



Von eingebetteten Systemen zu *Cyber-Physical Systems*

H. Wedde, S. Lehnhoff

School of Computer Science
University of Dortmund
Germany

C. Rehtanz, O. Krause

College of Electrical Engineering
University of Dortmund
Germany





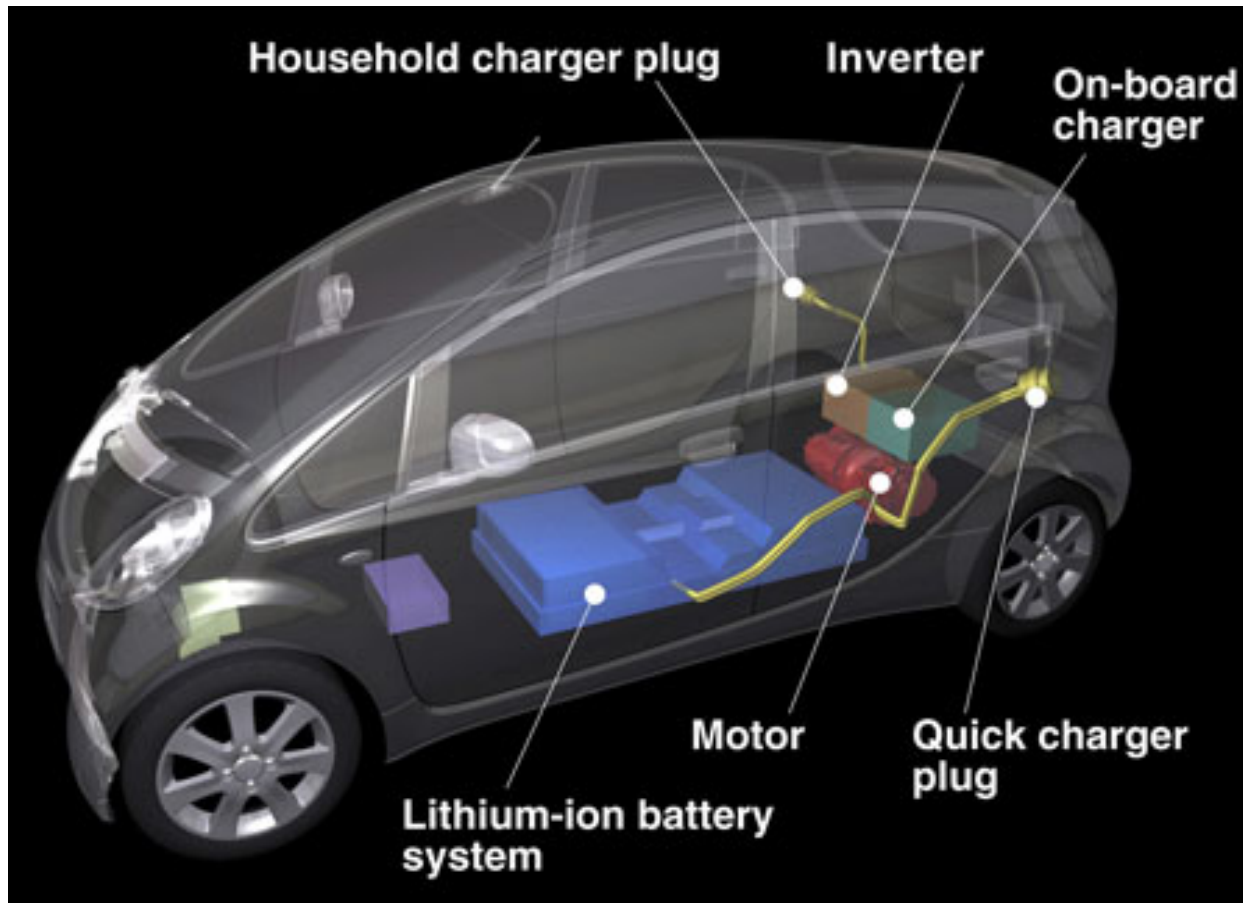
Contents

- E-Fahrzeuge als Schlüsseltechnologie
- Cyber – Physical Systems
- Betrieb und Verhandlungen
regenerativer Energien - **dezentral**
- Reinforcement Learning
- Diskussion und Ausblick





