

## Integration von Elektromobilen in das Smart Grid – Intelligente Beladung von Elektrofahrzeugen

Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben benötigen nur einen Bruchteil der Energie zur Fortbewegung wie herkömmliche Diesel oder Benziner und lassen sich zudem sehr gut in ein Energiekonzept auf Basis erneuerbarer Energien einbinden. Batteriebetriebene und Plug-In-Hybridfahrzeuge, aber auch Brennstoffzellenfahrzeuge, sind deshalb ideal, um auch den mobilen Sektor auf erneuerbare Energien umzustellen. Allerdings bedarf es intelligenter Strategien, um die Fahrzeuge optimal in das Stromnetz einzubinden. Ziel ist einerseits, die Belastung des Stromnetzes durch das Laden der Fahrzeugbatterien zu begrenzen, andererseits aber die Möglichkeiten Elektrofahrzeuge zum Ausgleich von Schwankungen der Energieversorgung und zur Netzstabilisierung zu nutzen.

### Anforderungen an eine leistungsfähige Ladeinfrastruktur

Im Gegensatz zu Brennstoffzellenfahrzeugen, für deren Betrieb erst eine Infrastruktur mit genügend Wasserstofftankstellen aufgebaut werden muss, können batteriebetriebene Elektrofahrzeuge bereits heute über das existierende Stromnetz mit Energie versorgt werden. Diese bereits vorhandene Ladeinfrastruktur dürfte für die geringen Stückzahlen der nächsten Jahre ausreichend sein; für eine breite Durchdringung mit Elektrofahrzeugen muss aber bereits heute mit ihrem Ausbau begonnen werden. Eine verbesserte Infrastruktur sollte ausreichend viele, leicht zugängliche Ladestationen im halböffentlichen und öffentlichen Raum bereit stellen und auch zusätzliche Funktionen wie Rückspeisen von Energie ins Stromnetz oder das Anbieten von Netzdienstleistungen erlauben.

Neben der Optimierung der häuslichen Lademöglichkeiten durch entsprechende Ladecontroller, die jeder Nutzer selbst vornehmen kann, sind Ladestationen in ausreichender Zahl an den Plätzen zu installieren, an denen Fahrzeuge bevorzugt stehen. Das sind beispielsweise Parkplätze von Arbeitgebern oder Einkaufszentren, öffentliche Parkhäuser, Straßen mit hoher Parkdichte etc. Zudem wird sicher auch die Ergänzung von herkömmlichen Tankstellen mit elektrischen Ladestationen nötig sein. Letztere sind insbesondere dann sinnvoll, wenn die Fortschritte in der Batterietechnologie Ladezeiten im Bereich deutlich unter einer halben Stunde ermöglichen.

Entscheidend ist nun, diese Infrastruktur von Anfang an so zu konzipieren, dass eine Nutzung von allen Fahrzeugnutzern problemlos und schnell möglich ist. Proprietäre Inseln, wie sie heute bereits vereinzelt existieren, sind zu vermeiden. Zudem sind Konzepte nötig, die es erlauben, eine hohe Dichte an Ladestationen möglichst preiswert zu erstellen. Das gilt nicht nur für die eigentliche Ladeelektronik sondern auch für den Anschluss an das Stromnetz.

Ladestationen sollten konzeptuell auch bereits für die zukünftig angedachten Funktionen geeignet sein. Heute steht sicher der einfache Beladevorgang im Zentrum. In einigen Jahren, wenn Energieversorger variable Stromtarife anbieten, möchte der Fahrzeugnutzer aber darauf reagieren können, um seine Energiekosten möglichst niedrig zu halten. Diese flexiblen Tarife sind ein besonders geeignetes Instrument, die Nutzer von Elektro- und Plug-In-Fahrzeugen in den Ausgleich von Energieangebot und -nachfrage mit einzubeziehen – eine Aufgabe, die mit steigendem Anteil von Wind- und Solarstrom im Netz immer wichtiger wird.

