

# Demand Side Management mit Elektrofahrzeugen – Ausgestaltungsmöglichkeiten und Kundenakzeptanz

**Alexandra-Gwyn Paetz, Patrick Jochem, Wolf Fichtner**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lehrstuhl für Energiewirtschaft,

Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe

+49 721 608 44669, paetz@kit.edu

[www.iip.kit.edu](http://www.iip.kit.edu)

**Kurzfassung:** Die zunehmende Elektrizitätsbereitstellung aus erneuerbaren Energiequellen, die geringen wirtschaftlichen Speichermöglichkeiten und die steigende dezentrale Einspeisung stellen den Energiesektor vor neue Herausforderungen. Die geplante Elektrifizierung des Straßenverkehrs mit 1 Mio. Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2020 steigert den Handlungsbedarf, da sich sowohl der Energie- als auch der Leistungsbedarf, v. a. bei Gleichzeitigkeit einer lokal nachgefragte Ladeleistung für Elektrofahrzeuge (E-Pkw), erhöhen wird. Demand Side Management (DSM) Maßnahmen sollen die Ladevorgänge von E-Pkw hinsichtlich des erneuerbaren Elektrizitätsangebots steuern und – eine Weiterentwicklung der Traktionsbatterien vorausgesetzt – die E-Pkw als Pufferspeicher nutzbar machen. Dazu sind verschiedene konkrete Ausgestaltungsmöglichkeiten, die sich zwischen direkter Lastkontrolle und indirektem Lastmanagement bewegen denkbar. Ihre Wirksamkeit hängt dabei neben der technischen und ökonomischen Machbarkeit von der Akzeptanz der E-Pkw Besitzer und Fahrer ab. Bislang gibt es kaum Kenntnisse zur Kundenakzeptanz von DSM-Maßnahmen für Elektrofahrzeuge. Zwar werden DSM-Maßnahmen in Feldversuchen im Haushaltssektor erprobt, doch inwieweit die Erkenntnisse aus dem Haushalt auf die Mobilität übertragbar sind, bleibt offen. Aufgrund der Tatsache, dass E-Pkw den Strom- und Leistungsbedarf eines Haushalts erhöhen und gleichzeitig diese Stromnachfrage aufgrund langer Standzeiten der Pkw im Vergleich zu anderen Haushaltsgeräten objektiv flexibler erscheint, ist diese Forschungsfrage besonders relevant. Im Rahmen des Projektes MeRegioMobil ist dazu ein Anreizsystem zum zeitversetzten Laden konzipiert und im Feldtest in Karlsruhe / Stuttgart erprobt worden. Mit einer Stichprobe von 14 Nutzern eines Smart electric drive sind im Rahmen der sozialwissenschaftlichen Feldtestbegleitung qualitative Telefoninterviews zu den Erfahrungen mit einem zeitversetzten Ladekonzept geführt worden. Die Ergebnisse zeigen, dass die E-Pkw Nutzer bereit sind, Ladevorgänge zeitlich zu verlagern, so lange diese keine Einschränkung im Tagesablauf mit sich bringt. Automatisierte Ladestrategien wurden in dieser Stichprobe von allen als notwendig erachtet, da reine tarifliche Anreize geringe Verhaltenswirkung zeigten. Zentrales Motiv zur Lastverlagerung waren nicht primär monetäre Einsparungen, sondern vielmehr die ökologische Sinnhaftigkeit und Nutzung von erneuerbarem Strom, um emissionsfrei fahren zu können. Kritisch hinterfragt wurden die Auswirkungen der Lastverlagerung auf die Batterielebensdauer. Viele äußerten den Wunsch nach Ladesäulen auch am Arbeitsplatz, um Lastverlagerung tagsüber zu ermöglichen.

**Keywords:** Demand Side Management, Elektromobilität, Kundenakzeptanz, Variable Tarife

## 1 Einleitung

Außen- und umweltpolitische Ziele führen in zunehmendem Maße zu grundlegenden Veränderungen im Energie- und Verkehrssektor. In der Elektrizitätswirtschaft liegen die Herausforderungen u. a. in der zunehmenden Elektrizitätsbereitstellung aus erneuerbaren Energiequellen, geringen wirtschaftlichen Speichermöglichkeiten und der steigenden dezentralen Einspeisung. Im Verkehrssektor soll die Elektrifizierung des Straßenverkehrs zu geringeren globalen (bspw. CO<sub>2</sub>) und lokalen Emissionen (bspw. Lärm) sowie zu einer Senkung der Erdölimporte beitragen. Die Elektromobilität hat jedoch auch Rückwirkungen auf die Energiewirtschaft: die Elektrizitätsnachfrage wird sich sowohl hinsichtlich des Energie- als auch des Leistungsbedarf, v. a. bei Gleichzeitigkeit einer lokal nachgefragte Ladeleistung für Elektrofahrzeuge (E-Pkw), erhöhen. Dadurch steigt der Steuerungsbedarf im Elektrizitätssystem.

Demand Side Management (DSM) Maßnahmen sollen die Ladevorgänge von E-Pkw hinsichtlich des erneuerbaren Elektrizitätsangebots steuern. Dazu sind verschiedene konkrete Ausgestaltungsmöglichkeiten, die sich zwischen direkter und anreizbasierte Laststeuerung bewegen, denkbar. Ihre Wirksamkeit hängt dabei neben der technischen und ökonomischen Machbarkeit von der Akzeptanz der E-Pkw Nutzer ab. Bislang gibt es aber kaum Kenntnisse zur Kundenakzeptanz von DSM-Maßnahmen für Elektrofahrzeuge. Zwar werden DSM-Maßnahmen in zahlreichen Feldversuchen im Haushaltssektor erprobt, doch inwieweit die Erkenntnisse aus dem Haushalt auf die Mobilität übertragbar sind, bleibt offen.

Die vorliegende Arbeit geht daher den Fragen nach, welche DSM-Maßnahmen aus Kundensicht sinnvoll erscheinen und wie sich der alltägliche Umgang mit ihnen gestaltet. Im Rahmen des Feldversuchs des Projektes MeRegioMobil<sup>1</sup> ist dazu ein Konzept zum zeitversetzten Laden entwickelt und implementiert worden. Die Erfahrungen von 14 Testkunden eines Smart electric drive (Smart ed) mit diesem Ladekonzept sind im Rahmen der sozialwissenschaftlichen Feldtestbegleitung analysiert worden und werden hier vorgestellt.

Die Arbeit strukturiert sich in sechs Kapitel. Zunächst wird das Konzept des Demand Side Management begrifflich abgegrenzt, bevor der Stand der Forschung zu DSM-Maßnahmen skizziert und die Forschungsfrage abgeleitet wird. Die methodische Vorgehensweise wird im vierten Kapitel beschrieben. Im Anschluss werden die Ergebnisse vorgestellt. Die Arbeit endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf zukünftige Forschungsfragen.