E-Fahrzeuge (EV) als Schlüsseltechnologie





E-Fahrzeuge (EV) als Schlüsseltechnologie





E-Fahrzeuge (EV) als Schlüsseltechnologie





E-Fahrzeuge (EV) als Schlüsseltechnologie

- Die Energie sollte von **regenerativen Energieanlagen (REA)** kommen
- Fragen: Wie kann man
 - Verhandlungen über Energiequantitäten bei unvorhersehbarem Aufkommen der weit verstreuten REAs durchführen?
 - REAs in das existierende Netz integrieren (Probleme der Netzstabilität)?
 - kurz- oder mittelfristige Lastspitzen ausgleichen?
 - Black-outs vermeiden?
 - etwa Regelenergie aus Auto- (EV-) Batterien vorhalten?





E-Fahrzeuge (EV) als Schlüsseltechnologie

Ein facettenreiches,

disziplinübergreifendes Problem

**gesucht: eine (hoffentlich) inkrementelle
Lösungsmethode**





Regenerative Energieanlagen (REA)

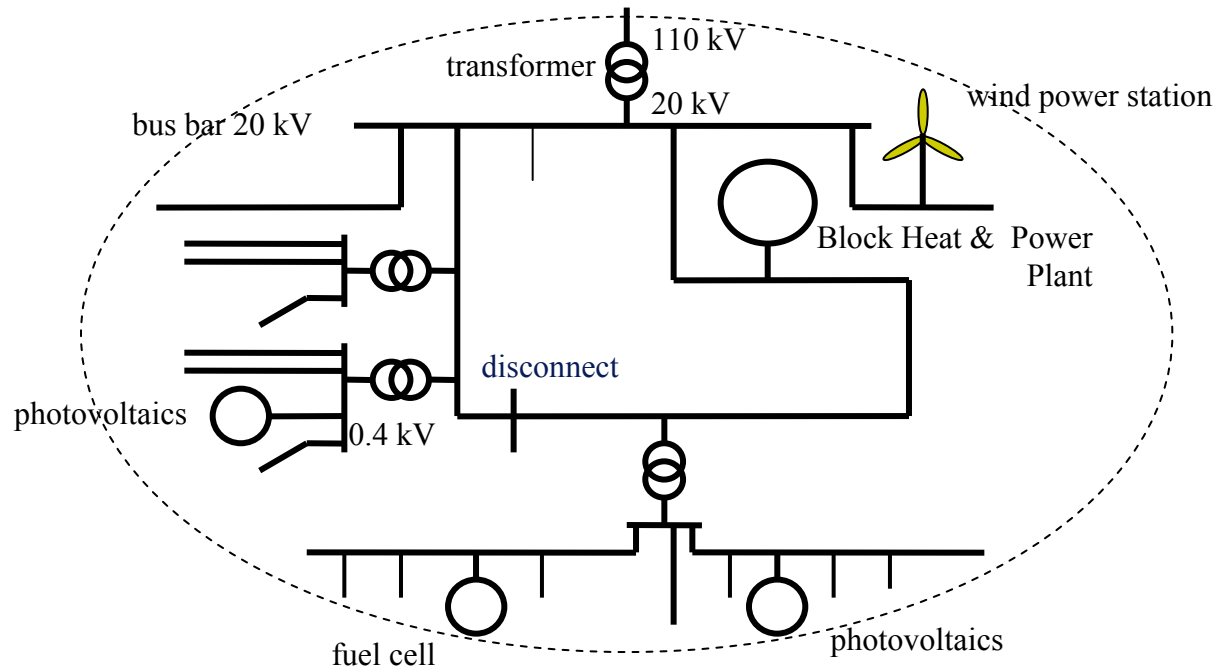
- Windräder
- Solarzellen
- Blockheizkraftwerke (BHKW)
 - (Bio-) Gas
 - Pflanzenöle
 - Holz (Pellets oder Häcksel)