Um das Ausgleichspotenzial voll auszuschöpfen, sollte im nächsten Schritt auch die Rückspeisung von Energie aus den Fahrzeugbatterien ins Stromnetz ermöglicht werden. Ein Fahrzeugnutzer könnte auf diese Weise langfristig sogar Anbieter von Regelenergie werden. Die dafür nötigen technischen Voraussetzungen in den Ladestationen sollten bereits heute mit bedacht werden.

Intelligente Ladestationen sind auch erforderlich, um bei hoher Durchdringung mit Elektrofahrzeugen die Stromnetze nicht durch gleichzeitiges Laden von zu vielen Fahrzeugen an einem Netzabschnitt zu überlasten. Gemäß einer Untersuchung des Fraunhofer ISI für ein fiktives Szenario im Jahr 2030 würde das ungesteuerte, sofortige Laden der Fahrzeuge nach der letzten Fahrt, zu einer deutlichen Überhöhung der Lastspitzen führen und damit sowohl das Verhältnis von Energieangebot und -nachfrage stören als auch die lokalen Verteilnetzabschnitte überlasten (rote Bereiche in *Abbildung 1*). Vermeiden lässt sich dies mit einem sinnvollen Lastmanagement (blaue Bereiche in *Abbildung 1*), das die Ladezeiten zeitlich sinnvoll verteilt. Da ein hartes Abschalten der Energieversorgung von den Verbrauchern sicher nur in Notsituationen akzeptiert werden würde, bietet sich hierfür eine Steuerung über variable Stromtarife an, die vom



*Fraunhofer ISE*

*Dr. Günther Ebert  
guenther.ebert@ise.fraunhofer.de*

*E.ON New Build & Technology*

*Dr. Petra Behrens  
Petra.Behrens@eon.com*

*Fraunhofer IWES*

*Markus Landau  
markus.landau@iwes.fraunhofer.de*

*DLR*

*Dr. Thomas Pregger  
thomas.pregger@dlr.de*

*ZSW*

*Dr. Michael Specht  
michael.specht@zsw-bw.de*

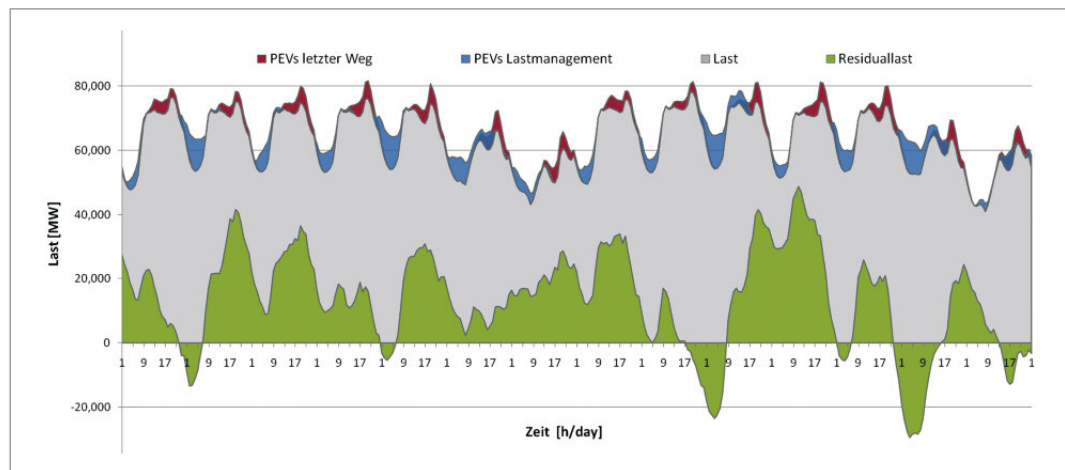


Abbildung 1  
Gesteuertes versus  
ungesteuertes Laden  
(Quelle: Fraunhofer ISE,  
Szenario 2030)

Energieversorger bzw. dem Verteilnetzbetreiber angeboten werden. Der Verbraucher wird dabei durch finanzielle Anreize zu einem konformen Verhalten angeregt.

