View metadata, citation and similar papers at core.ac.uk
brought to you by CORE
provided by University of Queensland eSpace

Von eingebetteten Systemen zu Cyber-Physical Systems

Eine neue Forschungsdimension für verteilte eingebettete Realzeitsysteme*

Horst F. Wedde[1], Sebastian Lehnhoff[1], Christian Rehtanz[2] und Olav Krause[2]

Fakultät für Informatik[1], Fakultät für Elektrotechnik[2]
Technische Universität Dortmund

Zusammenfassung. Das Hauptanliegen des Papiers ist, ein Paradigma für Probleme mit neuartigen Integrationsanforderungen für Forschung und Entwicklung in verteilten eingebetteten Echtzeitsystemen zu motivieren und vorzustellen, nämlich den Begriff Cyber-Physical Systems. Bei einer in letzter Zeit stark zunehmenden Anzahl von Realzeitanwendungen können ohne die Berücksichtigung solcher Forderungen keine praktisch brauchbaren Lösungen erwartet werden. Einige Anwendungsfelder werden angesprochen. Im Einzelnen werden dann für Elektroautos, die mit erneuerbaren Energien betrieben werden sollen, einerseits die Management-, verteilte Verhandlungs- und Verteilungsprobleme der benötigten Energie in einem bottom-up Ansatz gelöst. Andererseits wird als Teil unserer Projektarbeit die Bereitstellung von Reserveenergie (bei Spannungseinbrüchen oder lokalen Verbrauchsspitzen) für den allgemeinen Bedarf durch Autobatterien vorgestellt. Es zeigt sich, dass dies effizienter und wesentlich kurzfristiger in unserem verteilten Vorgehen geschehen kann als in traditionellen Verfahren.

1 Einleitung

1.1 Neue Perspektiven für Echtzeitsystem-Forschung

Ab 1988 wandte sich die Echtzeitforschung neben den CPU-Scheduling auch anwendungsbezogenen Leistungsanforderungen zu wie Fehlertoleranz, Verlässlichkeit, Ausfall- und Zugriffssicherheit obwohl diese in der Praxis ja sogar im Konflikt mit den Realzeitbedingungen stehen. Da diese von der System- bzw. Anwendungsumgebung erzwungen waren, wurde dieses erweiterte Arbeitsgebiet *"Eingebettete Systeme"* genannt.

Im Laufe der nächsten Jahre machten sich bei Modellieren, Analyse und Implementierung von Kontrollprozessen in eingebetteten Anwendungen dennoch zunehmend Schwachpunkte bemerkbar, etwa bei:

a) automatischen Verkehrssystemen für Stauvermeidung, "Harmonisierung" individueller Fahrtzeiten, wirtschaftlich und ökologisch effiziente Lösungen zu erreichen;
b) durch Lithium-Ionen-Batterien angetriebenen Elektroautos die Versorgung über Regenerative Energieumwandlungsanlagen (REA) wie Solarzellen oder Windräder einzurichten (*Vehicle-to-Grid/V2G*);

* Diese Projekte werden teilweise gefördert von der DFG unter WE 2816/4-1 und HA 937/32-1 sowie von E.on unter 2007/GI_UoDort-ESW_IEODN

c) erneuerbaren Energien die als hinreichend verlässliche und kostengünstige Alternative, sogar als Reserveenergie für Versorgungsnetze zur Verfügung gestellt werden sollen.

1.2 Probleme mit traditionellen Ansätzen

In den immer komplexeren Anwendungen werden zusätzlich zu den in 1.1 genannten Eigenschaften (und gleichzeitig zur Realzeitfähigkeit, die allerdings auf QoS beschränkt wird) *hohe Anpassungsfähigkeit von Systemsteuerung und -architektur, dynamisches Prozessverhalten, schnelle Überwindung/ Reparatur von Ausfällen, Erweiterbarkeit bzw. Vergrößerung der Systeme* verlangt. Dies kann aber bei Verwendung traditioneller Methodenfür große reale Systeme nicht bewältigt werden. Das Haupthindernis ist, dass man dort von globalen Zuständen und/oder zentraler Kontrolle ausgeht, wobei dann die Auswertung der globalen Informationen so lange dauert, dass jede Steuermaßnahme obsolet ist. Z.B. sind große Transportsysteme hochdynamisch, und die Staumeldungen - selbst, wenn sie alle 2 Minuten verbreitet würden, was vollkommen illusorisch ist - können nicht so schnell ausgewertet werden, dass sie der dann entstandenen Verkehrssituation noch entsprächen. Als Konsequenz berechnen in den Lkws die Navigationsinstrumente individuell ihre Ausweichrouten. Da jedoch alle Gerte den gleichen, statischen Algorithmus benutzen, geraten bei hohem Verkehrsaufkommen alle Fahrzeuge zur Stauumgehung auf dieselbe Umleitung (niedrigerer Ordnung), wodurch das Chaos noch gewaltig vergrößert wird (wie bei PEARL 2007 vorgestellt [6]).

