

# Lastmanagement mit intelligenten Haushaltsgeräten und Elektrofahrzeugen – eine modellgestützte Analyse

## Load management of smart household appliances and electric vehicles – a model-based analysis

Thomas Kaschub (kaschub@kit.edu), Alexandra-Gwyn Paetz, Patrick Jochem, Wolf Fichtner  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion, Lehrstuhl für Energiewirtschaft, Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe

### Kurzfassung

Mithilfe eines optimierenden Modells werden Lastverschiebepotenziale durch automatisierte Steuerung verschiebbarer Haushaltslasten auf Basis von dynamischen Tarifen untersucht. Bei den 1 000 modellierten Haushalten sind auch Elektrofahrzeuge berücksichtigt. Es zeigt sich, dass die Lastverschiebepotenziale von intelligenten Haushaltsgeräten im Vergleich zu Elektrofahrzeugen gering sind. Dennoch ist der Einfluss der Haushaltsgeräte erheblich, insbesondere wenn alle Haushalte mit entsprechenden Geräten ausgestattet wären.

### Abstract

We analyze the load-shifting potentials of households with automatic demand management based on dynamic pricing. Therefore, we developed an optimizing model with 1 000 households, equipped with smart appliances and electric vehicles. The results show that the load-shifting potentials of household appliances are relatively low compared to those of electric vehicles. However, their impact is remarkable – especially if all households were equipped with smart appliances.

## 1 Einleitung

Im Kontext der Veränderungen des Elektrizitätssystems hin zu mehr Erzeugung aus erneuerbaren Energiequellen und zunehmend dezentraler Bereitstellung, rückt die Harmonisierung von Angebot und Nachfrage in den Handlungsfokus. Da mit dem Ausbau der Erzeugungskapazitäten aus erneuerbaren Energien reduzierte Steuerungsmöglichkeiten auf der Erzeugungsseite einhergehen, gewinnt die Laststeuerung auf der Nachfrageseite zunehmend an Bedeutung.

Lastmanagement beim Verbraucher ist keine neue Erscheinung. Seit vielen Jahren kommt Lastmanagement in energieintensiven Industriebetrieben zum Einsatz [1]. Im Haushaltssektor werden Nachtspeicherheizungen seit Jahrzehnten zur Steigerung der Grundlast in den Nachtstunden eingesetzt. Aus der gleichen Motivation werden vermehrt einfache zeitabhängige Preissignale angeboten, um Haushalte zur Lastverlagerung zu bewegen. Ähnliches wird mit dynamischen Strompreissignalen in Feldversuchen untersucht. Bislang können jedoch Haushalte nur auf manuellem Wege die Nutzung der Haushaltsgeräte auf sich verändernde Strompreise anpassen. Kommen Zeitschaltuhren zum Einsatz kann dies als eine halbautomatisierte Lösung angesehen werden. Vollautomatisierte Lastverlagerung in Haushalten steht aufgrund der Fortschritte in der IKT erst seit wenigen Jahren im Fokus der Forschung.

Parallel zu diesen Veränderungen in der Energiewirtschaft wird in den letzten Jahren die Elektrifizierung der Antriebstechnik im motorisierten Individualverkehr vorangetrieben. Dies führt zu einer Kopplung mit dem Elektrizitätssystem.

Sollte eine breitere Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen (E-Kfz) realisiert werden, entsteht eine herausfordernde neue Lastkategorie im Elektrizitätssystem [2, 9]. Sie ist gekennzeichnet durch eine hohe Leistungs- und Energienachfrage pro Ladevorgang. Gleichzeitig bieten E-Kfz auch aufgrund ihrer langen Standzeiten hohe Freiheitsgrade beim Ladeprozess und damit die Möglichkeit zu Zeiten überschüssiger Erzeugung aus erneuerbaren Energien diese aufzunehmen und damit einen Beitrag zur Integration erneuerbarer Energien zu leisten [3]. Dazu ist eine zielgerichtete (und automatisierte) Lastverlagerung notwendig.

Dieser Beitrag widmet sich daher der integrierten Analyse von Lastverschiebepotenzialen (LVP) bei Elektrofahrzeugen und ausgewählten Haushaltsgeräten unter dem Einsatz einer automatisierten Laststeuerung. Diese modellgestützte Untersuchung ist Baustein einer verzahnten Forschung, die auch experimentelle Versuchsreihen in einem eigens errichteten Energy Smart Home Lab (ESHL) am KIT und verhaltenswissenschaftliche Forschung beinhaltet, wie sie beim letzten VDE-Kongress [4] vorgestellt wurde.