### Fahrzeug-Netzchnittstelle im Flottenversuch Elektromobilität des BMU

Ein Prototyp eines solchen Systems, das o.g. Anforderungen erfüllt, wurde im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Flottenversuchs Elektromobilität entwickelt. In einem Konsortium von verschiedenen Industriepartnern und Forschungsinstituten unter Leitung von Volkswagen wurde ein Plug-In-Hybridfahrzeug sowie eine geeignete Infrastrukturplattform zur Anbindung an das Stromnetz entwickelt. Daran angeschlossen wurde ein Feldversuch mit 20 Fahrzeugen um praktische Erfahrung mit dem System zu sammeln.

Das Fraunhofer ISE hat im Unterauftrag von E.ON die Fahrzeug-Netzchnittstelle konzipiert sowie die dafür erforderlichen Komponenten entwickelt. Das System erlaubt sowohl ein kostenoptimiertes Laden der Fahrzeuge sowie auch das Rückspeisen von Energie aus der Fahrzeugbatterie ins Netz. Die Steuerung erfolgt mittels eines variablen day-ahead-Tarifs für Strombezug und -rückspeisung, der die Erzeugungs- und Lastsituation im Stromnetz widerspiegelt. Die Arbeiten umfassten auch die Fahrzeugidentifikation an der Ladestation, die Ladetechnik, das Messen (Metering), der mit dem Netz ausgetauschten Energie, die tarifbasierte Ladesteuerung sowie die Kommunikation zwischen Fahrzeug, Energieversorger und Fahrzeugnutzer.

Hardwareseitig wurde eine bidirektional arbeitende intelligente AC-Wallbox mit einer maximalen Leistung von 3,7 kW entwickelt.

Für eine schnellere Ladung wurden zusätzlich 30 kW-DC-Schnellladestationen entwickelt und aufgebaut. Die Erfassung der Energieflüsse erfolgte durch einen mobilen Metering- und Ladesteuerungscontroller (mSM), der vollständig im CAN-Bordnetz des Fahrzeugs integriert wurde. Die AC-Wallbox, die über eine ZigBee-Funkverbindung mit dem mSM im Fahrzeug kommunizierte, wurde für den Feldversuch so konfiguriert, dass sie die Verbrauchsdaten über ein GSM-Modul an einen externen Tarif- und Messdaten-server schicken konnte.

Um den Feldversuch unter realistischen Bedingungen durchzuführen, wurde ein Szenario zu Grunde gelegt, wie es voraussichtlich um 2030 vorliegt. Auf der Basis der Leitstudie 2010 im Auftrag des BMU wurde angenommen, dass zu dieser Zeit 12 Millionen Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren und der Batteriepreis etwa 250 €/kWh beträgt. Durch die für dieses Szenario entwickelten variablen Tarife sowie den vom Nutzer eingestellten Vorgaben wurde im mSM die preisoptimale Ladestrategie errechnet und überwacht. Eine Rückspeisung bzw. die Bereitstellung von Netzdienstleistungen erfolgte nur, wenn es für den Fahrzeugnutzer auch einen finanziellen Vorteil ergab. Hierbei wurde die zusätzliche Batterienutzung mit einberechnet. Der Tarif wurde einen Tag im Voraus übermittelt (day-ahead) mit der Option der kurzfristigen Korrektur bei veränderter Netzsituation, die allerdings nie zum Nachteil des Fahrzeugnutzers ausfallen durfte. *Abbildung 2a* zeigt ein typisches Ergebnis über einen Tag. Deutlich erkennbar ist, dass sich Lade- und Rückspeiseabschnitte abwechseln. Die gestrichelten und gepunkteten Linien entsprechen optionalen, aktuellen Lade- bzw. Rückspeiseangeboten, die der Netzstützung dienen.

