

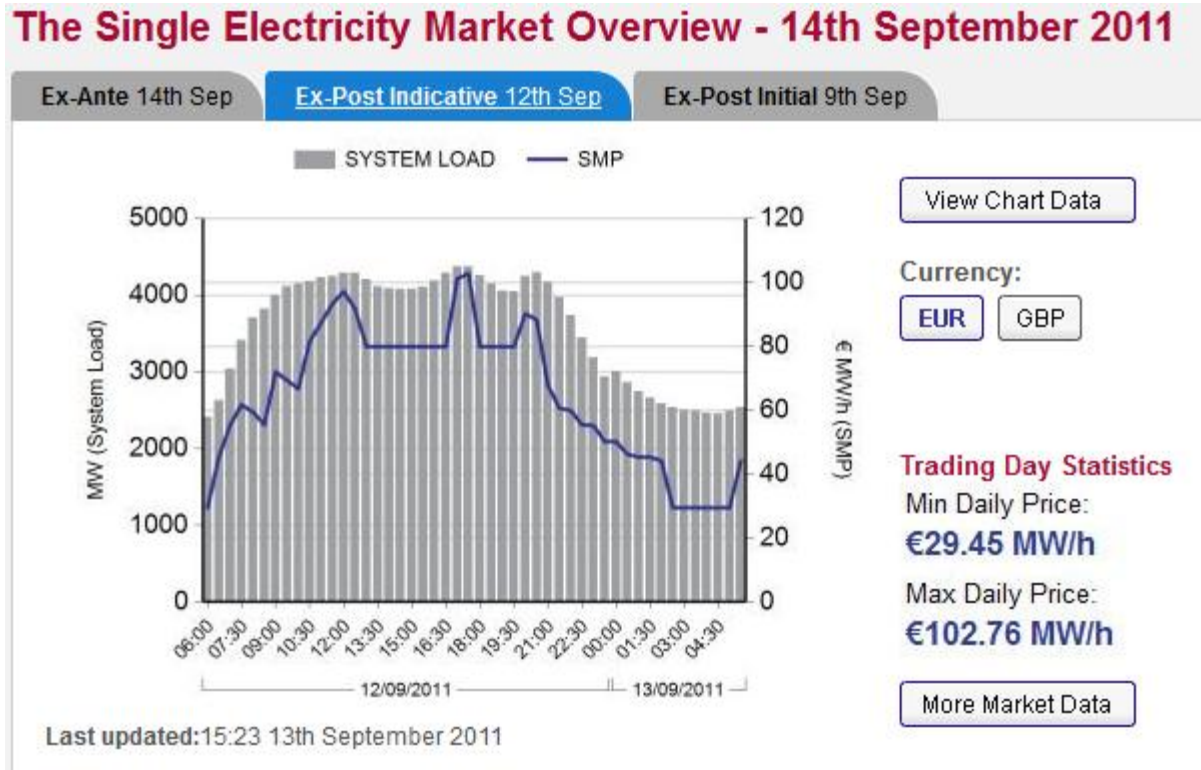
Optimierte Ablaufpläne für Ressourcenverbraucher bei zeitvariablen Ressourcentarifen

Walter Weininger

Motivation

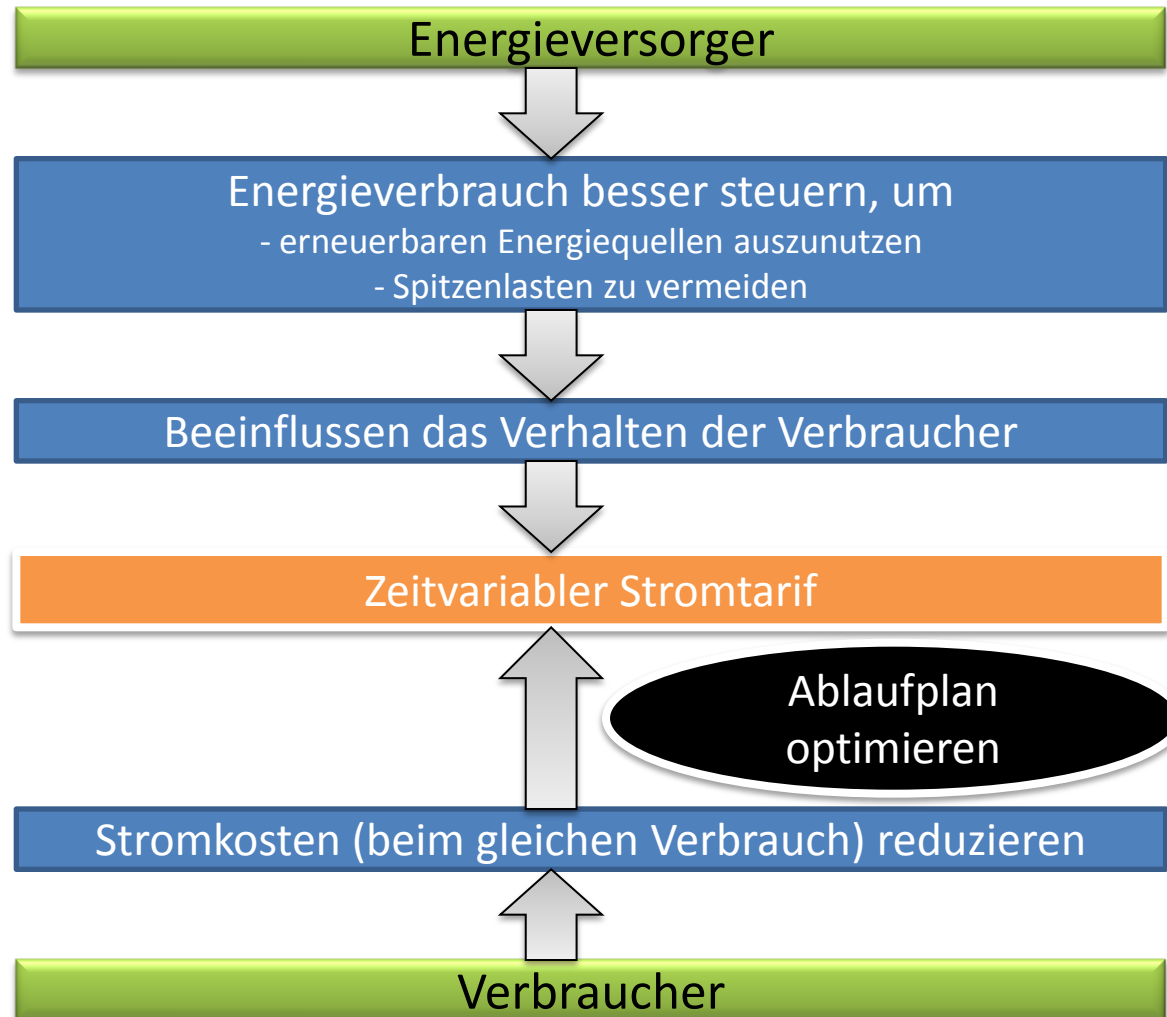
- Seit Beginn des Jahres 2011 sind deutsche Energieversorger gesetzlich verpflichtet, zukünftig zeitvariable Stromtarife anzubieten.
- In Irland gibt es bereits Tarife, bei denen der Strompreis sich jede halbe Stunde ändern kann (www.sem-o.com).