Dasselbe Problem tritt bei dem traditionellen Top-Down-Management in elektrischen Weittransportnetzen auf, was inzwischen weitgehend beobachtbar ist, in Form von zu sog. Black-Outs oder Leistungseinbrüchen verschiedener Dauer. Gleichzeitig wird zur Vermeidung der letzteren Probleme konventionell erzeugte Reserveenergie verschwenderisch, d.h. ineffizient und ökologisch bedenklich vorgehalten.

1.3 Der Übergang zu Cyber-Physical Systems

Wie oben erklärt, sind gerade die statischen bzw. Top-down Strukturen der Software-Prozesse typische Barrieren, die - jedenfalls unter strengen Realzeitanforderungen - es unmöglich machen, verteilte eingebettete Systeme wie z.B. in 1.1, a) - c) zu implementieren: Die in 1.2 genannten Bedingungen sind nicht zu erfüllen.

In allen obigen Beispielen fällt die Inkongruenz zwischen den physischen Strukturen und den ihren traditionellen Steuerprozessen auf. Das Paradigma der ***Cyber-Physical-Systems* (CPS)** *fußt aber gerade auf der Forderung nach einer strukturellen Verwandtschaft, womöglich einer Kongruenz zwischen physischen Anwendungs- und Computer-/Software-Steuerprozessen*. Nur dann kann man auch für hochkomplexe Anwendungen innovative und praxisnahe Forschung und Entwicklung erfolgreich voranbringen. Kurz für unseren Zusammenhang in 1.2 wiederholt, schließt das für die Softwareentwicklung ein: *verteilte Kontrolle, bottom-up Management für geschichtete Kontrollstrukturen, hoch-autonome Software-Prozesse (Agenten), verteilte Lernstrategien für Agenten*. Einen guten Überblick über gegenwärtige Arbeiten liefern die Proceedings des *National Workshop on High-Confidence Automotive Cyber-Physical Systems*, Troy, MI, vom 3./4. April 2008, die auch unsere eigenen Beitrge für die Zukunftsplanung (bis 2025)

enthalten [2]. Wie dabei gleichzeitig den in 1.2 aufgestellten Anforderungen genüge getan werden kann, soll in diesem Beitrag am Beispiel der Versorgung mit erneuerbarer elektrischer Energie demonstriert werden. Dabei geht es sowohl um transdisziplinre Bezüge (zwischen Informatik, E-Technik und Betriebswirtschaft) als auch um die adäquate Lösung verschiedenster Einzelprobleme, deren Regelung jedoch in enger (z.B. zeitlicher) Wechselbeziehung stehen.

1.4 Aufbau des Papiers

Im Abschnitt 2 wird zunächst ein Wirtschafts- und Steuermodell für die (weit gestreuten) regenerativen Energieumwandlungsanlagen ***(REA)*** definiert, das auf verteilten, im Wesentlichen autonomen Software-Agenten beruht. (Wir beschränken uns in der Folge (zunächst) der Übersicht halber auf Solarzellen und Windräder.) Dabei wird ein neuartiges Verhandlungsmodell zwischen Erzeugern und Verbrauchern eingeführt, das in Zeiträumen von ca. 50 msec systemweit zu Abschlüssen kommt. Zeitgerechtes Leitungsüber- bzw. Unterlastmanagement werden angesprochen, ebenso der Schutz gegen Missbrauch der Regelungen sowie die ohne globale Information stattfindende Adaption der Verhandlungsstrategien jedes einzelnen Agenten.

In Abschnitt 3 wird der Energieausgleich im Netz (Demand/ Supply Power Grid Management) in dem wichtigen Regelungsaspekte der kurzfristigen Schwankungen (Lastspitzen oder Spannungseinbrüche) behandelt. In Abschnitt 4 führen wir einen verteilten Ausgleichsalgorithmus ein, der die benötigte Reservenergie steuert, wenn sie etwa durch die neuesten elektrischen Batterien (in Elektroautos) zur Verfügung gestellt werden soll. In Abschnitt 5 wird in Simulationsexperimenten die deutlich vorteilhafte Ersparnis von Regelenergie herausgearbeitet.