Das ungesteuerte Laden ist zum Vergleich in *Abbildung 2b* dargestellt.

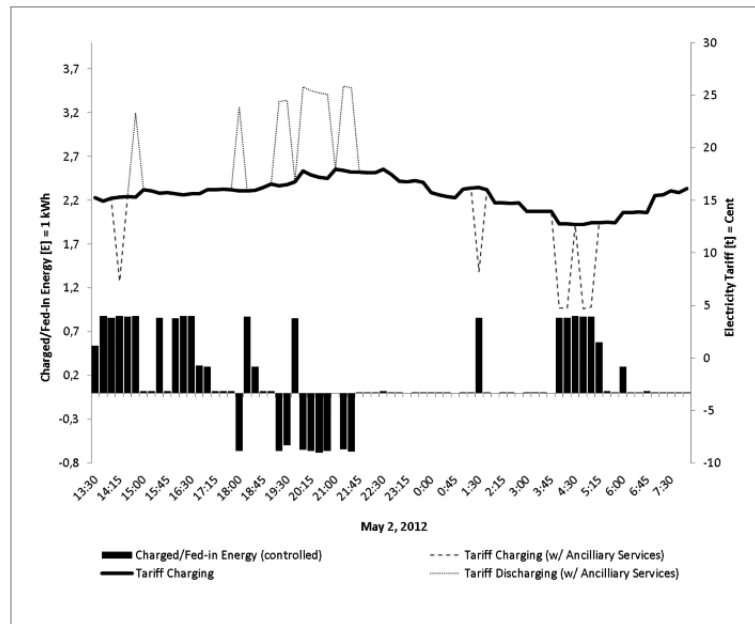


Abbildung 2a  
Tagesprofil bei tarifgesteuertem Laden und Rückspeisen ins Netz

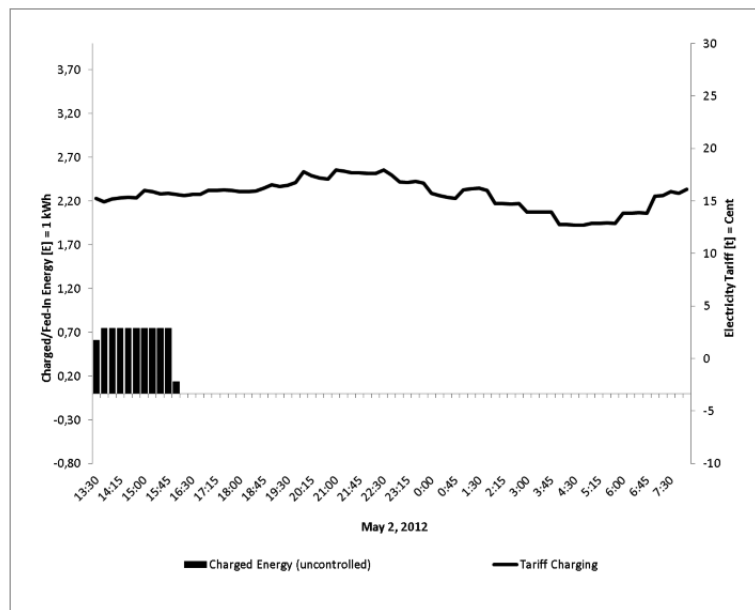


Abbildung 2b  
Tagesprofil bei ungesteuertem Laden

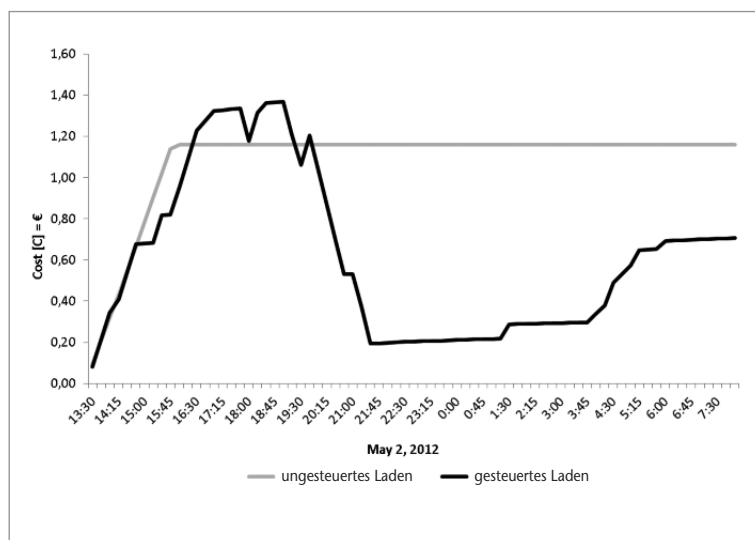


Abbildung 3  
Kostenvergleich:  
ungesteuertes Laden  
versus gesteuertes  
Laden

Für den Fahrzeugnutzer besonders interessant ist der Kostenvergleich zwischen ungesteuertem und tarifgesteuertem Laden (Abbildung 3). Die dunkle Linie, die der gesteuerten Ladung entspricht, endet bei deutlich niedrigeren Gesamtkosten als bei ungesteuerter Ladung. Die Auswertung aller Feldversuchsdaten ergab, dass der Kostenvorteil für den Fahrzeugnutzer je nach Situation zwischen 10 und 20% lag. In der Praxis sollte sich damit eine effektive Steuerwirkung ergeben.

### Zukunftsweisendes Schnellladegerät

Auch im Rahmen des durch das BMBF geförderten Projekts „Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität“ wurde die Integration von Elektrofahrzeugen in das Stromnetz untersucht und eine prototypische Entwicklung einer „Fahrzeug-Netzchnittstelle“ durchgeführt (Abbildung 4).

