

## **Lastadaption von Haushaltsgeräten durch Verbundsteuerung**

Ontje Lünsdorf

Prof. Dr. Michael Sonnenschein

OFFIS – Institut für Informatik

### **Einleitung**

Durch den Einsatz regenerativer Energiequellen erhöht sich die Unsicherheit bei Angebotsprognosen. Dadurch werden häufiger Energieengpässe oder –überschüsse entstehen, deren Ausgleich durch die Bereitstellung von Regelenergie bewerkstelligt werden muss. Im FEN werden in mehreren Teilprojekten Maßnahmen zur Bereitstellung von Regelenergie untersucht. In TP 1 wird eine neue Betriebsweise für BHKWs simulativ erprobt, während in TP 7 Betrachtungen zu elektrischen Energiespeichern angestellt werden.

In TP 6 sind Kleinverbraucher in Haushalten der Untersuchungsgegenstand. Es sollen Methoden zur Ansteuerung der Kleinverbraucher, wie z.B. Kühlschränken, entwickelt werden, um gesteuerte Lastverschiebungen zu ermöglichen. Solche Methoden sind im Bereich des Demand-Side Management einzuordnen, der den generellen Eingriff in das Verbrauchsverhalten beschreibt. Demand-Side Management Maßnahmen finden bereits bei Großkunden im industriellen Sektor Anwendung. Im Bereich der privaten Haushalte ist dies jedoch nicht der Fall. Da aber etwa ein Viertel der Stromnachfrage in privaten Haushalten generiert wird und diese wesentlich zu den Peakzeiten beitragen, bieten sich Demand-Side Management Maßnahmen für Load-Shaping hier besonders an.

Im Vergleich zum Industriesektor zeichnen sich private Haushalte durch ihre große Anzahl und geringen Lasten aus. Deshalb sind die Kommunikationsinfrastruktur und der Aufwand für Gerätecontroller als das kritische Element für den Einsatz von Demand-Side Management Maßnahmen anzusehen. Je nach Typ unterscheidet sich der Umfang, mit dem in die Betriebsweise eines Haushaltsgeräts eingegriffen werden kann. Insbesondere ist dabei sicherzustellen, dass der Eingriff nicht zu Lasten des Nutzers fällt.

In [1] wurde bereits das Speicher- und Lastverschiebungspotenzial kleiner thermischer Speichergeräte wie z.B. Warmwasserboilern identifiziert. Dieses wurde in [2] typspezifisch genauer untersucht und grundsätzlich quantifiziert. Die Smart-A Studie [3] betrachtet darüberhinaus auch Haushaltsgeräte ohne thermischen Speicher und gibt Vorschläge zu möglichen Demand-Side Management Maßnahmen. Diese reichen von Verhaltensänderungen des Benutzers bis zu selbstständig agierenden Hardwarecontrollern. Im Vergleich ergibt sich,

dass die größten Lastverschiebungen durch automatische bzw. entfernt gesteuerte Eingriffe zu erreichen sind.

Über das Erneuerbare-Energien-Gesetz von 2000 ist durch den Gesetzgeber der Einsatz von genaueren Messzählern in Neubauten zum 01.01.2010 vorgeschrieben. Im Zuge dieser Modernisierung wird eine neue Kommunikationsinfrastruktur entstehen, die die Grundlage für die Ansteuerung von Haushaltsgeräten bilden kann.

Im Gegensatz zu aktuellen Steuerungsmethoden auf Haushaltsebene, wie der Rundsteuerung, erlaubt die SmartMetering-Infrastruktur komplexere Steuerungsmechanismen.

## Überblick über Haushaltsgeräte

Haushaltsgeräte können wie in Tabelle 1 dargestellt typisiert werden. Lastverschiebungen über direkte Steuerungsmechanismen sind nur bei programm- oder aufgabengetriebenen Geräten zu realisieren. Der Verbrauch von benutzergetriebenen Geräten kann nur vom Nutzer selbst bestimmt werden und somit nicht durch automatische Eingriffe. Hierfür eignen sich z.B. preisliche Motivationen, welche hier aber nicht behandelt werden. Wie in Tabelle 1 dargestellt beträgt der Anteil der programm- und benutzergetriebenen Geräte am Stromverbrauch in privaten Haushalten etwa 54% <sup>1</sup>.

