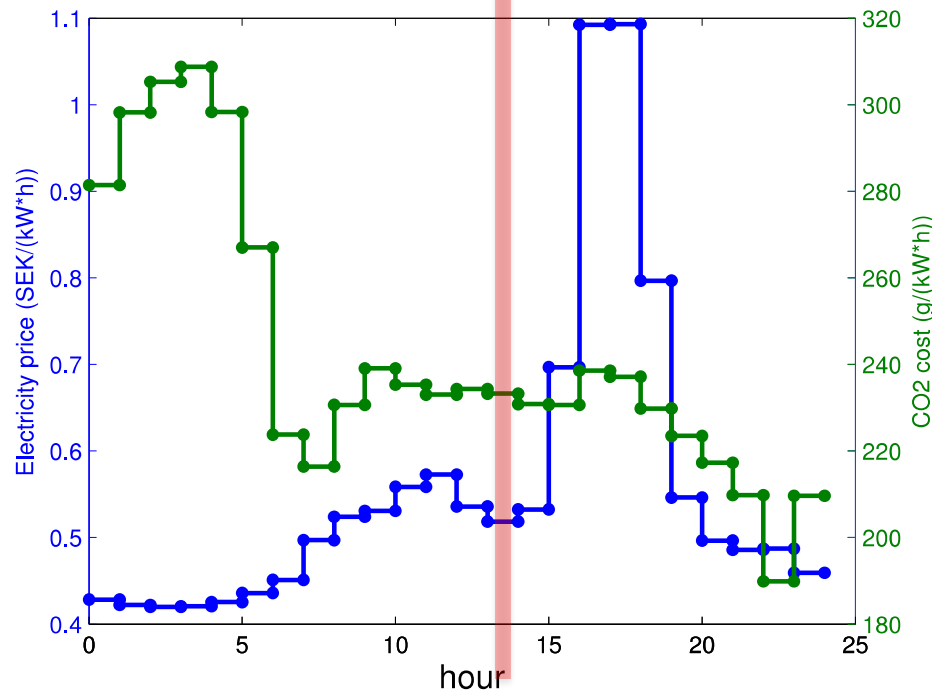


Abb. 1. Elektrizitätstarif und CO₂ Profil in Schweden am 05. 01. 2010. Abbildung entnommen aus [3].

Bilder:
http://images.clipartlogo.com/files/images/38/381721/washing-laundry-clip-art_f.jpg
<https://pixabay.com/de/symbol-der-waschmaschine-667712/>

Problemstellung

- Einige Restriktionen müssen berücksichtigt werden:
 - Abhängigkeiten zwischen Geräten
 - Nutzerpräferenzen

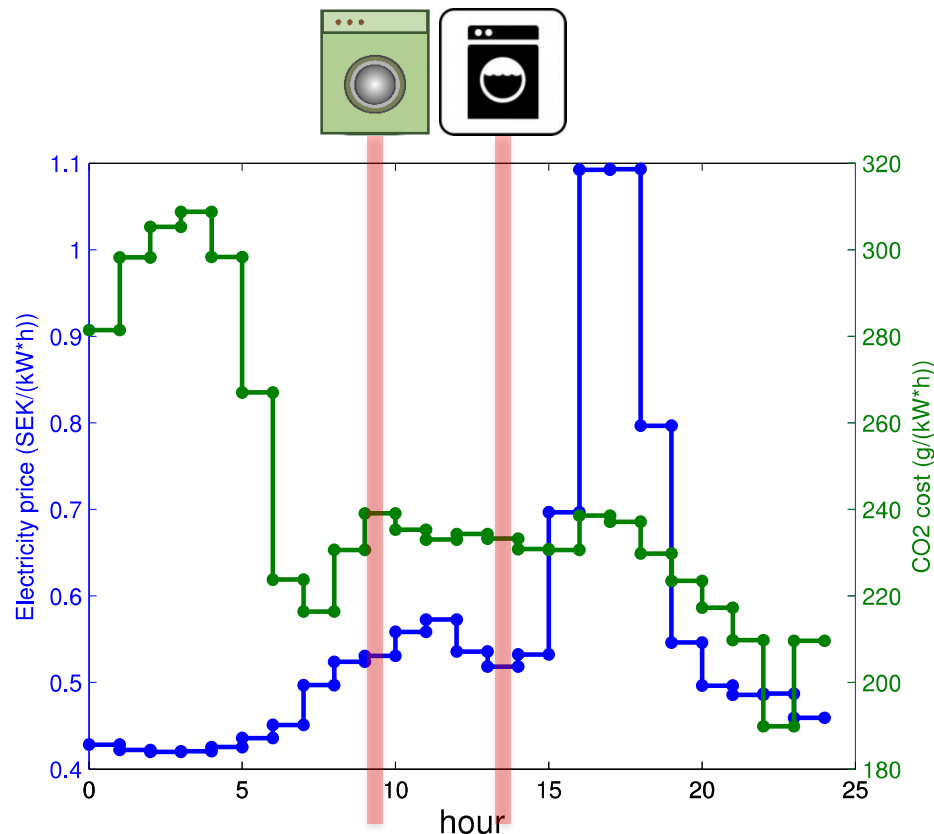


Abb. 1. Elektrizitätstarif und CO₂ Profil in Schweden am 05. 01. 2010. Abbildung entnommen aus [3].

Bilder:
http://images.clipartlogo.com/files/images/38/381721/washing-laundry-clip-art_f.jpg
<https://pixabay.com/de/symbol-der-waschmaschine-667712/>

Problemstellung

- Einige Restriktionen müssen berücksichtigt werden:
 - Abhängigkeiten zwischen Geräten
 - Nutzerpräferenzen

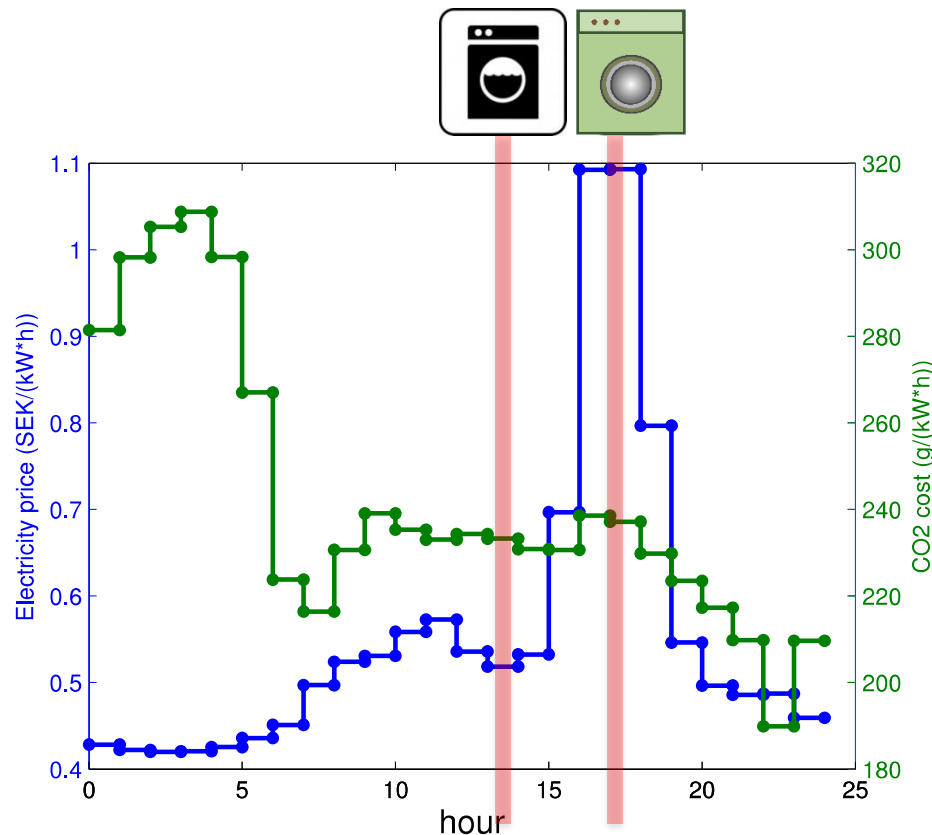


Abb. 1. Elektrizitätstarif und CO₂ Profil in Schweden am 05. 01. 2010. Abbildung entnommen aus [3].