Der sogenannte E-Car-Communication-Manager bildet die zentrale Einheit zur Steuerung aller Prozesse und Abläufe an der Fahrzeug-Netz-Schnittstelle. Neben einer „normalen“ AC-Ladung gibt es auch hier die Möglichkeit einer Schnellladung über eine DC-Strecke. Für letztere wurde am Fraunhofer ISE eine spezielle Schnellladeeinheit entwickelt um den zukünftig zu erwartenden steigenden Anforderungen an die Ladezeiten gerecht zu werden (Abbildung 5). Ziel war es, dem derzeit technisch Machbaren möglichst nahe zu kommen. Das Schnellladegerät mit einer Leistung von 22 kW wurde primär für den Einbau in eine stationäre Ladesäule konzipiert. Durch die Wahl eines transformatorlosen Designs, welches erstmalig im automobilen Bereich eingesetzt wurde, und den Einsatz von Siliziumkarbid-Transistoren, die eine hohe Taktfrequenz von 80 kHz und damit den Einsatz von Induktivitäten mit kleiner Bauform erlauben, konnte das Gerät extrem kompakt ausgeführt wer-

den. Mit einer Leistungsdichte von 2,7 kW/l kann das Gerät deshalb auch als On-Board-Lader eingesetzt werden. In diesem Falle kann die Baugruppe auch in die Wasserkühlung des Fahrzeugs integriert werden. Die Schnellladeeinheit arbeitet dabei bidirektional und erlaubt damit auch das Rückspeisen in das Stromnetz. Die Schaltung ist zweistufig aufgebaut, um eine gute Anpassung an die Batteriespannung zu erreichen und beinhaltet einen 3-Level-AC/DC-Wandler, der besonders geringe EMV-Emissionen aufweist, so dass trotz hoher Leistung keine aufwändigen Schirmaßnahmen nötig wurden.