1.5 Eigene und fremde Vorarbeiten

Zu den angesprochenen Themen sind seit Jahren viele Einzelarbeiten erschienen, die jedoch alle auf statischen Ansätzen, globaler Information oder Kontrolle basieren und daher in die Gesamtproblematik der erneuerbaren Energieerzeugung nicht eingepasst werden können. Das Hauptanliegen dieses Beitrags liegt jedoch darin, beispielhaft klarzumachen, wie ein, die Prinzipien von Cyber-Physical Systems respektierendes, Vorgehen trotz der enormen Komplexität der Problematik und Aufgabenstellungen unter rigiden zeitlichen Nebenbedingungen und sogar inkrementell zum Ziel führen kann. Unsere eigenen Vorarbeiten fanden hauptsächlich im DFG-Projekt DEZENT statt und werden neuerdings von E.on gefördert. Als Einführung in die technischen Einzelfragen wird in den folgenden Abschnitten auf die angegebene Literatur verwiesen.

2 Verteilte Agentenverhandlungen in DEZENT

2.1 Das Grundmodell

Eines der Probleme mit Windrädern bzw. Solarzellen ist die Unvorhersehbarkeit der Produktion. Dennoch ist es gerechtfertigt (aus verschiedenen praktischen Lösungen),

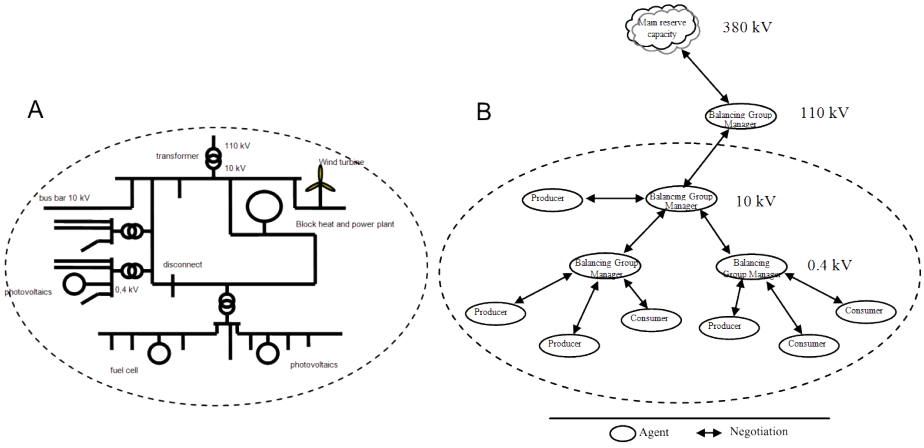

Abb. 1. Bilanzkreis und zugeordnete Agenten

davon auszugehen, dass der Bedarf in hohem Maße lokal befriedigt werden kann, inzwischen u.a. mit Hilfe von Batteriespeichern. Unsere Grundvorstellungen lauten im Einzelnen:

1. Der Bedarf kann entweder *innerhalb eines lokalen/ regionalen Teilnetzes (0.4-10kV), oder zwischen Teilnetzen (110kV)* durch erneuerbare Energie befriedigt werden, nur in Ausnahmefällen wird eine Reservekapazität in Anspruch genommen (s. Abb. 1A). In diesem Abschnitt wird angenommen, dass keine Versorgungsausfälle vorkommen.
2. Ein Energieausgleich findet zwischen verschiedenen Spannungsebenen statt (*bottom-up*) oder zwischen Bilanzgruppen (balancing groups) auf derselben Ebene.
3. Produzenten sind normalerweise auch Verbraucher und umgekehrt.
4. Verhandlungen werden durch Erzeuger- bzw. Verbraucheragenten durchgeführt. Sie werden koordiniert durch Bilanzkreismanager***(balance group managers(BGMs))***, welche auf jeder Ebene parallel arbeiten, und zwar zeitsynchronisiert. Im Beispiel in Abb.1B gibt es 3 solcher (Ausgleichs-) Ebenen.
5. Verhandlungen beginnen alle 0,5s. *Wir erwarten sogar, dass diese sowie die Verteilung der verhandelten Energie deutlich vor Ende jeder solchen* ***Periode*** *beendet wierden*. In diesem Fall könnten wir auf Vorausplanung verzichten. In der Zwischenzeit ankommende Angebote oder Gebote werden in der nächsten Periode verhandelt. Diese Erwartung konstituiert eine harte Deadline.
6. Zu Beginn jeder Periode bestimmt jeder Kunde nach gegenwärtiger Differenz zwischen Bedarf- und Erzeugungsstand, ob er als Produzent, Verbraucher oder gar nicht an den Verhandlungen teilnimmt.
7. Gebote und Angebote geschehen innerhalb von Preisrahmen, die Amortisierung und Wartung. Es gibt keine langfristigen Verträge oder Rabatte (für große oder zukünftige Käufe.)