Bilder:
http://images.clipartlogo.com/files/images/38/381721/washing-laundry-clip-art_f.jpg
<https://pixabay.com/de/symbol-der-waschmaschine-667712/>

Problemstellung

- Einige Restriktionen müssen berücksichtigt werden:
 - Abhängigkeiten zwischen Geräten
 - Nutzerpräferenzen

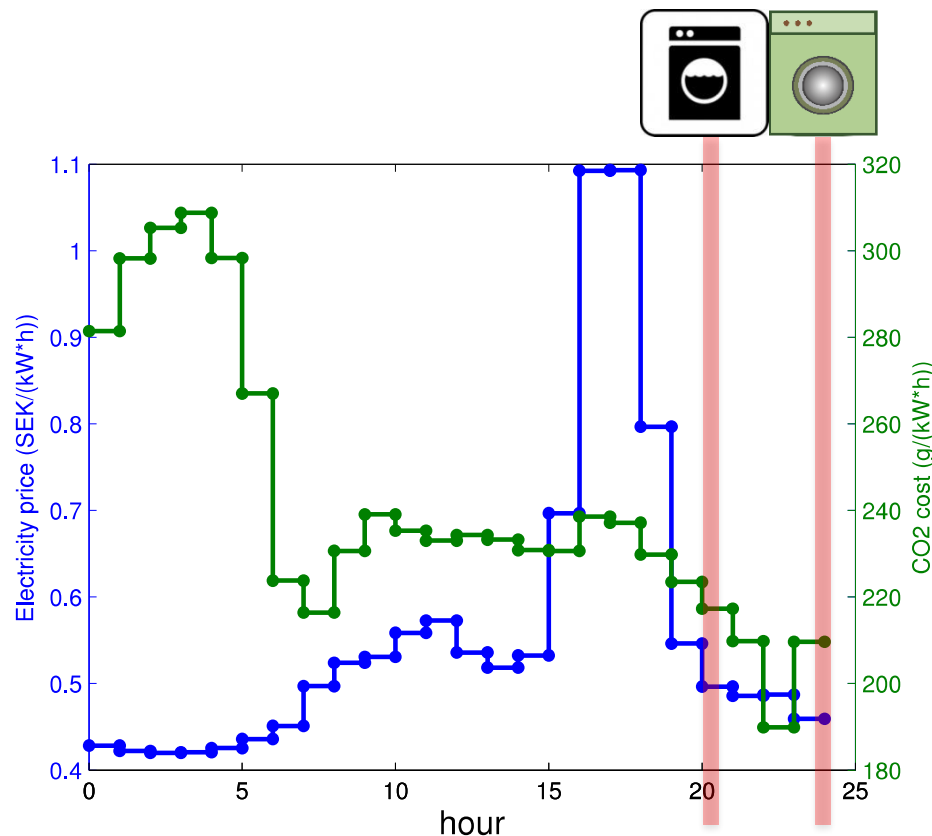


Abb. 1. Elektrizitätstarif und CO₂ Profil in Schweden am 05. 01. 2010. Abbildung entnommen aus [3].

Bilder:
http://images.clipartlogo.com/files/images/38/381721/washing-laundry-clip-art_f.jpg
<https://pixabay.com/de/symbol-der-waschmaschine-667712/>

Problemstellung

- Problem: Unrealistisch, dass der Nutzer sich nach stündlich wechselndem Tarif und CO₂ Fußabdruck richtet.

- Lösung wären automatische Systeme die
 - dem Nutzer Informationen bereitstellen
 - komplett von selbst die Geräte der Nutzers steuern

- Einsatz von intelligenten Geräten die auf Tarif- und Emissionsdaten zugreifen können.
 - Stellen die Realisierbarkeit einer optimalen Lösung sicher

Beispiel für optimalen Zeitplan

- Beispielsituation mit drei verschiedenen Geräten.
- Nutzerpräferenzen:
 - Geschirrspülmaschine zwischen 19:00 Uhr und 24:00 Uhr
 - Waschmaschine und Trockner zwischen 9:00 und 23:00 Uhr

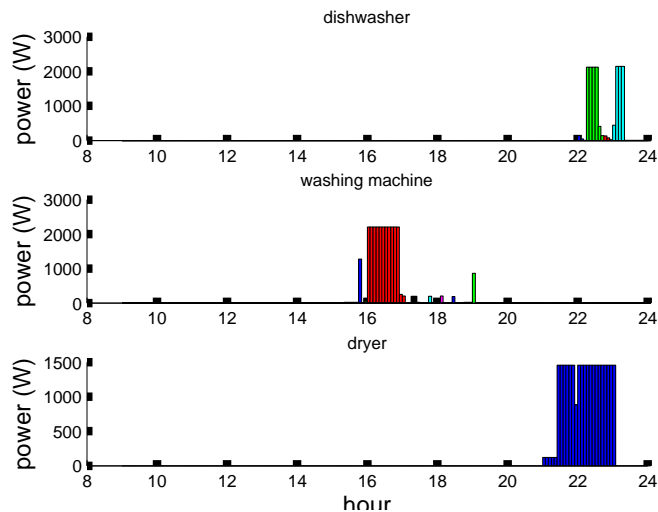


Abb. 2. Die Energieprofile der 3 Geräte mit minimalen Kosten nach MILP. Abbildung entnommen aus [1]

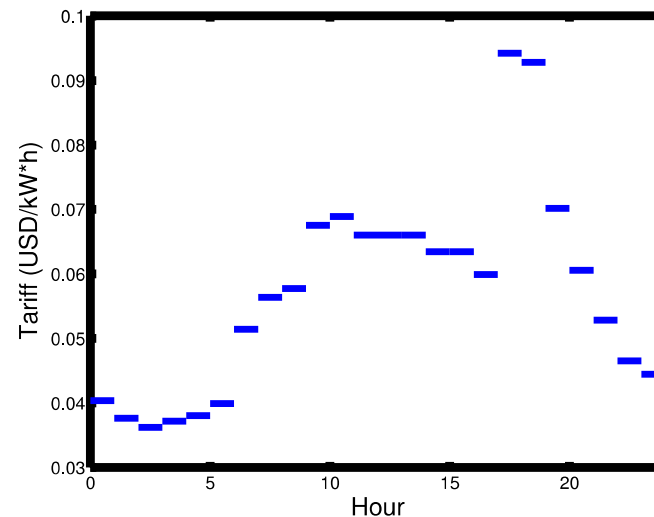


Abb. 3. Elektrizitätstarif für New York City am 15. Februar 2011. Abbildung entnommen aus [1]

Mathematische Formulierung des Problems

- Gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung
 - Annahmen
 - Minimierung der Stromkosten
 - Einbindung einer Batterie
 - Betrachtung von Lösungskonzepten
 - Minimierung der Stromkosten und der CO₂ Emissionen

MILP Formulierung des Problems

■ Annahmen:

- Stückweise konstante Stromkosten
- Unterteilung eines Betriebsprozesses in sequentielle Verbrauchsphasen
- Verbrauchsphase kann nicht unterbrochen werden
- Phasen haben vorgegebene Mengen benötigter elektrischer Energie
- Die Verbrauchsphasen können in einem Energieprofil für jedes Gerät dargestellt werden:

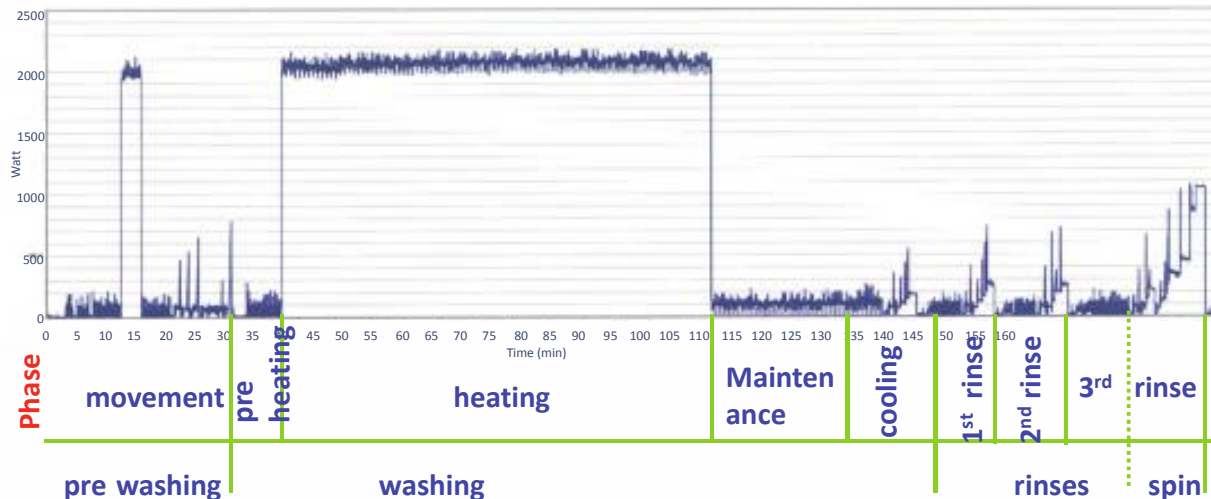


Abb. 4. Die 8 Energiephasen bilden das Energieprofil des Beispiels Waschmaschine. Abbildung entnommen aus [3].

Mathematische Formulierung des Problems

- Gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung
 - Annahmen
 - **Minimierung der Stromkosten**
 - Einbindung einer Batterie
 - Betrachtung von Lösungskonzepten
 - Minimierung der Stromkosten und der CO₂ Emissionen

MILP Formulierung des Problems [K. C. Sou, 2011]

■ Indizes und Variablen:

- Die betrachtete Periode wird in m gleichgroße Zeitabschnitte aufgeteilt
- Die Anzahl der im Zeitplan zu berücksichtigenden Geräte ist N
- Die Anzahl der Verbrauchsphasen für jedes Gerät ist n_i für $i = 1, 2, \dots, N$

■ Entscheidungsvariablen:

- p_{ij}^k Zugeteilte Energie für Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k
- x_{ij}^k binär mit $x_{ij}^k = 1$, wenn Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k ausgeführt wird
- s_{ij}^k binär mit $s_{ij}^k = 1$, wenn Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k ausgeführt ist
- t_{ij}^k binär mit $t_{ij}^k = 1$, wenn Phase $j-1$ beendet aber j noch nicht angefangen hat



MILP Formulierung des Problems [K. C. Sou, 2011]

■ Indizes und Variablen:

- Die betrachtete Periode wird in m gleichgroße Zeitabschnitte aufgeteilt
- Die Anzahl der im Zeitplan zu berücksichtigenden Geräte ist N
- Die Anzahl der Verbrauchsphasen für jedes Gerät ist n_i für $i = 1, 2, \dots, N$

■ Entscheidungsvariablen:

- p_{ij}^k Zugeteilte Energie für Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k
- x_{ij}^k binär mit $x_{ij}^k = 1$, wenn Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k ausgeführt wird
- s_{ij}^k binär mit $s_{ij}^k = 1$, wenn Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k ausgeführt ist
- t_{ij}^k binär mit $t_{ij}^k = 1$, wenn Phase $j-1$ beendet aber j noch nicht angefangen hat



15 Minuten in 15 Zeitabschnitten

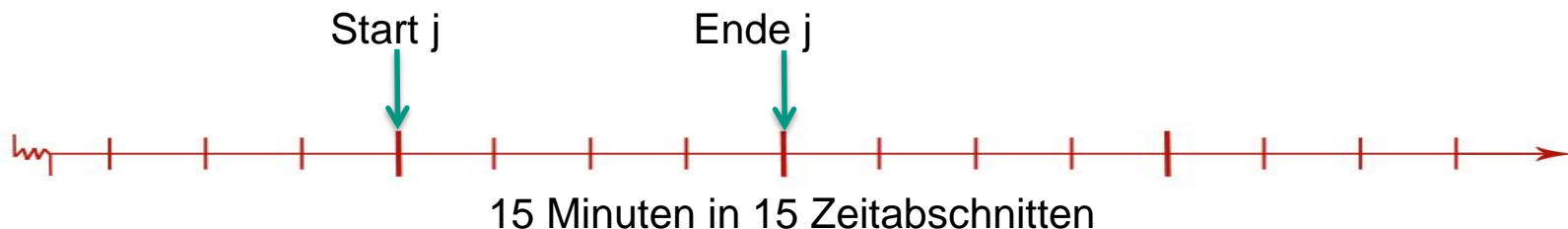
MILP Formulierung des Problems [K. C. Sou, 2011]

■ Indizes und Variablen:

- Die betrachtete Periode wird in m gleichgroße Zeitabschnitte aufgeteilt
- Die Anzahl der im Zeitplan zu berücksichtigenden Geräte ist N
- Die Anzahl der Verbrauchsphasen für jedes Gerät ist n_i für $i = 1, 2, \dots, N$

■ Entscheidungsvariablen:

- p_{ij}^k Zugeteilte Energie für Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k
- x_{ij}^k binär mit $x_{ij}^k = 1$, wenn Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k ausgeführt wird
- s_{ij}^k binär mit $s_{ij}^k = 1$, wenn Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k ausgeführt ist
- t_{ij}^k binär mit $t_{ij}^k = 1$, wenn Phase $j-1$ beendet aber j noch nicht angefangen hat



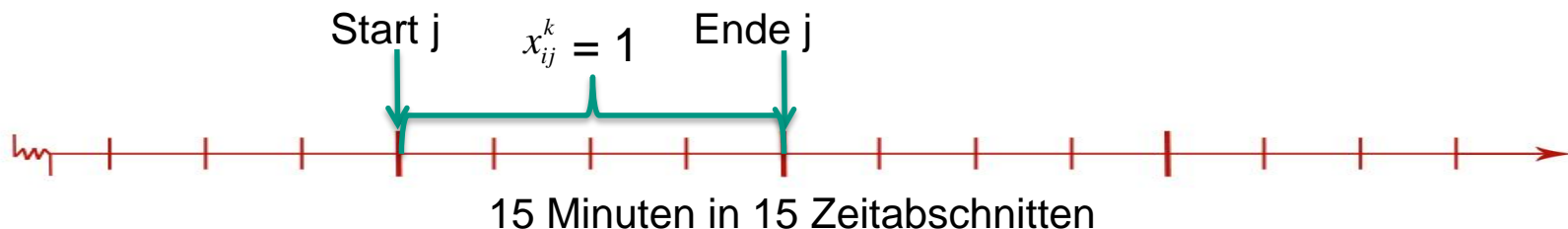
MILP Formulierung des Problems [K. C. Sou, 2011]

■ Indizes und Variablen:

- Die betrachtete Periode wird in m gleichgroße Zeitabschnitte aufgeteilt
- Die Anzahl der im Zeitplan zu berücksichtigenden Geräte ist N
- Die Anzahl der Verbrauchsphasen für jedes Gerät ist n_i für $i = 1, 2, \dots, N$

■ Entscheidungsvariablen:

- p_{ij}^k Zugeteilte Energie für Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k
- x_{ij}^k binär mit $x_{ij}^k = 1$, wenn Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k ausgeführt wird
- s_{ij}^k binär mit $s_{ij}^k = 1$, wenn Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k ausgeführt ist
- t_{ij}^k binär mit $t_{ij}^k = 1$, wenn Phase $j-1$ beendet aber j noch nicht angefangen hat