## 2 Demand Side Management – eine Begriffsabgrenzung

Die eingangs skizzierten Veränderungen im Energie- und Verkehrssektor stellen die Führung des elektrischen Netzes vor neue Herausforderungen. Während bislang die Elektrizitätsbereitstellung gemäß der Nachfrage („top-down“) gesteuert wurde, geht dies aufgrund der Volatilität erneuerbarer Energiequellen zunehmend mit kurzfristigen Anpassungen einher, die an technische als auch an ökonomische Grenzen stoßen. Auch die dezentrale Einspeisung von Elektrizität (bspw. Solarstrom) oder kurzfristig hoher Leistungsbedarf (bspw. durch Wärmepumpen oder Elektrofahrzeugen) erhöhen den Handlungsbedarf in der Netzsteuerung. Ein Lösungsansatz sieht einen Paradigmenwechsel vor: So soll die Nachfrage nach Elektrizität

gemäß des (erneuerbaren) Angebots gesteuert werden („bottom-up“) – die Kunden werden aktiv in die Steuerung des Energiesystems eingebunden.

Alle Maßnahmen, die auf die Beeinflussung der Stromnachfrage zielen, werden unter dem Begriff DSM zusammengefasst und beziehen sich im vorliegenden Kontext insbesondere auf den Haushaltssektor. Darunter fallen vielfältige Maßnahmen, die alle irgendeine Form der Kundenbereitschaft (bspw. zum Kauf effizienter Haushaltsgeräte) erfordern. In Anlehnung an Albadri & El-Saadany (2008), CRA (2005), DOE (2006) lassen sich grundsätzlich DSM-Maßnahmen in zwei Bereiche unterteilen<sup>2</sup> (vgl. Abbildung 1): Laststeuerung (Demand Response) und Verbrauchssteuerung (Energy Response).

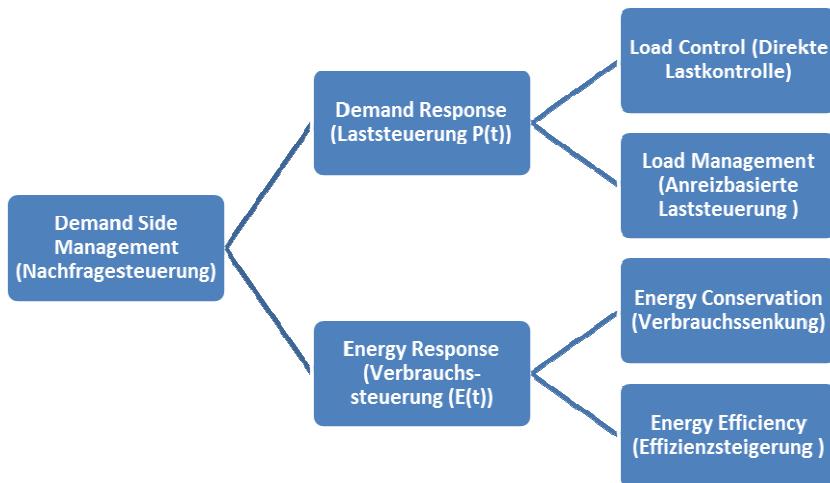


Abbildung 1: Einordnung von DSM-Maßnahmen

Demand Response hat zum Ziel die Lastkurve ereignisbasiert anzupassen; den Leistungsbedarf also so zu steuern, dass entweder Spitzen- (Peak Shaving) oder Niedriglasten (Valley Filling) vermieden werden. Das wird durch ein breites Spektrum an Maßnahmen erreicht, das sich zwischen direkter Laststeuerung bzw. -kontrolle (Direct Load Control) und anreizbasierter Laststeuerung (Incentive Based Load Management) bewegt. Der Einfluss des Kundenverhaltens und das Ausmaß der technischen Ausstattung in den Haushalten variiert dabei. So ist bspw. bei der Kontrolle von Heizpumpen für Schwimmbäder, keine aktive Kundeneinbindung, allerdings eine technische Aufrüstung notwendig. Umgekehrt hängt bspw. beim Angebot variabler Tarife (Dynamic Pricing) die Effektivität der Lastverlagerung (Load Shifting) größtenteils vom Kundenverhalten ab.

Mit Energy Response Maßnahmen soll hingegen nicht auf den Leistungs-, sondern auf den Strombedarf so Einfluss genommen werden, dass dieser sinkt. Dazu wird entweder der Output (bspw. weniger Waschgänge pro Woche senken den Strombedarf) oder der Input (bspw. effizientere Waschmaschine senkt Strombedarf bei gleichbleibender Anzahl an Waschgängen) gesenkt. Maßnahmen, die bei Demand Response zum Einsatz kommen, können auch zur Verbrauchssenkung genutzt. So werden variable Tarifmodelle sowohl zur Leistungs- als auch zur Verbrauchssteuerung eingesetzt und entsprechend ausgestaltet. Beispiele hierfür sind u. a. zeit- und lastvariable Tarife sowie nutzungsabhängige Tarife mit progressivem Verlauf.

### 3 Stand der Forschung

In den vergangenen Jahren sind, nicht zuletzt aufgrund der öffentlichen Förderung der Elektromobilität, zahlreiche Studien zu den Auswirkungen der Elektromobilität auf das Energiesystem, insbesondere auf die Erzeugung und die Netze, entstanden. Die größten Herausforderungen sind hier in der Niederspannungsebene aufgrund eines lokal steigenden Leistungsbedarfs zu erwarten (NPE 2010). Haupteinflussfaktoren sind dabei das Mobilitätsverhalten (der daraus resultierende Ladebedarf, der Ladezeitpunkt / Gleichzeitigkeitsfaktor sowie der Ladeort), die Batterie- (bspw. die Kapazität), die Ladeeigenschaften (bspw. die Leistung) sowie die Penetration der E-Pkw (vgl. Green et al. 2011). Zentrale Ergebnisse vieler modellbasierter Analysen sind, dass in Abhängigkeit der oben genannten Faktoren die Lastspitzen im Niederspannungsnetz bis zu 70 % ansteigen und die Belastungsgrenzen von Transformatoren ausgereizt werden können (vgl. Kaschub et al. 2010; Leitinger & Litzlbauer 2011; Rölink & Rehtanz 2010; Shao et al. 2009). Um diese Lastspitzen zu vermeiden und die Nachfrage nach Ladeleistung letztlich dem erneuerbaren Energieangebot anzupassen, empfehlen die genannten Autoren die Einführung einer (Lade-)Laststeuerung. Diese Empfehlung basiert ausschließlich auf bisherigen Statistiken im konventionellen Verkehr, die zwar zeigen, dass Pkw täglich zu 94 % der Zeit nicht bewegt werden und daher zum Lastmanagement theoretisch bereitstünden (MOP 2011)<sup>3</sup>, aber nicht darauf eingehen, wie realistisch dieses Szenario aus Kundensicht ist.