|                              | <b>Programmgetrieben</b><br><i>Kühlschrank,<br/>Wärmepumpe, ...</i> | <b>Aufgabengetrieben</b><br><i>Geschirrspüler,<br/>Waschmaschine, ...</i> | <b>Benutzergetrieben</b><br><i>Licht, TV, Herd, ...</i> |
|------------------------------|---|---|---|
| <b>Zweck</b>                 | Einhalten eines bestimmten Zustands (Innentemperatur)               | Erfüllung einer Aufgabe zu gegebener Zeit                                 | Gewährleistung der On-demand Verfügbarkeit              |
| <b>Kontrolle</b>             | Vollautomatisch möglich   | Halb-automatisch (Benutzer muss Zeitpunkte spezifizieren)                 | Nur vom Benutzer  |
| <b>Stromverbrauchsanteil</b> | ~ 33%   | ~ 21%   | ~ 46%   |

Tabelle 1: Typisierung von Haushaltsgeräten

In TP 6 soll untersucht werden, wie Demand-Side Management Maßnahmen für programm- und aufgabengetriebene Haushaltsgeräte realisiert werden können und welches Potenzial für Lastverschiebungen erschließbar ist.

## Modellierte Haushaltsgeräte

<sup>1</sup> Quelle: Energieagentur NRW 2006, <http://www.ea-nrw.de/infopool/page.asp?InfoID=4106> letzter Zugriff 20.11.09

Zur Untersuchung der Steuerungsmöglichkeiten von Haushaltsgeräten wurden diese in Simulationsmodellen nachgebildet.

Als Repräsentant für programmtriebene Geräte wurden Kühlschränke gewählt. Ein Kühlschrank verfügt über einen Kühlkompressor, der in regelmäßigen Abständen die Wärme aus dem Inneren abführt.

Zur Modellierung des Kühlschranks wurde die folgende Differenzgleichung aus [4] verwendet:

$$T_{i+1} = \varepsilon \cdot T_i + (1 - \varepsilon) \cdot \left( T^o - \eta \cdot \frac{q_i}{A} \right), \quad \varepsilon = e^{-\frac{\tau \cdot A}{m_c}}$$

Gleichung 1: Differenzgleichung zur Modellierung eines Kühlschranks

Die Temperatur des nächsten Zeitschritts  $T_{i+1}$  ergibt sich aus der aktuellen Temperatur  $T_i$  sowie der Umgebungstemperatur  $T^o$ . Wichtigste Einflussgröße ist dabei die Systemträgheit  $\varepsilon$ , die sich aus der Isolierung  $A$ , der thermalen Masse  $m_c$  und dem Zeitintervall  $\tau$  zusammensetzt. Das Kühlaggregat ist durch seine Leistungsaufnahme  $q_i$  und die Effizienz  $\eta$  beschrieben.

Repräsentativ für aufgabengetriebene Geräte wurde das Verhalten von Geschirrspülern modelliert. Geschirrspüler folgen einem internen Programmablauf, bei dem in verschiedenen Phasen Wasser auf ca. 60°C erhitzt werden muss, wobei die Leistungsaufnahme zwischen 1800 und 2500 Watt liegt. In Abbildung 2 ist der durchschnittliche Stromverbrauch eines Geschirrspülers dargestellt [3]. In der initialen Heizphase wird das Wasser erhitzt und mit dem Waschmittel vermengt. In einer zweiten Heizperiode wird das Wasser auf Waschtemperatur erhitzt. In der anschließenden Waschphase wird nur Strom zur Zirkulation des Wassers benötigt. Eine letzte Heizphase ist notwendig um den Spülvorgang einzuleiten.

## Steuerungsansätze für Haushaltsgeräte

Programmtriebene Geräte sind in der Regel dafür verantwortlich einen bestimmten Zustand zu wahren. Ein Kühlschrank muss bspw. die Innentemperatur in einem bestimmten Intervall halten. Dies geschieht üblicherweise in Arbeitszyklen, die in periodischen Abständen Energie verbrauchen. In Abbildung 1 ist die Temperatur und der Stromverbrauch eines Kühlschranks dargestellt.