## 2 Lastmanagement

Das Lastmanagement unterteilen wir in zwei Kategorien: direkte Lastkontrolle und anreizbasierte Laststeuerung [5]. In beiden Fällen sind Anreize erforderlich um die Nachfrage zu beeinflussen. Es sind sowohl nicht-monetäre (bspw. gesonderte Informationen) als auch monetäre (bspw. Strompreissignale) Anreize denkbar. Unter der Annahme rationaler Entscheidungen führen monetäre

Anreize zu direkten Verhaltensänderungen und werden daher in Form von dynamischen Tarifmodellen zur anreizbasierten Laststeuerung untersucht.

## 2.1 Tarifmodelle

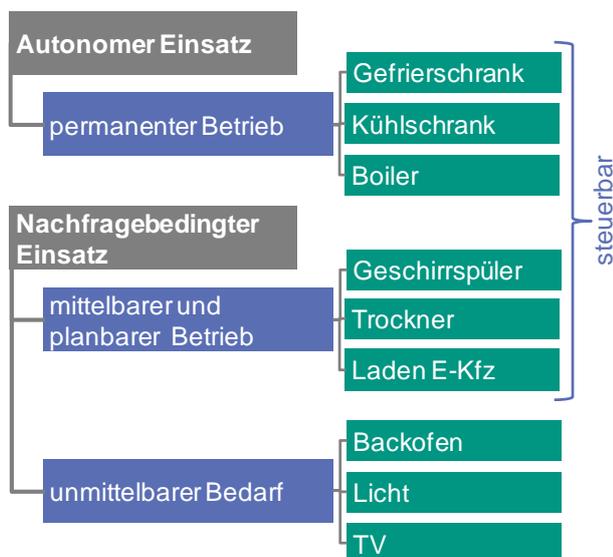
Die derzeit gängigen Haushaltstarife werden auf Basis der Stromgestehungskosten (inkl. Netzentgelt und Vertrieb) kalkuliert. Hinzu kommen Steuern und Abgaben. Beim weitverbreiteten Grundpreistarif werden Vertriebs- und Leistungskosten über einen pauschalen Grundpreis (bspw. 5 €/Monat) und die Arbeitskosten über einen konstanten Arbeitspreis (bspw. 25 ct/kWh) abgerechnet. In der Regel bleiben Arbeitspreise über einen Zeitraum von zwölf Monaten konstant.

Bei dynamischen Tarifmodellen variiert der Arbeitspreis entweder in Abhängigkeit des Nachfragezeitpunktes (zeitvariabler Tarif) oder der Haushaltslast zum Zeitpunkt der Nachfrage (lastvariabler Tarif). Welchen Wert der Arbeitspreis zu welchem Zeitpunkt annimmt wird in den derzeitigen Feldtests i. d. R. 24 Stunden im Voraus kommuniziert. Da beim Tag-Nacht-Tarif (HT/NT) die Werte sowohl der Arbeitspreise als auch die Tarifzeiten im Tagesverlauf konstant bleiben, ist dieses Tarifmodell als statisch zu bezeichnen (siehe [6] für eine Klassifizierung).

Für die vorliegende Analyse wurden ein zeit-, ein lastvariabler sowie ein kombinierter Tarif in das Modell integriert. Der zeitvariable Tarif hat drei Preisstufen (20, 25, 30 ct/kWh). Der lastvariable Tarif sieht einen Preisaufschlag von je 10 ct/kWh beim Überschreiten der Lastgrenzen (0,75 kW und 3 kW) vor. Die Werte lehnen sich dabei an die Testreihen aus dem ESHL an [4] und wurden unter Berücksichtigung der EEX Spotmarktpreise und der Einspeisung aus erneuerbaren Energiequellen kalkuliert.

## 2.2 Steuerbare Verbraucher

Ein Ergebnis aus den Analysen zum Nutzerverhalten im ESHL [4] ist eine Klassifizierung der Haushaltsgeräte nach ihrer Steuerbarkeit (siehe **Bild 1**).



**Bild 1** Verbraucherklassifikation nach Steuerbarkeit

Es wird ersichtlich, dass nur Geräte deren Betrieb entweder permanenter Natur oder zumindest planbar in ihrem Einsatz sind sich für eine Lastverlagerung eignen. Im vorliegenden Modell sind zunächst die Geräte mit planbarem Betrieb sowie die Ladevorgänge für E-Kfz integriert worden.

## 3 Optimiermodell

Mithilfe des Optimiermodells (DS-Opt+) werden die techno-ökonomischen Lastverschiebepotenziale im Haushaltssektor, d. h. die technisch möglichen und aus Haushaltssicht wirtschaftlich nutzbaren untersucht. Dieser Ansatz untersucht damit maximal mögliche Lastverschiebungen im Haushalt bei gleichbleibender Gerätenutzung – wobei Einschränkungen durch das Verhalten der Nutzer vernachlässigt werden. Weiterhin wird die Annahme getroffen, dass ein automatisiertes Lastmanagement (ALM) weitgehend unabhängig von spezifischen Nutzereinflüssen entsprechende Haushaltsgeräte sowie Ladevorgänge optimal einplant. Berücksichtigt wurden die Nutzeranforderungen insofern, dass die Mobilität ohne Einbußen gewährleistet ist und auch der wöchentliche Wasch- und Spülbedarf gedeckt werden. Weiterhin wird angenommen, dass die Elektrizitätsbezugskosten minimiert werden sollen. Die Option im Modell DS-Opt+, die Eigenerzeugung aus Photovoltaik zu berücksichtigen, wurde für die vorliegenden Analysen nicht ausgewählt.

