

Ökonomische Bewertung von Vehicle-to-Grid in Deutschland

David Ciechanowicz

TUM CREATE Centre for Electromobility, 637459 Singapore,
E-Mail: david.ciechanowicz@tum-create.edu.sg

Martin Leucker

Universität zu Lübeck, Institut für Softwaretechnik und Programmiersprachen, 23562 Lübeck,
E-Mail: leucker@isp.uni-luebeck.de

Martin Sachenbacher

Technische Universität München, Institut für Informatik, 85748 Garching,
E-Mail: sachenba@in.tum.de

Abstract

Vehicle-to-Grid (V2G) beschreibt das Konzept der Speicherung von Energie in den Akkupacks von Elektrofahrzeugen sowie der bedarfsorientierten Rückeinspeisung dieser Energie in das Stromnetz. Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Bewertung des potenziellen, zu erwirtschaftenden Gewinns durch die Nutzung von V2G auf unterschiedlichen Energiemärkten in Deutschland auf Basis von Energiemarktdaten des Jahres 2009. Zu diesem Zweck wurden die verschiedenen Energiemärkte in Deutschland analysiert und auf Basis eines statischen Kostenmodells ein neuartiges Microsoft Excel-basiertes Tool namens *Vehicle-to-Grid Profit Agent* entwickelt, das die flexible Auswertung verschiedener V2G-Szenarien erlaubt.

1 Motivation

Nahezu der gesamten motorisierten Individualmobilität liegt ein Antrieb auf Kraftstoffbasis zu Grunde. Mit dem Elektroantrieb steht eine effiziente alternative Antriebstechnologie bereit, deren Einsatz zu lokal emissionsfreien *Elektrofahrzeugen* (EV) führt. Die Nutzung der Energiespeicher der EVs während der, nicht ihrem Primärzweck des Transports dienenden, Zeit stellt eine sinnvolle Maßnahme für eine mögliche Amortisation der hohen Investitionskosten dar. *Vehicle-to-Grid* (V2G), also die Rückeinspeisung der in den EVs gespeicherten Energie in das Stromnetz, stellt eine solche vielversprechende sekundäre Nutzungsmöglichkeit dar.

Es ist Gegenstand dieser Arbeit, die erforderlichen Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche wirtschaftliche Umsetzung von V2G als Bindeglied der anerkannten Notwendigkeit und der demonstrierten Funktionalität zu untersuchen. Hierfür wird die in [5] und [19] beschriebe-

ne US-amerikanische Studie auf deutsche Verhältnisse übertragen und das vorgestellte Kostenmodell auf Daten verschiedener Energiemärkte in Deutschland angewendet. In Kapitel 2 wird zunächst das V2G-Konzept beschrieben. Kapitel 3 ist den Energiemärkten, auf denen Besitzer V2G-fähiger EVs agieren können, gewidmet. In Kapitel 4 wird das ganzheitliche statische Kostenmodell aus [5] vorgestellt, auf das die Energiemarktdaten mittels des entwickelten und in Kapitel 5 präsentierten *V2G Profit Agents* (V2GPA) angewendet werden. Nachdem in Kapitel 6 ein Gesamtfazit gezogen wird, schließt Kapitel 7 die Arbeit mit einem Ausblick auf zukünftige Untersuchungen ab.

