

**ETH**

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

**eeh** power systems  
laboratory

Christian Schluchter

## Die Idee des Vehicle to grid (V2G)

D-ITET, PPS Arbeit



Departement:

EEH – Power Systems Laboratory, ETH Zürich

Experte:

Prof. Dr. Göran Andersson, ETH Zürich

Betreuer:

Florian Kienzle, ETH Zürich

Zürich, Juni 2007

# Vorwort

Diese Arbeit im Rahmen einer PPS-Arbeit im 2. Semester des Departements für Informationstechnologie und Elektrotechnik hat mir einen Einblick in die zukunftsweisende Technologie Vehicle-to-grid gewährleistet und dabei die Arbeitsweise beim Schreiben einer wissenschaftlichen Arbeit näher gelegt.

Ich bedanke mich herzlich beim Institut für Power Systems Laboratory und im Speziellen bei Florian Kienzle für die unterstützende Hilfe.

Christian Schluchter, schluchc@ee.ethz.ch

# Kurzfassung

Die verbreiteten Antriebskonzepte im Strassenverkehr sind veraltet. Neue Technologien zur Förderung von Elektromobilen könnten diesen bald den Durchbruch bringen. Vehicle-to-grid ist eine Technologie, mit der Elektromobile als Kleinkraftwerke genutzt werden können. Elektromobile sollen eine bidirektionale Verbindung zum bestehenden Stromnetz erhalten, um einerseits die Batterien zu laden und andererseits Netzhilfsdienste zu leisten. Von allen existierenden Strommärkten erweist sich ein Einsatz im Regelmärkte am sinnvollsten. Elektromobile, die mit einem Elektromotor bereits mit den wichtigsten Elementen für die Wechselstromerzeugung ausgerüstet sind, könnten Aufgaben übernehmen, für die sonst teure Anlagen mit ineffizient genutzten Generatoren gebraucht werden. In dieser Arbeit werden die verschiedenen Strommärkte kurz erläutert. Sie soll aber hauptsächlich einen Überblick über verschiedene Systeme und Einsatzmöglichkeiten von Vehicle-to-grid gewähren. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit besteht darin, aufzuzeigen, dass ein Einsatz von Vehicle-to-grid durchaus lohnenswert und plausibel ist.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung in "Vehicle-to-Grid"</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Strommärkte</b>	<b>3</b>
2.1	Grund- und Mittellast . . . . .	4
2.2	Spitzenlast . . . . .	4
2.3	Regelung . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Verschiedene V2G-Systeme</b>	<b>6</b>
3.1	Ausschliesslich mit Batterie betriebene EM . . . . .	6
3.2	Hybridfahrzeuge . . . . .	7
3.3	Solarmobile . . . . .	7
3.4	Brennstoffzellenfahrzeuge . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Der Einsatz von V2G</b>	<b>9</b>
4.1	Schwierigkeiten beim Einsatz von EM . . . . .	9
4.2	Die Leistung von Regelungsdiensten . . . . .	10
4.3	Strategien zur Erfüllung der Bedürfnisse des Fahrers und des Netzbetreibers	10
4.4	Die Verbreitung von V2G . . . . .	11
4.4.1	Schritt 1: Demonstrationsflotten . . . . .	12
4.4.2	Schritt 2: Kostendeckung und Verbreitung individueller Fahrzeuge	12
4.4.3	Schritt 3: Speicherung erneuerbarer Energie . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>13</b>

# 1 Einführung in "Vehicle-to-Grid"

Es ist unumstritten, dass im Bereich der Mobilität in der näheren Zukunft signifikante Änderungen geschehen müssen. Die Tage des Verbrennungsmotors als alleiniger Antrieb von Fahrzeugen sind gezählt. Vermehrt wird an Alternativen wie Hybridsystemen oder anderen Elektromobilen (nachfolgend abgekürzt EM) geforscht. Deren Durchbruch ist absehbar.

Heute wird die Erde von Millionen von Fahrzeugen befahren, die nur zu etwa 4% der Zeit genutzt werden [10]. Wäre nur schon ein Teil davon elektrisch betrieben, entstünde eine riesige Energiespeicherkapazität, die zu 96% der Zeit frei genutzt werden könnte. Im Stromversorgungsnetz hingegen, besteht keine relevante Möglichkeit, Energie zu speichern. Die gelieferte Energiemenge muss laufend der Nachfrage angepasst werden, was enorme Mehrkosten für die Netzbetreiber mit sich bringt.