### Power-to-Gas-Konzept

Neben den batteriegestützten Elektrofahrzeugen, die direkt aus dem Stromnetz versorgt werden und sich besonders gut für Fahrten mit Reichweiten bis etwa 100 km eignen, dürften in den nächsten Jahren auch Brennstoffzellenfahrzeuge in signifikanten Stückzahlen auf den Markt kommen. Diese weisen maximale Reichweiten von 400 km und mehr auf und sind somit in der Lage, das Langstreckensegment abzudecken.

Versorgt werden diese Fahrzeuge mit Wasserstoff, der an speziellen Tankstellen zur Verfügung steht. Dennoch können diese Fahrzeuge, wenn auch nur indirekt, zur Stabilität unseres Stromnetzes beitragen. Zu Grunde liegt ein Versorgungskonzept, das insbesondere die saisonalen Ungleichheiten zwischen Stromerzeugung und -verbrauch bei hohen Anteilen an Wind- und Solarenergie ausgleichen soll und derzeit am ZSW erprobt wird. Mit überschüssigem Strom aus Wind- und Solarkraftwerken soll in riesigen Elektrolyseuren Wasserstoff erzeugt werden, der entweder direkt zum Betrieb von Brennstoffzellenfahrzeugen verwendet werden kann oder auch in einem Folgeprozess in Methan umgewandelt werden kann (Abbildung 6).

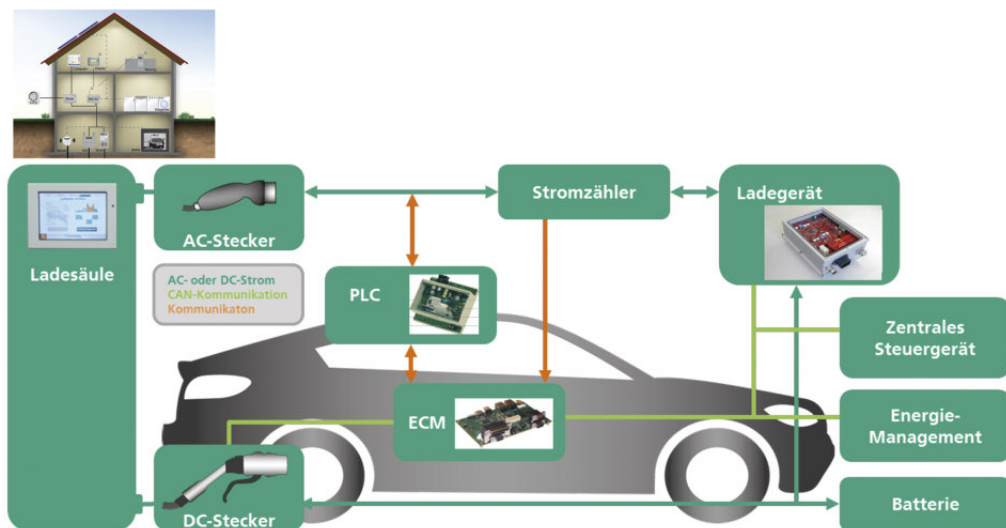


Abbildung 4  
Systemlösung:  
Fahrzeug-  
Netzchnittstelle

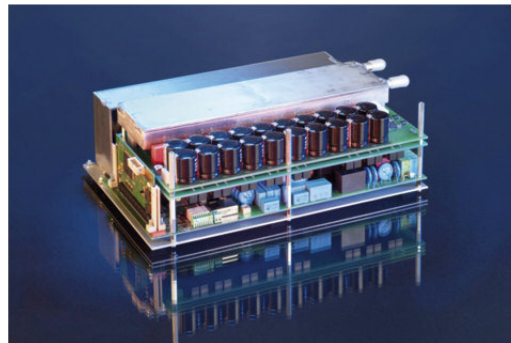


Abbildung 5  
Schnellladegerät  
(Fraunhofer ISE)