Es bleibt ungeklärt, inwieweit Kunden eine Ladelaststeuerung akzeptieren und wie die nötigen DSM-Maßnahmen konkret ausgestaltet werden sollten, um die technischen Lastverschiebepotenziale auszuschöpfen. Grahn & Söder (2011) diskutieren zwar welche Faktoren aus Kundensicht eine Rolle spielen könnten (bspw. die gewünschte Ladedauer), stützen sich dabei aber auf keine empirische Untersuchung und berücksichtigen daher auch keine realen Kundenerfahrungen.

Reale Kundenerfahrungen mit DSM-Maßnahmen sind hingegen in zahlreichen Feldversuchen im Haushaltskontext erhoben worden. Weltweit wurden Versuche zum Verbrauchsfeedback (kombiniert mit der Installation von Smart Metern) mit dem Ziel einer Verbrauchssenkung durchgeführt. Der dahinterliegende Gedanke ist, dass das Wissensdefizit der Haushalte über ihren eigenen Stromverbrauch durch regelmäßige Information ausgeglichen wird und in stromsparender(er) Gerätenutzung mündet (vgl. Hargreaves et al. 2010). Zumindest kurz- und mittelfristig ist eine Verbrauchssenkung erzielbar, wenn das Feedback regelmäßig (bspw. in Echtzeit) gegeben, mit relevanten Informationen (bspw. CO<sub>2</sub>-Einsparung) angereichert, verständlich dargestellt und zusätzlich mit einem monetären Anreiz versehen wird (vgl. Paetz et al. 2011a).

Die Kombination von Feedback und monetärem Anreiz (variable Strompreise) ist auch bei Feldversuchen mit dem Ziel der Laststeuerung erfolgsversprechend. So fallen Lastverschiebung bis zu 40 % höher aus als beim Einsatz von variablen Tarifen ohne Verbrauchsfeedback (Stromback et al. 2011). Bislang kommen verschiedene variable Tarifmodelle zum Einsatz, die sich anhand verschiedener Kategorien strukturieren lassen (vgl. Tabelle 1) und unterschiedlich wirksam sind. Aus einem internationalen Vergleich verschiedener Feldversuche kommen Stromback et al. (2011) zum Ergebnis, dass Tarife mit Critical Peak Pricing (CPP)-Komponenten Lastspitzen um durchschnittlich 16% senken können, während dieser Wert bei reinen zeitvariablen Modellen bei 5% liegt. Ergebnisse von Neenan et al. (2002) und Paetz &

Dütschke (2011) geben allerdings Hinweise darauf, dass Kunden eine entgegengesetzte Präferenz haben: Tarife mit geringer Dynamik werden vorgezogen, da kurzfristige Preisanspannungen (wie das bei CPP der Fall ist) als hohes Preisrisiko empfunden werden. Allerdings werden Optionen, bei denen bspw. die Ladesäule automatisiert auf Preissignale reagiert und sich nicht der Nutzer an eine Tarifstruktur anpassen muss, als interessante Lösungen gesehen, auch wenn sie derzeit als noch zu teuer wahrgenommen wird (vgl. Paetz et al. 2011c).

**Tabelle 1: Ausgestaltungsoptionen bei der Konzeption von Tarifmodellen**

Parameter	Beispiel
Anzahl Zonen (zeit-, lastabhängig)	Drei Zonen
Zeitliche Geltungsdauer pro Zeitzone	Je acht Stunden
Höhe der Lastgrenzen	1 kW – 2 kW – 3 kW
Höhe des (Arbeits-)Preises	15 Ct/kWh – 20 Ct/kWh – 25 Ct/kWh
Grad der Dynamik aller Parameter	Täglich wechselnde Lastgrenzen
CPP-Komponente <sup>4</sup>	Jährlich vier Tage
Technische Zusatzausstattung	Anzeigengerät für geltenden Strompreis

Die wissenschaftliche Literatur erkennt die Wichtigkeit von DSM-Maßnahmen zur Integration von Elektrofahrzeugen in das Energiesystem, liefert aber noch keine Erkenntnisse zur realen Umsetzbarkeit, die nicht zuletzt von der Kundenakzeptanz abhängt. Aus den Erfahrungen mit DSM-Maßnahmen im Haushaltssektor können zwar Empfehlungen abgeleitet werden, allerdings ist ungeklärt, ob die Erkenntnisse auch auf die Mobilität übertragbar sind. Daher hat die vorliegende Studie einen explorativen Charakter und geht folgenden Forschungsfragen nach: Wie werden einzelne Ladestrategien von E-Pkw Nutzern wahrgenommen? Welche Motive und Barrieren beeinflussen die Bereitschaft Ladevorgänge zu verschieben? Wie stehen insbesondere Konsumenten, die variable Tarife im Haushalt nutzen, diesem Konzept bei E-Pkw gegenüber?

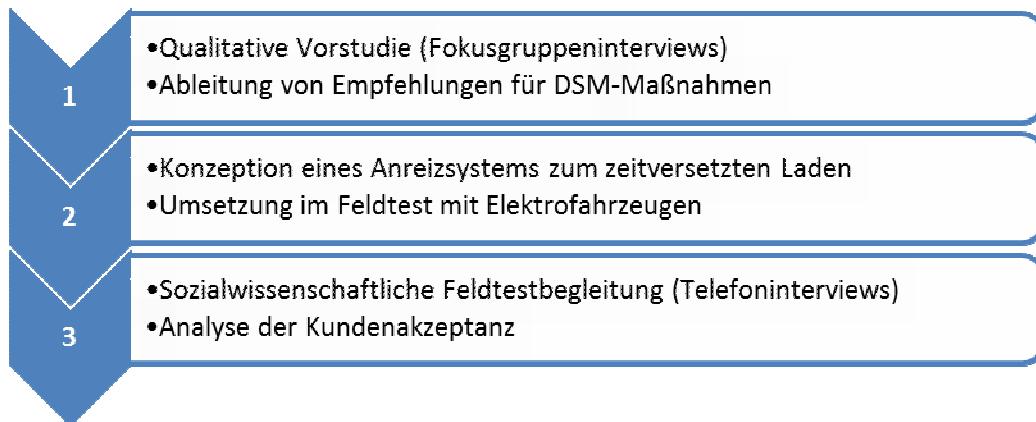
## 4 Forschungsdesign

Die oben skizzierten Forschungsfragen sind im Rahmen eines Feldtests mit Elektrofahrzeugen im Rahmen des Projektes MeRegioMobil analysiert worden. Dieser fand im Zeitraum Januar bis September 2011 statt. Die methodische Vorgehensweise, der Aufbau des Feldtests sowie die Stichprobe werden im Folgenden beschrieben.