Unter dem Begriff Vehicle-to-grid (nachfolgend abgekürzt V2G) versteht man ein System von EM, welche über eine bidirektionale Verbindung zum Stromnetz verfügen.

Der Hauptgedanke von V2G befasst sich mit batteriebetriebenen EM, welche während der Zeit in der sie nicht gebraucht werden, mit dem Stromnetz verbunden sind. Durch die Nutzung dieser mobilen Speicherkapazitäten würde die Leistung von Netzhilfsdiensten wie die Regelung der Netzfrequenz oder die Aushilfsleistungen bei einem Generatorausfall ermöglicht, welche andernfalls mit teuren Investitionen verbunden wären. Dies würde die Kosten für die Netzbetreiber drastisch senken. Werden diese den Trend zu EM und die für sie resultierenden Vorteile einmal erkennen, werden sie die Verbreitung der EM unterstützen. Die zunehmende Nachfrage nach EM hätte zur Folge, dass vermehrt in diese Technologie investiert würde und sie somit konkurrenzfähig wäre.

Eine Netzverbindung ist heute nur bei Fahrzeugen vorhanden, welche ausschliesslich batteriebetrieben sind und keine Möglichkeit haben, die Batterie an Bord zu laden. Diese Verbindung ist heute aber standardmässig nur einseitig, das bedeutet, dass das Fahrzeug zwar geladen werden kann, jedoch keine Rückspeisung von Energie in das Stromnetz möglich ist. Im Allgemeinen wären aber keine hohen Zusatzkosten erforderlich um EM V2G-tauglich zu machen.

Der Einsatz von V2G könnte nebst den Vorteilen für die Netzbetreiber auch die Nutzung von erneuerbarer Energie fördern. Die Speichereinheiten der Fahrzeuge könnten genutzt werden um die oft schwankende Energieproduktion auszugleichen. V2G hätte auch direkte Vorteile für den EM-Besitzer, könnte dieser doch bei einem Stromausfall sein Fahrzeug als Notstromaggregat benutzen.

Im nächsten Kapitel wird das nötige Wissen über die verschiedenen Strommärkte vermittelt. Ausserdem werden die zugehörigen V2G-Nutzungsmöglichkeiten beschrieben. Das darauf folgende Kapitel erläutert verschiedene Systeme von V2G, während das vierte Kapitel die beim Einsatz auftretenden Schwierigkeiten und Lösungsansätze vorstellt.

## 2 Strommärkte

Mit Strom wird auf verschiedenen Märkten gehandelt. So kann der konstante Anteil der nachgefragten Energie langfristig vertraglich geregelt werden, was die Produktion günstiger macht. Strom, welcher zusätzlich benötigt wird, kann entsprechend der Nachfrage kurzfristig geliefert werden, ist aber teurer, da für die Stromlieferanten Mehrkosten durch die schwankende Nachfrage entstehen. Es müssen Kraftwerke dazu- oder abgeschaltet werden und nicht alle Generatoren können mit der optimalen Leistung laufen. Zusätzlich zu diesen Energien werden Reserven benötigt, welche die Netzfrequenz konstant halten oder notfalls zusätzliche Energie liefern.

In Abbildung 2.1 ist ein Beispiel einer typischen Tageslastkurve dargestellt, das die Aufteilung auf die verschiedenen Lasten, welche nachfolgend beschrieben sind, zeigt.