Zeitvariabler Stromtarif



The Single Electricity Market Operator, Ireland (www.sem-o.com)

Motivation



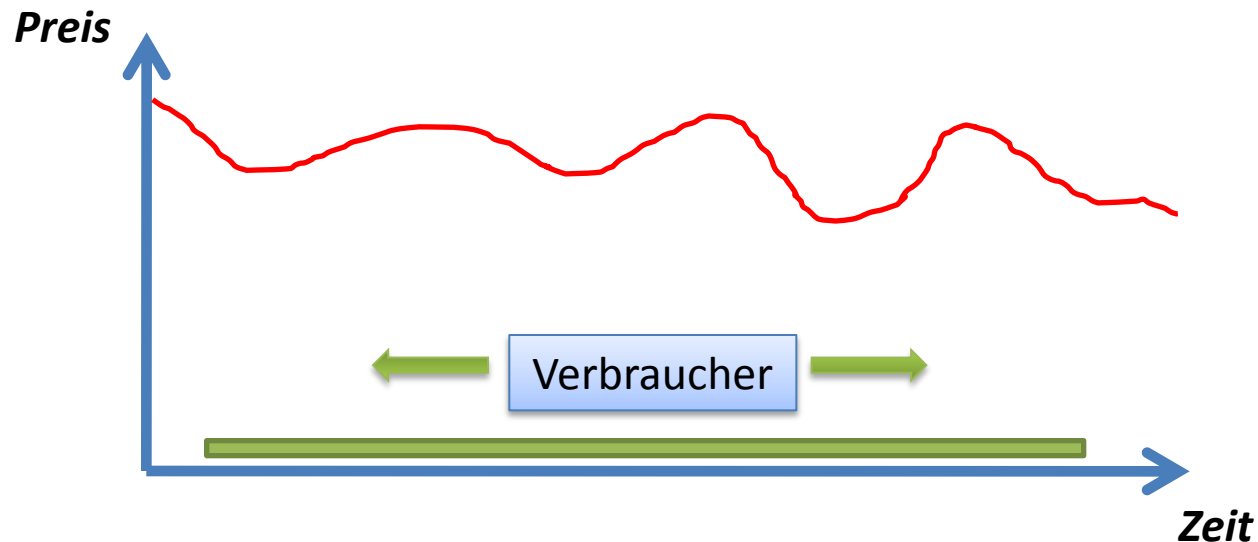
Motivation

- Zeitvariable Tarife kann es auch für andere Ressourcenarten geben (nicht nur für Strom).
- Optimierung des Ablaufplans bei zeitvariablen Tarifen bietet Sparpotential.

Ziel

Erstellung eines Constraint-Modells zum Optimieren des Ablaufplans

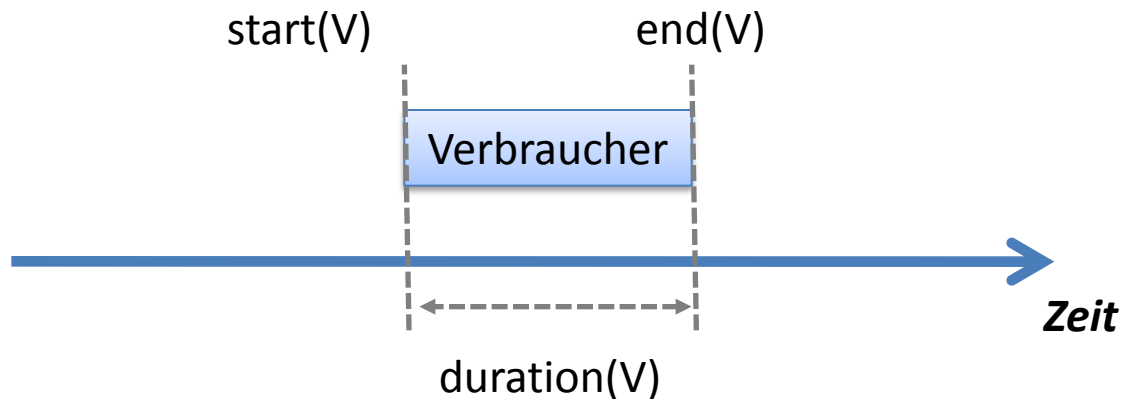
- Für zeitlich flexible Ressourcenverbraucher
- Bei zeitvariablem Ressourcentarif
- Über festgelegten Zeitraum