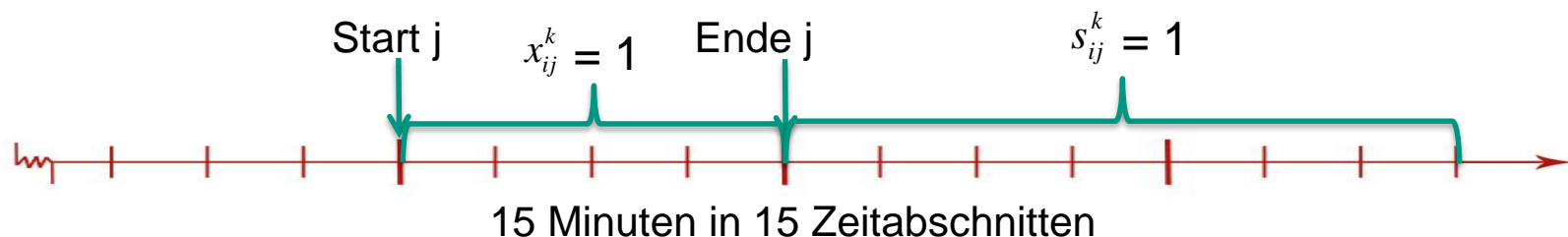
MILP Formulierung des Problems [K. C. Sou, 2011]

■ Indizes und Variablen:

- Die betrachtete Periode wird in m gleichgroße Zeitabschnitte aufgeteilt
- Die Anzahl der im Zeitplan zu berücksichtigenden Geräte ist N
- Die Anzahl der Verbrauchsphasen für jedes Gerät ist n_i für $i = 1, 2, \dots, N$

■ Entscheidungsvariablen:

- p_{ij}^k Zugeteilte Energie für Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k
- x_{ij}^k binär mit $x_{ij}^k = 1$, wenn Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k ausgeführt wird
- s_{ij}^k binär mit $s_{ij}^k = 1$, wenn Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k ausgeführt ist
- t_{ij}^k binär mit $t_{ij}^k = 1$, wenn Phase $j-1$ beendet aber j noch nicht angefangen hat



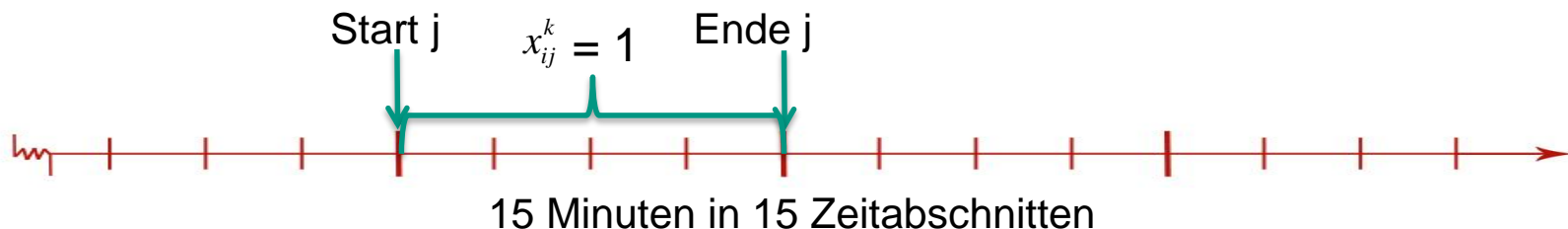
MILP Formulierung des Problems [K. C. Sou, 2011]

■ Indizes und Variablen:

- Die betrachtete Periode wird in m gleichgroße Zeitabschnitte aufgeteilt
- Die Anzahl der im Zeitplan zu berücksichtigenden Geräte ist N
- Die Anzahl der Verbrauchsphasen für jedes Gerät ist n_i für $i = 1, 2, \dots, N$

■ Entscheidungsvariablen:

- p_{ij}^k Zugeteilte Energie für Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k
- x_{ij}^k binär mit $x_{ij}^k = 1$, wenn Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k ausgeführt wird
- s_{ij}^k binär mit $s_{ij}^k = 1$, wenn Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k ausgeführt ist
- t_{ij}^k binär mit $t_{ij}^k = 1$, wenn Phase $j-1$ beendet aber j noch nicht angefangen hat



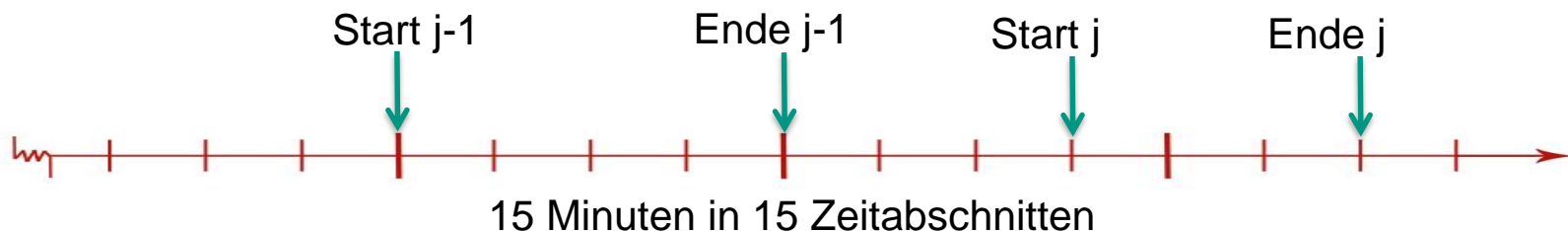
MILP Formulierung des Problems [K. C. Sou, 2011]

■ Indizes und Variablen:

- Die betrachtete Periode wird in m gleichgroße Zeitabschnitte aufgeteilt
- Die Anzahl der im Zeitplan zu berücksichtigenden Geräte ist N
- Die Anzahl der Verbrauchsphasen für jedes Gerät ist n_i für $i = 1, 2, \dots, N$

■ Entscheidungsvariablen:

- p_{ij}^k Zugeteilte Energie für Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k
- x_{ij}^k binär mit $x_{ij}^k = 1$, wenn Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k ausgeführt wird
- s_{ij}^k binär mit $s_{ij}^k = 1$, wenn Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k ausgeführt ist
- t_{ij}^k binär mit $t_{ij}^k = 1$, wenn Phase $j-1$ beendet aber j noch nicht angefangen hat



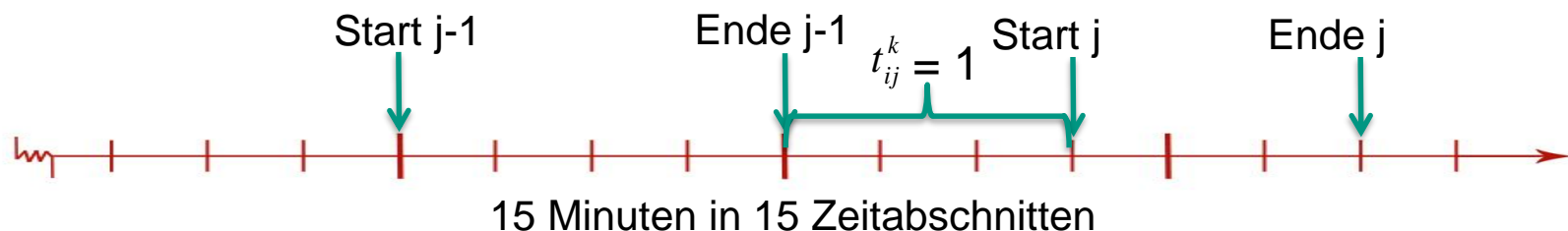
MILP Formulierung des Problems [K. C. Sou, 2011]

■ Indizes und Variablen:

- Die betrachtete Periode wird in m gleichgroße Zeitabschnitte aufgeteilt
- Die Anzahl der im Zeitplan zu berücksichtigenden Geräte ist N
- Die Anzahl der Verbrauchsphasen für jedes Gerät ist n_i für $i = 1, 2, \dots, N$

■ Entscheidungsvariablen:

- p_{ij}^k Zugeteilte Energie für Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k
- x_{ij}^k binär mit $x_{ij}^k = 1$, wenn Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k ausgeführt wird
- s_{ij}^k binär mit $s_{ij}^k = 1$, wenn Phase j in Gerät i in Zeitabschnitt k ausgeführt ist
- t_{ij}^k binär mit $t_{ij}^k = 1$, wenn Phase $j-1$ beendet aber j noch nicht angefangen hat



MILP Formulierung des Problems [K. C. Sou, 2011]

- Zielfunktion:
 - Minimierung der Stromkosten
 - Sei c^k ein Vektor der Länge m der den Tarif für jedes k enthält.

$$\min_{p,x,s,t} \sum_{k=1}^m c^k \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij}^k \right)$$

- Stromverbrauch je Zeitabschnitte wird mit Kosten multipliziert und aufsummiert

MILP Formulierung des Problems [K. C. Sou, 2011]

■ Nebenbedingungen:

- (1) Um sicherzustellen, dass jeder Verbrauchsphase die Energie zugeteilt wird, die sie benötigt:

$$\sum_{k=1}^m p_{ij}^k = E_{ij}$$

- Wobei E_{ij} der benötigte Strom für Phase j des Gerätes i ist.