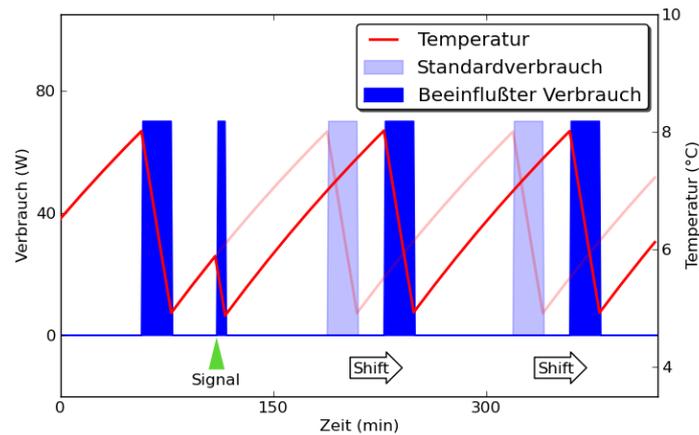


Abbildung 1: Eingriff in die Betriebsweise eines Kühlschranks

Bei Erreichen der oberen Temperaturschwelle von 8°C startet das Kühlaggregat, wodurch die Innentemperatur sinkt. Unterschreitet diese die untere Temperaturschwelle stoppt das Kühlaggregat und der Kreislauf wiederholt sich. Durch ein vorzeitiges Starten des Kühlaggregats können nachfolgende Kühlzyklen und somit der Stromverbrauch verschoben werden.

Während programmgetriebene Geräte relativ unabhängig von externen Einflussgrößen sind, sind aufgabengetriebene Geräte abhängig vom Benutzerverhalten. Geschirrspüler müssen z.B. vom Nutzer beladen und gestartet werden. Verfügt das Gerät über eine Zeitschaltuhr lässt sich der Verbrauch verschieben. Statt den Betrieb des Geräts sofort zu initiieren kann der Benutzer einen gewünschten Zeitpunkt einstellen, zu dem die Aufgabe erledigt sein soll. Ca. 25% aller Geschirrspüler in Deutschland verfügen über eine Zeitschaltuhr [3].

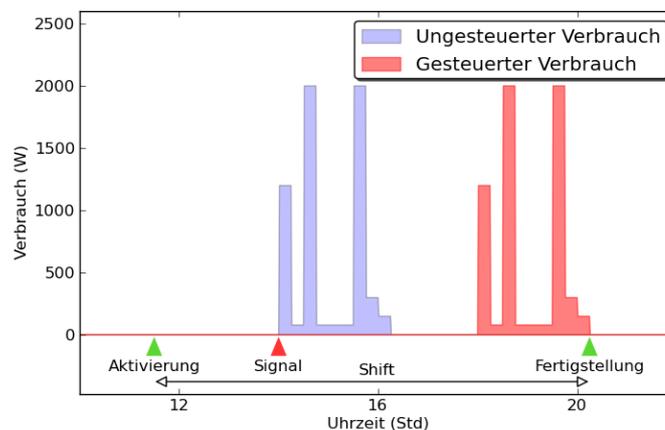


Abbildung 2: Lastverschiebung bei Geschirrspülern

Das Gerät könnte so wie in Abbildung 2 dargestellt zu einem beliebigen Zeitpunkt zwischen Aktivierungs- und dem gewünschten Fertigstellungszeitpunkt starten. Im ungesteuerten Betrieb startet das Gerät zum letzt möglichen Zeitpunkt von dem Fertigstellungszeitpunkt. Ein vorzeitiges Starten verschiebt demzufolge die Last vom ursprünglichen Fertigstellungszeitpunkt.

## Virtuelles Gerät

Die Steuerung von Haushaltsgeräten ließe sich wie im vorangegangenen Abschnitt realisieren. Zu einer gezielten Lastverschiebung eignen sich diese Verfahren jedoch nicht, da der Effekt eines Signals nicht ohne Kenntnis des internen Zustands eines Geräts vorhersagbar und somit nicht planbar wäre.

Da die internen Zustände der Haushaltsgeräte jedoch durch externe Einflüsse verrauscht werden, stellt sich bei der Betrachtung von großen Verbunden eine stabile Verbrauchskurve ein.

Ähnlich verhält es sich bei der Behandlung von Steuerungssignalen. Dank dieser Eigenschaft können die Auswirkungen von Signalen vorhergesagt werden, ohne dass die internen Zustände der Geräte bekannt sein müssen.