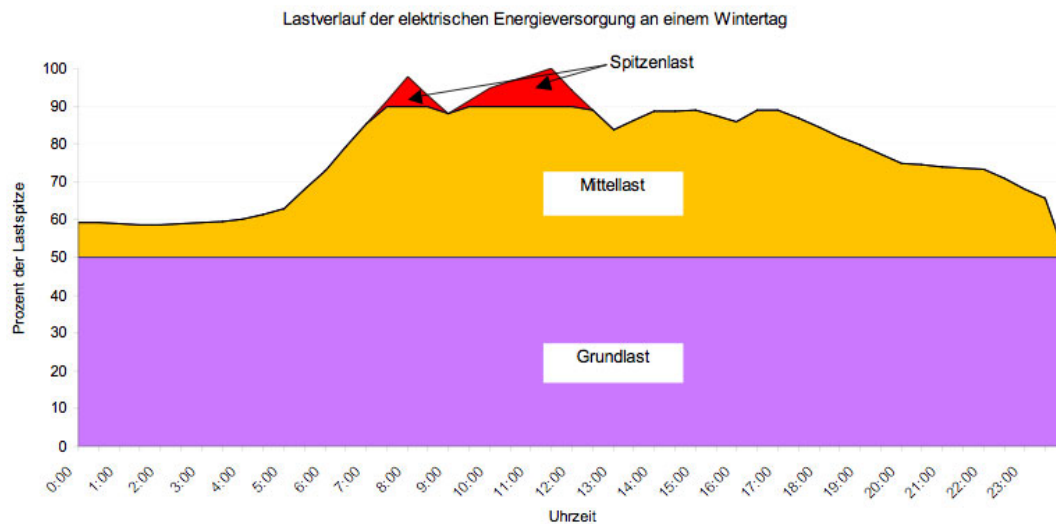


Abbildung 2.1: Beispiel einer Tageslastkurve [12]

## 2.1 Grund- und Mittellast

Grundlaststrom wird rund um die Uhr benötigt und über langfristige Geschäfte mit einer Laufzeit von mehreren Jahren eingekauft. Oft stammt er von Atom- oder thermischen Kraftwerken, welche zwar hohe Investitionskosten aufweisen, diese aber mit einer stetigen Produktion und einem tiefen Preis pro Kilowattstunde wettmachen.

In den Bereich der Mittellast steigt der Verbrauch, wenn zur Grundlast zusätzlicher Strom benötigt wird, wie beispielsweise mittags. Der Anstieg muss aber vorhersehbar sein, da Mittellastkraftwerke nicht mit sofortiger Wirkung eingeschaltet werden können. Für unerwartete Anstiege oder sehr hohe Spitzenwerte müssen reaktionsschnellere Spitzenlastkraftwerke hinzugezogen werden.

Mittels V2G kann nicht Grund- oder Mittelstrom ins Stromnetz zurückgespeist werden. Da eine stetig hohe Produktion erforderlich ist, trifft es genau die Schwächen von EM. Sie bestehen namentlich in der kleinen Speicherkapazität, einer kurzen Lebensdauer der Geräte verglichen mit Grosskraftwerken und damit verbundenen hohen Kosten pro Kilowattstunde erzeugter Energie. In einer fortgeschrittenen Phase der Verbreitung von V2G ist es aber möglich, dass V2G genutzt wird, um erneuerbare Energien wie die Photovoltaik oder die Windkraft vermehrt einzusetzen. Die Leistung dieser Energiequellen leidet wetterbedingt unter mangelnder Kontinuität. Mit der Nutzung der riesigen Speicherkapazität aufsummierter V2G-Batterien kann dieses Problem weitgehend behoben werden.

## 2.2 Spitzenlast

Spitzenlaststrom wird nur produziert, wenn erhöhter Strombedarf besteht. Dies geschieht durch Zuschaltung flexiblerer Kraftwerke wie Gas- oder Wasserturbinen. Da Spitzenlaststrom typischerweise nur an wenigen hundert Stunden im Jahr benötigt wird, stehen tiefe Investitionskosten im Vordergrund, auch wenn dadurch der Preis pro Kilowattstunde höher ist.

V2G könnte möglicherweise wirtschaftlich Spitzenlaststrom zur Verfügung stellen. Die

Dauer einer Spitzenlasteinheit beträgt üblicherweise drei bis fünf Stunden, was für V2G möglich, jedoch wegen der begrenzten Speichermöglichkeiten schwierig ist [10].