Regenerative Energieanlagen (REA)

n Bilanzkreis (enthält regenerative Erzeuger)





Regenerative Energie

- Fragen: Wie kann man
 - Verhandlungen über Energiequantitäten bei unvorhersehbarem Aufkommen der weit verstreuten REAs durchführen?
 - REAs in das existierende Netz integrieren (Probleme der Netzstabilität)
 - kurz- oder mittelfristige Lastspitzen ausgleichen
 - Black-outs vermeiden?
 - etwa Regelenergie aus Auto- (EV-) Batterien vorhalten?





Verhandlungen über regenerative Energie

- **Globale oder top-down Steuerkonzepte funktionieren nicht:**
 - nicht flexibel, nicht skalierbar, nicht adaptiv
 - Online-Steuerung unmöglich: Es dauert zu lange, ein globales Szenario zu erstellen: Dann hat sich die Verhandlungssituation schon wieder geändert
 - Zeitrahmen für Verhandlungen, Verteilung der angeforderten Wirkleistung, Lastflussrechnung, Netzstabilitätsprüfung:



0,5 sec



Globale/Top-Down Steuerung **unpassend**



Cyber-Physical Systems

Frühere “Definition”:

“Cyber-Physical Systems (CPS) sind integrierte Computer und physische Prozesse [UCB].”

Liste “definierender Charakteristika (z.B. nach Raj Rajkumar, CMU):

- Vernetzt über mehrfache Größenordnungen
- Hochkomplex in fräumlicher und zeitlicher Dimensionen
- unter dynamischer Reorganisation/Rekonfiguration stehend
- Hoher Automatisierungsgrad, Steuerungskreise jeder Größe
- Hochverlässliche, auch oft zugleich zertifizierte Funktionen





Anforderung an Systemsteuerung:

Höchstmögliche Kongruenz zwischen physischen und Steuerstrukturen

Hier mindestens dezentrale Kontrolle und Koordination, Bottom-Up Management etc.

Cyber-Physical Systems





Cyber-Physical Systems

2 Hauptprobleme der EV Integration in die Versorgung:

➤ **Erzeugung von genügend erneuerbarer Energie**

Wie verhandeln die verstreuten Parteien über unvorhersehbare Erzeugung?