- (2) Sicherstellung, dass $p_{ij}^k = 0$, falls $x_{ij}^k = 0$ und dass die obere und untere Grenze für die Phase eingehalten wird:

$$\underline{P}_{ij}^k x_{ij}^k \leq p_{ij}^k \leq \overline{P}_{ij}^k x_{ij}^k$$

- Obere und untere Grenze sind gerätespezifisch.
 - z. B. Überspannungsschutz

MILP Formulierung des Problems [K. C. Sou, 2011]

■ Nebenbedingungen:

- (3) Setzen eines Maximalwertes für die Menge an Strom, der pro Zeitabschnitt zugewiesen werden darf:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij}^k \leq PEAK^k$$

- z. B. um Überbelastung der Stromversorgung des Gebäudes zu vermeiden

- (4) Grenze der Zeit, die eine Phase erhalten muss:

$$\underline{T}_{ij} \leq \sum_{k=1}^m x_{ij}^k \leq \bar{T}_{ij}$$

- Wobei die Grenzen eine Anzahl an Zeitabschnitten beziffern (ganzzahlig)
- Grenzen sind technisch bedingt

MILP Formulierung des Problems [K. C. Sou, 2011]

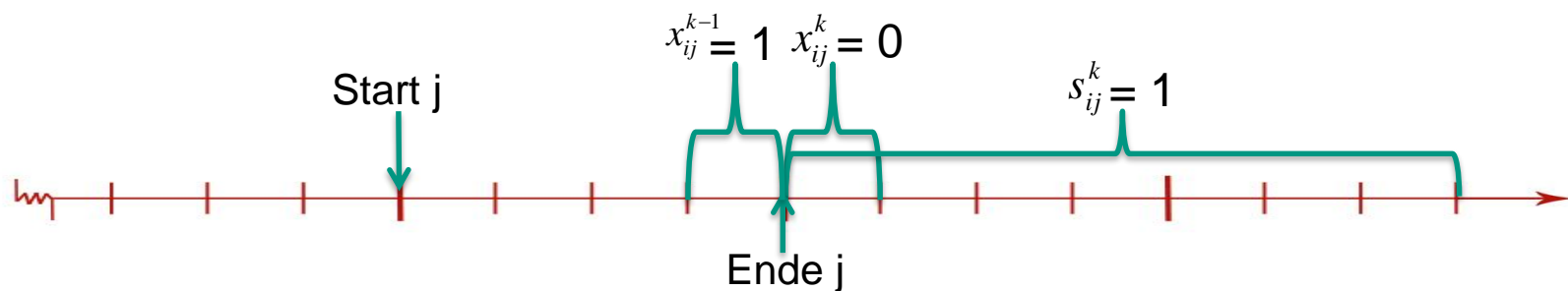
■ Nebenbedingungen:

- (5) Eine Verbrauchsphase darf nicht unterbrochen werden:

$$x_{ij}^k \leq 1 - s_{ij}^k$$

$$x_{ij}^{k-1} - x_{ij}^k \leq s_{ij}^k$$

$$s_{ij}^{k-1} \leq s_{ij}^k$$



MILP Formulierung des Problems [K. C. Sou, 2011]

■ Nebenbedingungen:

- (5) Eine Verbrauchsphase darf nicht unterbrochen werden:

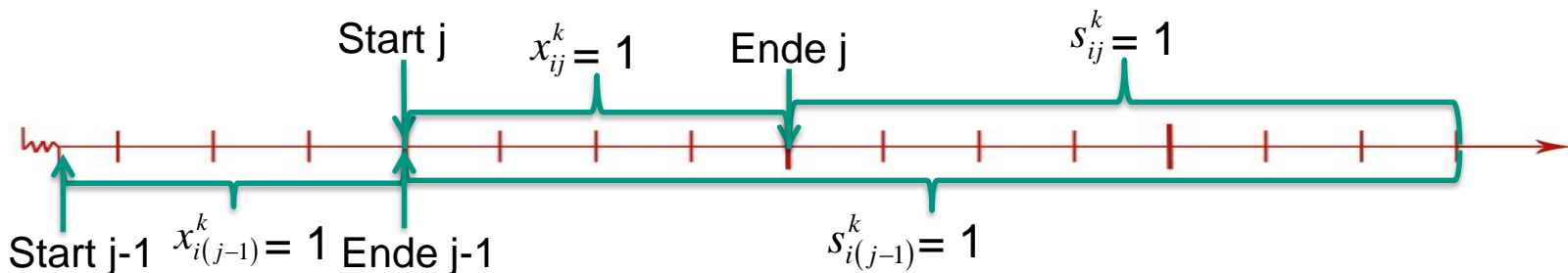
$$\begin{aligned}
 x_{ij}^k &\leq 1 - s_{ij}^k \\
 x_{ij}^{k-1} - x_{ij}^k &\leq s_{ij}^k \\
 s_{ij}^{k-1} &\leq s_{ij}^k
 \end{aligned}$$

- (6) Verbrauchsphasen dürfen nur sequentiell ablaufen:

$$x_{ij}^k \leq s_{i(j-1)}^k$$

- (7) Einige Geräte dürfen nur nacheinander ablaufen:

$$x_{i1}^k \leq s_{in_{\gamma}}^k$$



MILP Formulierung des Problems [K. C. Sou, 2011]

■ Nebenbedingungen:

- Es ist nicht zwingend notwendig, dass auf Verbrauchsphase j direkt $j+1$ folgt
- Begrenzung der Zeit, die zwischen zwei speziellen Zeitabschnitten vergehen darf

- 1. Definition von t_{ij}^k (8):

$$t_{ij}^k = s_{i(j-1)}^k - (x_{ij}^k + s_{ij}^k)$$

- 2. Bindung von t_{ij}^k an eine obere und eine untere Grenze (9):

$$\underline{D}_{ij} \leq \sum_{k=1}^m t_{ij}^k \leq \bar{D}_{ij}$$

- (10) Möglichkeit zur Einbinden von Zeitpräferenzen des Nutzers:

- Zeitintervalle in denen die Geräte laufen sollen

$$x_{ij}^k \leq TP_i^k$$

- TP_i^k ist binär

$$TP_i^k = 1$$



MILP Formulierung des Problems [K. C. Sou, 2011]

■ Komplette Formulierung:

$$\min_{p,x,s,t} \sum_{k=1}^m c^k \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij}^k \right)$$

so dass Nebenbedingungen (1) – (10)

$$\begin{aligned} p_{ij}^k &\in \mathbb{R}^+, \quad \forall i, j, k \\ x_{ij}^k &\in \{0, 1\}, \quad \forall i, j, k \\ s_{ij}^k &\in \{0, 1\}, \quad \forall i, j, k \\ t_{ij}^k &\in \{0, 1\}, \quad \forall i, k \quad \forall j = 2, \dots, n_i \end{aligned}$$

Mathematische Formulierung des Problems

- Gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung
 - Annahmen
 - Minimierung der Stromkosten
 - **Einbindung einer Batterie**
 - Betrachtung von Lösungskonzepten
 - Minimierung der Stromkosten und der CO₂ Emissionen

Einsatz von Energiespeichern [K. Paridari, 2014]

- Zentrale Batterie mit Verbindung zu allen Geräten, die geladen und entladen werden kann