## 2.3 Regelung

Die variable Nachfrage und auch das Ein- und Ausschalten von Generatoren muss möglichst zeitgleich kompensiert werden. Dafür sind Reserven nötig, die möglichst ohne Verzögerung für kurze Zeit Regelenergie liefern können. Diese Reserven halten auch die Netzfrequenz konstant, die von den angeschlossenen Verbrauchern und Generatoren abhängig ist. Die Regelung geschieht in verschiedenen Schritten [1, 11]:

**Primärregelung** stabilisiert die Netzfrequenz innert Sekunden mittels Anpassung der Leistung der Turbinen über einen automatischen Controller.

**Sekundärregelung** ersetzt oder unterstützt die Primärregelung nach einigen Minuten bei zu grossen unerwarteten Schwankungen der Frequenz oder der Leistung.

**Tertiärregelung** wird manuell hinzugeschaltet, wenn die Primär- und Sekundärregelung nicht ausreichend ist.

V2G ist vor allem in der Primär- und Sekundärregelung gewinnbringend einsetzbar. Gesteuert über einen Kommunikationskanal kann die Leistungselektronik des Fahrzeuges mit sofortiger Wirkung auf Signale des Netzbetreibers reagieren und Leistung wie gefordert entweder liefern oder aufnehmen. Das Energiesystem von EM ist im Gegensatz zu Generatoren bereits dazu konstruiert, auf plötzliche, starke Schwankungen der Nachfrage zu reagieren. Die schnelle Leistungsanpassung ist Voraussetzung für den Fahrbetrieb. Somit sind EM wie geschaffen für die Regelung und, da praktisch keine zusätzlichen Anlagen benötigt werden, äusserst ökonomisch einsetzbar.

Verschiedene Systeme von V2G und deren Einsatzmöglichkeiten werden im nächsten Kapitel erläutert.

## 3 Verschiedene V2G-Systeme

Es gibt zwei Grundsysteme von Fahrzeugen mit einer Verbindung zum Stromnetz. Das erste besteht aus Fahrzeugen, die solange sie geparkt sind eine Verbindung zum Stromnetz haben und Netzhilfsdienste wie z.B. Regeldienste leisten. Vier Typen von EM, die so eingesetzt werden können, werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Andere Fahrzeuge beziehen während der Fahrt Leistung über Stromabnehmer von einem Netz, wie wir es von öffentlichen Verkehrsmitteln kennen. Obwohl auch diese Fahrzeuge eine Verbindung zum Stromnetz haben, werden sie meistens nicht unter dem Begriff V2G eingeordnet, weshalb sie in dieser Arbeit auch nicht genauer beschrieben werden.

Alle beschriebenen Typen von EM werden von Elektromotoren betrieben, die mit sinusförmigem Wechselstrom gespeist werden. Die Motoren und die zugehörige Leistungselektronik machen schon den grössten Teil der benötigten Elemente für die Erzeugung von Wechselstrom aus, der an die Netzfrequenz von 50 bzw. 60 Hz angepasst ist. Zusammen mit der schon eingebauten Batterie beinhalten alle EM die für die Netzstromerzeugung und Energiespeicherung notwendigen Hauptkomponenten. Zukünftige Modelle können also mit wenig zusätzlichem Aufwand V2G-tauglich hergestellt werden.

### 3.1 Ausschliesslich mit Batterie betriebene EM

Fahrzeuge, die keine Möglichkeit zur Energiegewinnung an Bord haben, benötigen schon eine leistungsfähige Batterie für die Fahrt. Auch die Verbindung zum Stromnetz muss für das Laden des Fahrzeugs gewährleistet sein. Zur Umrüstung auf das V2G-System wären also minimale Investitionen nötig: Das Fahrzeug müsste um eine bidirektionale Verbin-

derung und die für V2G benötigte Elektronik erweitert werden, so dass eine Rückspeisung ins Netz und somit Netzhilfsdienste ermöglicht würden.

## **3.2 Hybridfahrzeuge**

Ein Hybridantrieb, wie er im Strassenverkehr eingesetzt wird, besteht aus einem Verbrennungsmotor und einem oder mehreren Elektromotoren. Der Verbrennungsmotor treibt einen Generator an, der Strom für die Elektromotoren liefert und kann so im Normalbetrieb sparsamer betrieben werden. Falls zusätzliche Leistung benötigt wird, etwa beim Beschleunigen, kann er mit direktem Antrieb über die Achse die Leistung verstärken. Es ist eine vergleichsweise kleine Batterie eingebaut, die eine Pufferfunktion einnimmt, um durch regeneratives Bremsen oder Abwärtsfahren zurückgewonnene Energie zu speichern.