2 Vehicle-to-Grid

V2G bezeichnet das Konzept der bedarfsorientierten Rückeinspeisung der in den Akkupacks der EVs gespeicherten Energie ins Stromnetz. V2G wurde erstmals 1997 in [3] erwähnt, ist seitdem Gegenstand intensiver Forschung und die theoretische Nützlichkeit eines solchen Konzepts für ein stabileres und qualitativ hochwertigeres Stromnetz hinreichend untersucht [2][4][5][9][19]. Nicht zuletzt konnte der Konzeptstatus von V2G durch die Demonstration funktionsfähiger Prototypen abgelegt werden [1][9][14]. Die Idee hinter dem V2G-Konzept sieht vor, dass die Akkupacks in Zeiten geringer Energienachfrage geladen werden und ihre Energie im Bedarfsfall ins Stromnetz zurückspeisen. Die hierfür zu schaffenden fahrzeugseitigen wie infrastrukturellen Voraussetzungen können in [4] und [14] nachgelesen werden. Der Bedarf für ein solches Konzept liegt in der Tatsache begründet, dass das Stromnetz lediglich eine vernachlässigbar kleine inhärente Energiespeichermöglichkeit bietet und zu jedem Zeitpunkt exakt so viel Energie produziert werden muss wie verbraucht wird. Ferner können EVs die zeitweise überschüssig produzierte Energie der Kraftwerke – vor allem der stärker schwankenden erneuerbaren Energien wie Wind- und Sonnenkraft – in Zeiten geringen Energiebedarfs temporär speichern (*Grid-to-Vehicle, G2V*).

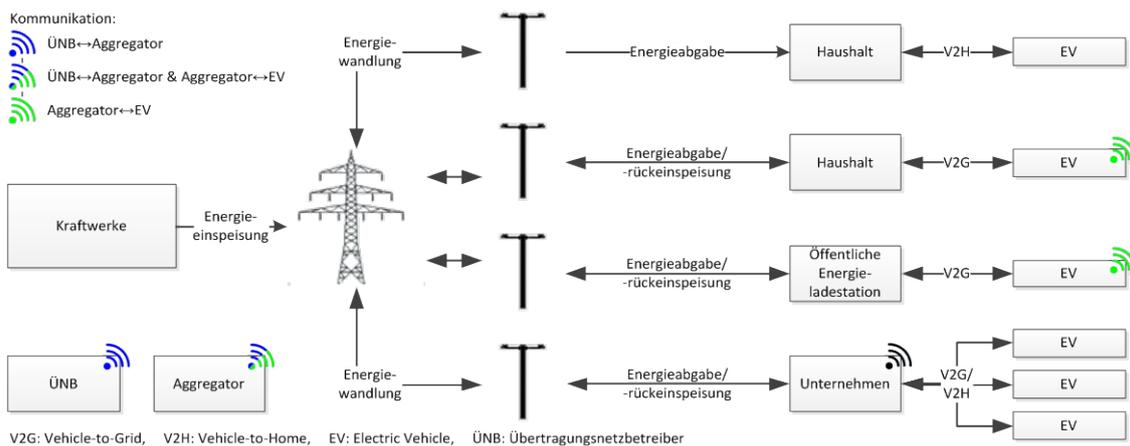


Bild 1: Das V2G-Konzept – Energie- und Kommunikationsflüsse.

Bild 1 zeigt schematisch das V2G-Konzept. Energie wird in Kraftwerken produziert, über Höchst-, Hoch-, Mittel- und Niederspannungsleitungen bis zu den Haushalten bzw. Unternehmen geführt und entweder für den hier nicht weiter betrachteten Eigenbedarf (*Vehicle-to-Home, V2H*) genutzt oder bedarfsorientiert zurück in das Stromnetz gespeist. Die dargestellte Kommunikation verläuft hierbei über einen Aggregator – ein Mittelsmann zwischen den

Besitzern der EVs und den *Übertragungsnetzbetreibern* (ÜNB), der die EVs zu einer in [9] und [10] beschriebenen virtuellen Fahrzeugflotte (*Electric Vehicle Virtual Power Plant*, EV-VPP) zusammenfasst und die aggregierte Energie bedarfsorientiert bereitstellt.

3 Energiemärkte

Der Einsatz von V2G kann auf unterschiedlichen, nach ihrer Lastart in *Grund-*, *Mittel-* und *Spitzenlast* sowie *Regelleistung* zu differenzierenden Energiemärkten erfolgen. Der Energiehandel erfolgt deutschlandweit meist über die *European Energy Exchange* [17]. Dies führt dazu, dass regional unterschiedliche Szenarien, obwohl durch ihre sehr spezifische Erzeugungs-, Speicherungs- und Verbrauchssituation höchst interessant, nicht differenziert betrachtet werden können. Die für die vorliegende Studie verwendeten Energiemarktdaten sind aus dem Jahr 2009 und entstammen [12][13][18][20][21].