Verbraucher

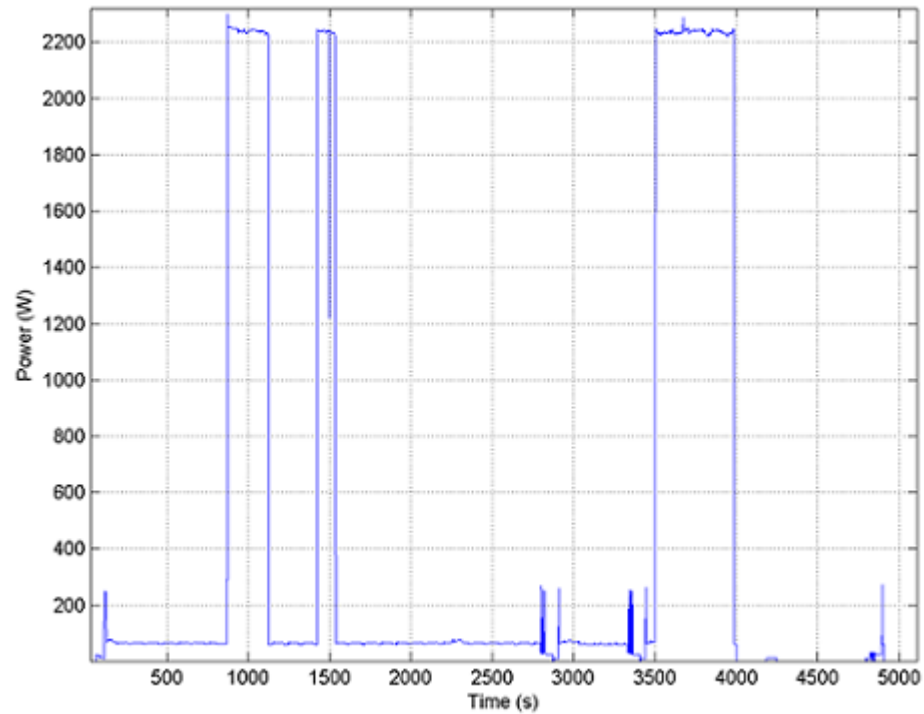
Jeder Verbraucher V ist definiert durch

- Startzeit: **start(V)**
- Endzeit: **end(V)**
- Dauer: **duration(V)**



Verbraucher

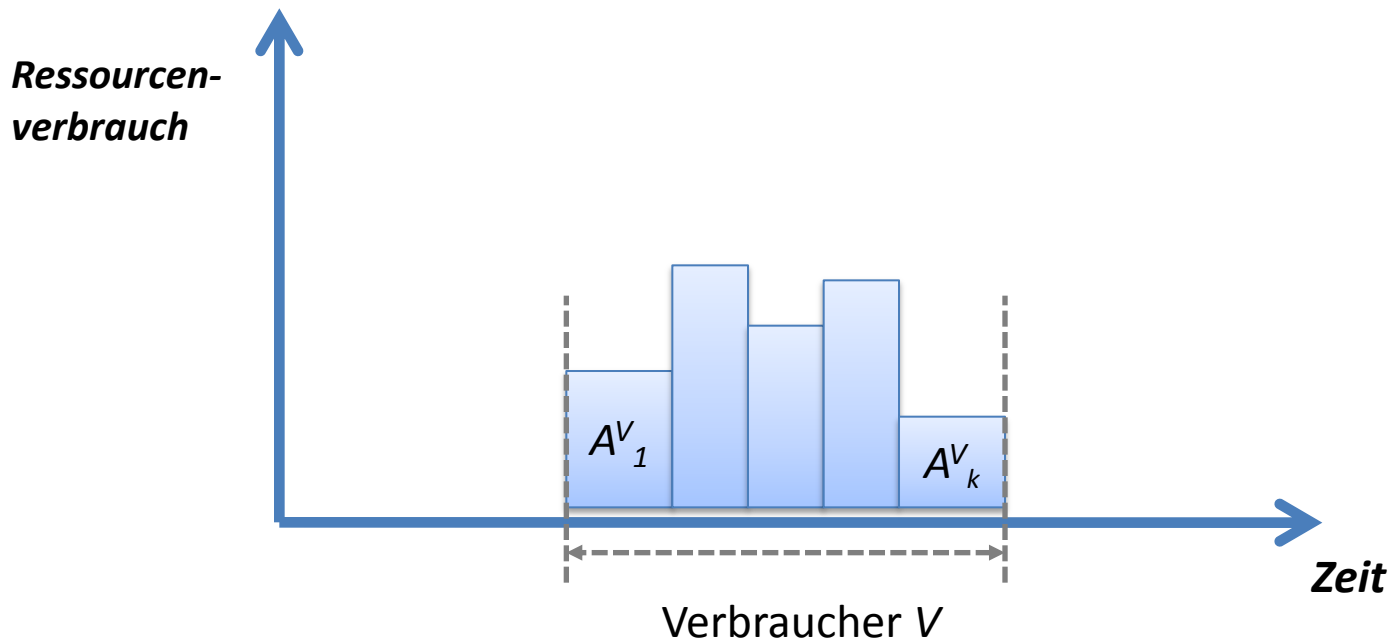
Einige Verbraucher konsumieren während unterschiedlicher Arbeitsschritten unterschiedliche Ressourcenmenge (Beispiele: Waschmaschine, Wäschetrockner, Geschirrspüler)



Verbrauchsprofil eines Geschirrspülers

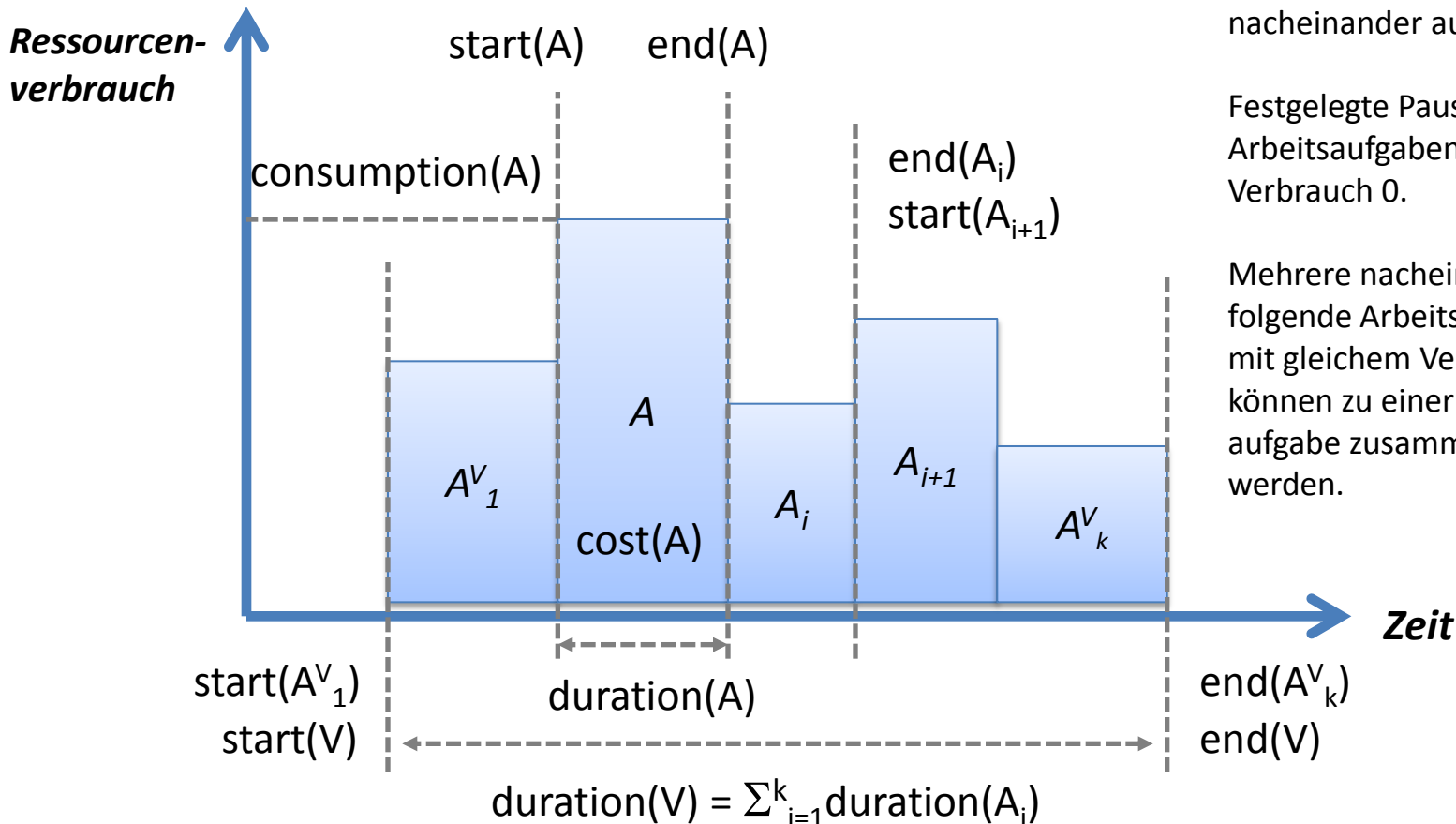
Arbeitsaufgaben

Jeder Verbraucher V ist eine Folge von Arbeitsaufgaben (*tasks*): $[A^V_1, \dots, A^V_k]$



Arbeitsaufgaben

Jede Arbeitsaufgabe ist definiert durch Start- und Endzeit, Dauer (festgelegt), Verbrauch (festgelegt) und Kosten.



Arbeitsaufgaben werden ohne Verzögerung nacheinander ausgeführt.

Festgelegte Pausen sind Arbeitsaufgaben mit Verbrauch 0.

Mehrere nacheinander folgende Arbeitsaufgaben mit gleichem Verbrauch können zu einer Arbeitsaufgabe zusammengefasst werden.