### 4.1 Methodische Vorgehensweise

Es ist ein qualitatives Forschungsdesign zur Beantwortung der Forschungsfragen gewählt worden, um die Motive im Umgang mit DSM-Maßnahmen für Elektrofahrzeuge zu eruieren. Die Anforderungen an die methodische Vorgehensweise sind hoch, da bislang kaum Kundenerfahrungen weder mit Elektrofahrzeugen noch mit DSM-Maßnahmen und somit auch nicht im Umgang mit beidem vorliegen. Der MeRegioMobil Feldtest wurde so konzipiert,

dass beide Themenfelder entsprechend analysiert werden konnten. Dazu ist ein dreistufiges Forschungsdesign gewählt worden (vgl. Abbildung 2).



**Abbildung 2: Forschungsdesign**

Im Rahmen einer Vorstudie sind die Kundenreaktionen auf zeitvariable Stromtarife – auch im Umgang mit Elektrofahrzeugen – erfasst worden (vgl. Paetz et al. 2011b). Dazu sind vier Fokusgruppeninterviews mit insgesamt 29 Teilnehmern durchgeführt worden. Fokusgruppen eignen sich besonders, um mit einer Gruppe von Teilnehmern neuartige Ideen, Produkte oder Dienstleistungen zu diskutieren. Durch den Dialog in der Gruppe werden Assoziationen und Meinungen einzelner geweckt, die bei einem Fragebogen nicht erfasst worden wären. Dieses Vorgehen ist insbesondere für noch unerforschte Gebiete, wie bspw. dem Umgang mit neuen Technologien, geeignet (Flick et al. 2008). Darüber hinaus ermöglichen diese Art der Interviews dem Forscher in direkten Austausch mit den Befragten zu treten und durch bspw. konkretes Nachfragen oder durch Produktdemonstrationen Unklarheiten und Fragen unmittelbar zu klären. Damit wird die Validität der erhobenen Befragungsdaten erhöht.

Aus dieser Vorstudie sind Empfehlungen für die Konzeption von DSM-Maßnahmen im Kontext der Elektromobilität abgeleitet worden (vgl. Paetz et al. 2011b). Da herauskam, dass der Besitz eines Pkw besonders stark mit dem Wunsch nach Unabhängigkeit und Flexibilität verbunden ist, ist ein Anreizsystem zum zeitversetzten Laden empfohlen worden, das diesem Wunsch Rechnung trägt. Die Grundlage bildet ein statischer Ladestromtarif auf den ein Rabatt gewährt wird, wenn der Kunde einen spezifischen Ladevorgang dem Energieversorger (EVU) überlässt und dieser bspw. den Ladezeitpunkt oder die Ladeleistung regeln darf.

Dieses Konzept ist im MeRegioMobil Feldversuch leicht modifiziert und umgesetzt worden (siehe Folgeabschnitt). Im Rahmen der sozialwissenschaftlichen Begleitung sind die Teilnehmer des Feldversuchs in telefonischen Leitfadeninterviews einzeln zu ihren Erfahrungen mit dem Lademanagement befragt worden (n=14). Telefonische Leitfadeninterviews ermöglichen – ähnlich zu den Fokusgruppen – den direkten Austausch zwischen Forscher und Befragtem (Hopf 2007). Durch die Leitfadenstruktur wird sichergestellt, dass in jedem Telefoninterview alle Themenfelder abgedeckt werden, aber auch Raum für Fragen, die sich aus dem Dialog ergeben, gelassen wird. Dem Befragten ist es darüber hinaus möglich die Breite seiner Ausführungen selbst zu bestimmen. Zudem können alle Feldtestteilnehmer ortsungebunden (der Feldversuch fand im Raum der Städte Karlsruhe / Stuttgart statt) separat zu ihren persönlichen Erfahrungen befragt werden.

Sowohl die Fokusgruppen als auch die Telefoninterviews sind mit Einverständnis der Interviewpartner aufgezeichnet und im Anschluss wörtlich in geglätteter Form transkribiert worden. Mithilfe der qualitativen Inhaltsanalyse (Mayring 2000) wurden die Transkripte codiert und ausgewertet.

## **4.2 Konzept zum zeitversetzten Laden**

Im MeRegioMobil Feldtest ist ein Konzept zum zeitversetzten Laden entwickelt und umgesetzt worden. Herzstück war ein zweitstufiger Ladestromtarif, der an einen üblichen HT/NT-Tarif gelehnt war (22,31 Ct/kWh HT; 19,31 Ct/kWh NT). So wurde allen Teilnehmern ein Preisanreiz geboten, die Ladevorgänge auf kostengünstige Zeitpunkte zu verschieben.

Zusätzlich wurde ein automatisiertes Lademanagement (ILM – intelligentes Lademanagement) durch den Projektpartner EnBW eingeführt. Das ILM ermöglicht dem EVU innerhalb von definierten Zeitfenstern den Zeitpunkt der Ladung der Fahrzeugbatterie zu steuern. Mittels einer Smartphone Anwendung konnten Kunden die „eingesteckten“ Standzeiten an der Ladesäule eingeben und so ein Zeitfenster definieren bis welches das Fahrzeug vollgeladen werden sollte. Innerhalb dieses Zeitfensters konnte der Energieversorger über den Zeitpunkt des Ladevorgangs entscheiden, musste aber eine vollständige Aufladung bis Ende des Zeitfensters garantieren. Die Anzahl der freigegebenen Zeitfenster wurden in einem Ladezeitkonto registriert. Je höher hier der Kontostand, desto höher der erreichbare Ladebonus, der mit den Ladekosten in der monatlichen Abrechnung verrechnet wurde. Dadurch entstand für die Kunden über das ILM ein zusätzlicher monetärer Anreiz.

Mit diesem ILM-Konzept behält der Kunde einerseits die volle Flexibilität (er entscheidet, ob und wann er welche Ladevorgänge anmeldet) und andererseits kann das EVU zumindest bei den angemeldeten Ladevorgängen die Lastverschiebepotenziale effektiv nutzen.