3.1 Grundlast

Die minimale, zu keinem Tageszeitpunkt unterschrittene, benötigte Energiemenge wird als Grundlast bezeichnet und hatte 2009 einen Anteil von 75,15 % am gesamtdeutschen Energieverbrauch. Die Energie wird mit etwa 4 Ct/kWh am preisgünstigsten in lastmäßig schwer herauf- oder herunterregelbaren Atom- oder Braunkohlekraftwerken erzeugt. Durch V2G kann in diesem Markt prinzipiell kein Profit erwirtschaftet werden, da die durch V2G verkaufte Energie zu mindestens demselben Preis zzgl. Steuern und Abgaben erworben wurde [15].

3.2 Mittel- und Spitzenlast

Neben der über eine längere Zeit konstanten Grundlast bedarf es zur Deckung des variablen Energiebedarfs einer Mittel- und Spitzenlast. Diese hatte 2009 bei einem jahresdurchschnittlichen Preis von 4,68 Ct/kWh einen Anteil von 23,28 % am gesamtdeutschen Energieverbrauch. Der kontinuierlich variierende Leistungsbedarf aller Verbraucher ist mit einer sehr geringen Fehlerquote zu jedem Tageszeitpunkt prognostizierbar und wird daher, im Vergleich zur Grundlast, lediglich durch einen geringfügig höheren Preis vergütet. Eine, mit einer Standardabweichung von 19,4, über das Jahr betrachtete hohe Preisvolatilität könnte diesen Markt für V2G interessant werden lassen. In Ermangelung entsprechender Daten kann keine Unterscheidung zwischen Mittel- und Spitzenlast, sondern lediglich zwischen den beiden Zeiträumen *On-Peak* (von 8 bis 20 Uhr) und *Off-Peak* (von 20 bis 8 Uhr) erfolgen.

3.3 Regelleistungen

Regelleistungen, einen Anteil von 1,56 % am gesamtdeutschen Energieverbrauch 2009 haltend, wahren die Zuverlässigkeit und die Stabilität des Stromnetzes durch den kontinuierlichen Ausgleich des Energieangebots und der -nachfrage. Kraftwerke bzw. Generatoren stellen in stufenweise unterschiedlicher Geschwindigkeit Energie zur Glättung der sich aus dem Energieverbrauch ergebenden Lastkurve sowie zur Anpassung der Netzspannung und -frequenz zur Verfügung. Die Abweichung kann sowohl *negativer* (die Nachfrage übersteigt das Angebot, Heraufregulierung erforderlich, V2G) als auch *positiver* (das Angebot übersteigt die Nachfrage, Herabregulierung erforderlich, G2V) Natur sein. Bild 2 veranschaulicht diese Abweichungen graphisch anhand der durchschnittlichen Leistungsbedarfskurve in Deutschland im Jahr 2009. Es ist zu erkennen, dass Regelleistungen zu jedem Tageszeitpunkt in Anspruch genommen werden, um Frequenzschwankungen auszugleichen. Im Ge-

gensatz zum normalen Lastgang erhöht sich der Bedarf an Regelleistungen nicht notwendigerweise in Spitzenlastzeiten.

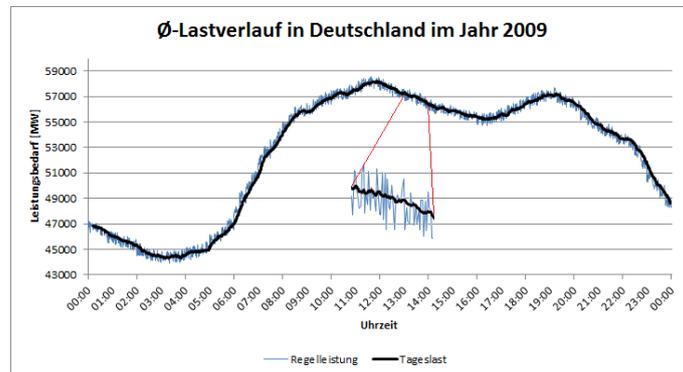


Bild 2: Durchschnittlicher Lastverlauf in Deutschland im Jahr 2009.