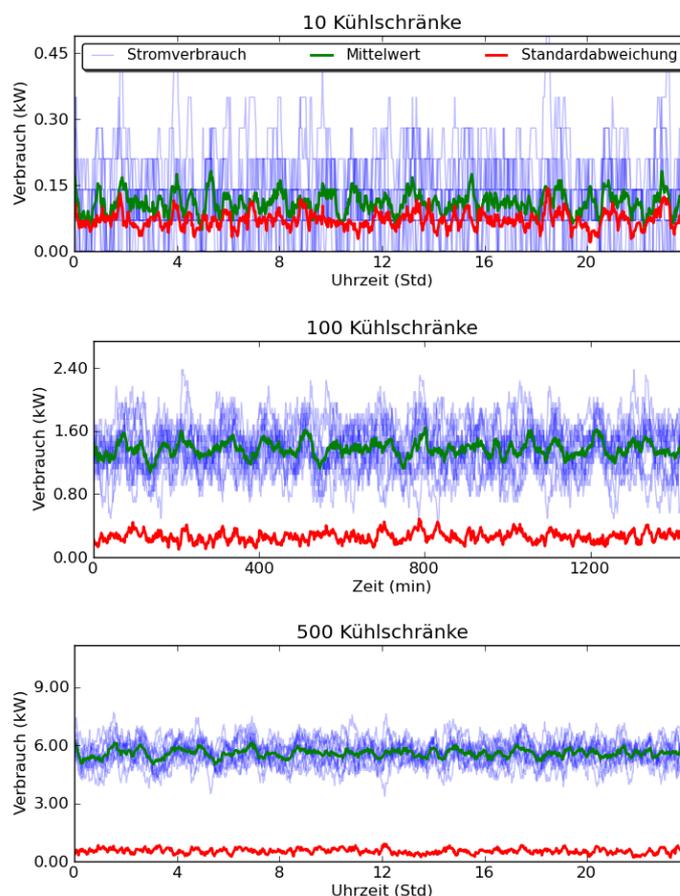


Abbildung 3: Stromverbrauch von unterschiedlich großen Kühlschränkeverbänden

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der Simulation des Stromverbrauchs von verschiedenen großen Verbänden von Kühlschränken. Die Simulation wurde zehnmal durchgeführt und der Mittelwert sowie die Standardabweichung des Stromverbrauchs berechnet. Anhand der Relation zwischen Mittelwert und Standardabweichung ist zu erkennen, dass sich der Verbrauch mit zunehmender Anzahl an Geräten stabilisiert.

Ein solcher Verbund wird im Folgenden als *virtuelles Gerät* bezeichnet. Ein virtuelles Gerät ist ein logisches Konstrukt, dessen Aufgabe die Verteilung von Informationen ist.

Haushaltsgeräte kommunizieren mit dem virtuellen Gerät, um sich an- oder abzumelden. Das virtuelle Gerät selbst veröffentlicht Informationen zu seinen Lastverschiebepotenzialen und verteilt empfangene Steuerungssignale an die Haushaltsgeräte weiter. Ein virtuelles Gerät präsentiert sich somit nach außen als steuerbare Last.

Im Folgenden werden exemplarisch zwei Verbände von Haushaltsgerätetypen hinsichtlich ihrer Eignung zum Lastmanagement untersucht.

## Simulationsergebnisse

In Abbildung 4 ist der Stromverbrauch von insgesamt 10 Simulationen eines Verbund aus 500 Geschirrspülern abgebildet. Die Einsatzwahrscheinlichkeiten der Geschirrspüler sind nach [3] gewählt. Die Zeitschaltuhr wird dabei gleichverteilt auf einen Zeitpunkt zwischen 0 und 4 Uhr eingestellt.