Heute verkehrende Hybridfahrzeuge wären ungeeignet für V2G. Zukünftige Versionen, bekannt unter dem Namen plug-in-hybrids oder eHybrids werden eine grössere Batterie und einen Netzanschluss erhalten. Diese plug-in-hybrids sind die Fahrzeuge, die am besten mit dem Konzept V2G harmonieren. Gegenüber rein batteriebetriebenen EM haben sie den Vorteil, dass sie im Falle fehlender Lademöglichkeit noch mit flüssigen Treibstoffen oder Gas betrieben werden können, während rein batteriebetriebene EM bei leerer Batterie und ohne Netzanschluss nicht mehr fahrtauglich sind.

Mit Hilfe des Verbrennungsmotors könnte bei Stromausfällen Notstrom erzeugt werden, was für den Besitzer, vor allem auch für grössere Institutionen wie zum Beispiel Spitäler, sehr nutzbringend wäre. Eine zusätzliche Infrastruktur für die Notstromversorgung würde somit entfallen, da die Fahrzeuge sowieso vorhanden und auch schon ans Netz angeschlossen wären.

## **3.3 Solarmobile**

Solarmobile könnten bei aufgeladenen Batterien überschüssige Energie ins Netz speisen und würden als kleine Solarkraftwerke fungieren. Solche Systeme sind schon seit Jah-

ren bei grösseren Fahrzeugen (zum Beispiel Solarschiffen) in Betrieb. Im Strassenverkehr werden Solarmobile aber in näherer Zukunft kaum zu beobachten sein, da ein wirtschaftlicher Betrieb von genügend effizienten Solarzellen hier aus verschiedenen Gründen auf sich warten lässt.

### **3.4 Brennstoffzellenfahrzeuge**

Fahrzeuge mit Brennstoffzellen speichern Energie in Form von Wasserstoff ( $H_2$ ) in einem Tank. Mit Sauerstoff aus der Atmosphäre wird Elektrizität erzeugt, Nebenerzeugnisse dabei sind Wasser und Wärme. Forschungen über alternative Speicher- oder auch Herstellungsmöglichkeiten von Wasserstoff an Bord sind im Gange. Zur Zeit ist noch nicht klar, ob Brennstoffzellenfahrzeuge rentabel eingesetzt werden können. Netzverbindungen werden für den Fahrbetrieb nicht benötigt und würden zusätzliche Kosten verursachen. Auch Batterien sind für V2G nicht ausreichend vorhanden. Der V2G-Einsatz würde also relativ hohe zusätzliche Investitionen erfordern, was Brennstoffzellenfahrzeuge, auch wegen ihrer ungewissen Zukunft für V2G eher ungeeignet macht.

Im folgenden Kapitel werde ich auf Schwierigkeiten beim Einsatz von V2G eingehen und Lösungsstrategien vorstellen.

## 4 Der Einsatz von V2G

### 4.1 Schwierigkeiten beim Einsatz von EM

Um EM konkurrenzfähig zu machen, muss es möglich sein, sie an strategisch wichtigen Stellen, wie Arbeitsplätzen, Parkhäusern und auch Wohnhäusern, zu jeder Zeit aufladen zu können. Dabei müsste auch die Leistung der Ladestation entsprechend hoch sein, um ein möglichst rasches Laden zu ermöglichen. Die EM-Besitzer werden wohl eher auf Bequemlichkeit setzen und ihre Fahrzeuge laden, wenn es eben gerade praktisch ist, als dass sie die schwach belasteten Zeiten nutzen würden. Ein typisches Beispiel wäre nach der Fahrt vom Arbeitsplatz nach Hause in der Stosszeit von 18-20 Uhr. Dies würde ernsthafte Auswirkungen auf die tägliche Höchstbelastung des Netzes haben. Man stelle sich, vor jedes Fahrzeug würde mit 12-24kW zur gleichen Zeit geladen werden [9]. Zum Vergleich: Höchstverbraucher im Haushalt sind zur Zeit elektrische Heizungen oder Ähnliches mit 2-4kW [9].