Es wird, je nach Schnelligkeit und Dauer der Zurverfügungstellung von Energie, zwischen der *Primär-* (PRL), *Sekundär-* (SRL) und *Tertiärregelleistungsart* (MRL) unterschieden [22]. Die Vergütung lag 2009 in positiver Energieflussrichtung je nach Regelleistungsart und Zeitpunkt durchschnittlich zwischen 15 und 44 Ct/kWh. Der Anbieter von PRL wird bereits für das Anbieten von Leistung bezahlt (*Leistungspreis*, LP), ohne tatsächlich Energie in das Stromnetz einzuspeisen. Neben einem LP erhält der Anbieter von SRL und MRL eine zusätzliche Vergütung für die tatsächlich bereitgestellte Energiemenge (*Arbeitspreis*, AP). Die entsprechenden LPs und APs können Tabelle 1 entnommen werden. Neben den vergleichsweise hohen LPs und APs sowie der, vor allem bei der Vergütung der SRL auftretenden, hohen Standardabweichung ist dieser Markt für V2G von besonderem Interesse. In Tabelle 2 finden sich der gesamtdeutsche Bedarf an Regelleistung und -energie für das Jahr 2009, gegliedert nach Regelleistungsarten sowie nach negativer und positiver Energieflussrichtung. Die Daten beider Tabellen finden in den Berechnungen von Kapitel 5 Verwendung.

Kennzahl	PRL		SRL		MRL	
	LP [€/MW/h]	AP [€/MWh]	LP [€/MW/h]	AP [€/MWh]	LP [€/MW/h]	AP [€/MWh]
	Neg / Pos	Neg / Pos	Neg / Pos	Neg / Pos	Neg / Pos	Neg / Pos
Min.	19,92 / 19,92	n.V.	0,56 / 5,83	0 / 57	0 / 0	0 / 0
Max.	48,17 / 48,17	n.V.	40,98 / 24,03	480 / 620	741,86 / 102,09	1.000 / 3.000
Ø	20,08 / 20,08	n.V.	9,18 / 10,55	25,42 / 152,51	31,23 / 9,01	32,22 / 439,09
Stdev.	---	---	3104 / 1087	54 / 71	110 / 71	90 / 344

Tabelle 1: Leistungs- und Arbeitspreise der Regelleistungen in Deutschland im Jahr 2009.

Bereich	Kennzahl	PRL	SRL	MRL	Gesamt
		Neg / Pos	Neg / Pos	Neg / Pos	Neg / Pos
Leistung [MW]	Min.	660 / 660	660 / 500	869 / 958	2.189 / 2.118
	Max.	705 / 705	1.798 / 980	2.087 / 1.367	4.590 / 3.052
	Ø	672 / 673	1.096 / 763	1.222 / 1.176	2.991 / 2.612
Energie [GWh]	Σ	n.V.	4.809,15 / 2.577,72	1.339,70 / 336,08	3.469,45 / 2.913,80

Tabelle 2: Regelleistungs- und -energiebedarf in Deutschland im Jahr 2009.