## **4.3 Stichprobe**

Um im Feldversuch das oben beschriebene Konzept zum zeitversetzten Laden durchzuführen zu können, waren einige technische Installationen notwendig, so dass bei der Auswahl der Teilnehmer u. a. auf folgende Kriterien geachtet wurde: DSL-Anschluss mit W-LAN im Haus, fester Stellplatz für ein Fahrzeug, Steckdose an diesem Stellplatz, Bereitschaft zum Einbau einer Ladestation und eines Smart Meters (EnBW Intelligenter Stromzähler). Des Weiteren wurde bei der Teilnehmerrekrutierung angestrebt, Teilnehmer zu finden, die bereits Vorerfahrungen mit DSM-Maßnahmen bspw. im Haushalt hatten und / oder über eine eigene Photovoltaik(PV)–Anlage verfügten.

Unter den 15 Haushalten im Feldversuch (es nahmen zusätzlich noch 19 gewerbliche Nutzer am Feldversuch teil) besaßen vier eine eigene PV-Anlage und sieben Haushalte waren zeitgleich Teilnehmer im Schwester-Feldtest MeRegio<sup>5</sup>, durch das sie Erfahrungen mit variablen Tarifmodellen im Alltag sammelten und somit mit dem Konzept der Lastverschiebung vertraut waren.

An den Telefoninterviews nahmen 14 Haushalte teil. Befragt wurden jeweils die Hauptnutzer des Smart ed. Die Stichprobe setzt sich damit aus fünf weiblichen und neun männlichen Befragten im Alter zwischen 33 und 59 Jahren zusammen. Alle Teilnehmer wohnen im Eigentum mit zwei bis sechs Haushaltsmitgliedern zusammen. Die Mehrheit (76%) wohnt außer-

halb einer Stadt (in ländlicher Region oder einem Vorort) und legt tägliche Wegstrecken zwischen 25 und 100 km zurück. Dazu stehen allen Haushalten, mit einer Ausnahme, mindestens zwei Pkw zur Verfügung.

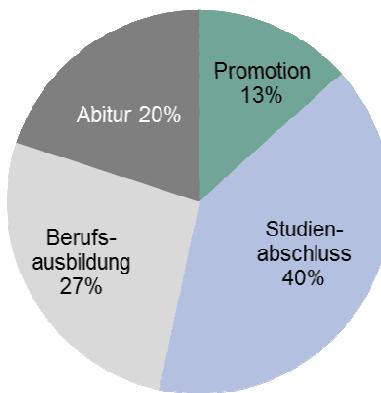


Abbildung 3: Bildungsgrad in der Stichprobe

Die Stichprobe zeigt einen überdurchschnittlichen Bildungsgrad (vgl. Abbildung 3) und ein hohes monatliches Haushaltsnettoeinkommen (60 % der Haushalte bei über 4.000 Euro). Mittels fünfpoligen Likert-Skalen wurden die Einstellungen der Teilnehmer vor dem Start des Feldtests erfasst. Hier zeigt sich, dass die Stichprobe ökologisch motiviert ist und eine hohe Affinität zu Technik im Allgemeinen aufweist (vgl. Abbildung 4). So verwundert es nicht, dass die Nutzung eines alternativ betriebenen Fahrzeugs für die Mehrheit nicht ganz neu war, sondern Hybridfahrzeuge, E-Pkw oder Auto- / Erdgasfahrzeuge zuvor mindestens getestet wurden.

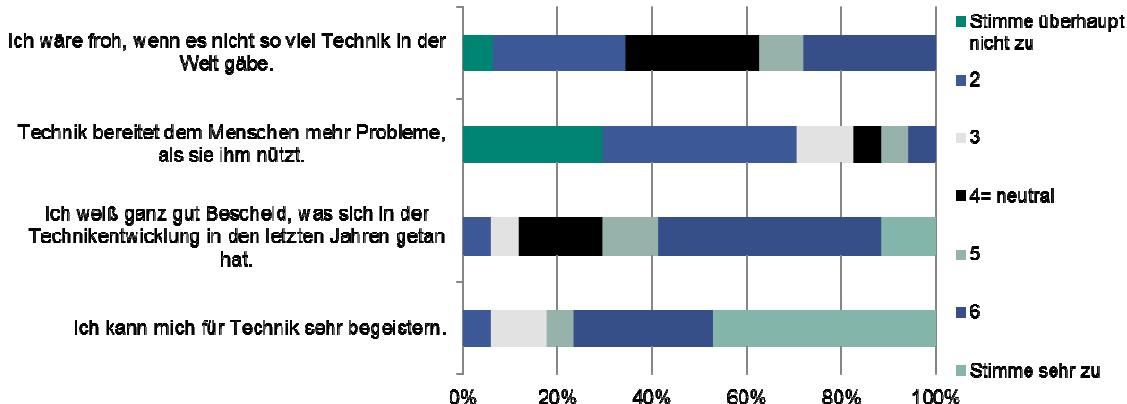


Abbildung 4: Einstellungen zum Thema Technik

## 5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse zum Lademanagement und dem Umgang mit DSM-Maßnahmen vorgestellt. Zur Veranschaulichung werden Originalzitate aus den Interviews herangezogen und mit Buchstaben versehen, die während des Anonymisierungsprozesses den Feldtestteilnehmern zugewiesen wurden. Zu den Interviews fließen Ergebnisse zu den Ladedaten – also dem realen Verhalten der Feldtestteilnehmer – ein, die dem Projektabschlussbericht (vgl. MRM 2011) entstammen.