2.2 Der Basisalgorithmus

Die Grundidee für den Verhandlungsalgorithmus auf der Basis von 2.1 ist wie folgt:

1. Sei $[A_k, B_k]$ der Preisrahmen für Ebene k ($1 \leq k \leq 3$ in Abb. 1B). Jeder Bilanzkreismanager (BGM) auf dieser Ebene führt einen *Koordinierungszyklus* von 10 *Runden* durch. Jede Runde dauert 1 msec.
2. Nach jeder Runde prüfen die BGMs *parallel*, ob Gebote und Angebote „ähnlich" genug sind. Wenn ja, wird zwischen den Parteien abgeschlossen, und zwar unter der Grundidee, dass gem. einer *Round Robin Prozedur* immer nur ein fester Betrag von *Wh* zugeschlagen wird, bis der Vorrat oder Bedarf erschöpft sind. (In der E-Technik kann Energie beliebig partitioniert werden.)
3. Die Verhandlungsstrategien eines Kundenagenten C sind gegeben durch ein opening bid $bid_C(0) \in [A_k, 1/2(B_k + A_k)]$, ein opening offer $offer_P(0) \in [1/2(B_k + A_k), B_k]$, eine gerätespezifische Dringlichkeit urg_0 und Strategieparameter s_{1C} und t_{1P}. Nach Runde n; $n \in [0,9]$ adaptieren die unbefriedigten Agenten ihre Gebote/ Angebote gem.:

$$bid_c(n) = -\frac{1}{e^{\frac{urg_0 \cdot n}{s_{1C}} + s_{2C}}} + B_k \tag{1}$$

$$offer_p(n) = \frac{1}{e^{\frac{urg_0 \cdot n}{t_{1P}} + t_{2P}}} + A_k \tag{2}$$

   Die Parameter s_{2C} und t_{2P} sind bestimmt durch opening bid ($bid_C(0) = bid_0$) bzw. offer ($offer_P(0) = offer_0$):

$$s_{2C} = -log(B_k - bid_0) \tag{3}$$

$$t_{2P} = -log(offer_0 - A_k) \tag{4}$$

   Das resultierende exponentielle Verhalten ist am besten geeignet, eine schnelle Konvergenz zwischen Geboten und Angeboten zu erreichen. Abb. 2 gibt ein Beispiel für 6 Verbraucher (steigende Kurven) und 5 Produzenten (fallende Kurven). Eingekreiste Gebot/Angebotspaare (hänliche Werte) und Zahlen entsprechen der Ordnung, in der die Verträge geschlossen wurden. (Der Ähnlichkeitsbereich in Abb. 2 ist 2cent). Der verhandelte Preis ist das arithmetische Mittel zwischen den Ähnlichkeitswerten. Bei jedem Abschluss endet eine Verbraucherkurve (z.B. Abschluss 2), eine Produzentenkurve endet (Abschluss 3, 4), oder beide Arten von Kurven enden (bei vollständiger Einigung wie bei Abschluss 1, 5, 6). In Abb. 2 bleiben 2 Kunden unbefriedigt nach Ende des Zyklus.
4. Unbefriedigte Kunden auf Ebene k werden auf die Ebene $k+1$ weitergereicht. Dort sind die Preisrahmen $[A_{k+1}, B_{k+1}]$ gegenüber $[A_k, B_k]$ um ein festes Verhältnis geschrumpft (20% oder 40% sind in Abb. 2 gewählt). Eingangsgebote bzw. -angebote werde bei Bedarf in den geschrumpften Rahmen $[A_{k+1}, B_{k+1}]$ eingepasst. Die

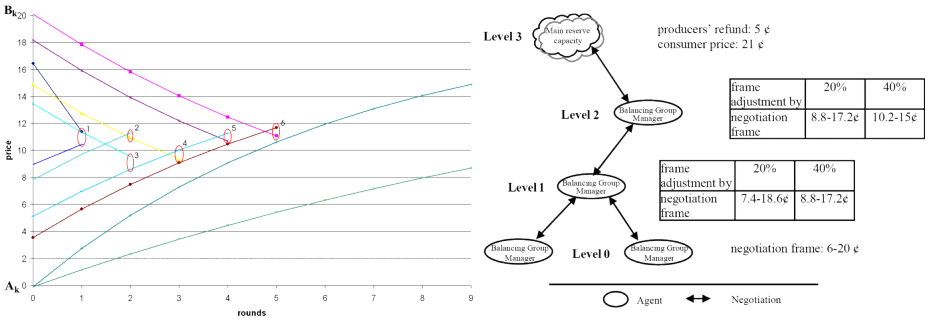

Abb. 2. Verhandlungen von Energiebeträgen (links); Beispiel für Verhandlungsrahmen und ihre Anpassung (rechts)