4 Kostenmodell

Im Folgenden wird das in [4][5][19] beschriebene ganzheitliche Kostenmodell vorgestellt. Auf dieses Modell werden in Kapitel 5, konträr zum ursprünglichen Ansatz der Nutzung von US-amerikanischen Energiemarktdaten, die in Kapitel 3 dargestellten Energiemarktdaten angewendet. Das Modell besteht aus Gleichungen für erzielbare Umsätze U_{Ges} sowie für anfallende Kosten K_{Ges} und dient der Bestimmung des möglichen Gewinns G_{Ges} entsprechend Gleichung (1). Die angegebenen Gleichungen wurden unverändert den oben angegebenen Ausführungen entnommen; lediglich die vorkommenden Parameter wurden neu bezeichnet. Die Bedeutung der einzelnen Parameter kann dem Symbolverzeichnis entnommen werden. Ein alternatives Kostenmodell ist in [7] dargelegt. Aufgrund vereinfachter, weniger realistischer Annahmen gegenüber dem Modell aus [5] wird letzterem der Vorzug eingeräumt.

$$G_{Ges} = U_{Ges} - K_{Ges} \quad (1)$$

4.1 Umsätze

Die Umsätze, die durch das Anbieten von Energie mittels V2G seitens des Anbieters der Energie zu erwirtschaften sind, setzen sich aus den Umsätzen im Leistungs- und Arbeitsbereich zusammen. Der Leistungsbereich definiert die dem Abnehmer potenziell zur Verfügung gestellte und vertraglich vereinbarte Leistungsmenge E_L sowie den zugehörigen Leistungspreis P_L . E_L ist das Produkt aus der vertraglich vereinbarten und vorgehaltenen Leistung L_L sowie der Zeitdauer der Bereithaltung dieser Leistung t_L . Der Arbeitsbereich definiert die tatsächlich geflossene Energiemenge E_A sowie den zugehörigen Preis P_A , nach dessen Produkt der Anbieter vergütet wird. E_A ist die Summe der Produkte aus der tatsächlich genutzten Leistung L_A sowie der Zeitdauer der Nutzung t_A . Der Gesamtumsatz U_{Ges} , der der Summe der Umsätze beider Bereiche entspricht, ist in Gleichung (2) angegeben.

$$U_{Ges} = (P_L \cdot E_L) + (P_A \cdot E_A) = (P_L \cdot L_L \cdot t_L) + \left(P_A \cdot \sum_{i=0} L_{A,i} \cdot t_{A,i} \right) \quad (2)$$

Die detaillierte Ausführung von Gleichung (2) und damit die Gleichung zur Berechnung der Umsätze ist in Gleichung (3) dargestellt. Auf eine erneute Herleitung sei an dieser Stelle verzichtet und auf [5] verwiesen.

$$U_{Ges} = \left(\min \left\{ U \cdot I \cdot \sqrt{S}, \frac{\left(E_{Akku} \cdot T - \frac{d_d + d_p}{F} \right)}{t_A^{max}} \cdot \eta_{el} \right\} \cdot t_L \right) (P_L + P_A \cdot V_{LA}) \quad (3)$$

4.2 Kosten

Die Kosten K_{Ges} , die dem Anbieter durch die Abgabe von Energie mittels V2G entstehen, setzen sich aus den variablen Kosten k_{var} je abgegebener Energieeinheit E_A sowie den fixen Ausrüstungskosten K_{fix} zusammen. Die Berechnung der Gesamtkosten erfolgt entsprechend Gleichung (4). Die aufzuwendenden Kosten für den Bereich der Heraufregulierung bestehen aus den genannten Kostenanteilen. Bei der Herabregulierung sind diese gleich Null, da der Energiefluss vom Abnehmer zum Anbieter stattfindet (G2V) und dieses Szenario dem normalen Ladevorgang entspricht, der unabhängig von einer V2G-Teilnahme stattfindet.

$$K_{Ges} = (k_{var} \cdot E_A) + K_{fix} \quad (4)$$

Die detaillierte Ausführung von Gleichung (4) und damit die Gleichung zur Berechnung der Kosten ist in Gleichung (5) dargestellt. Auf eine erneute Herleitung sei auch an dieser Stelle verzichtet und auf [5] verwiesen.

$$K_{Ges} = L_L \cdot t_L \cdot V_{LA} \cdot \left(\frac{k_E}{\eta_{Umw}} + \frac{K_{Akku}^{fix} + K_{Arbeit}^{Akku}}{Z \cdot E_{Akku} \cdot T} \right) + K_0 \cdot \frac{d}{1 - (1 + d)^{-n}} \quad (5)$$