➤ **Regelenergie aus regenerativen Quellen**

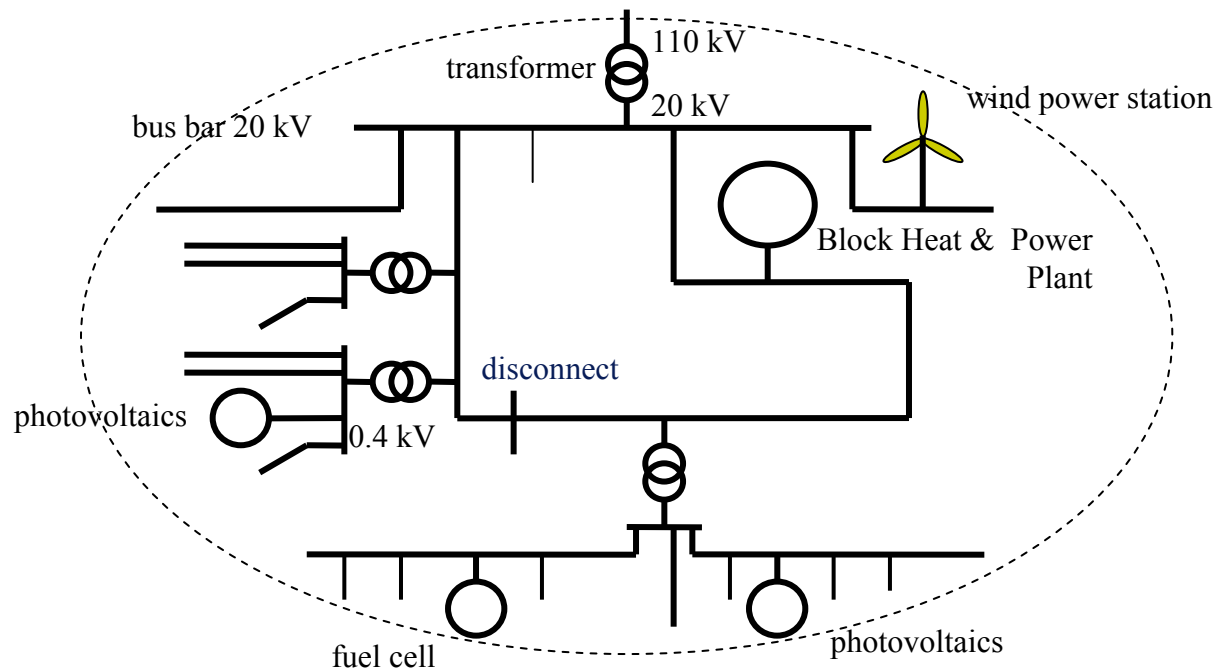


Schlüssel zur Integration in bestehendes Netz



DEZENT (*Verteilte Multi-Agentendienste*)

n Bilanzkreis (enthält regenerative Erzeuger)