- Bei optimalem Einsatz können die Kosten weiter reduziert werden

- Konzept:
 - Zu Zeitpunkten, in denen der Strompreis oder der CO₂ Fußabdruck gering ist Strom, speichern
 - Zu Zeitpunkten, in denen der Strompreis oder CO₂ Fußabdruck hoch ist, gespeicherte Energie verbrauchen

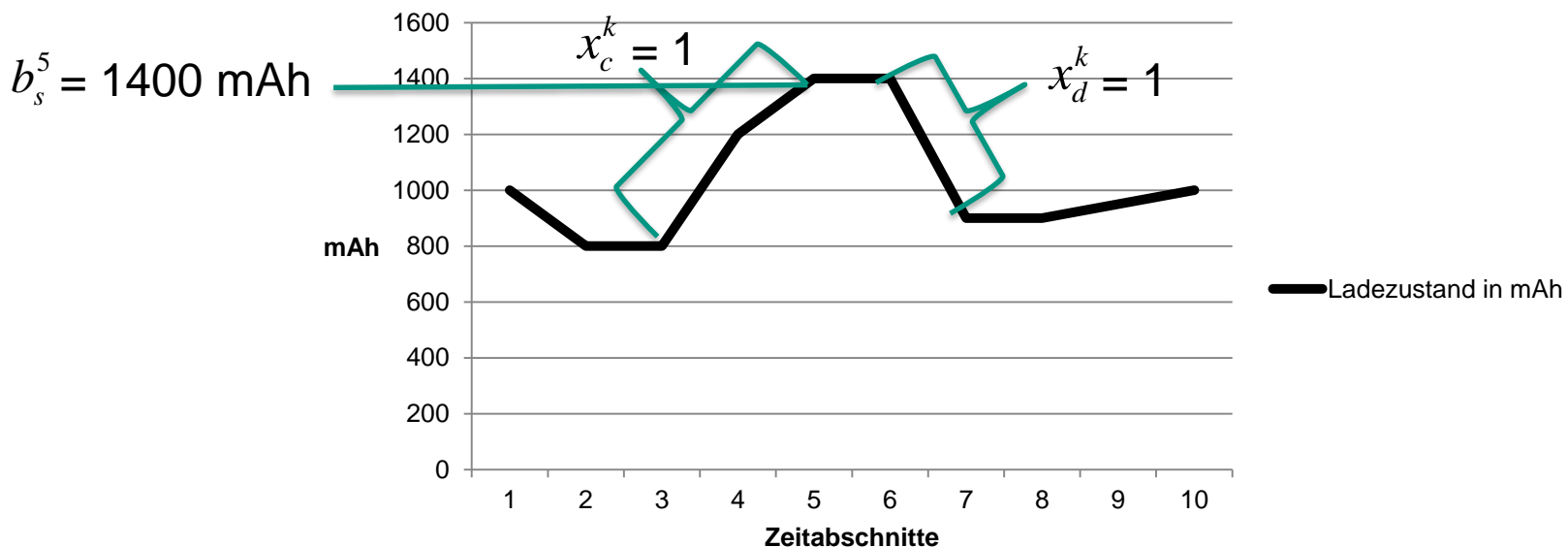
- Gespeicherte Energie kann wieder verkauft werden

Einsatz von Energiespeichern [K. Paridari, 2014]

■ Modellierung einer Batterie:

■ Zusätzliche Entscheidungsvariablen:

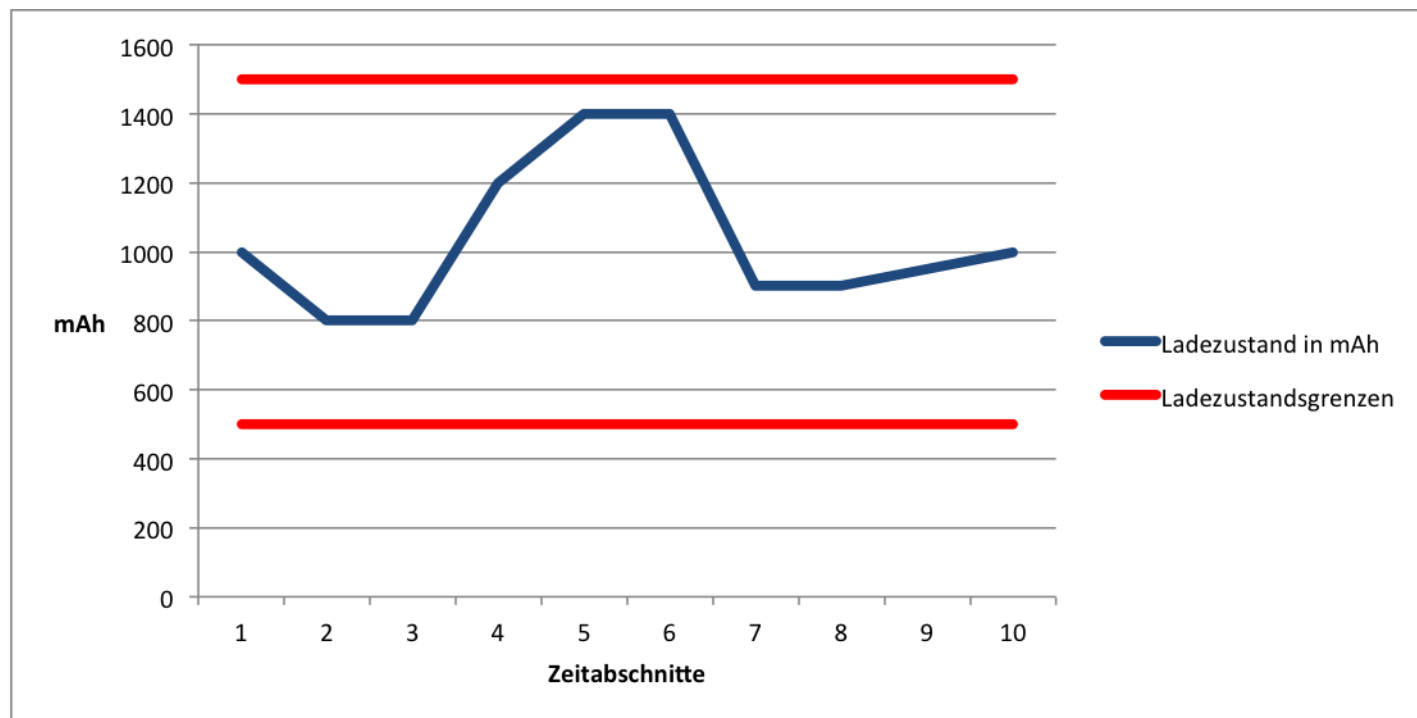
- b_s^k bezeichnet den Ladezustand der Batterie in Zeitabschnitt k
- x_c^k / x_d^k gibt an ob die Batterie in Zeitabschnitt k geladen / entladen wird
- b_c^k / b_d^k geben die Menge an Energie an die geladen / entladen wird
- p_G^k gibt die gesamte, mit dem Netz ausgetauschte Energie an



Einsatz von Energiespeichern [K. Paridari, 2014]

- Obere und untere Grenze für den Ladezustand der Batterie:

$$\underline{b}_s \leq b_s^k \leq \bar{b}_s$$



- Grenzen können dazu dienen die Batterie zu schonen

Einsatz von Energiespeichern [K. Paridari, 2014]

■ Modellierung einer Batterie

- Obere und Untere Grenze für den Energieaustausch beim Laden und Entladen:

$$0 \leq b_d^k \leq \bar{b}_d^k x_d^k$$

$$0 \leq b_c^k \leq \bar{b}_c^k x_c^k$$

- Eine Batterie kann nicht gleichzeitig geladen und entladen werden:

$$x_c^k + x_d^k \leq 1$$

- Begrenzung der Anzahl an Lade- und Entladevorgänge auf die Zahl N_c , um die Batterielebensdauer zu verlängern:

$$x_c^k - x_c^{k-1} \leq c_t^k$$

$$x_d^k - x_d^{k-1} \leq d_t^k$$

$$\sum_{i=1}^k c_t^i + d_t^i \leq N_c$$

- Beschreibung von Verlusten durch Abbau der gespeicherten Energie (α) oder Verlusten beim Laden und Entladen (η_c und η_d):

$$b_s^k = \alpha b_s^{k-1} + \eta_c b_c^{k-1} - \eta_d b_d^{k-1}$$

Einsatz von Energiespeichern [K. Paridari, 2014]