Um das Anwachsen der Lastspitze zu verhindern, müssen die Ladezeit und -dauer der EM kontrolliert werden. Dies wäre am einfachsten über eine kabellose Internetverbindung oder ähnliches zu einer Kontrollstation, vorzugsweise vom Netzbetreiber geführt, umzusetzen.

Da mit Hilfe von V2G alternative Energien effizienter eingesetzt werden können, kann, falls ein Verbrauchsanstieg trotzdem unausweichlich ist, die nötige Energie zumindest nachhaltiger gewonnen werden. Wind- und Solarenergie beispielsweise haben einen bedeutenden Nachteil in der Kontinuität. Mit einer kostengünstigen Methode zur Energiespeicherung, die bisher in dieser Grössenordnung fehlt und V2G ermöglichen würde, wäre ein grosses Problem bei der Nutzung dieser Energien beseitigt.

## 4.2 Die Leistung von Regelungsdiensten

Unter allen möglichen Netzdienstleistungen können Regelungsdienste am konkurrenzfähigsten von V2G geleistet werden (Vgl. Kapitel 2.3). Darüber hinaus beanspruchen sie das Energiespeichersystem der Fahrzeuge am wenigsten [2].

Regelungsdienste werden auf dem Markt mit zwei Preisen gehandelt. Ersterer ist der Preis, der gezahlt wird für die Einsatzbereitschaft eines Generators. Der zweite Preis wird bezahlt für den tatsächlichen Energiefluss, er wird also nur bezahlt für die Energiemenge, die wirklich angefordert wird.

Für V2G würde dies bedeuten, dass Netzbetreiber einen Preis bezahlen würden, falls garantiert wird, dass die Regelung auch erfolgt wenn sie benötigt wird. Dazu müsste noch der Preis der gelieferten Energie mitgerechnet werden. Wie die Einsatzbereitschaft garantiert werden kann, wird in Abschnitt 4.3 teilweise erläutert. Genauer dazu ist in [7] zu finden.

Der potentielle Wert von Regelungsdiensten bei V2G würde sich nach Romm in [8] auf 700 – 3000 US-Dollar pro Jahr und Fahrzeug belaufen. Dieser hohe Wert, könnte sogar dazu führen, dass der Preis für den Kauf oder das Leasen eines V2G-Fahrzeuges tiefer sein wird als der eines herkömmlichen Verbrennungsfahrzeuges. Möglicherweise würden sogar die Batterieersatzkosten dadurch gedeckt.

## 4.3 Strategien zur Erfüllung der Bedürfnisse des Fahrers und des Netzbetreibers

Für den Einsatz von V2G ist es von zentraler Bedeutung, dass die Bedürfnisse des Fahrers wie auch diejenigen des Netzbetreibers befriedigt werden. Der Fahrer möchte keine Mobilitäts- und Flexibilitätseinbussen über sich ergehen lassen, während sich der Netzbetreiber zu jeder Zeit auf die Einsatzbereitschaft der angebotenen Dienste von V2G verlassen möchte. Drei wichtige Strategien von Kempton und Tomić aus [7] zur Befriedigung der Bedürfnisse beider Parteien werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Die erste Methode besteht im Einbau von zusätzlichen Speichern. Diese würden das

Gewährleisten von V2G-Diensten in nützlicher Menge erlauben ohne dabei die Reichweite auf ein Minimum zu reduzieren. Das zusätzliche Gewicht und die Zusatzkosten sind aber gute Gründe gegen diese Strategie.

Die zweite Methode ist die Nutzung von Fahrzeugflotten, die über einen fixen Einsatzplan verfügen. Grössere Institutionen könnten die Dienste ihrer V2G-Flotte mit der Garantie, dass zu den angegebenen Zeiten eine minimale Anzahl Fahrzeuge einsatzbereit ist, anbieten. Diese Idee wäre sinnvoll während der Einführungsphase, erweist sich aber als nicht ausreichend für die Ausschöpfung des vollen Potentials von V2G. Es existieren zu wenig Fahrzeugverbände, als dass der Markt der V2G-Dienste gesättigt werden könnte.