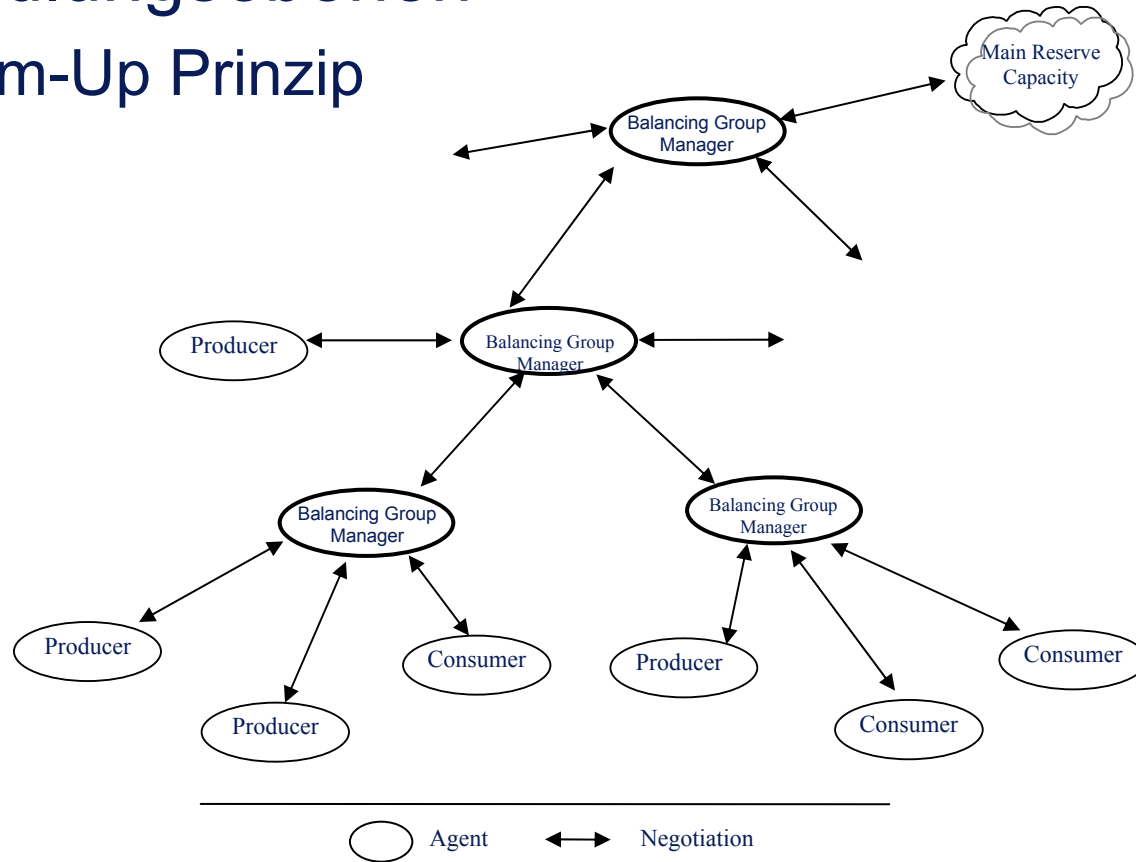




Autonome dezentrale Agentenverhandlungen

n Verhandlungsebenen

è Bottom-Up Prinzip





DEZENT - Projekt

- è Verteilte Multi-Agenten
 - | im Dienste menschlicher oder elektrischer Aktoren
 - | auch von Aktor-Gruppen
- è Verhandlungen finden statt in **Perioden** von 0,5 sec. In jeder Periode sind **Verhandlungszyklen** (z.B. 3), jeder Zyklus hat 10 **Verhandlungsrunden** à 1 msec,
- è Benutzer, die in einem Zyklus nicht befriedigt sind, werden zur nächsthöheren Ebene weitergereicht.
- è Nach höchstens 4 Zyklen sind alle Benutzer (40 msec) ggf. durch eine Reservekapazität.





Verteilter DEZENT Algorithmus

- n Preisrahmen und ihre Anpassung auf jeder Ebene
- è Nach Runde n ($n \in [0,9]$) passen die Agenten Gebote bzw. Angebote an:

$$bid_C(n) = -\frac{1}{e^{\frac{urg_0 \cdot n}{s_1} + s_2}} + B_k \quad (1)$$

$$offer_P(n) = \frac{1}{e^{\frac{urg_0 \cdot n}{t_1} + t_2}} + A_k \quad (2)$$

urg₀ ist benutzer-spezifisches Maß für Anfangsgebot/-angebot

- ➔ Die Preisrahmen $[A_k, B_k]$ schrumpfen um einen festen Betrag, auf der nächst-höheren Ebene, $k = 1, 2, \dots$