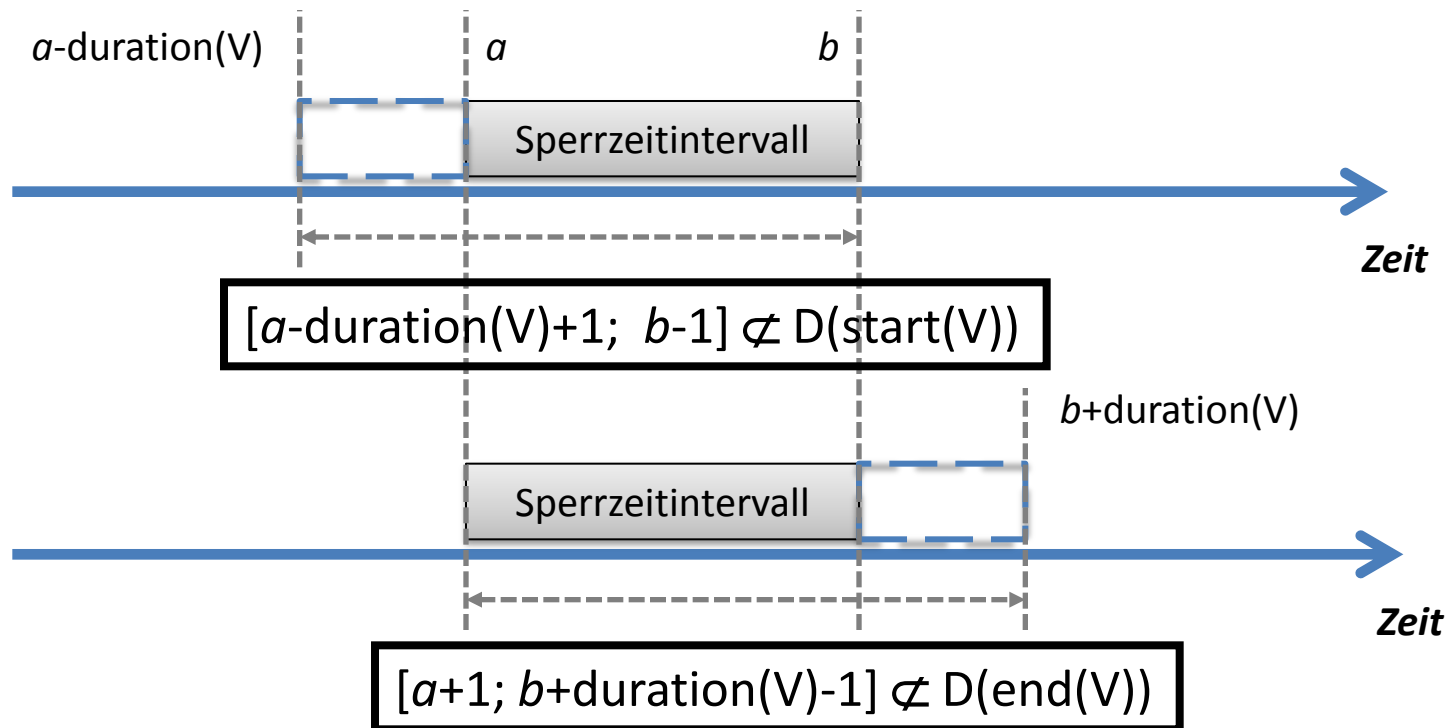
Randbedingungen (Constraints)

- Zeitliche Bedingungen: $\text{start}(A) + \text{duration}(A) = \text{end}(A)$
(lokal konsistent)
- Festgelegt durch den Nutzer: Sperrzeiten, Reihenfolge, Kapazitätsbeschränkung etc.
- Kostenberechnung

Sperrzeiten

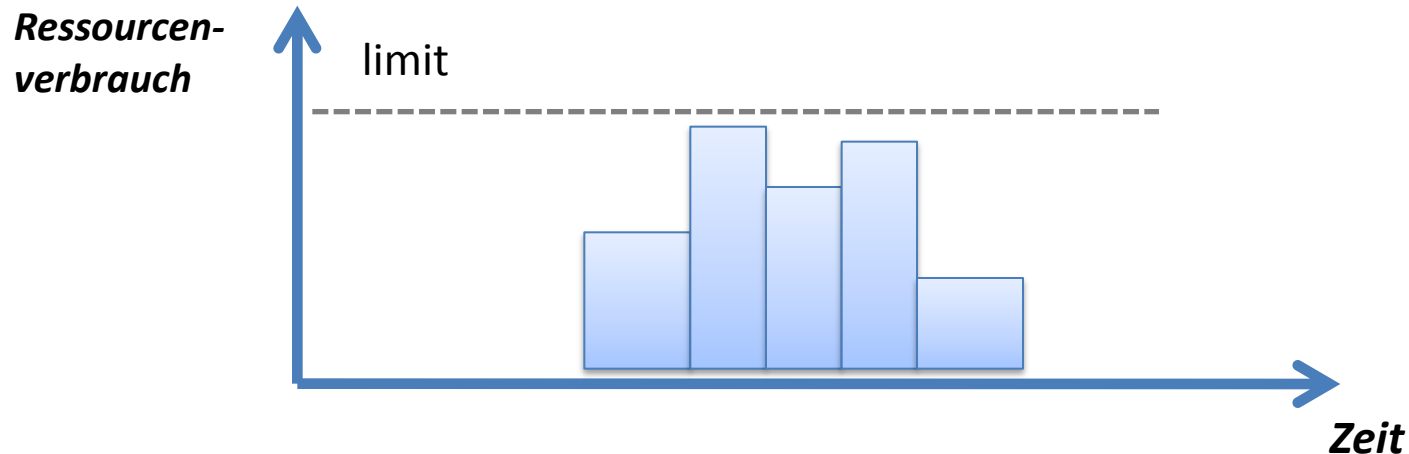
Verbraucher ist zu bestimmten Zeiten nicht planbar:

Domänen ($D(\text{start}(V))$ und $D(\text{end}(V))$) der Start- und Endzeitvariablen entsprechend definieren.



Kapazitätseinschränkung

Gesamtverbrauch aller Arbeitsaufgaben darf zu keinem Punkt einen bestimmten Grenzwert überschreiten (Hauptsicherung).



Diese Einschränkung wird durch das **Cummulative**-Constraint formuliert:

$$\forall t \quad \sum_{A \in \{A_1, \dots, A_m\} | \text{start}(A) \leq t < \text{end}(A)} \text{consumption}(A) \leq \text{limit}$$

Nicht-Überlappung

Exklusive Nutzung von Ressourcen (Geräten, Menschen):

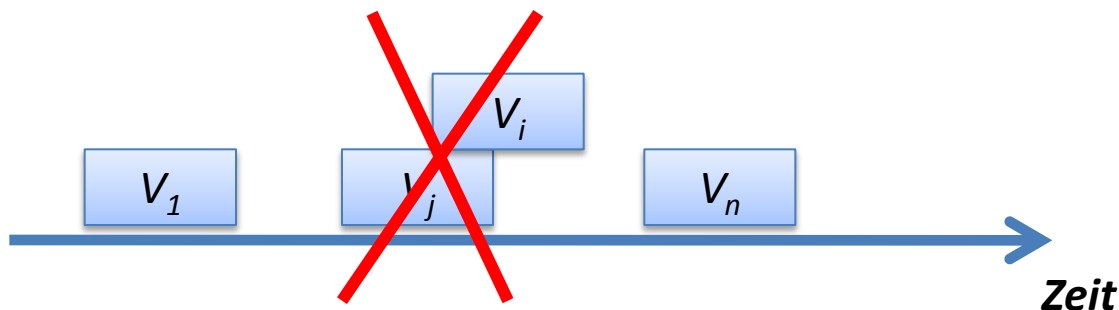
- Mehrmaliges Aktivieren eines Gerätes
- Bedienen von unterschiedlichen Geräten durch einen Menschen