Die dritte Methode, der Einsatz intelligenter Steuerungen, würde auch die Nutzung von individuellen Fahrzeugen erlauben. Während Anfragen nach Netzhilfsdiensten unvorhersehbar sind, benötigen die meisten Fahrzeuge Energie zu relativ gut vorhersehbaren Zeiten. Der Fahrer könnte einige Stunden vor einer geplanten Fahrt diese dem Fahrzeug eingeben, um sicher zu stellen, dass genügend Energie vorhanden sein wird. Eine andere Implementierung einer Steuerung könnte das Fahrverhalten eines Fahrzeuges über eine gewisse Zeit aufzeichnen und ausgehend von diesen Daten die Energie dem Netz zur Verfügung stellen oder speichern für die Zeiten, in denen das Fahrzeug wahrscheinlich genutzt würde. So stünde fest, welches Fahrzeug zu welcher Zeit mit hoher Wahrscheinlichkeit Netzhilfsdienste leisten könnte. Durch Zusammenfassen vieler Fahrzeuge zu einer Einheit würde eine sichere Versorgung entstehen.

## **4.4 Die Verbreitung von V2G**

V2G ist für die Verantwortlichen in der Stromversorgung wie auch für die Fahrzeugnutzer ungewohnt. Daher bedarf es einer ausgeklügelten Strategie zur Einführung und Verbreitung von V2G. Kempton und Tomić haben in [7] drei Schritte für den Übergang zu V2G vorgeschlagen:

#### **4.4.1 Schritt 1: Demonstrationsflotten**

V2G-taugliche Prototypen sind bereits getestet worden, daher braucht es nun grössere Fahrzeugflotten, die V2G in brauchbarer Masse gewährleisten. So können auftretende Probleme festgestellt und gelöst werden. Stromlieferanten einerseits, wie auch V2G-Fahrzeugbesitzer andererseits können sich mit dem System vertraut machen.

In diesen kleinen Produktionsmengen würden die Produktionskosten noch nicht durch den Verkauf von Regelungsdiensten gedeckt werden. Trotzdem bestehen Anreize für Firmen oder Regierungen Demonstrationsflotten einzusetzen, sei es um technisch auf den Höchststand zu gelangen, die wirtschaftliche Entwicklung zu fördern oder Umweltbestimmungen einzuhalten, um nur einige plausible Gründe zu nennen. Mit der zunehmenden Anzahl von V2G-Systemen würde auch die Produktion ansteigen und somit wirtschaftlicher werden.

#### **4.4.2 Schritt 2: Kostendeckung und Verbreitung individueller Fahrzeuge**

Werden durch gutes Marketing die Brauchbarkeit ersichtlich und die Kosten erschwinglich, würde V2G attraktiv für Anleger. Kleinere Flotten oder individuelle Fahrzeuge könnten, in verschiedenen Netzkontrollgebieten zusammengefasst, Regelungsdienste leisten. Ist ein bestimmter Anteil<sup>1</sup> an V2G-tauglichen Fahrzeugen erreicht, kann die gesamte benötigte Regelenergie durch V2G gewährleistet werden.

#### **4.4.3 Schritt 3: Speicherung erneuerbarer Energie**

Ist der Markt für V2G-Regelungsdienste gesättigt, würden die Preise für diese Dienste fallen. Inzwischen hätten sich die Produktionskosten für V2G denjenigen von konventionellen Verbrennungsfahrzeugen genähert und die installierte Kapazität von V2G ginge in grösseren Staaten in die Gigawattstunden. Die Gesamtsumme der Speicherkapazitäten und die mittlerweile akzeptablen Stückpreise von V2G würden nun den Einstieg in den letzten Markt ermöglichen: die Speicherung von erneuerbarer Energie.