### 3.1 Modellierung der Haushalte

Datengrundlage für das Mobilitätsverhalten ist das Deutsche Mobilitätspanel (MoP) ab 1997, welches repräsentativ das Mobilitätsverhalten deutscher Haushalte abbildet. Die Haushalte und Fahrten des MoP wurden für die Auswahl zweier Wohngebiete (Innenstadt sowie Stadtrand) mit je 500 repräsentativen Haushalten (bzgl. Haushaltszusammensetzung und Ausstattung mit Haushaltsgeräten, Fahrzeugen sowie PV-Anlagen) genutzt. Für die Abbildung der Haushaltslastgänge wurden 20 typische Haushaltslastgänge über den Zeitraum eines Jahres in viertelstündlicher Auflösung genutzt.

### 3.2 Elektrofahrzeuge

Die Fahrzeugtypen der MoP wurden in vier Größenklassen eingeteilt. Neben drei E-Pkw-Segmenten wurden auch E-Roller abgebildet, um damit dem derzeitigen Markterfolg der elektrischen Zweiräder Rechnung zu tragen. Es wurde die Annahme getroffen, dass Haushalte bei einem Wechsel von einem konventionellen Kfz auf ein E-Kfz ein Fahrzeug aus derselben Größenklasse wählen würden. Auf Basis von [8] wurde der Verbrauch für die drei Typen von E-Pkw berechnet (**Tabelle 1**) und auch Zusatzverbraucher wie Klimaanlage berücksichtigt. In den Szenarien wurde sowohl die Marktpenetration von E-Kfz als auch deren Verbrauch entsprechend angepasst.

Fahrzeug-segmente	Batteriekapa-zität in kWh	Verbrauch in kWh/km
E-Pkw klein	20	0,168
E-Pkw mittel	26	0,220
E-Pkw groß	32	0,281
E-Roller	3	0,040

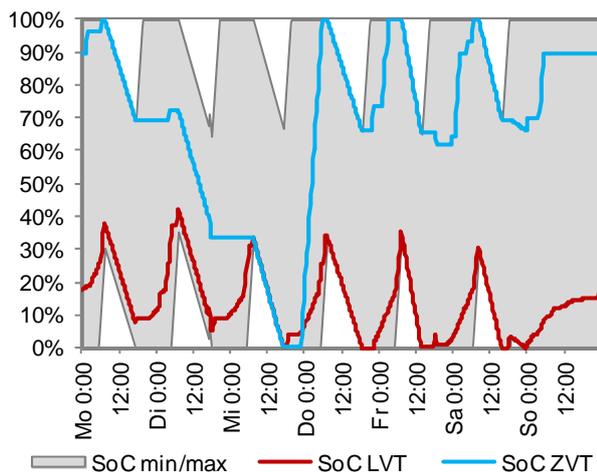
**Tabelle 1** Fahrzeugeinteilung, Batteriegröße und Verbrauch

Aus dem Mobilitätsverhalten der Haushalte sind die Fahr-routen und der Energiebedarf für jedes einzelne Fahrzeug errechnet worden. Davon abgeleitet wird der Ladezustand (SoC, engl. State of Charge) im Zeitverlauf als Variable in das Modell integriert. Der optimale Ladezustand  $SoC(t)$  wird dabei nach Gleichung (1) berechnet:

$$SoC(t) = SoC(t - 1) + [E_{lad.}(t) - E_{entl.}(t)] / E_{Bat} \quad (1)$$

Vorgegeben ist die Batteriekapazität  $E_{Bat}$  und das Entladen  $E_{entl.}(t)$  der Batterie durch die Fahrzeugnutzung. Der Ladevorgang  $E_{lad.}(t)$  wird optimiert und beeinflusst direkt den Ladezustand  $SoC(t)$ . Dieser darf sich lediglich zwischen der Obergrenze  $SoC_{max}(t)$  und der Untergrenze  $SoC_{min}(t)$  bewegen. Diese Grenzen sind definiert durch zwei Ladeszenarien: sofortiges Vollladen und spätestmögliches Minimalladen [9]. Für eine beispielhafte Woche ist der Ladezustand  $SoC(t)$  eines E-Pkw in **Bild 2** dargestellt. Das theoretische Lastverschiebepotenzial (hellgrau) liegt zwischen den Grenz-SoC-Kurven (grau).