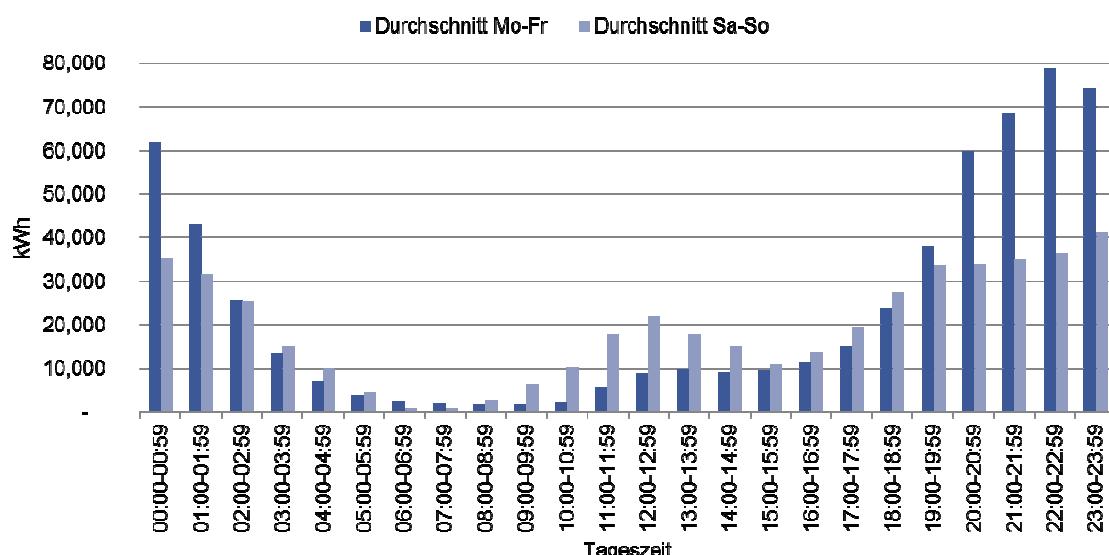
## 5.1 Ladeverhalten

Wie oben beschrieben wurde bei allen Haushalten eine eigene Ladesäule (Wallbox) an den Stellplatz des Smart ed installiert. Daneben standen den Fahrern 25 Ladesäulen im öffentlichen und sieben Ladesäulen im halb-öffentlichen Raum zur Verfügung. Mehrheitlich (84%) wurde der Smart ed zu Hause und nur zu 5% an öffentlichen Ladesäulen geladen (vgl. Tabelle 2).

**Tabelle 2: Nutzung der Ladeinfrastruktur während eines dreimonatigen Betrachtungszeitraums im Feldversuch (in Anlehnung an MRM 2011)**

Ladeinfrastruktur	Anteil an geladener Energiemenge	Durchschnittlich Zeit an der Ladesäule/Tag
Öffentlicher Raum (bspw. Laterne)	5 %	3 h 55 min
Halböffentlicher Raum (bspw. Parkhaus)	11 %	8 h 32 min
Privater Raum (Wallbox)	85 %	12 h 10 min

Die meisten Teilnehmer gaben auch an abends nach der letzten Fahrt des Tages das Fahrzeug zu Hause zu laden. Entsprechendes spiegelt sich auch bei den aufgezeichneten Ladevorgängen wider (vgl. Abbildung 5). Wurde das Fahrzeug von mehreren Haushaltsgliedern genutzt, so war die Planung der Ladevorgänge Teil der häuslichen Gesprächsthemen und das nächtliche Aufladung zwischen den Haushaltsgliedern vereinbart worden. Es wurden in einigen Haushalten allerdings auch andere Vereinbarungen getroffen. In knapp der Hälfte der Fälle wurde ein Ladestand von 40 bis 60 % als untere Grenze gesetzt, welcher teilweise nach einem, häufig aber auch erst nach zwei bis drei Tagen erreicht wurde, ehe das Fahrzeug wieder geladen wurde.



**Abbildung 5: Aufschlüsselung der Stromnachfrage der Smart ed in einem dreimonatigen Betrachtungszeitraums (in Anlehnung an MRM 2011)**

## 5.2 Anreizwirkung des zweistufigen Ladestromtarifs

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben wurde ein zweistufiger Ladestromtarif angeboten. Da alle Befragten berufstätig und tagsüber außer Haus waren, wurde der Ladezeitpunkt allerdings aus rein praktischen Gründen unter Woche auf die Abendstunden zu Hause gelegt und erst wieder vor der Weiterfahrt am nächsten Tag vom Stromnetz getrennt. Zehn Teilnehmer gaben an, direkt bei Ankunft den E-Pkw unabhängig vom aktuellen Strompreis anzustecken, um später nicht mehr hinausgehen zu müssen oder das Laden gänzlich zu vergessen. Bei vier Teilnehmern war das anders.

*„Ich gehe immer um 22.00 Uhr hinaus, um das Fahrzeug zu laden. Die Stromampel ist in 95 % aller Fälle dann grün.“ (C).*

Eine generelle Bereitschaft das Ladeverhalten zu verändern, gaben alle Befragten an. Als Motiv nannten einige Teilnehmer Preisersparnisse. Interessanterweise handelte es sich hierbei primär um die „erfahrenen“ Nutzer, die – eingebunden im MeRegio Feldtest – nach eigenen Angaben insbesondere auch die Spülmaschine nur zu preisgünstigen Zeiten nutzten.

Die Mehrheit empfand aber den benötigten Aufwand zur Ladelastverlagerung verglichen mit den Kosten (v.a. in Bezug auf die Anschaffungskosten des Fahrzeugs) zu hoch. Nur wenige hatten bis dahin ihr Ladeverhalten tatsächlich an den Strompreisen ausgerichtet.

*„Wenn ich schon so viel Geld für das Elektroauto ausgebe, dann kommt es jetzt auf ein paar Cent rauf oder runter auch nicht an.“ (B)*

Der Wunsch nach einer Ladesäule, die automatisiert die günstigen Preise erkennt und den Ladevorgang startet wurde entsprechend häufig geäußert. Dahinter steckt der Wunsch den Mehraufwand für die Preisersparnis zu minimieren.

*„Sie fahren in der Regel auch nicht jetzt tagsüber in der Mittagspause von mir aus an die Tankstelle, weil vielleicht zwischen zwölf und eins das Benzin billiger wäre. Das muss wenn, automatisiert laufen.“ (G)*

Zwölf Teilnehmer nannten hingegen ökologische Aspekte als Anreiz zur Lastverlagerung und damit auch die Anforderung, dass die Ladesäule die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien kommuniziert bekommt. Ein Teilnehmer setzte dies sogar für seinen Autokauf voraus. „Das muss auf jeden Fall funktionieren, sonst würde ich auch kein Elektroauto nehmen.“ (C)

## 5.3 Anreizwirkung intelligentes Lademanagement

Die langen Standzeiten an der privaten Ladesäule (Wallbox) von über 12 Stunden verdeutlichen das zeitliche Lastverschiebepotenzial für Elektrofahrzeuge. Durch die Einführung des oben beschriebenen intelligenten Lademanagements sollte daher zusätzlich getestet werden, ob die Teilnehmer ihre Standzeiten dem EVU kommunizieren und in diesem Zeitfenster zum automatisierten Lastmanagement freigeben – immerhin hatten sie zuvor den Wunsch nach automatisierten Lösungen geäußert.

Vier Teilnehmer nutzen die Möglichkeiten des ILM über eine Smartphone Anwendung regelmäßig und wurden in einer zweiten telefonischen Befragung zu ihren Erfahrungen damit befragt. Die Erwartung, dass die Smartphone Anwendung den Ladevorgang vereinfachen würde, wurde von allen mit einer Ausnahme bestätigt.