---

<sup>1</sup>Die ausführliche Rechnung am Beispiel von Kalifornien in [7] ergibt einen Anteil von 3% von der gesamten Fahrzeugflotte des Bundesstaates, welcher V2G-Dienste leisten müsste.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

V2G erweist sich als eine Technologie, die ohne riesige Investitionen den Durchbruch von Elektromobilen näher bringen kann. Zusätzlich können die heute beachtlichen Kosten für die Stabilisation des Stromnetzes drastisch gesenkt werden. Am wirtschaftlichsten können V2G-Fahrzeuge im Regelungsmarkt eingesetzt werden. Da es in der Natur von Elektromobilen liegt, die gelieferte Energie dauernd ohne Zeitverzögerung der Nachfrage anzupassen, sind sie wie geschaffen zur Leistung von Regeldiensten. Im Stromnetz entstehen in diesem Bereich noch hohe Kosten, was Energieunternehmen dazu veranlassen könnte, den Einsatz von V2G zu fördern.

V2G-fähige Hybridfahrzeuge sind in der Branche die grössten Hoffnungsträger. Dank der Verbindung zum Netz, die bei bisherigen Hybridfahrzeugen noch fehlt, könnte ihre Reichweite beachtlich gesteigert werden. Zugleich wird sie durch die Leistung von Netzhilfsdiensten nicht eingeschränkt, da bei leerer Batterie der Verbrennungsmotor eingesetzt werden kann.

Eines der grössten Probleme von V2G könnte ihre Verbreitung sein. V2G ist für alle Beteiligten ungewohnt und benötigt für den Durchbruch eine gute Marketingstrategie. Der zunehmende Druck in Richtung erneuerbarer Energiequellen und emissionsarmer Fahrzeuge hat hier aber eine unterstützende Wirkung.

# Literaturverzeichnis

- [1] G. Andersson, Dynamics and Control of Electric Power Systems, 2007, ETH Zürich, Letzter Zugriff 14.5.07, <http://www.eeh.ee.ethz.ch/downloads/academics/courses/227-0528-00.pdf>
- [2] W. Kempton, J. Tomić, Journal of Power Sources 168: Using fleets of electric-drive vehicles for grid support, 2007, Elsevier, letzter Zugriff 14.5.07, <http://www.sciencedirect.com>
- [3] K. Kurani, B. Williams, Journal of Power Sources 166: Commercializing light-duty plug-in/plug-out hydrogen-fuel-cell vehicles: "Mobile Electricity" technologies and opportunities, 2007, Elsevier, letzter Zugriff 14.5.07, <http://www.sciencedirect.com>
- [4] o.V. Three ULTra Case Studies, ULTra Advanced Transport Systems, 2007, letzter Zugriff 14.5.07, <http://www.atstld.co.uk/media/casestudies/>
- [5] R. Gilbert, A. Perl, Energy Policy 35: Grid-connected vehicles as the core of future land-based transport systems, 2006, Elsevier, letzter Zugriff 14.5.07, <http://www.sciencedirect.com>
- [6] o.V. Facts and Figures, 2006, Dubai International Financial Centre, letzter Zugriff 14.5.07, [http://www.difc.ae/district/facts\\_and\\_figures/](http://www.difc.ae/district/facts_and_figures/)

- [7] W. Kempton, J. Tomić, Journal of Power Sources 144: Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy, 2005, Elsevier, letzter Zugriff 2.5.07, <http://www.sciencedirect.com>
- [8] J. Romm, Energy Policy 34: The car and fuel of the future, 2005, Elsevier, letzter Zugriff, 1.5.07, <http://www.sciencedirect.com>
- [9] D. Sutanto: Alternative Energy Resource from Electric Transportation, 2004, The Hong Kong Polytechnic University, letzter Zugriff 14.5.07, <http://ieeexplore.ieee.org/>
- [10] W. Kempton, J. Tomić, Journal of Power Sources 144: Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue, 2004, Elsevier, letzter Zugriff 2.5.07, <http://www.sciencedirect.com>
- [11] o.V. UCTE Operation Handbook, Appendix 1: Load-Frequency Control and Performance, 2004, Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity (UCTE), letzter Zugriff 14.6.07, [http://www.ucte.org/ohb/cur\\_status.asp](http://www.ucte.org/ohb/cur_status.asp)
- [12] H. Neumann, Unterbrechbare Verbrauchseinrichtungen als Chance?, 2002, NWS Energievertriebs AG & Co. KG, letzter Zugriff 2.5.07, <http://www.vdn-berlin.de/global/downloads/Netz-Themen/Lastprofile/NeumannLPfuVe2002-11-11.pdf>