Zwei Verbraucher (V_i und V_j dürfen niemals gleichzeitig aktiv sein):

$$(\text{end}(V_i) \leq \text{start}(V_j)) \quad \vee \quad (\text{end}(V_j) \leq \text{start}(V_i))$$

Mehrere Verbraucher (Serialisieren der Aktivitäten der Verbraucher auf einer exklusiven Ressource): **SingleResource**-Constraint

(effektivere Suchraumeinschränkung durch das globale Constraint)



Ablaufreihenfolge

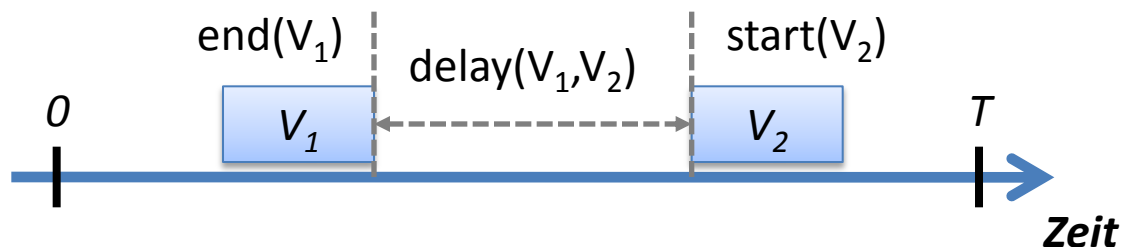
Bestimmte Prozesse verlangen festgelegte Reihenfolge der Verbraucher (Z.B. Waschen, Trocknen, Bügeln sind nur in dieser Reihenfolge sinnvoll.)

Modellierbar durch das Summenconstraint (*lokal konsistent*):

$\text{end}(V_1) + \text{delay}(V_1, V_2) = \text{start}(V_2)$ mit $D(\text{delay}(V_1, V_2)) \subseteq [0; T\text{-duration}(V_1) - \text{duration}(V_2)]$

Zwei Sonderfälle

- Keine Einschränkung für die Verzögerung:
wenn $D(\text{delay}(V_1, V_2)) = [0; T\text{-duration}(V_1) - \text{duration}(V_2)]$, dann **$\text{end}(V_1) \leq \text{start}(V_2)$**
- Keine Verzögerung erlaubt:
wenn $D(\text{delay}(V_1, V_2)) = 0$, dann **$\text{end}(V_1) = \text{start}(V_2)$**

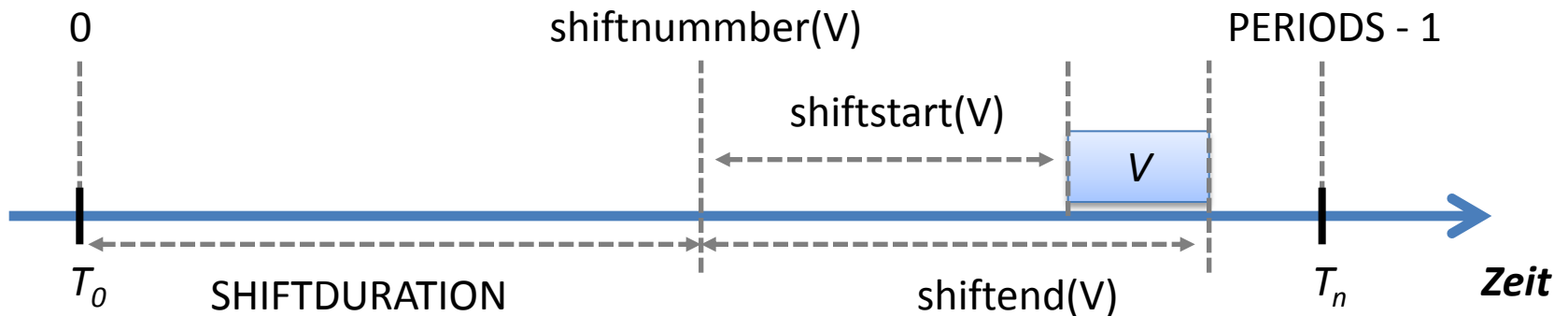


Schichten

Der Gesamtzeitraum ist in mehrere gleich lange Schichten aufgeteilt:

Mehrere Verbraucher können in gleicher Schicht oder in verschiedenen Schichten starten oder enden. Dann gelte:

- **PERIODS** – Anzahl der Schichten
- Jede Schicht ist nummeriert – von 0 bis PERIODS - 1
- **SHIFTDURATION** – Dauer jeder Schicht
- **shiftnumber(V)** mit $D(\text{shiftnumber}(V)) \subseteq [0; \text{PERIODS} - 1]$
- **shiftstart(V)** mit $D(\text{shiftstart}(V)) \subseteq [0; \text{SHIFTDURATION} - 1]$
- **shiftend(V)** mit $D(\text{shiftend}(V)) \subseteq [1; \text{SHIFTDURATION}]$



Schichten

Für einen Verbraucher V gilt:

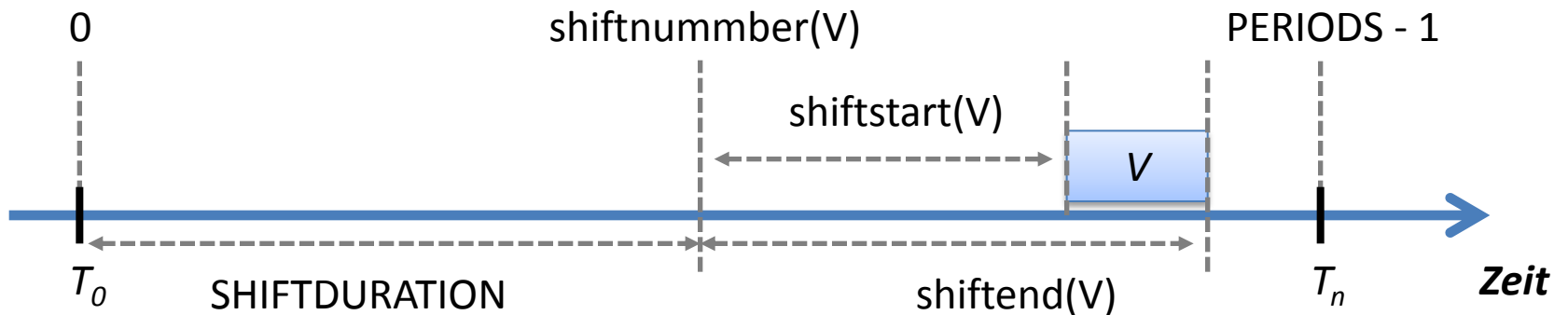
- $T_0 + \text{shiftnumber}(V) * \text{SHIFTDURATION} + \text{shiftstart}(V) = \text{start}(V)$
- $T_0 + \text{shiftnumber}(V) * \text{SHIFTDURATION} + \text{shiftend}(V) = \text{end}(V)$

- Mehrere Verbraucher $\{V_1, \dots, V_n\}$ in einer Schicht aktivieren:

shiftnumber(V_1) = ... = shiftnumber(V_2) (eine gemeinsame Variable verwenden)

- Mehrere Verbraucher $\{V_1, \dots, V_n\}$ in verschiedenen Schichten aktivieren:

AllDifferent(shiftnumber(V_1), ..., shiftnumber(V_n)) (Keine Lösung, wenn $n > \text{PERIODS}$)