anderen Strategieparameter bleiben unverändert. Dies erhöht die Chancen für Abschlüsse. Auf der anderen Seite sind wahrscheinlich die erzielten Preise potentiell für alle ungünstiger.

5. Die Bedürfnisse oder Interessen von am Ende noch unbefriedigten Kunden werden befriedigt von der zentralen Reservekapazität, allerdings zu höchst ungünstigen Preisen (vgl. Abb. 2, wo die Preise für die Ebenen 1 - 3 nach EU-Formeln, der Preis für die Reservekapazität (Großkraftwerk) nach Marktpreisen gegeben sind).

In umfangreichen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Deadlines alle eingehalten werden konnten, also realistisch angesetzt waren. Daher bleiben etwa bei 3 Ebenen wie in unserem Beispiel immer noch 450ms zur Erledigung der Kommunikationsprobleme und weiterer Fragen.

2.3 Erweiterungen des Modells und der Algorithmen

Eine Diskussion der Zugriffssicherheit gegen Missbrauch ist in [4] zu finden. Wirtschaftliche Bezüge, die sich ergeben, indem ja alle Besitzer von REAs in selbstständigen Verhandlungen stehen, werden in [3] besprochen. Die Lastregelung, insbesondere die Über- bzw. Unterspannung auf den Transportnetzebenen sind in [1] dargestellt, insbesondere durch völlig neue dezentrale Abschätzmethoden. Schließlich sind die Verhandlungsstrategien zwar frei wählbar in den angegebenen Rahmen, jedoch kann sich für einen Kunden nach einigen Perioden herausstellen, dass seine Wahl „ungünstig“ war. Durch Beobachtung einiger Perioden kombiniert mit explorativem Verhalten haben wir einen verteilten Algorithmus finden können, der sich an den Prinzipien des *Reinforcement Learning* orientiert [5]. Zwar sind alle Regelungen aufeinander bezogen, wegen des dezentralen Vorgehens konnte jedoch eine inkrementelle Arbeitsweise gewählt werden.

3 Management von kurzfristigen Lastspitzen und Spannungseinbrüchen

Kurzfristige Verbrauchsschwankungen (im *ms*- bis *min*-Bereich) - die oft unvorhersehbare lokale oder regionale Ursachen haben - äußern sich nicht nur als Flackern in Haushalten, sondern können Reserveenergiebelastung für zentrale Großkraftwerke bedeuten, ja sogar die Transportnetzstabilität gefährden. In DEZENT wirken wir dem entgegen, indem wir zur frühest möglichen Zeit, d.h. hier nach jedem Verhandlungszyklus (also auf jeder Verhandlungsebene) tätig werden. Die Grundidee ist, dass viele elektrische Geräte unter vielen Betriebssbedingungen temporär entweder auf Leistungsaufnahme verzichten können (Kühlschrank, Wasserboiler) oder Ladungsaufnahme unterbrechen können (Elektrobatterien). Dies stellt Reserveenergie dar, die von vornherein dort verfügbar ist, wo sie gebraucht wird, und deren Fehlen bei geeigneter Vorgehensweise (s. 3.3) die Gerätefunktion auch nicht beeinträchtigt. Dazu ist damit zu rechnen, dass die so gewonnene Reserveenergie deutlich preiswerter ist als die traditionelle (weniger Transportkosten, kein Vorhalten von Energie auf Grund globaler Planung). Schließlich wird von den BGMs auf jeder Ebene parallel in kürzester Zeit (10 *ms*) operiert, also optimal nahe am Anforderungsprofil.