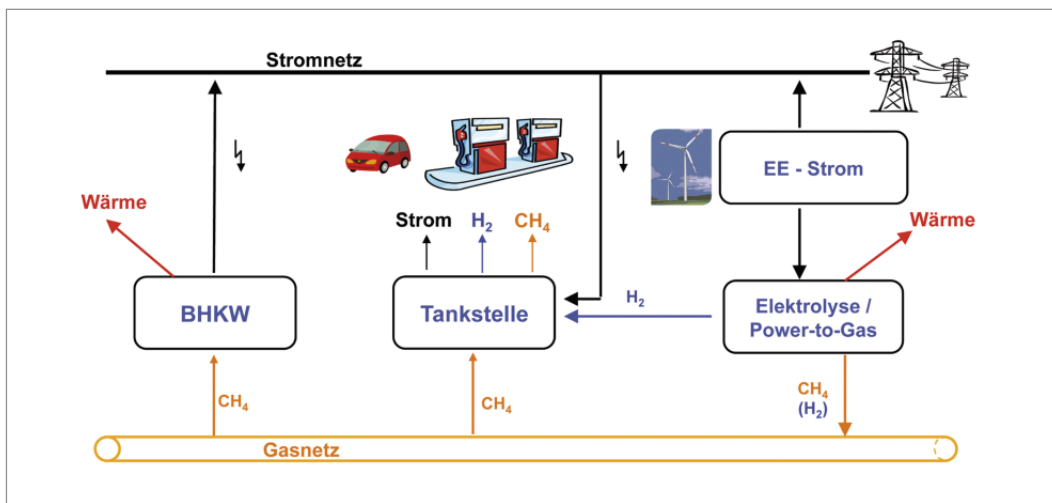


Abbildung 6  
Power-to-Gas-Konzept  
mit Tankstellen für  
Strom, H<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>  
als „Speicher“ und  
Regelenergieanbieter



Abbildung 7  
E-Mobilität via H<sub>2</sub> aus  
EE-Strom:  
Links: H<sub>2</sub>-Tankstelle  
(Fraunhofer ISE)  
Rechts: 25 kW Power-  
to-Gas-Anlage  
(ZSW/SolarFuel)

Dieses synthetische Methan hat den entscheidenden Vorteil, dass es direkt in das vorhandene Gasnetz eingeleitet werden kann (Power-to-Gas-Konzept) und deshalb keine zusätzliche Infrastruktur zum Transport zu den Verbrauchern nötig ist. Insbesondere steht damit mehr Gas für die Versorgung von Erdgasfahrzeugen oder auch für die Möglichkeit der Wiederverstromung in Blockheizkraftwerken zur Verfügung. Da das heutige Gasnetz eine im Vergleich zum Stromnetz gigantische Speicherkapazität besitzt und diese notfalls noch erweitert werden kann, ist dieses Konzept sehr gut geeignet um saisonale Schwankungen in der Energiebilanz auszugleichen: In Überschusszeiten wird Wasserstoff bzw. Methan erzeugt, in

Mangelzeiten wird das Gas wieder verstromt. Geschieht das in Blockheizkraftwerken bei gleichzeitiger Nutzung der Wärme sind auch die Verluste, die durch die zusätzliche Umwandlung von Wasserstoff in Methan entstehen, akzeptabel.

Abbildung 7 zeigt links eine der ersten photovoltaisch versorgten Wasserstofftankstellen, die seit 2012 am Fraunhofer ISE in Betrieb ist. Ein Konsortium aus Automobilherstellern und Versorgungsindustrie hat angekündigt, in den nächsten Jahren in Deutschland ein ausreichend dichtes Netz an Wasserstofftankstellen aufzubauen.