Kostenberechnung

Es wird nur ein zeitvariabler Tarif betrachtet:

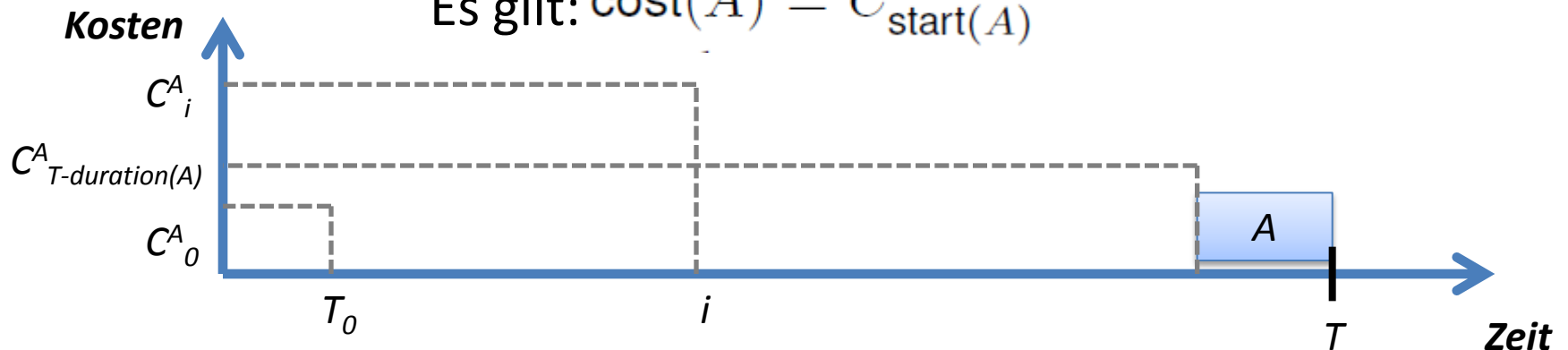
- Preis ist abhängig nur vom Zeitpunkt
- Preis ist unabhängig von der verbrauchter Menge

Für jede Arbeitsaufgabe A wird ein **Element**-Constraint erzeugt:

$\text{Element}(\text{cost}(A), [C_0^A, \dots, C_{T-\text{duration}(A)}^A], \text{start}(A))$

C_i^A - Kosten der Arbeitsaufgabe A, wenn sie zum Zeitpunkt i starten würde.
Diese Werte werden im Voraus nach dem gegebenen Tarif berechnet.

$$\text{Es gilt: } \text{cost}(A) = C_{\text{start}(A)}^A$$



Kostenberechnung

Gesamtkosten aller Arbeitsaufgaben $\{A_1, \dots, A_m\}$:

$$\sum_{i=1}^m \text{cost}(A_i) = \text{totalcost}$$

Es gilt, den Wert von totalcost zu minimieren.

Element-Constraint für eine Arbeitsaufgabe:

- Vorteil: propagiert in beide Richtungen – $\text{start}(A) \leftrightarrow \text{cost}(A)$
- Nachteil: berücksichtigt andere Arbeitsaufgaben des gleichen Verbrauchers nicht.

Lösung: redundante Element-Constraints für die Verbraucher, die aus mehreren Arbeitsaufgaben bestehen.

Kostenberechnung

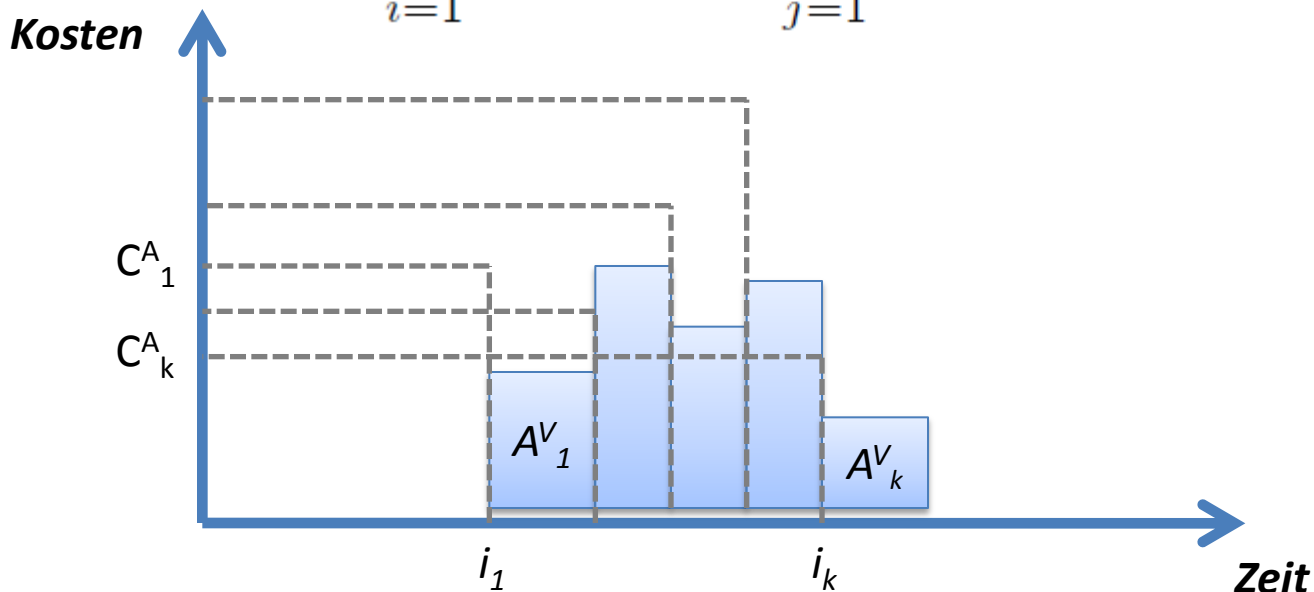
Element-Constraint für einen Verbraucher V mit k Arbeitsaufgaben:

$\text{Element}(\text{cost}(V), [C_0^V, \dots, C_{T-\text{duration}(V)}^V], \text{start}(V))$

C_i^V – Kosten des Verbrauchers V, wenn er zum Zeitpunkt i starten würde.

$$C_i^V = C_{i1}^{A1} + \dots + C_{ik}^{Ak}$$

Es gilt:
$$\sum_{i=1}^m \text{cost}(A_i) = \sum_{j=1}^n \text{cost}(V_j) = \text{totalcost}$$



Suchstrategie

- Nur die Startzeiten der Verbraucher belegen
- Belegungen von allen anderen Variablen ergeben sich aus impliziten Abhängigkeiten
- Branch&Bound-Methode:
 - Erste gültige Belegung für **totalcost** finden
 - Dann **totalcost** mit immer kleineren Werten belegen, bis die kleinstmögliche Belegung von **totalcost** gefunden ist:
 - Dichotomes Optimieren
 - Kosten der Verbraucher $\text{cost}(V)$ nach absteigender Domänenkardinalität sortieren
 - Ganzzahlige Domänenwerte – die Suche terminiert nach endlich vielen Schritten

Monoton:



Dichotom:



$D(\text{totalcost})$

Test

- Zeitraum: 1 Woche, Zeiteinheit: halbe Stunde (336 Zeiteinheiten)
- Eine Schicht – ein Tag
- Tarif von sem-o: 4 bis 40 cent/KWh
- Haushaltstypische Geräte
- Durchschnittsverbrauch für jede halbe Stunde