*„Also RFID Karte dran heben, Ladeklappe wird freigemacht, ich muss den Mennekes Stecker rein, dann muss ich es am Fahrzeug auch noch haben, dann muss ich auch noch am iPhone irgendwelche Abfahrtsdaten eingeben, das wird dann vielleicht dem ein oder anderen einfach zu viel des Guten.“ (L)*

Das Vergütungsmodell wurde als angenehm bewertet, da keine Stromtarife mehr zu verfolgen waren, sondern von der Ladesäule automatisch berücksichtigt wurden. Somit war nach eigenen Angaben der Teilnehmer die Tagesplanung nicht von Tarifsprüngen abhängig. Zusätzlich konnten durch die fixe Vergütung der kommunizierten Standzeiten die Preisersparnisse von den Nutzern besser eingeschätzt werden.

Allerdings war es nicht der Bonus, der die Teilnehmer zur Nutzung des ILM animierte, sondern auch hier dominierte der Wunsch einen Beitrag zum Umweltschutz durch die optimale Nutzung erneuerbarer Energien zu leisten. Um auch tagsüber die Möglichkeiten des ILM nutzen zu können, wurde mehrfach der Wunsch nach (intelligenten) Ladesäulen auch am Arbeitsplatz geäußert.

Ein ungutes Gefühl bzgl. der Lebensdauer der Traktionsbatterie beim zeitversetzten Laden äußerten alle Teilnehmer. Sie vertrauten der automatisierten Ladesäule nicht vollkommen, was dazu führte, dass zusätzlich kontrolliert wurde, ob die Ladesäule die Niedrigpreiszeiten zur Beladung der Smart ed auch tatsächlich optimal nutzte.

#### **5.4 Zusammenspiel Lademanagement und PV-Eigenerzeugung**

Neben dem manuellen Laden über tarifliche Anreize, dem automatisierten Laden über das ILM, wurde auch das Zusammenspiel zwischen Eigenerzeugung und Elektromobilität untersucht. Dazu wurden, wie oben beschrieben, bei der Auswahl der Feldtestteilnehmer Besitzer von PV berücksichtigt.

Wie zu erwarten, gab es für die „Volleinspeiser“ keinen direkten Zusammenhang zwischen ihrer PV-Anlage und dem E-Pkw. Zwei Teilnehmer gaben an mit einem Pufferspeicher (bspw. einer Zusatzbatterie im Keller) „Überschusseinspeiser“ zu werden, um „100 Prozent autark leben zu können“ (D).

Der „Überschusseinspeiser“ in der Stichprobe versuchte den Smart ed möglichst nur mit dem selbst erzeugten PV-Strom zu laden. Die übrigen Mechanismen (tariflicher Anreiz, automatisiertes Lademanagement) hatten in dieser Konstellation keinerlei Anreizwirkung. Vielmehr richtete sich die Mobilität nach der Sonneneinstrahlung. An Arbeitstagen war man bemüht vor 18:00 Uhr nach Hause zu fahren, um den PV-Strom nutzen zu können. An den Wochenenden machte der Haushalt die Ladvorgänge des Smart ed vollständig von der Sonneneinstrahlung abhängig.

*„Es ist die einzige Möglichkeit, um wirklich reinen Gewissens CO<sub>2</sub> neutral durch die Gegend zu fahren“ (J).*

#### **5.5 Grenzen der Arbeit**

Wie jede empirische Studie unterliegt auch diese Arbeit einigen Grenzen. Zunächst sind die Ergebnisse dieser Untersuchung nicht generalisierbar, da die Stichprobe zu klein ist und für keine Bevölkerungsgruppe (gut gebildet, Vollzeit berufstätig, an Technik- und Umweltthemen

interessiert, hohes Haushaltsnettoeinkommen, Hausbesitzer, große Haushalte, hoher Fahrzeugausstattungsgrad) repräsentativ ist.

Der Feldtestaufbau bot zwar das einmalige Umfeld DSM-Maßnahmen für Elektrofahrzeuge aus Kundensicht zu evaluieren, stellt aber auch gleichzeitig eine Einschränkung dar. So könnten andere Fahrzeuge, eine andere Verteilung der Ladesäulen und ein anderes Anreizkonzept (bspw. ein lastvariabler Ladestromtarif) auch andere Verhaltensmuster hervorrufen.

Aufgrund des relativ kleinen Feldversuchs konnte keine Validierung mit einer Kontrollgruppe durchgeführt werden. Zudem war der Feldversuch zeitlich zu kurz, um jahreszeitabhängige Einflüsse abzubilden und Aussagen zu längerfristigen Entwicklungen zu treffen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser qualitativen Erhebung sind DSM-Maßnahmen im Kontext der Elektromobilität aus Kundensicht bewertet worden. Dabei wurde das manuelle Ladeverhalten auf Basis eines tariflichen Anreizes, das automatisierte Ladeverhalten auf Basis einer fixen Bonusvergütung (intelligentes Lademanagement), sowie der Einfluss von PV-Eigenerzeugung im Rahmen des MeRegioMobil Feldversuchs mit 15 Smart ed bei privaten Haushalten betrachtet.

Die Ergebnisse zeigen, dass E-Pkw Nutzer bereit sind, Ladevorgänge zeitlich zu verlagern, so lange diese keine Einschränkung im Tagesablauf mit sich bringt. Automatisierte Ladestrategien wurden in dieser Stichprobe von allen als notwendig erachtet, da reine tarifliche Anreize geringe Verhaltenswirkung zeigten. Zentrales Motiv zur Lastverlagerung waren – im Gegensatz zu den Erfahrungen im Haushaltssektor – nicht primär monetäre Einsparungen, sondern vielmehr die Nutzung von erneuerbarem Strom, um emissionsfrei fahren zu können. Ob ein Anreizsystem zur Lastverlagerung ohne preislichen Anreiz wirksam wäre, ist allerdings fraglich, zumal die Nutzer mit Vorerfahrungen im Umgang mit DSM-Maßnahmen im Haushalt preissensibler waren. In der Gestaltung preislicher Anreize scheinen feste Vergütungen besser akzeptiert zu werden als verbrauchsabhängige (bspw. variable Strompreise). Kritisch hinterfragt wurden die Auswirkungen der Lastverlagerung auf die Batterielebensdauer, was vor dem Hintergrund der Diskussion um mobile Pufferspeicher (Vehicle-to-Grid) an Relevanz gewinnen dürfte. Der Infrastrukturausbau an Arbeitsplätzen (im halböffentlichen Raum) wurde von vielen gewünscht, um Lastverlagerung auch tagsüber zu ermöglichen.

Die Grenzen der Arbeit betreffen vor allem die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Kundengruppen. So ist zwar die Bereitschaft zur Verlagerung der Ladelast bei dieser kleinen Testgruppe bereits vorhanden, allerdings wäre dieser Aspekt durch eine breitere Untersuchung noch zu validieren, zumal erste Untersuchungen auch ein konträres Bild zeigen (vgl. Paetz et al. 2011b).