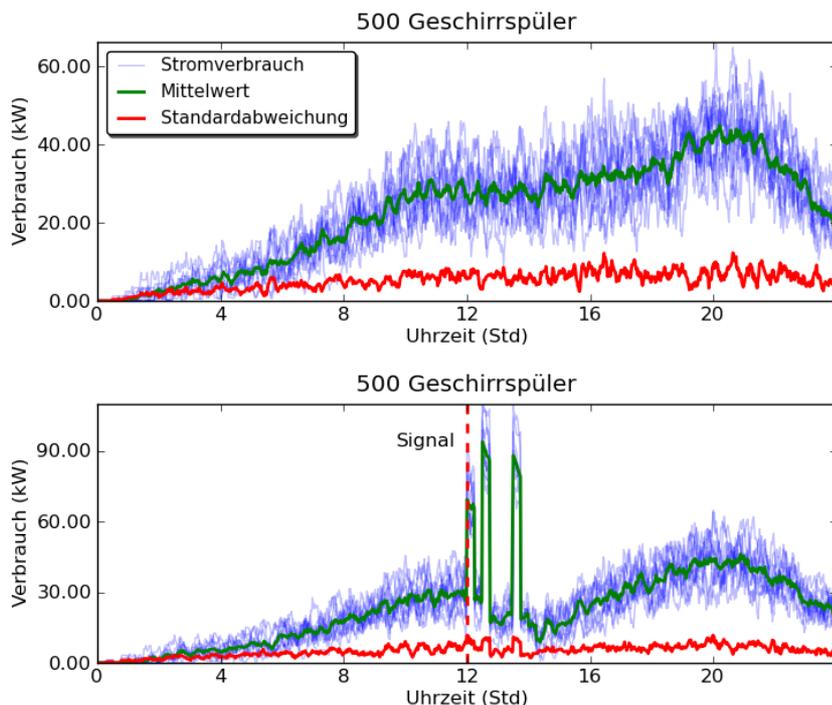


Abbildung 4: Stromverbrauch von 500 Geschirrspülern: ungesteuert, gesteuert

Wird über ein Steuerungssignal der Start der Geschirrspüler forciert, verschiebt sich der Verbrauch wie im unteren Graphen gezeigt. Bei dem dargestellten Signal um 12 Uhr wurde die Last vom Peak vorgezogen. Abbildung 5 zeigt die Differenz zwischen ungesteuertem und gesteuertem Verbrauch zu verschiedenen Tageszeitpunkten, welche somit den Lastverschiebungseffekt beschreibt. Bedingt durch die Nutzungswahrscheinlichkeiten variiert der Lastverschiebungseffekt je nach Tageszeitpunkt. In diesem Szenario sind bei 500 Geschirrspülern über Steuerungssignale zwischen 15 kWh (0 Uhr) und 198 kWh (18 Uhr) verschiebbar.

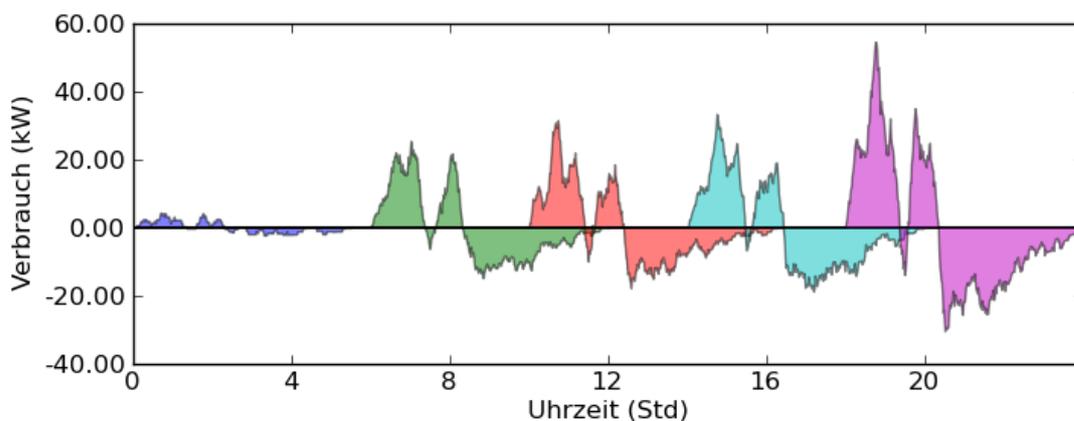


Abbildung 5: Lastverschiebung Geschirrspüler zu verschiedenen Tageszeitpunkten

In Abbildung 6 ist der Gesamtstromverbrauch eines virtuellen Geräts bestehend aus 500 Kühlschränken dargestellt. Alle Kühlschränke besitzen in diesem Szenario dieselbe Isolierung und Größe. Die thermale Masse ist um 19,95 kWh/°C mit einer Abweichung von 2,5 kWh/°C gleichverteilt. Das Kühlaggregat von 21% der Kühlschränke ist zu Simulationsstart aktiviert, was dem Durchschnitt im ungesteuerten Verhalten entspricht. Die initiale Innentemperatur ist zwischen den Temperaturschranken 5°C und 8°C und die Außentemperatur mit einer Abweichung von 2,5°C um 17°C gleichverteilt. Bei jedem Simulationslauf werden diese Voraussetzungen basierend auf Pseudo-Zufallszahlen neu berechnet. Das virtuelle Gerät initiiert über ein Steuerungssignal das Starten aller Kühlaggregate. Wie zu beobachten ist, stellt sich die Verbrauchsänderung des Verbunds in allen 10 Simulationen ein und ist somit unabhängig von den Einzelzuständen der Kühlschränke.