Es wird zudem angenommen, dass das Fahrzeug nur zu Hause mit max. 3,7 kW geladen werden kann. Das entspricht sowohl der Erwartung, dass Ladeinfrastruktur zunächst nur oder hauptsächlich zu Hause verfügbar ist [10], als auch dem beobachteten Nutzerverhalten in Feldversuchen der letzten Jahre. Vereinfacht wird die Ladeleistung auch bei hohen SoC-Werten nicht reduziert, was eine gewisse Überschätzung der Lastverschiebung bedeutet.



**Bild 2** Optimierte Ladekurven eines E-Pkw aus zwei Szenarien (LVT bzw. ZVT) inkl. SoC-Grenzen

### 3.3 Haushaltsgeräte

Im Modell werden die einplanbaren Haushaltsgeräte (HHG) mit hohem Leistungs- und Energiebedarf berück-

sichtigt (vgl. Bild 1). Als weiteres Kriterium wurde ein relativ hoher Verbreitungsgrad in deutschen Haushalten vorausgesetzt, so dass Waschmaschine (98% Verbreitung), Wäschetrockner (50%) und Spülmaschine (72%) im Modell integriert wurden [11].

Zur gesonderten Betrachtung der HHG wurden deren Lasten entsprechend ihrer Jahresenergiemengen proportional von den Lastgängen der Haushalte heraus gerechnet. Die Lastgänge der HHG selbst wurden aus den Messdaten im ESHL erzeugt und im Modell vorgegeben.

Grundsätzlich wurde die Einplanung der HHG im Zeitverlauf frei ermöglicht. Da eine halbautomatisierte (bspw. über Zeitschaltuhren) oder eine vollautomatisierte (mit entsprechender IKT-Infrastruktur) Gerätenutzung angenommen wurde, ist die Einplanung der Geräte auch ohne Anwesenheit von Haushaltsmitgliedern und auch nachts möglich. Lediglich zwei Anforderungen sind zu erfüllen: Die Anzahl der Gerätenutzung pro Woche muss für jeden Haushalt (0 bis 5 Einsätze pro Woche) gewährleistet werden und der Einsatz des Trockners ist an den der Waschmaschine gekoppelt.

## 4 Szenarien

Es sind Szenarien konzipiert worden, um das automatisierte Lade- und Lastmanagement (ALM) detailliert analysieren zu können (vgl. **Tabelle 2**).

Szenario	E-Kfz Stk. (Anteil)	untersuchte Tarifmodelle	ALM
Basis	570 (85 %)	Konstant	---
Technik	570 (85 %)	ZVT, LVT, komb.	X
Markt	41 (6 %)	komb: ZVT+LVT	X

**Tabelle 2** Szenarienübersicht für Stadtrand

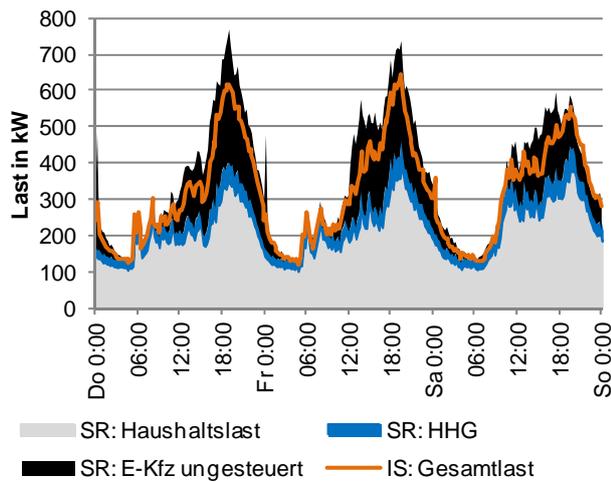
In allen Szenarien sind die modellierten Haushalte mit HHG entsprechend dem vorgegeben Verbreitungsgrad ausgestattet (siehe Abschnitt 3.3). Die Verbreitung der Elektrofahrzeuge wird hingegen variiert: Im Basis- und Technikszenario werden konventionelle Fahrzeuge durch elektrische Varianten in den Haushalten substituiert, in denen sie den gesamten Mobilitätsbedarf decken können – sie also technisch substituierbar sind. Grundlage dafür ist die aktuell verfügbare Technik. Im Marktszenario verfügen hingegen nur die Haushalte über ein Elektrofahrzeug, bei denen sowohl die technischen als auch wirtschaftlichen Anforderungen gedeckt werden können. Um die Wirtschaftlichkeit der E-Kfz gegenüber den konventionellen bewerten zu können, wird eine TCO-Rechnung (engl. Total Cost of Ownership) für jeden Haushalt vorgenommen.