3.1 Bedingte Erzeuger und Verbraucher

Während bisher Kunden Energie anboten oder anforderten, etwa indem eine Batterie an eine Steckdose angeschlossen wurde und dann entweder Ladung abgeben oder aufnehmen sollte, werden inzwischen zeitflexible Regelungen diskutiert, bei der z.B. ein Kühlschrank vom Ladevorgang abgeschaltet werden kann, solange keine maximale Temperatur überschritten wird, bei der die Haltbarkeit der Lebensmittel gefährdet ist. Entprechendes gilt gilt auch für elektrisch geheizte Boiler oder stromgeführte Blockheizkraftwerke (*BHKW* oder *CHP*). Man kann hier von ***dynamisch gesteuerter Energieregelung*** sprechen. Ob nun Kunden die akkumulierten Bedürfnisse oder/ und Erzeugung an/ von Energie von Haushalten oder Produktionsanlagen repräsentieren oder jeweils die Gerte selbst gemeint sind: Wir wollen im Folgenden von ***bedingten*** *Kunden/ Verbrauchern/ Erzeugern* sprechen.

3.2 Bedingte Kunden

Um für die verschiedensten Geräte eine einheitliche Darstellung zu haben, treffen wir folgende Festlegungen:

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

4. t_{duty} ist die Zeit, die ein Gerät braucht, um seine Funktion als Erzeuger oder Verbraucher unbedingt zu erfüllen.

Tabelle 1. Parameterbereiche für bedingte Kunden

	$\|P\|$	t_{max}	t_{min}	t_{duty}
Kühlschrank	∼0.2kW	<5min	0s	5min
Boiler	∼2kW	<15min	0s	3min
BHKW	∼3kW	<15min	>20s	3min
Batterie	∼3kW	<45min	0s	3min

In Tabelle 1 sind diese Parameterbereiche für die erwähnten Geräte zusammengestellt.

3.3 Ausgleichsalgorithmus

Findet in einer Periode p, am Ende eines Verhandlungszyklus n, also auf der n-ten Spannungsebene, einer der BGMs heraus, dass die zu ihm gehörige Bilanzgruppe eine von 0 verschiedene Bilanz $P_{p,n}$ hat, so wird als nächstes von jedem dieser Betroffenen (parallel!) entschieden, ob es sich um eine Bilanzspitze handelt. Dazu wird für $P_{p,n}$ ein gewichteter Durchschnitt $\bar{P}_{p,n}$ gebildet nach

$$\bar{P}_{p,n} := \bar{P}_{p-1,n} + \alpha\,(P_{p,n} - \bar{P}_{p-1,n}) \tag{5}$$

wobei $0 < \alpha \leq 1$. Abb. 3 zeigt für stochastisch generierte Bilanzprofile, dass kleinere α-Werte einen stark glättenden Charakter haben, was bedeuten würde, dass die relativ zur gewichteten Durchschnittskurve interpretierten Spitzen stärkere Ausgleichsmaßnahmen nötig machten, während im Extremfall $\alpha = 1$ keine einzige Spitze erschiene (da kein Unterschied zur ursprünglichen Kurve ist).

$\Delta P_{p,n} = P_{p,n} - \bar{P}_{p,n}$ bedeutet also in diesem Kontext die jeweilige auszugleichende Spitze. Der Ausgleich erfolgt durch bedingte Produzenten oder Verbraucher, je nach der Abweichungsrichtung. Um nun bedingte Kunden für einen möglichst starken Ausgleich zu bestimmen, soll jedoch gleichzeitig der Kostenaufwand von deren Aktivierung - die sich ja über viele Perioden hinzieht (siehe 3.2) - minimal gehalten werden. Dies ist eine Formulierung des 0-1 Rucksackproblems. Formalisiert: Nach Beendigung von Zyklus n (während der Periode p) wird eine Teilmenge von $\mathbf{P}_{Cond}$ gesucht, um $\Delta P_{p,n}$ soweit wie möglich auszugleichen. Setzt man mit $c : \mathbf{P}_{cond} \rightarrow \mathbb{R}^+$ die Kostenfunktion an, die den inversen Wert der eben erwähnten Aufwandsfunktion hat, weiter $v : \mathbf{P}_{cond} \rightarrow \mathbb{R}^+$ als Ausgleichsbeitrag eines Elements von $\mathbf{P}_{Cond}$, schließlich $x : \mathbf{P}_{cond} \rightarrow \{0;1\}$ eine Auswahlfunktion von Elementen aus P_{Cond} , so ist das Ziel:

$$\sum c(P_i) \cdot x(P_i), \underset{P_i \in P_{Cond}}{\forall} \tag{6}$$

mit der Nebenbedingung

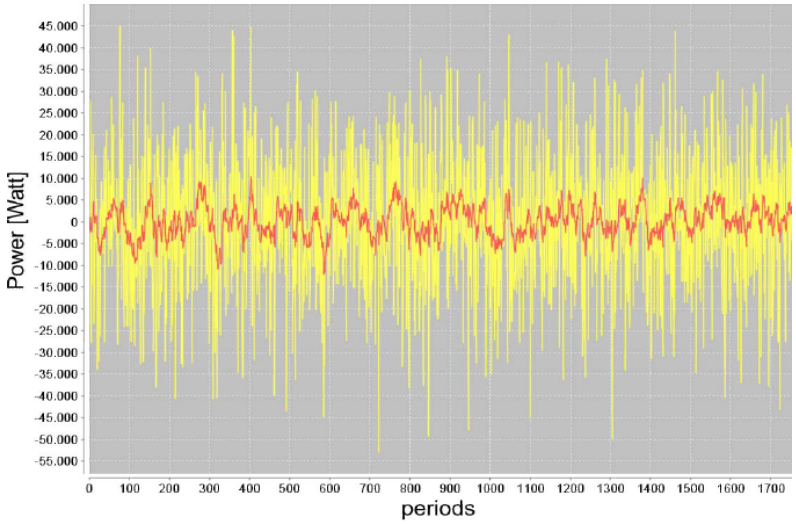

Abb. 3. Gewichteter Durchschnitt für $\alpha = 0.1$

$$\sum v(P_i) \cdot x(P_i) \leq \Delta P_{p,n}, \underset{P_i \in P_{Cond}}{\forall} \tag{7}$$

Dieses Problem wird jeweils von jedem betroffenen BGM mittels Linearer Programmierung (im *ms*-Bereich) gelöst, und die Elemente von P_{Cond} werden zu dieser Ausgleichsfunktion während der nächsten t_{min} Perioden berücksichtigt (siehe 3.2).

4 Simulationsstudien

In einer realistischen Studie auf der 0,4 kV - Ebene verglichen wir - nach intensiven experimentellen Voruntersuchungen, die aus Platzgründen hier nicht dargestellt werden können - den Gesamtbetrag von Reserveenergie, der jeweils von der nächst höheren Ebene oder der höchsten Reserveenergieinstanz (siehe 2) zum Ausgleich des Flackerns geliefert wurde, mit dem entsprechenden Resultat nach Anwendung unseres verteilten Ausgleichsalgorithmus (der ja auf jeder Ebene, d.h. in jedem Zyklus aktiviert wird). In der E-Technik ist die Kilowattstunde (kWh) die Einheit der elektrischen Arbeit. Sie entspricht der Fläche unter einer $P(t)$-Kurve (siehe 3.2). - Für alle Experimente wurden 100 Läufe durchgeführt. Da die Ergebnisse nicht signifikant variierten, wurden die Ergebnisse gemittelt. Wir verwendeten für den 0,4kV - Bilanzkreis reale Profile eines Frühlingstages im Ruhrgebiet, sowie Geräte wie in Tabelle 3 erfasst.

Die Ergebnisse der Experimente (für $\alpha = 0,1$) sind in Tabelle 3 erfasst, geordnet nach den für die Messungen verwendeten Gerätetypen bzw. deren Kombinationen. Abgesehen von dem durchaus differenzierten Bild der jeweiligen Ersparnisse (in Abhängigkeit von den gewählten Gerätekombinationen), ergibt sich, dass in der realen

Tabelle 2. Geräte-Zusammenstellung für 1-Tagesstudie

	$\|P\|$	t_{max}	t_{min}	t_{duty}
Kühlschrank	0.2kW	5min	0s	5min
Boiler	2kW	15min	0s	3min
BHKW	3kW	15min	20s	3min
Batterie	3kW	45min	0s	0min
A = 30 Kühlschränke	B = 10 Boiler	C = 5 BHKW	D = 2 Batterien	E = 4 Batterien

Umgebung bei den über den ganzen Tag gegebenen (erheblichen) Spannungsschwankungen bis zu 75% der benötigten Reserveenergie aus der „normalen“ (das hieße auch erneuerbaren Energie-) Produktion selbst abgezweigt werden konnte, daher nicht zentral (durch laufende Überproduktion) vorgehalten werden musste.