■ Modellierung einer Batterie

- Einführung einer Energiebilanz und Definition von p_G^k :

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij}^k + b_c^k - b_d^k = p_G^k$$

- Obere und untere Grenze für die gesamte ausgetauschte Energie:

$$\underline{p}_G^k \leq p_G^k \leq \overline{p}_G^k$$

- z. B. Grenzen für Nutzung der Batterie
- Beachte: \underline{p}_G^k kann auch negativ sein
- Der Anfangsladezustand der Batterie sollte gleich dem Endladezustand sein:

$$b_s^0 = b_s^T$$

Mathematische Formulierung des Problems

- Gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung
 - Annahmen
 - Minimierung der Stromkosten
 - Einbindung einer Batterie
 - **Betrachtung von Lösungskonzepten**
 - Minimierung der Stromkosten und der CO₂ Emissionen

Allgemeine Lösungsverfahren

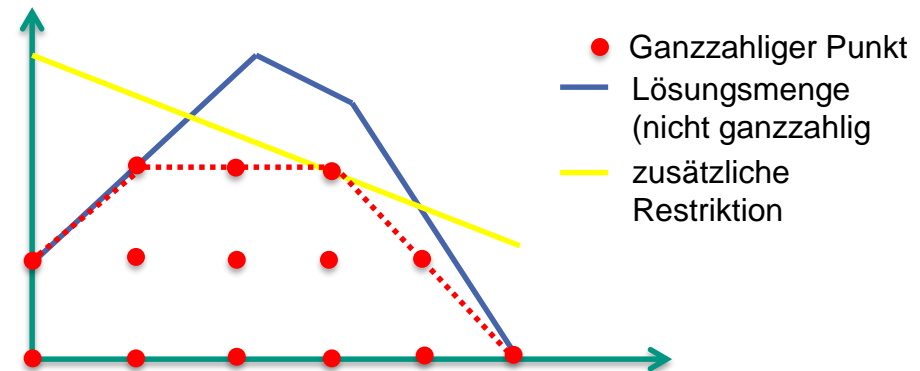
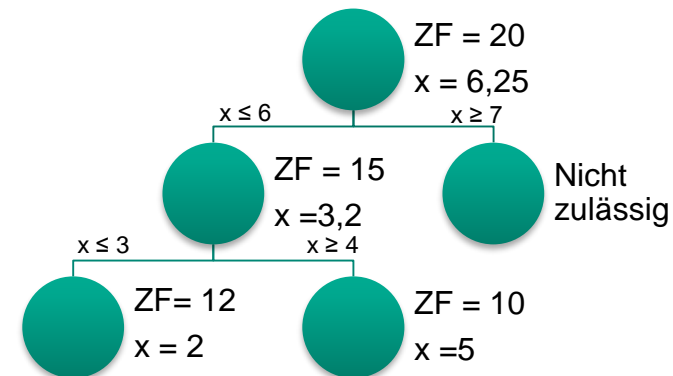
■ Lösungskonzepte von ganzzahligen linearen Problemen

■ Das Branch and bound Verfahren

- Entscheidungsbaum
- Verzweigung des Problems

■ Schnittebenenverfahren

- „Abschneiden“ der unzulässigen Lösungen



■ Beispiele für kommerzielle Solver die mit unter diese Lösungsverfahren verwenden sind CPLEX oder Gurobi

Mathematische Formulierung des Problems

- Gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung
 - Annahmen
 - Minimierung der Stromkosten
 - Einbindung einer Batterie
 - Betrachtung von Lösungskonzepten
 - **Minimierung der Stromkosten und der CO₂ Emissionen**

Multikriterieller Lösungsansatz

- Multikriterielle Optimierung
 - Betrachtung von CO₂ Emissionen und Stromkosten

- In MILP: multikriterielle Optimierung mittels gewichteter Summe

- Ziel ist, möglichst viele Pareto optimale Punkte zu finden

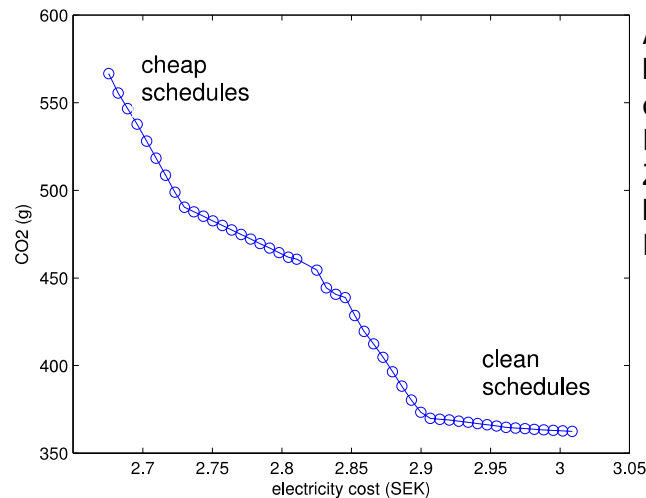


Abb. 5 Alle blauen Punkte bezeichnen einen Pareto optimalen Punkt. Jeder dieser Punkte stellt einen optimalen Zeitplan für die berücksichtigten Geräte dar. Entnommen aus [3].

MILP mit Berücksichtigung der CO₂ Emissionen [K. Paridari, 2014]

- Lösung mittels einer gewichteten Summe:

$$\sum_{k=1}^m \left((1 - \lambda) E^k + \lambda C^k \right) \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij}^k \right), \lambda \in [0, 1]$$

- Wobei $E^k = \frac{e^k}{\max(e^1, e^2, \dots, e^m)}$ und $C^k = \frac{c^k}{\max(c^1, c^2, \dots, c^m)}$ die normalisierten Werte des Kosten und Emissionsvektors sind
- Nutzer entscheidet sich für einen der Pareto optimalen Punkte

Zusammenfassung

- Stromkosten und CO₂ Emissionen können mit einem geeigneten Laufplan minimiert werden

- Es wurde eine MILP Formulierung vorgestellt mit den Erweiterungsmöglichkeiten um:
 - Einbindung eines Batteriespeicherung
 - Eine Betrachtung mit CO₂ Emissionen

- Lösungsverfahren für ganzzahlige Probleme wurden vorgestellt

Literaturverzeichnis

- [1] K. C. Sou, J. Weimer, H. Sandberg, and K. Johansson, “Scheduling smart home appliances using mixed integer linear programming,” in *Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 2011 50th IEEE Conference on*, dec. 2011, pp. 5144 –5149.
- [2] K. Paridari, A. Parisio, H. Sandberg and K. H. Johansson. Energy and CO2 Eddicient Scheduleing of smart Home Appliances Equipped with Batteries. *In IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, pp. 632-639, IEEE, August, 2014
- [3] K. C. Sou, M. Kordel, J. Wu, H. Sandberg, and K. H. Johansson, “Energy and CO2 efficient scheduling of smart home appliances,” in *Control Conference (ECC), European*, 2013, pp. 4051–4058.

Backup

Die Problemstellung

- Stromnetzauslastung schwankt bezüglich
 - Tagen / Wochen / Monaten
- Stärker werdende Unvorhersehbarkeit des Energieverbrauchs durch:
 - Erneuerbare Energien (insb. Windkraft)
 - plug-in electrical vehicles
- Zwang zu umweltschädlichen Erzeugungsmethoden durch Spitzenauslastungen
- Lösung: Bessere Lastenverteilung über die Zeit durch scheduling der Haushaltsgeräte

→ Aber wie kann man das Nutzungsverhalten der Verbraucher beeinflussen?