Um möglichen Fortschritten in der Fahrzeugtechnik gerecht zu werden, wird im Marktszenario ein reduzierter Verbrauch um fünf Prozent angenommen, was in etwa dem prognostizierten Wert für das Jahr 2020 entspricht. Ebenso werden entsprechend der angenommenen Marktverbreitung die Preise angepasst. In den übrigen Szenarien wird die derzeitige Technik (Stand 2010) aus Tabelle 1

zugrunde gelegt. Im Basisszenario wurde ein konstanter Arbeitspreis von 25 ct/kWh hinterlegt, um einen ungesteuerten Fall abzubilden.

## 5 Ergebnisse

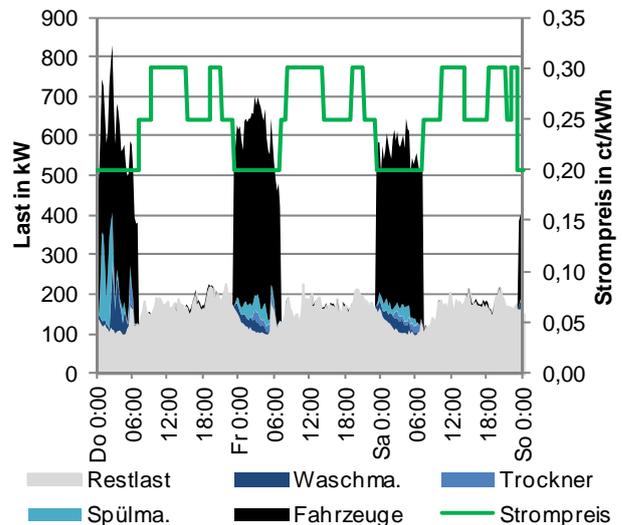
Als Vergleichsgrundlage für die Ergebnisbewertung dient ein Basisszenario in dem keine Laststeuerung vorgenommen wird (vgl. **Bild 3**). Je nach Wohnviertel liegt die Substitutionsrate der Fahrzeuge in der Innenstadt (IS) bei 80 % und am Stadtrand (SR) bei 85 %. In der Innenstadt sind es auch absolut weniger E-Kfz, was die geringeren Lastspitzen (646 kW im Vergleich zu 767 kW am Stadtrand) erklärt.



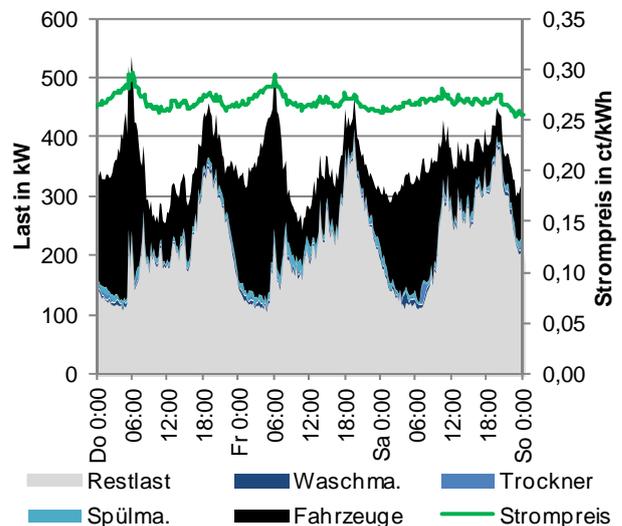
**Bild 3** Basis: Lasten bei sofortigem Laden der E-Kfz zu Hause ohne Ladesteuerung, Stadtrand, Winterwoche

Bei den folgenden Szenarien wird nur noch das Wohnviertel am Stadtrand betrachtet. Das Wohnviertel Innenstadt hat jeweils ähnliche Ausprägungen mit moderat geänderten Verbräuchen von ca. 70 % bei den E-Kfz und ca. 105 % bei den HHG. Die Ergebnisse der Winter-, Übergangs- und Sommerwochen sind von gleicher Struktur, weshalb sich die Auswertungen immer nur auf einen Wochentyp konzentrieren. Für das Technikszenario werden die Ergebnisse zu allen Tarifmodellen vorgestellt, für das Marktszenario hingegen nur der kombinierte Tarif (zeit- und lastvariabel).