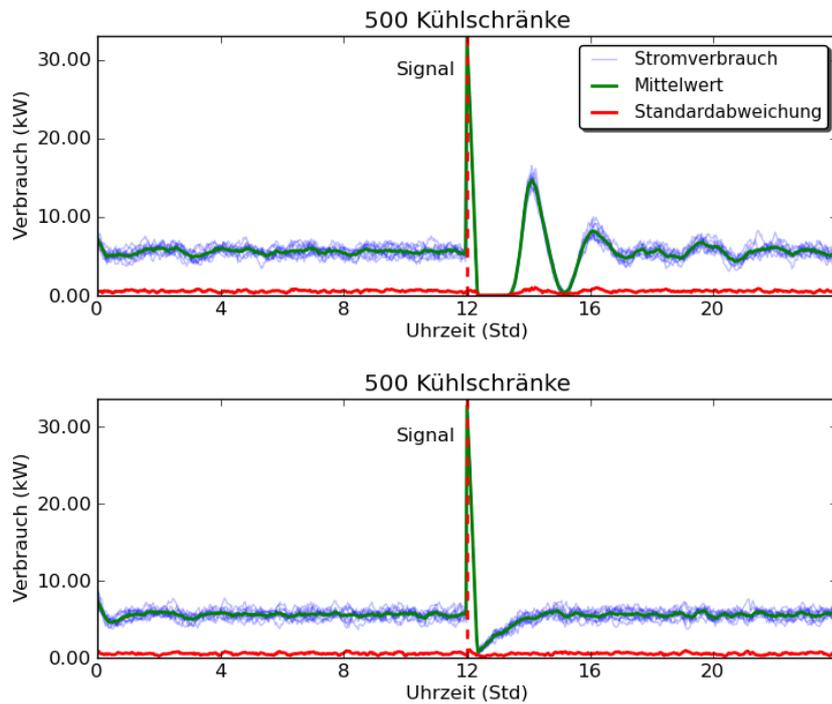


Abbildung 6: Virtuelles Gerät aus 500 Kühlschränken; ungedämpft, gedämpft

Da programmgetriebene Geräte allerdings nur in geringerem Maße von externen Einflüssen abhängig sind, synchronisieren sich ihre Zustände durch den Einsatz von Steuerungssignalen. Dadurch entstehen Oszillationen die gedämpft werden müssen, damit das System wieder in seinen Ausgangszustand zurückkehrt und bspw. weitere Signale behandelt werden können. Dazu wurde ein Desynchronisationsmechanismus [5] entwickelt, der über Randomisierung Oszillationen effektiv verhindern kann. Im unteren Graphen aus Abbildung 6 ist das Steuerungssignal mit aktivierter Desynchronisation dargestellt, welche die Oszillation unterbindet.