Testszenario

8 Stromverbraucher:

- Wäschewaschen: zwei Mal in der Woche, Intensiv- und Sensitiv-Wäsche, an verschiedenen Tagen, Mo-Fr, 10-18 Uhr, je 2 Stunden;
- Wäschetrocknen: zwei Mal in der Woche, nach dem Wäschewaschen, spätestens halbe Stunde danach, je 2,5 Stunden;
- Bügeln: einmal in der Woche, nach beiden Trocknungen, frühestens eine Stunde danach, Mo-Fr, 10-18 Uhr, 1 Stunde;
- Staubsaugen: einmal in der Woche, Mo-Fr, 12-16 Uhr, 1 Stunde;
- DVD-Schauen: zwei Mal in der Woche, an verschiedenen Tagen, Mo-So, 16-22 Uhr, je 2 Stunden;
- Computern: nach dem DVD-Schauen, aber am selben Tag, spätestens 4 Stunden danach, je 2 Stunden;
- Geschirrspülen: täglich, Mo-So, 16-22 Uhr, 1,5 Stunden;
- Backen: Sa oder So, 10-20 Uhr, 4 Stunden

Testszenario

Weitere Einschränkungen:

- Verschiedene Tage für Bügeln und DVD-Schauen;
- Nicht-Überlappung für DVD-Schauen, Computern, Bügeln, Staubsaugen, Backen (SingleResource-Constraint);
- Bügeln und Staubsaugen am gleichen Tag;
- Der Gesamtverbrauch darf zu keinem Zeitpunkt den Wert von 2 KW überschreiten (Cumulative-Constraint)

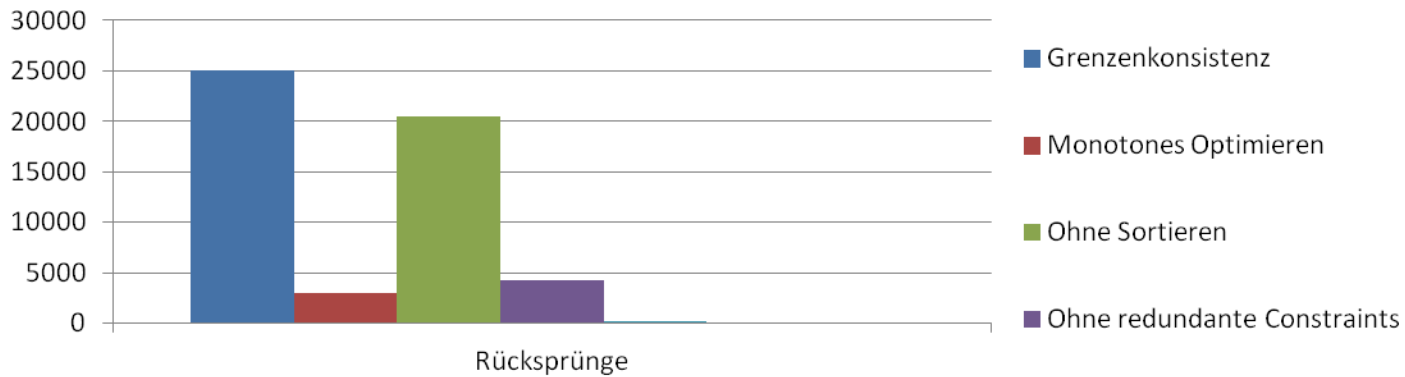
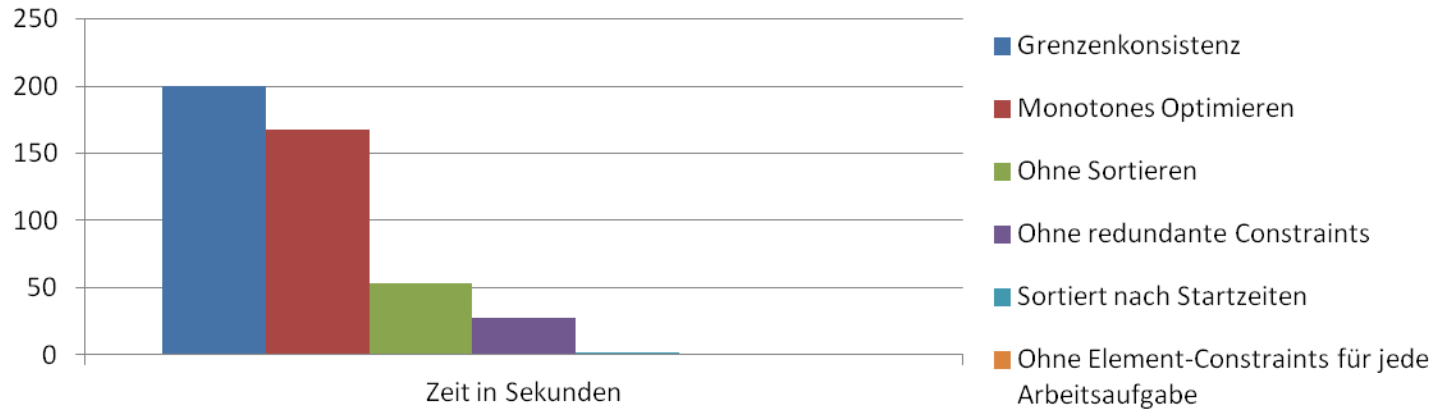
Testresultate

	Zeit in ms	Rücksprünge
Grenzenkonsistenz	> 600000	-
Monotones Optimieren	168486	3035
Ohne Sortieren	53197	20462
Ohne redundante Constraints	26757	4261
Sortiert nach Startzeiten	2055	224
Ohne Element-Constraints für jede Arbeitsaufgabe	1036	114
Konstruiertes Constraint-Modell mit spezieller Suchstrategie	1014	112