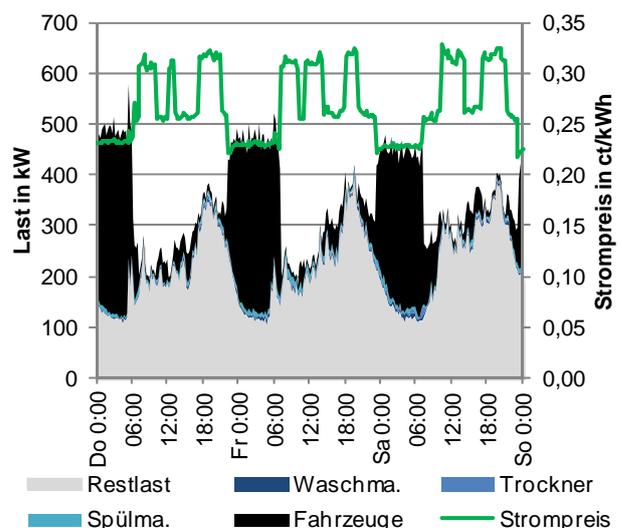
In einem ersten Technik-Szenario, wird der zeitvariable Tarif angewendet (vgl. **Bild 4**). Deutlich zu erkennen sind die starken Lastspitzen in Zeiten mit niedrigem Strompreis. Dargestellt ist hier eine Sommerwoche bei der die Spitzen stärker ausgeprägt sind als im Basis-Szenario. Die Zusammenhänge zeigen sich auch für eine Winterwoche (vgl. dazu **Tabelle 3**, S. 6). Eine automatisierte Lastverlagerung in Niedrigpreiszzeiten bewirkt dadurch auch eine Verlagerung in Nachfragetäler (insb. nachts; vgl. Basis-szenario). Dies funktioniert sowohl für die Nutzung der HHG als auch die Ladevorgänge. Da nun alle verschiebbaren Lasten verlagert werden, entstehen neue Spitzen. Dies wiederum könnte insbesondere hinsichtlich eines ausgeglichenen Lastgangs kontraproduktiv sein.



**Bild 4** Technik 1: Last bei automatischer Steuerung mit ZVT, Stadtrand, Sommerwoche



**Bild 5** Technik 2: Last bei automatischer Steuerung mit LVT, Stadtrand, Winterwoche

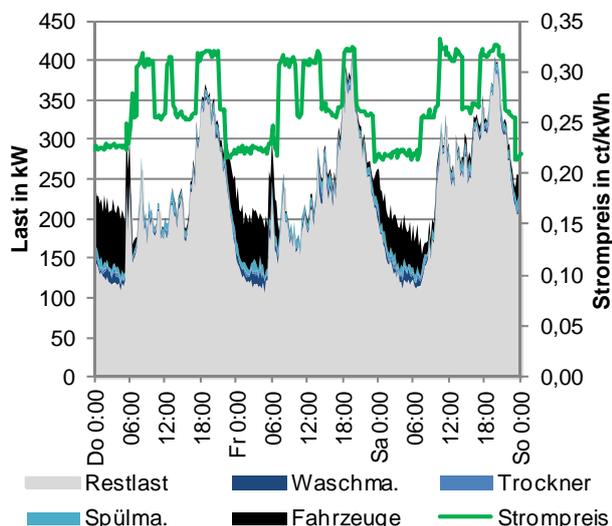


**Bild 6** Technik 3: Last mit automatischer Steuerung mit ZVT und LVT, Stadtrand, Winterwoche

Im Gegensatz zum ZVT wird bei der Anwendung des in Abschnitt 2.1 beschriebenen lastvariablen Tarifs (LVT) ein deutlicher Lastenausgleich durch die verschiebbaren Lasten erreicht (vgl. **Bild 5**). Lastspitzen werden im Vergleich zum Basis-Szenario abgesenkt und Lasttäler aufgefüllt.

Im Ergebnis entsteht dadurch ein ausgeglichener Lastgang (vgl. Tabelle 3). Der in den Bildern dargestellte Strompreis bei LVT ist der berechnete durchschnittliche Strompreis pro Viertelstunde auf Basis der jeweiligen Haushaltsnachfrage. Mit einem Wochenverbrauch von 20.360 kWh der E-Kfz und 3.853 kWh der drei HHG zeigt sich der hohe Einfluss der E-Kfz bei hohen Penetrationsraten, die allerdings mittelfristig nicht absehbar sind. Im folgenden Szenario werden die beiden dynamischen Tarife LVT und ZVT kombiniert (vgl. **Bild 6**). Dadurch ergibt sich eine kombinierte Zielstellung bei der Lastverlagerung. Durch eine abgestimmte Preisspreizung beim ZVT auf die Aufschläge des LVT ergibt sich eine Variabilität der dynamischen Tarife für automatisiertes Lastmanagement, insb. für die hohen Lasten der E-Kfz. Im Vergleich zum Basisszenario werden die Lastspitzen deutlich abgesenkt, die neu entstandenen Spitzen bleiben unter denen des Basisszenarios. Ähnlich zum Technik-Szenario 1 werden die E-Kfz hauptsächlich nachts aufgeladen.