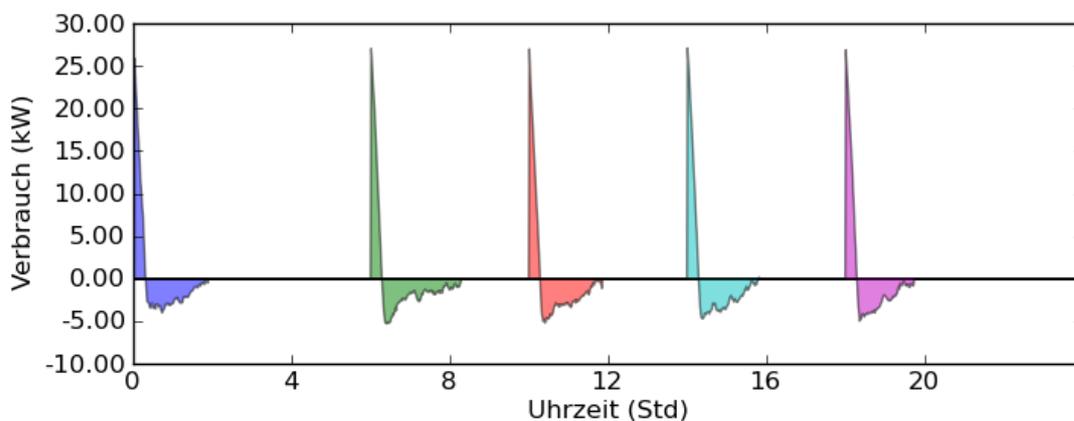


Abbildung 7: Lastverschiebung Kühlschränke zu verschiedenen Tageszeitpunkten

Die durch das gedämpfte Signal verursachte Lastverschiebung ergibt sich aus der Differenz zu dem Standardverbrauch. Wie in Abbildung [7] zu erkennen ist, sind die Lastverschiebungen bei Kühlschränken im Gegensatz zu Geschirrspülern unabhängig vom Tageszeitpunkt. In diesem Szenario lassen sich durch ein Steuerungssignal durchschnittlich 16 kWh der Leistungsaufnahme von 500 Kühlschränken bewegen.

## Anwendungsszenario

Virtuelle Geräte können als steuerbare Lasten eingesetzt werden. Die folgenden, vorläufigen Ergebnisse zeigen ein mögliches Anwendungsszenario.

Durch die gezielte Einplanung von Steuersignalen können Fahrpläne erstellt werden, mit denen vorgegebene Lastkurven abgefahren werden können. Abbildung 8 zeigt den Stromverbrauch in einem Szenario mit 30 virtuellen Geräten, jeweils bestehend aus 1000 Kühlschränken und 10 virtuellen Geräten bestehend aus 1000 Geschirrspülern. Die jeweiligen physikalischen Geräte sind wie oben parametrisiert; am Vortag fand kein Steuerungseingriff statt. Der linke Graph stellt den ungesteuerten Verbrauch der Haushaltsgeräte dar.

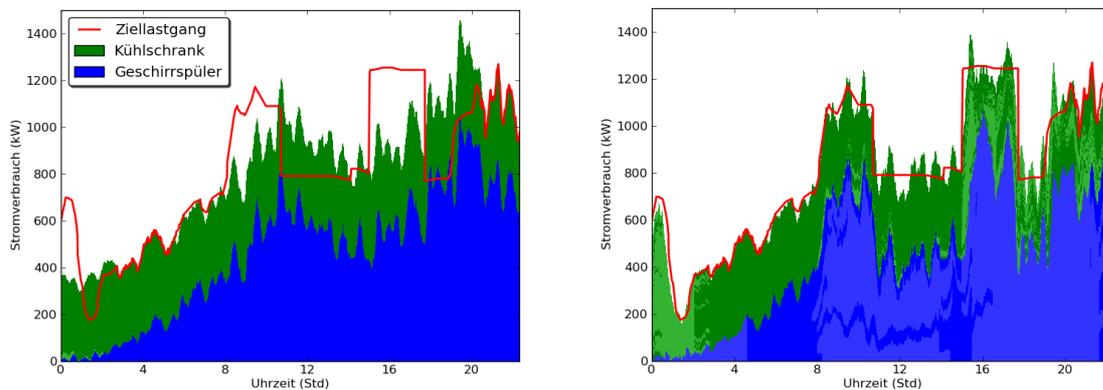


Abbildung 8: Einsatzplanung von virtuellen Geräten. Links ungesteuerter Verbrauch, Rechts gesteuerter Verbrauch. Hellere Flächen repräsentieren Steuersignale

Mittels eines einfachen Planungsalgorithmus wurde ein Fahrplan aus Steuersignalen für die virtuellen Geräte erstellt, damit sich der Gesamtlastgang dem Ziellastgang annähert. Dieser weicht in drei Zeitfenstern vom ursprünglichen ab. Zwischen 0 und 1 Uhr Nachts wird eine kurzzeitige Fluktuation im Angebot ausgeglichen. Dies geschieht nur durch Verbrauchsadaptionen der Kühlschränke, da Geschirrspüler in dieser Zeitspanne nicht in Betrieb sind. Im zweiten und dritten Zeitfenster wird der Stromverbrauch während des Mittagpeaks bzw. des Abendpeaks reduziert, in dem der Verbrauch vorgezogen wird. Während die Abweichung des ursprünglichen Lastgangs vom Ziellastgang 3,177 MWh

betrug, wurde diese durch die Einplanung der Steuersignale auf 1,05 MWh reduziert. Insgesamt wurden 2,872 MWh Energie bewegt.