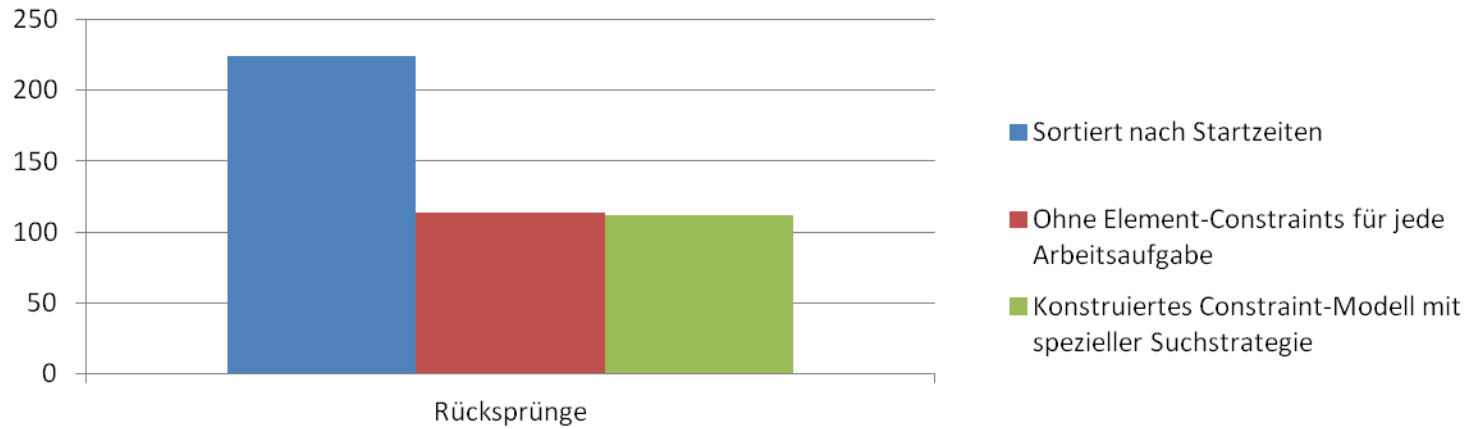
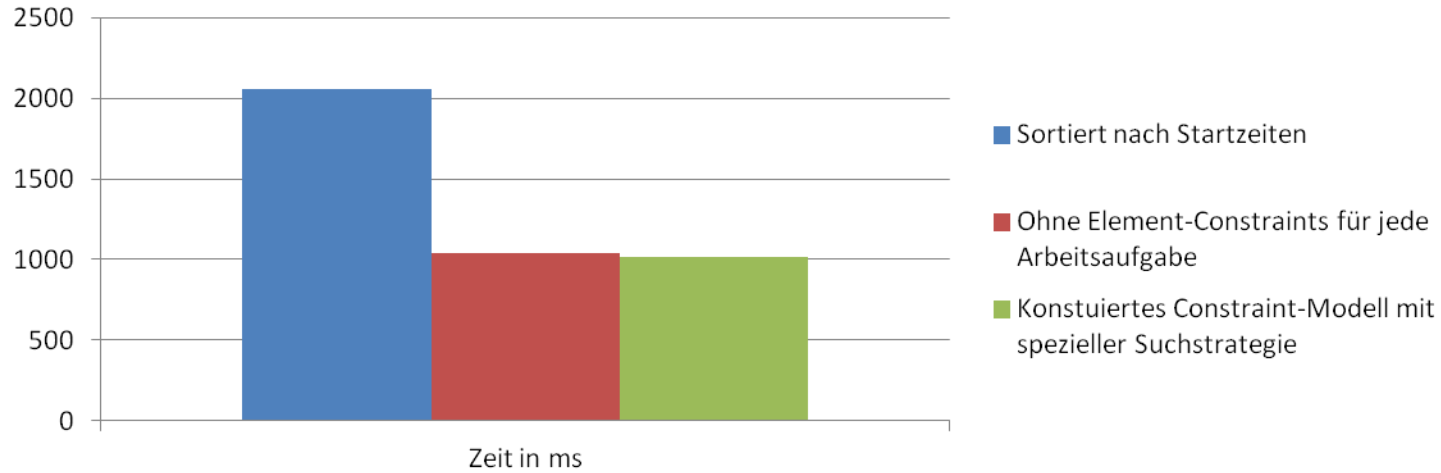
Testergebnisse für die Suche nach der Konfiguration mit den minimalen Kosten

- Constraint-Solver **firstcs** für ganzzahlige Domänenwerte
- Intel Xeon CPU
- Taktrate 2,53 GHz
- 6 GB Arbeitsspeicher

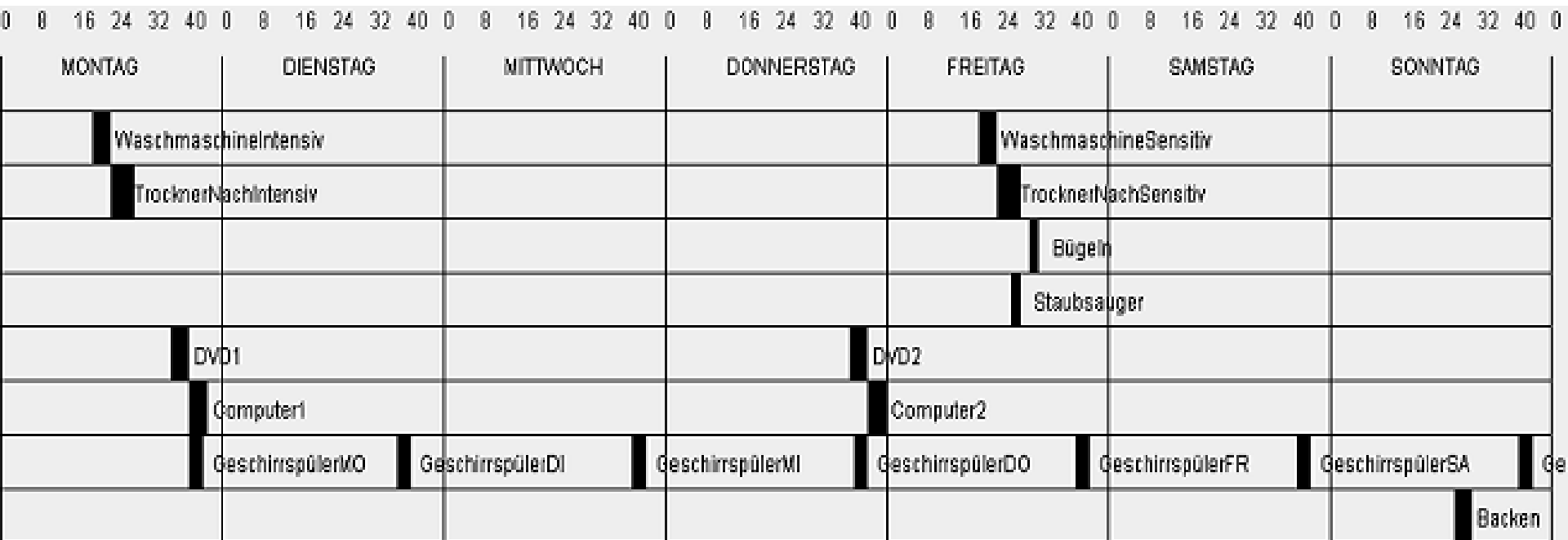
Testresultate



Testresultate



Minimale Kosten



Gesamtkosten in der Woche = 97.22 cent

Jährliche Kosten = 50.55 Euro

Maximale Kosten

0 8 16 24 32 40 0					8 16 24 32 40 0					8 16 24 32 40 0					8 16 24 32 40 0					8 16 24 32 40 0					8 16 24 32 40 0					8 16 24 32 40 0									
MONTAG					DIENSTAG					MITTWOCH					DONNERSTAG					FREITAG					SAMSTAG					SONNTAG									
					WaschmaschineSensiv					WaschmaschineIntensiv																													
					TrocknerNachSensitiv					TrocknerNachIntensiv																													
															Bügeln																								
										Staubsauger																													
					DVD1					DVD2																													
					Computer1					Computer2																													
					GeschirrspülerMO					GeschirrspülerDI					GeschirrspülerMI					GeschirrspülerDO					GeschirrspülerFR					GeschirrspülerSA					GeschirrspülerSO				
																																			Backen				

Gesamtkosten in der Woche = 211.5 cent

Jährliche Kosten = 109.98 Euro

Fazit

- Unterschied zwischen den wöchentlichen Kosten:
 $211,15 \text{ cent} - 97,22 \text{ cent} = \mathbf{113,93 \text{ cent}}$

Differenz > 100% von minimalen Kosten

- Unterschied zwischen den jährlichen Kosten:
 $109,98 \text{ €} - 50,55 \text{ €} = \mathbf{59,43 \text{ €}}$

Relativ großer Betrag für einen privaten Haushalt

Industrielle Verhältnisse: enormes Sparpotenzial

Danke!