Im letzten Szenario wird für die Verbreitung der E-Kfz eine Marktverbreitung von ca. 6 % angenommen, wie sie vielleicht nach 2020 erreicht werden könnte (vgl. **Bild 7**). Bei den HHG wurde weiterhin eine automatisierte Steuerung angenommen, da diese schon heute bei vielen Geräten zumindest für den halbautomatisierten Fall (bspw. integrierte Zeitschaltuhren und Knitterschutz bei der Waschmaschine) umsetzbar wäre.



**Bild 7** Markt: Last mit automatische Steuerung mit ZVT und LVT, Stadtrand, Winterwoche

Hier zeigt sich, dass die E-Kfz mit einem Wochenverbrauch von 3.592 kWh hinter dem der drei HHG mit 3.853 kWh liegen. Das zeigt die Potenziale der HHG für das Lastmanagement in Haushalten, insbesondere für die kommenden Jahre, auf. Vergleicht man die drei HHG untereinander haben die Spülmaschinen mit einem Anteil

von etwa sieben Prozent den größten Anteil am Gesamtverbrauch. Waschmaschine und Trockner liegen mit jeweils etwa drei Prozent deutlich dahinter.

Ergebnisse der Verhaltensanalysen [6] zeigen, dass die Nutzer die Spülmaschine auch als das geeignetste Gerät zur Lastverlagerung ansehen, da sie mit den geringsten Komforteinbußen einhergeht. Das ist insofern besonders positiv als dies auch für die manuelle Steuerung der Haushaltsgeräte gilt.

Zum besseren Vergleich der verschiedenen Szenarien sind in **Tabelle 3** relevante Kennwerte aufgetragen. Die maximale Gesamlast zeigt hierbei, dass der LVT hier zu einer Reduktion der Lastspitzen geeignet ist, während der ZVT sogar zu einer Erhöhung dieser führen kann. Das kann im Hinblick auf eine Lastharmonisierung kontraproduktiv sein. Der Quotient aus Maximal- und Minimallast kann als Kennwert für den Harmonisierungsgrad herangezogen werden und bestätigt, dass der LVT eine deutliche Harmonisierung herbeiführt. Umgekehrt kann im Hinblick auf die volatile Einspeisung aus erneuerbaren Energiequellen aber auch die kurzfristige Erhöhung bzw. die schnelle Absenkung der Stromnachfrage erwünscht sein. Ein solch flexible Nachfrage erreicht im Modell der ZVT, indem die Haushalte ihre verschiebbaren Lasten auch verlagern ohne Strafzahlungen (wie bspw. beim LVT) fürchten zu müssen.

An dem durchschnittlichen Arbeitspreis zeigt sich, dass der ZVT zu einer Reduktion der Ausgaben beim Endkunden führt, da hier vermehrt die niedrigste Preisstufe genutzt werden kann. Beim LVT führen die Aufschläge zu einer Steigerung der Ausgaben – Einsparungen sind hier zu keinem Nachfragezeitpunkt möglich. Inwieweit dies von Haushalten akzeptiert werden würde, bleibt Bestandteil weiterer Untersuchungen. Entsprechende Preiselastizitäten vorausgesetzt kann durch eine passende Wahl der Tarifspreizung, Preishöhe und Aufschlagshöhe die Haushaltsnachfrage gesteuert und Lastverschiebepotenziale gehoben werden.

Szenario	Tarif	max. Last kW	Last <sub>max</sub> / <sub>min</sub>	Arbeitspreis Ø ct/kWh
Basis	konst.	767	6,1	25
Technik	ZVT	615	5,0	23,6
Technik, Sommer	ZVT	827	7,6	23,0
Technik	LVT	534	2,2	27,2
Technik	L&Z	580	3,2	26,5
Markt, Innenstadt	L&Z	406	2,6	27,3
Markt	L&Z	417	2,7	27,4

**Tabelle 3** Kennwerte zum Vergleich der Szenarien; Winterwoche und Stadtrand

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe des Optimiermodells DS-Opt+ wurden die Auswirkungen dynamischer Tarifmodelle auf Lade- und Lastverschiebepotenziale unter der Annahme eines automatisierten Lastmanagements in den Haushalten unter-

sucht. Hinsichtlich der untersuchten Tarifmodelle zeigt sich, dass mit zeitvariablen Tarifmodellen eine flexible Nachfrage erzeugt werden kann, die aber ggf. mit neuen Lastspitzen in den Nachtstunden einhergeht. Lastvariable Tarifmodelle eignen sich hingegen zur Harmonisierung des Lastgangs in den Haushalten sowie in den Wohnvierteln.

Hinsichtlich der Stromkosten zeigt sich, dass die Haushalte mit optimierter Gerätenutzung im angenommenen Szenario bis zu acht Prozent einsparen können.

Hinsichtlich der verschiebbaren Lasten zeigt sich, dass ein E-Kfz ein deutlich größeres Potenzial aufweist. Bis E-Kfz eine relevante Verbreitung erfahren, ermöglichen die drei hier untersuchten Haushaltsgeräte (Waschmaschine, Wäschetrockner, Spülmaschine) die insgesamt größeren Verlagerungspotenziale, insbesondere aufgrund ihrer hohen Verbreitung in den Haushalten.