Tabelle 3. Geräte-Zusammenstellung für 1-Tagesstudie

Gerätekombinationen	Ersparnis in %
A	22,39
B	61,32
C	5,77
D	31,19
E	50,97
A ∪ B	69,40
A ∪ B ∪ C	70,91
A ∪ B ∪ C ∪ D	74,34
A ∪ B ∪ C ∪ E	75,70

5 Diskussion und Ausblick

Als Beispiel für die Entwicklung großer und komplexer eingebetteter Realzeitsysteme nach den Prinzipien von Cyber-Physical Systems haben wir, als Teil unseres DEZENT-Projekts, die durchgängige Versorgung mit erneuerbarer elektrischer Energie besprochen, die Lösung der Management-, Verhandlungs- und Verteilungsprobleme zwischen den weit gestreuten REAs, in diesem Beitrag besonders die Minimierung von Reserveenergie, die zur Regulierung bei kurzfristigen Lastspitzen oder Spannungseinbrüchen bereitgestellt werden muss. All diese Prozesse sind nicht nur in wechselseitiger Abhängigkeit, sondern werden auch in Perioden von 0,5 sec durchgeführt, unabhängig von der Systemgröße, die Verhandlungen selbst in weniger als 50 msec. Selbst die sehr effiziente Anpassung der Verhandlungsstrategien über Perioden hinweg erfolgt innerhalb dieser Zeitintervalle. Die Reserveenergie zum Ausgleich von kurzfristigen Lastspitzen oder Spannungseinbrüchen wird traditionell zentral von Großkraftwerken vorgehalten. In diesem Beitrag haben wir mit dem Konzept der bedingten Erzeuger und Verbraucher - die ja auf jeder Spannungsebene direkt miteinander verhandeln - einen

Weg gefunden, auf dem, und zwar zyklenweise innerhalb jeder Periode, die ihrer Natur nach lokalen Störungen bis über 70% auszugleichen. Das löst ein Schlüsselproblem der Netzstabilität, und auch wieder unabhängig von der Systemgröße. Das Haupthindernis, so neue elektrotechnische Projekte wie die Versorgung mit erneuerbaren Energien in die Praxis in die Praxis zu bringen, liegt sicherlich in der großen Zahl von Rand- und Nebenbedingungen, die sowohl mit dem funktionalen Betrieb wie mit der Sicherheit (safety und security), Verlässlichkeit, der (zeitlichen) Verfügbarkeit, Fehlertoleranz, und schließlich mit der Erweiterbarkeit und Anpassungsfähigkeit (der Funktionen sowie der Systemarchitektur selbst) zu tun haben (siehe Abschnitt 1). Der konzeptionelle Übergang von verteilten eingebetteten Echtzeitsystemen zu Cyber-Physical Systems kann daher als ein nahe liegender, wenn nicht sogar zwingend erforderlicher Weg zur praktischen Realisierung so hoch-komplexer Entwicklungen gesehen werden. Jedenfalls wäre ohne die durchweg dezentralen oder Bottom-up Ansätze unter der enormen Komplexität (zeitlich wie auch durch die konfligierenden Anforderungen) keine umfassende Systementwicklung möglich gewesen. In unserem DEZENT Projekt haben wir gerade die letzte Evaluationsphase in unserer großen E-Techniklaborumgebung abgeschlossen. In den nächsten Monaten steht die Erprobung auf Gemeindeebene an.

6 Literatur

1. O. Krause, S. Lehnhoff, C. Rehtanz, E. Handschin, H.F. Wedde. On-line Stable State Determination in Decentralized Power Grid Management, in: *Proceedings of the 16th Power Systems Computation Conference (PSCC'08)*, Glasgow/ UK, 2008-07-14
2. C. Rehtanz, H.F.Wedde. Development of Innovative Strategies for Integrating Distributed Energy Storages like Batteries and Electric Vehicles into Distribution Networks Based on Multi-Agent Technologies. Funded by E.on Research Initiative, 2008-2012; unter *http://varma.ece.cmu.edu/Auto-CPS/*
3. H.F.Wedde, S.Lehnhoff, E.Handschin und O.Krause. Dezentrale vernetzte Energiebewirtschaftung im Netz der Zukunft. In: *Wirtschaftsinformatik* 6/2007, GWV Fachverlage GmbH, 2007-06
4. H. F. Wedde, S. Lehnhoff, E. Handschin and O. Krause. Real-Time Multi-Agent Support for Decentralized Management of Electric Power. *In Proceedings of the 18th Euromicro Conference on Real-Time Systems*, Dresden, Germany, 2006, Euromicro, IEEE Computer Society Press.
5. H. F. Wedde, S. Lehnhoff, C. Rehtanz and O. Krause. Distributed Learning Strategies for Collaborative Agents in Adaptive Decentralized Power Systems. *In Proceedings of the 15th Int'l Conference on Engineering of Computer Based Systems*, Belfast, Ireland, 2008, IEEE Computer Society Press.
6. Horst F. Wedde, Sebastian Lehnhoff, Bernhard van Bonn et al.: Highly Dynamic and Adaptive Traffic Congestion Avoidance in Real-Time Inspired by Honey Bee Behavior. PEARL Workshop 2007; Springer „Informatik aktuell"