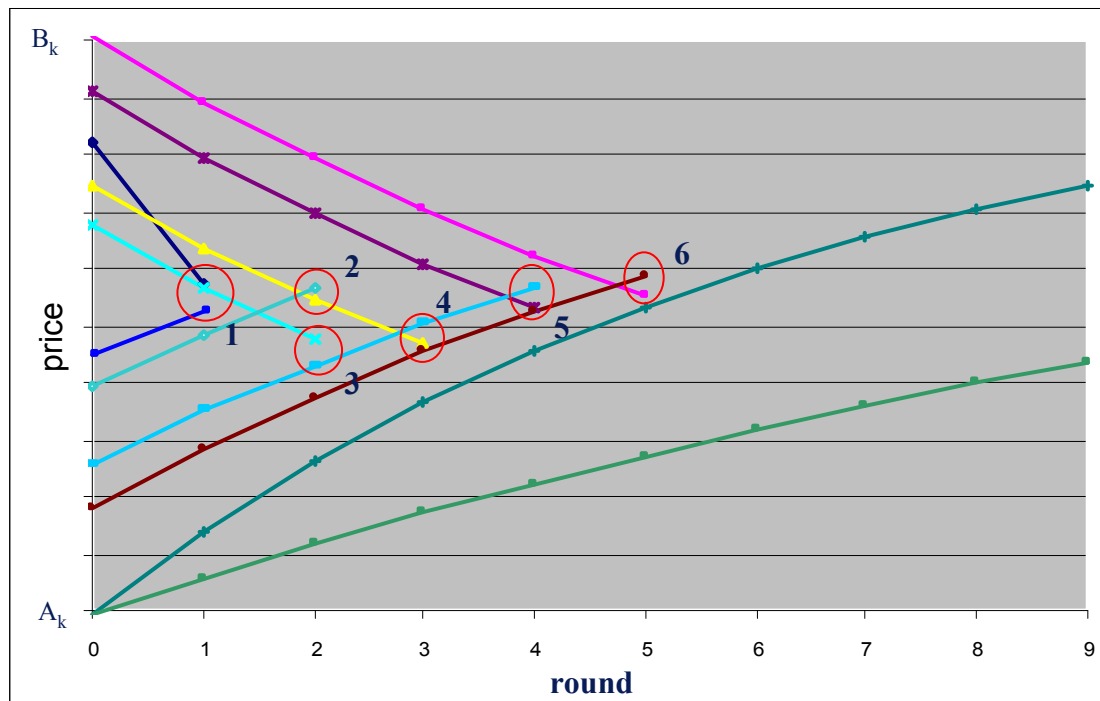




Verteilter Verhandlungsalgorithmus

n Abschlüsse

è Verhandlungsvorgang während eines Zyklus





Reinforcement Learning

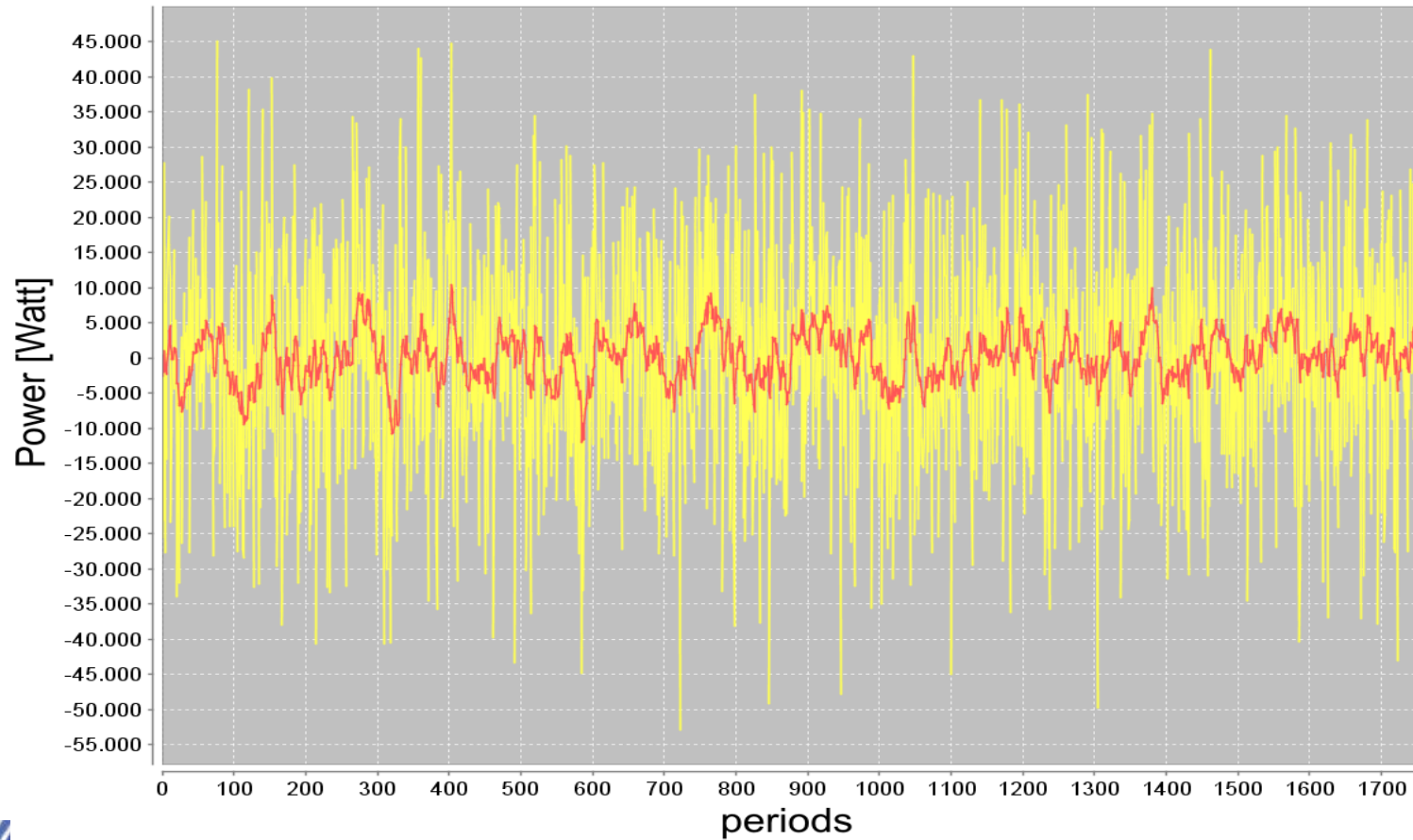
Wie können Verhandlungsstrategien zur “Verbesserung” der individuellen Ergebnisse angepasst werden?