Daraus lässt sich schließen, dass kurzfristig auch ohne zusätzliche Technik ein Teil der Lastverschiebepotenziale durch weiße Ware und halbautomatisierte Steuerung (d. h. über Zeitschaltuhren) erreicht werden könnte, wenn Haushalte einen entsprechenden Preisanreiz und damit einhergehende Nutzungsinformationen bekämen (vgl. [6]).

Für weitere Forschungsarbeiten ist die Analyse der Umsetzbarkeit des automatisierten Lastmanagements (ALM) in Haushalten ein wichtiger Bestandteil. Dazu gehört die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit sowie der Nutzerakzeptanz der entsprechenden IKT-Infrastruktur; gleiches gilt für die dynamischen Tarifmodelle. Insbesondere lastvariable und kombinierte Tarife wurden in Feldversuchen bislang kaum erprobt. Damit geht auch die Analyse der Preiselastizitäten der Nachfrage einher, die klassischerweise für Commodity-Produkte wie Strom sehr gering ist [12]. Es bleibt daher offen inwieweit die IKT durch verbessertes Feedback des Haushaltsverbrauches (bspw. durch eine Verbrauchsanzeige) die Sichtbarkeit für Strompreise und damit auch ihre Auswirkungen im Nutzerverhalten erhöhen. Die Verbreitung von Elektrofahrzeugen kann einen wichtigen Beitrag zu diesem Wahrnehmungsprozess in Haushalten leisten. Inwieweit dies letztlich auch in einem preisoptimierten Lademanagement mündet bleibt ebenfalls Untersuchungsgegenstand in der Forschung.

## 7 Literatur

- [1] Rehm, M.: Lastmanagement und dynamische Stromtarife in regenerativen Energieversorgungssystemen, Diss. 1998, VDI Reihe 6 Nr. 419
- [2] Leitinger C, Litzlbauer M, Schuster A, Brauner G, Simic D, Hiller G, Bäuml T, Sammer G, Link C, Raich U, Stark J.: Smart Electric Mobility - Speichereinsatz für regenerative elektrische Mobilität und Netzstabilität. Endbericht. Klima- und Energiefonds Österreich
- [3] Link, J.: Elektromobilität und erneuerbare Energien: Lokal optimierter Einsatz von netzgekoppelten Fahrzeugen, Diss. 2011, TU Dortmund
- [4] Paetz, A.-G.; Kaschub, T.; Jochem, P.; Fichtner, W.: Erfahrungen mit dynamischen Tarifkonzepten im intelligenten Haus, in: Tagungsband VDE Kongress, Würzburg, 2011
- [5] Paetz, A.-G.; Jochem, P.; Fichtner, W.: Demand Side Management mit Elektrofahrzeugen - Ausgestaltungsmöglichkeiten und Nutzerakzeptanz, in: Tagungsbandbeitrag 12. Symposium Energieinnovation 2012
- [6] Paetz, A.-G.; Kaschub, T.; Jochem, P.; Fichtner, W.: Demand Response with Smart Homes and Electric Scooters – An Experimental Study on User Acceptance. Proceedings ACEEE Conference, Pacific Grove 2012
- [7] Das deutsche Mobilitätspanel (MoP) – Erhebungen der Jahre 1997 bis 2009. Hg. v. Institut für Verkehrswesen, Karlsruher Institut für Technologie
- [8] Helms, H.; Pehnt, M.; Lambrecht, U. & Liebich, A.: Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions. 18th International Symposium Transport and Air Pollution, Dübendorf 2010
- [9] Jochem, P.; Kaschub, T.; Fichtner, W.: How to Integrate Electric Vehicles in the Future Energy System?, in: Michael Hülsmann and Dirk Fornahl (Eds.), Evolutionary Paths Towards the Mobility Patterns of the Future, Springer, Heidelberg (in Druck)
- [10] Wietschel M.; Kley F.; Dallinger D: Eine Bewertung der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. ZfAW 03 2009, 33–41
- [11] DeStatis: LWR – Ausstattung privater Haushalte mit ausgewählten Gebrauchsgütern 2003-2010, Statistisches Bundesamt
- [12] Bruhn, M.: Commodities im Dienstleistungsbereich, in: Enke, M.; Geigenmüller, A. (Hrsg.): Commodity Marketing, 57-77, 2. Auflage, Springer Verlag, Wiesbaden 2011

Diese Arbeit wurde unterstützt durch die studentische Abschlussarbeit von Martin Kopp.

Das Projekt iZEUS wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) als Teil der Initiative „IKT für Elektromobilität 2“ gefördert (01ME12013).