## **Weiteres Vorgehen**

Die statische Zuordnung von Haushaltsgeräten zu virtuellen Geräten wie in den obigen Szenarien ist in der Realität nicht möglich. Der Bestand der Haushaltsgeräte unterliegt durch den ständigen Austausch durch neue Gerätemodelle Schwankungen, die eine Rekonfiguration der virtuellen Geräte zur Folge hätten. Außerdem unterliegt der Betrieb der Geräte – insbesondere von aufgabengetriebenen - externen Einflüssen, wie dem Nutzerverhalten oder der Umgebungstemperatur.

Statt einer statischen muss deshalb eine dynamische Zuordnung mit den folgenden Eigenschaften entwickelt werden:

- Automatische Integration neuer Haushaltsgeräte
- Überwachung des Bestands, um den Ausfall von Geräten zu registrieren
- Adaption an Stromverbrauchsänderungen

Zusätzlich müssen weitere Gerätemodelle in das System integriert und untersucht werden. Aufbauend auf den aggregierten Steuerungssignalen der virtuellen Geräte wird anschließend ein Planungsalgorithmus entwickelt. Mit Hilfe dieses Algorithmus können verschiedenen Lastverschiebungen koordiniert werden um den Gesamtverbrauch der Haushaltsgeräte an eine Zielkurve anzunähern.

Insgesamt umfasst werden die folgenden Komponenten entwickelt:

- Simulationsmodelle für Haushaltsgeräte
- Nutzungsszenarien
- Dynamischer Zuordnungsalgorithmus für virtuelle Geräte
- Planungsalgorithmus zur Lastadaption der Haushaltsgeräte

Diese Komponenten sind in das Gesamtsimulationsmodell zu integrieren, so dass das Potenzial der Verbundsteuerung von Kleinverbrauchern abgeschätzt werden kann.

## **Zusammenfassung und Ausblick**

Durch die anstehende Einführung von SmartMetern und die damit verbundene Kommunikationsinfrastruktur ergeben sich neue Möglichkeiten für Demand-Side Management Maßnahmen in dem Bereich privater Haushalte. Kleinverbraucher können durch Verwendung von einfachen Steuerungssignalen im Verbrauchsverhalten beeinflusst werden.

Aufgrund der großen Anzahl an Haushaltsgeräten können allerdings nicht direkte Regelungssysteme verwendet werden. Die Verbundsteuerung erlaubt einen prognostizierbaren Eingriff in das Verbrauchsverhalten ohne Kenntnis über den genauen Zustand der Haushaltsgeräte.

Neben der Modellierung von Nutzerverhalten und weiteren Gerätetypen ist auch das Zuordnungsverfahren von Haushaltsgeräten in virtuelle Geräte Gegenstand der anstehenden Arbeiten. Die Zuordnung muss dabei der hohen Dynamik im Haushaltsgerätebestand, aber auch im Geräteverhalten selbst gerecht werden. Virtuelle Geräte müssen sowohl das Hinzufügen neuer als auch das Entfernen alter Haushaltgeräte registrieren und angemessen darauf reagieren können. Änderungen des Stromverbrauchverhaltens wie z.B. durch steigende Umgebungstemperaturen oder geändertes Nutzerverhalten (Ferien) sollten ebenfalls behandelt werden.

Darüber hinaus ist ein Planungsalgorithmus zu entwerfen, mit dem Fahrpläne für virtuelle Geräte erstellt werden können. Mit diesem können schließlich die Auswirkungen von Demand-Side Management auf Haushaltsebene in verschiedenen Szenarien bewertet werden.

## **Literatur**

- [1] KLOBASA, M. OBERSTEINER, C.: Technical Constraints on and Efficient Strategies for the Integration of Wind Energy. *Energy&Environment*, 2006
- [2] STADLER, I.: Nichtelektrische Speicher für Elektrizitätsversorgungssysteme mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Habilitation, University of Kassel, 2005
- [3] STAMMINGER, R.: Smart Domestic Appliances in Sustainable Energy Systems (Smart-A), Universität Bonn, 2009.
- [4] STADLER, M., KRAUSE, W., SONNENSCHNEIN, M., VOGEL, U.: Modelling and Evaluation of Control Schemes for Enhancing Load Shift of Electricity Demand for Cooling Devices. *Environmental Modelling and Software*, 2009
- [5] HINRICHS, C., VOGEL, U. SONNENSCHNEIN, M.: Modelling and Evaluation of Desynchronization Strategies for Controllable Cooling Devices. In I. Troch, M. Breitenacker, eds.: *Proc. Mathmod 2009 - 6th Vienna International Conference on Mathematical Modelling*