Weiterer Forschungsbedarf für die Zukunft ergibt sich darüber hinaus beim Lademanagement. So ist neben einem zeitversetzten Laden auch die Variation der Ladelast denkbar und nicht nur technisch-ökonomisch, sondern auch verhaltenswissenschaftlich zu analysieren, da die in dieser Studie geäußerten Bedenken zur Batterielebensdauer zumindest technisch gesehen bei bloßer Lastverschiebung und gleicher Ladeleistung unproblematisch sind (Jochum et al. 2011) Weitere Erprobungen im Rahmen von Feldversuchen sind erforderlich, um weitere Verhaltens- und Ladedaten aufzuzeichnen und eine stabile Datenanalyse zu ermöglichen.

Dabei könnten auch mehrere Fahrzeugtypen mit anderen Batterieeigenschaften (v. a. in Bezug auf die Ladedauer) zum Einsatz kommen. Die Berücksichtigung eines weiteren Personenkreises (bspw. Studenten) könnte die Erkenntnisse auf eine breitere Basis stellen.

Basierend auf den vorliegenden Ergebnissen empfehlen wir darüber hinaus die Durchführung eines zeitlich länger angelegten Feldversuchs mit einer Kombination der effektivsten DSM-Maßnahmen zur Lastverschiebung (v. a. im Zusammenspiel mit dem Haushalt) gezielt auf ihren Beitrag zu einem effizienteren Energie- und Verkehrssystems zu erforschen.

## 7 Literatur

- CRA (2005): Primer on Demand-Side Management, Charles River Associates.
- DOE (2006): Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for achieving them, U.S. Department of Energy.
- Flick, U.; v. Kardorff, E.; Steinke, I. (2008): Was ist qualitative Forschung?, in: Qualitative Forschung – Ein Handbuch, Hamburg: rororo 2008.
- Grahn, P.; Söder, P. (2011): The Customer Perspective of the Electric Vehicles Role on the Electricity Market, in: Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on the European Energy Market Zagreb, 141-148.
- Green, R.C.; Wang, L.; Alam, M. (2011): The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: A review and outlook, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 (2011), 544-553.
- Hargreaves, T., Nye, M.; Burgess, J. (2010): Making energy visible: A qualitative field study of how householders interact with feedback from smart energy monitors, in: Energy Policy, 38, 6111–6119.
- Hopf, C. (2007): Qualitative Interviews, in: Qualitative Forschung – ein Handbuch, Hamburg: rororo 2007.
- Jochem, P.; Feige, J.; Kaschub, T.; Fichtner, W. (2011): Increasing Demand for Battery Applications, in: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Renewables Energy Storage Conference and Exhibition, Berlin.
- Kaschub, T.; Mültin, M.; Fichtner, W.; Schmeck, H.; Kessler, A (2010).: Intelligentes Laden von batterieelektrischen Fahrzeugen im Kontext eines Stadtviertels , in: Tagungsbandbeitrag VDE Kongress Leipzig.
- Leitinger, C.; Litzlbauer, M. (2011): Netzintegration und Ladestrategien der Elektromobilität, in: Elektrotechnik & Informationstechnik, 128/1-2, 10-15.
- Mayring, P. (2000): Qualitative Content Analysis, in: Forum Qualitative Social Research, 1 (2)
- MOP (2011): Deutsches Mobilitätspanel – Bericht 2011: Alltagsmobilität.
- MRM (2011): MeRegioMobil – Abschlussbericht des Projektkonsortiums.
- Neenan, B.; Boisvert, R.N.; Cappers, P.A. (2002): What Makes a Customer Price Responsive?, in: The Electricity Journal, April 2002, 52-59.

NPE (2010): Nationale Plattform Elektromobilität, Zwischenbericht der Arbeitsgruppe Ladeinfrastruktur und Netzintegration.

Paetz, A.-G.; Dütschke, E. (2011): Dynamische Stromtarife - nur gesetzliche Pflicht oder Kundenwunsch?, in: SIV.news, 1/2011, 47-49.

Paetz, A.-G.; Dütschke, E.; Fichtner W. (2011a): Smart Homes as a Means to Sustainable Energy Consumption: A Study of Consumer Perceptions, in: Journal of Consumer Policy, Online First 16. Okt 2011, DOI: 10.1007/s10603-011-9177-2.

Paetz, A.-G.; Dütschke, E.; Schäfer, A. (2011b): Die Last mit der Lastkontrolle, in: Energie & Management, 12/2011, 19.

Paetz, A.-G.; Becker, B.; Fichtner, W.; Schmeck, H. (2011c): Shifting Electricity Demand with Smart Home Technologies - An Experimental Study on User Acceptance, in: 30<sup>th</sup> IAEE North American Conference Online Proceedings.

Rehtanz, C.; Rolink, J.: Netzintegration und Lastmanagement von Plug-In-Hybrid- und Elektrofahrzeugen, in: ETG-Mitgliederinformation, 2/2010, 6-10.

Shao, S.; Pipattanasompong, M.; Rahman, S. (2009): Challenges of PHEV penetration to the residential distribution network, in: IEEE PES General Meeting 2009, 1-8.

Stromback, J.; Dromacque, C., Yassin, M.H. (2011): The potential of smart meter enabled programs to increase energy and system efficiency – a mass pilot comparison, VaasaETT Global Energy Think Tank.

---

<sup>1</sup> Minimum Emissions Region & Mobility, <http://meregiomobil.forschung.kit.edu/>

<sup>2</sup> Im Kontext des DSM werden zahlreiche englische Begriffe verwendet. Eine entsprechende deutsche Übersetzung wird an geeigneten Stellen angegeben.

<sup>3</sup> Das tatsächliche Fahrverhalten mit E-Pkw wird erst derzeit mit größeren Stichproben, bspw. im Projekt CROME (CROss-border Mobility for EVs; <http://crome.forschung.kit.edu/>), untersucht. Durch die Integration realer elektromobiler Fahrprofile, können zukünftig die technischen Lastverschiebepotenziale in den Simulationsmodellen genauer abgebildet werden.

<sup>4</sup> Tarifmodelle mit CCP-Komponenten sehen zusätzlich eine kurzfristige Anpassung des Arbeitspreises im Fall kritischer Ereignisse (bspw. Kapazitätsengpässe) vor. Die kritischen Ereignisse werden auf einige Stunden oder Tage (Extreme Day Pricing) im Jahr begrenzt.

<sup>5</sup> Minimum Emissions Region, <http://meregio.forschung.kit.edu/>