Auswirkung verschiedener Gewichte sowie der Batterie auf das Problem in MILP Formulierung

[K. Paridari, 2014]

λ	0	0.25	0.5	0.75	1
Ersparnis ohne Batterie					
CO ₂ (€%)	-2,88	-0,23	1,05	1,79	1,98
Stromrechnung (€%)	2,41	2,16	1,56	0,68	-0,22
Ersparnis mit Batterie					
CO ₂ (€%)	-5,01	0,37	5,56	7,66	8,02
Stromrechnung (€%)	4,94	4,10	2,46	0,70	-1,10

Tabelle 1

Geld und CO₂ Ersparnis in einem Beispielszenario. Als Referenz gilt ein Haushalt ohne jegliche Optimierung. Daten entnommen aus [2]

- Szenario: drei Geräte in einem Betrachtungszeitraum von 24 Stunden
- Batterie bewirkt eine Spreizung der Ergebnisse Effekt
 - → bei starker Gewichtung eines Zielfaktors wird der negative Einfluss auf den jeweils anderen verstärkt.

Experiment zur Rechenzeit [K. Sou, 2011]

- Szenario: Planungsperiode von 15 Stunden, 3 einzuplanende Geräte, ohne Batterie
- Alle Berechnungen wurden mit CPLEX durchgeführt
- Untersuchung des Verhaltens der Rechenzeit bei Variation der Größe der Zeitabschnitte:

Länge der Zeitabschnitte	Kosten	Rechenzeit
30min	\$0,3257	8603sec
5min	\$0,3256	83,63sec
10min	\$0,3251	15,43sec

Tabelle 2: Lösung eines Beispielszenarios mit verschiedenen Größen der Zeitabschnitten bei einer betrachteten Periode von 15 Stunden. Daten entnommen aus [1].

- Durch Verfeinerung der Zeitachse kann nicht zwangsläufig eine bessere Lösung entstehen

Experiment zur Rechenzeit [K. Sou, 2011]

- CPLEX bietet die Möglichkeit der Terminierung bevor die optimale Lösung gefunden wurde
 - z. B. stoppen sobald eine zulässige Lösung gefunden wurde
 - Festlegung einer Obergrenze für die Rechenzeit

- Szenario: Planungsperiode von 15 Stunden, Zeitabschnitte sind 5 min lang, 3 einzuplanende Geräte, ohne Batterie

Rechenzeit (s)	6,94	12,2	17,2	27,2	67,2	87,2
rel. Fehler (%)	0,34	0,34	0,34	0,2	0,2	0

Tabelle 3: relativer Fehler (Abweichung vom Optimalwert in %) vs. gegebene Rechenzeit. Daten entnommen aus [1].

- Schon nach kurzer Zeit kann eine Lösung nahe dem Optimum erzielt werden

Experiment zur Rechenzeit [K. Sou, 2011]

- Szenario: Planungsperiode von 15 Stunden, Zeitabschnitte sind 10 min lang, 3 einzuplanende Geräte, ohne Batterie
- Die Rechenzeit nahm bei steigender Gerätezahl zu
 - Bei 10 Geräten war der Arbeitsspeicher (4 GB) überlastet
- Betrachtet werden 4 Lösungsverfahren für das Beispielszenario:
 - CPLEX mit Ausführung bis zur optimalen Lösung
 - CPLEX mit Ausführung bis eine zulässige Lösung gefunden wurde
 - ASAP: Geräte so früh wie möglich laufen lassen
 - ALAP: Geräte so spät wie möglich laufen lassen

} Vergleichsverfahren

Experiment zur Rechenzeit [K. Sou, 2011]

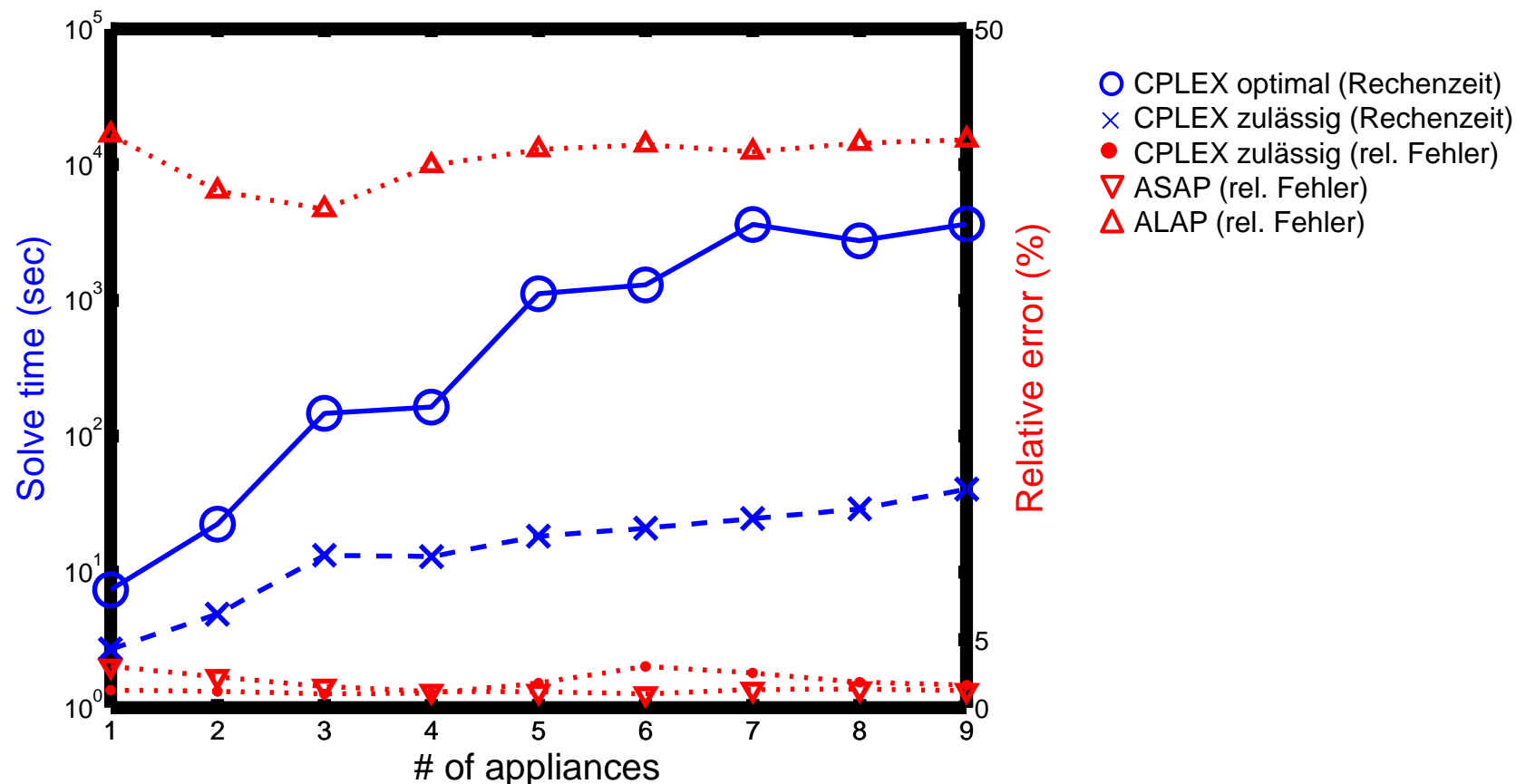


Abb. 6. Rechenzeit und relativer Fehler für zufällig generierte Szenarien mit variierender Anzahl an Geräten. Entnommen aus [1]

- Die Rechenzeit bis zum Optimum steigt schnell, während sich die Rechenzeit bis zu einer zulässigen Lösung nur langsam erhöht.

Zusammenfassung

- Energiekosten und CO₂ Emissionen können mit einem geeigneten Laufplan minimiert werden

- Es wurde eine MILP Formulierung vorgestellt mit den Erweiterungsmöglichkeiten um:
 - Einbindung eines Batteriespeicherung
 - Eine Betrachtung mit CO₂ Emissionen
 - Lösungsverfahren

- Die Feinheit der Zeitachse sowie die Anzahl der zu berücksichtigenden Geräte haben einen Einfluss auf die Rechenzeit