		Ladesysteme für Elektrofahrzeuge		Konvent. Kraftwerk
		Unidirektional	Bidirektional	Dampfturbine & Synchrongenerator
Technologie		Gleichrichter + PFC	Bidirektionaler Wechselrichter	Synchrongenerator
Wirkleistung P	Demand Side Management	✓	✓	✗
	Erzeugungsmanagement	✗	✓	✓
	Sekundärregelung	✗	✓	✓
	Primärregelung		✓	
	Momentanreserve		✓	
Blindleistung Q	Phasenschieberbetrieb	✗	✓	✓
	Stat. Spannungsstützung		✓	
	Dyn. Spannungsstützung		✓	
Verzerrungsblindleistung D	Oberschwingungskompensation	✗	✓	✓

Abbildung 8  
Systemdienstleistungen durch Elektromobilität

Die rechte Hälfte der Abbildung zeigt eine 25 kW-Power-to-Gas-Versuchsanlage, die das ZSW entwickelt hat. Seit kurzem ist – ebenfalls am ZSW – die weltweit größte Anlage zur Ökostromspeicherung mit einer Kapazität von 250 kW im Betrieb.

### Ausblick

Was eine leistungsfähige, nutzergerechte Lade-/Entlade-Infrastruktur für Elektrofahrzeuge leisten muss und wie eine technische Realisierung aussehen könnte, wurde in verschiedenen Projekten von unterschiedlichen Projektpartnern bereits gezeigt. In der Realität existiert davon erst wenig. Die derzeit im halböffentlichen bzw. öffentlichen Raum existierenden Lademöglichkeiten sind meist proprietäre Lösungen mit speziellen Zugangsmöglichkeiten. Funktionen über das reine Laden hinaus werden i. d. R. nicht angeboten. Das liegt an der derzeit noch geringen Anzahl von Elektrofahrzeugen, den noch recht hohen Kosten und den noch fehlenden Geschäftsmodellen für solche Systeme. Um den Ausbau der Ladeinfrastruktur zügig voran zu bringen, muss deshalb intensiv an der Entwicklung kostengünstiger Lösungen gearbeitet werden. Insbesondere sind Schnelladestationen noch besonders teuer, bieten aber auch – wie im obigen Beispiel aufgezeigt – viel Kostensenkungspotenzial. Auch die reinen Anschlusskosten für Ladesäulen sind relativ hoch, so dass hier ebenfalls neue Konzepte nötig sind. Dringenden Beschleunigungsbedarf gibt es auch bei der noch mangelnden Standardisierung. Nach den langwierigen Verhandlungen zur Stecker-Standardisierung muss jetzt insbesondere

an der Standardisierung der Zugangsschemata und der Kommunikationsprotokolle gearbeitet werden.

Netzdienstleistungen, die durch Elektrofahrzeuge erbracht werden, sind eher ein mittelfristiges Thema und setzen eine gewisse Mindestanzahl von Fahrzeugen voraus. Dennoch muss dieser Aspekt bereits beim Aufbau einer Infrastrukturplattform berücksichtigt werden. *Abbildung 8* gibt einen Überblick über die möglichen Arten von Netzdienstleistungen. Die allermeisten heutigen Ladesysteme sind lediglich in der Lage, Ladevorgänge zeitlich zu verschieben (Demand Side Management), sofern sie denn einen Kommunikationsanschluss besitzen. Weitere wünschenswerte Netzdienstleistungen wie Wirkleistungs- und Blindleistungsregelung oder Power-Quality-Funktionen, wie sie bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung nötig werden, um die Netzqualität zu verbessern, setzen intelligente Ladestationen mit bidirektionaler Wirkungsweise voraus.

Interessante Ansätze, um den Komfort beim Stromtanken und damit die Akzeptanz beim Fahrzeugnutzer zu erhöhen, bieten kabellose Ladeverfahren. Damit würden die besonders beim Schnellladen dicken und störrischen Ladekabel und das Stecken von schwergängigen Steckern entfallen. Technisch wird diese induktive Übertragung von Energie in einigen Segmenten der Industrie heute schon angewandt. Die Herausforderung liegt deshalb eher bei der Berücksichtigung der speziellen Aspekte im Fahrzeug und insbesondere bei der Realisierung kostengünstiger Systeme. Derzeit wird in den Fraunhofer Instituten ISE und IWES zusammen mit Industrieunternehmen an solchen Lösungen gearbeitet.