→ durch **Reinforcement Learning**: Durch *individuelles* Lernen aus der Vergangenheit und Exploration





Kurzfristige Lastspitzen





Bedingte Kunden

- ❖ *Kühlschränke und Boiler* haben eine Ladeleistung, *Batterien* und *BHKWs* eine Abgabeleistung. Diese wird jeweils mit P bezeichnet und in kW angegeben. (Die Ladekapazität für Batterien wird zur Vereinfachung hier noch vernachlässigt.)
- ❖ t_{\max} ist der minimale Zeitraum, in dem ein Gerät Energie aufnimmt bzw. abgibt - je nach seiner Funktion -, bis es entweder seine minimale Temperatur erreicht hat (Kühlschrank) oder wiederwieder nachgeladen werden muss (Batterie).
- ❖ t_{\min} ist die Mindestzeit, in der ein stromgeführtes BHKW Energie erzeugen muss, um den Verbrennungsmotor nicht unterhalb der Betriebstemperatur zu fahren.
- ❖ t_{duty} ist die Zeit, die ein Gerät braucht, um seine Funktion als Erzeuger oder Verbraucher unbedingt zu erfüllen





Parameterbereiche für bedingte Kunden

	$ P $	t_{\max}	t_{\min}	t_{duty}
Kühlschrank	~0,2kW	<15min	0s	5min
Boiler	~2kW	< 5min	0s	3min
BHKW	~3kW	<15min	> 20s	3min
Batterie	~3kW	<45min	0s	0min





Ausgleichsalgorithmus

- n Pro Zyklus findet in jeder Periode ein Abgleich mit bedingten Kunden statt, unter der Kontrolle der jeweils dort zuständigen BGMs.
- n Die erste Entscheidung, ob es sich nach der Verhandlung um eine Lastspitze $P_{p,n}$ handelt, basiert auf der dynamischen Berechnung eines gewichteten Durchschnitts für $P_{p,n}$ nach

$$\bar{P}_{p,n} = \bar{P}_{p-1,n} + \alpha (P_{p,n} - \bar{P}_{p-1,n})$$

$$0 < \alpha \leq 1$$

- Je kleiner α , desto glatter die Ausgleichskurve.





Ausgleichsalgorithmus

n Zur Bestimmung von $\Delta P_{p,n} = P_{p,n} - P_{p,n}$

wird ein 0 – 1 Rucksackproblem gelöst
(im Papier).





Ergebnisse

- ❖ Cyber-Physical Systems am Beispiel der erneuerbaren Energieversorgung:
 - ❖ Bottom-Up Management, verteilte Kontrolle, d.h. beliebig skalierbar
 - ❖ Hohe verteilte Adaptivität bei Verhandlungen reinforcement Learning
 - ❖ Hohe Integration von Computer- und elektrischen Steuerfunktionen (Lastflussrechnung, Netzstabilität): hier nicht dargestellt
 - ❖ Verteilte Regelenergieregulierung unter den bedingten Benutzern jedes Bilanzkreises, aufsteigend nach Zyklen in jeder Periode, zu mindestens 75 %





Ergebnis 2

- **Versorgung von EVs aus erneuerbarer Energie durch Steckdosen in Garagen und Parkhäusern auf Grund von DEZENT Verhandlungen effizient und preiswert .**
- **Um transdisziplinäre Anwendungen wie die obige überhaupt in den Griff zu bekommen, liefert das *ernstgenommene* Paradigma der Cyber-Physical Systems ein höchst wirksames Entwicklungswerkzeug.**



Vielen Dank!

Fragen?