5 Vehicle-to-Grid Profit Agent

Auf Basis des vorgestellten Kostenmodells wurde ein neuartiges Microsoft Excel-basiertes Software-Tool namens *V2G Profit Agent* (V2GPA) entwickelt, das eine bisher nicht mögliche, schnelle, flexible und einfach zu benutzende Auswertung verschiedener V2G-Szenarien ermöglicht. Innerhalb des V2GPA können die zugrunde gelegten Daten einfach gegen individuell benötigte Daten oder gar solche anderer Länder ausgetauscht werden. Abschnitt 5.1 gibt einen Überblick über den Aufbau des V2GPA. Nachdem in Abschnitt 5.2 eine ergebnisorientierte Auswertung der Anwendung des Kostenmodells aus Kapitel 4 auf die Energiemarktdaten aus Kapitel 3 erfolgt, wird in Abschnitt 5.3 eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

5.1 Überblick

Der V2GPA besteht aus mehreren Arbeitsblättern. Bild 3 zeigt einen Überblick über die V2G-Gewinnermittlung ausgewählter Szenarien. Die Darstellung ist zeilenbezogen in die Ebenen Kosten, Umsätze und Gewinne gegliedert, wovon aus Platzgründen lediglich die Kosten dargestellt sind. Nach einer Beschreibung der in den Gleichungen aus Kapitel 4 verwendeten Parameter in den Spalten A bis G erfolgt eine Bestimmung der Werte aller Parameter für verschiedene Lastarten in den Spalten J bis V; allesamt im unten näher erläuterten Average-Case. Neben der in Bild 3 nicht-sichtbaren PRL, SRL und MRL wurden aus Vergleichbarkeitsgründen und zur Verifikation des V2GPA zusätzlich die Werte für den US-amerikanischen Primärregelmarkt aus [5] in Spalte M angegeben. Einer Definition der jeweiligen Einheit der Parameter in Spalte X folgen in Spalte Z und AA Verweise auf den im Arbeitsblatt *Wertebereich* dargestellten sinnvollen Wertebereich der einzelnen Parameter.

Der durch eine V2G-Nutzung zu erwartende Gewinn im Bereich der Regelleistungen sowie der On- und Off-Peak Mittel- und Spitzenlast wurde in einem *Worst-* (WC), *Best-* (BC) und *Average-Case-Szenario* (AC) betrachtet. Dem AC-Szenario liegen in Deutschland im Jahr 2009 tatsächlich realisierte Ausprägungen der einzelnen Parameter zugrunde. Die beiden erstgenannten Szenarien basieren auf diesen Daten und wurden sowohl in positiver als auch negativer Energieflussrichtung aus Anschaulichkeitsgründen der Abweichungen vom erwarteten AC-Szenario entsprechend den Angaben des Arbeitsblatts *Wertebereich* variiert. Das Eintreten ist unter den aktuell gegebenen Umständen höchst unwahrscheinlich. Daher sollte stets auf das AC-Szenario zurückgegriffen und, wie im Fall des zusätzlich dargestellten *eE-Tour-Cases*, dieses auf die eigenen Bedürfnisse angepasst werden. Mit dem *eE-Tour-Case*, einem modifizierten AC-Szenario basierend auf echten Daten des *eE-Tour Allgäu-Projekts* [16], wurde exemplarisch der praktische Nutzen einer V2G-Nutzung aufgezeigt.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	X	Y	Z	AA
										TEST (mit SB)	TEST (ohne SB)	[KeTo05a]	Einheit				Sinnvoller Wertebereich Von Bis	
3	Kosten	$K_{Ges} = k_E \cdot t_L \cdot V_{La} \cdot \left(\frac{k_E}{\eta_{Strom}} + \frac{K_{Akkum}^{fix}}{Z} + \frac{K_{Akkum}^{lohn}}{T} \right) + K_0 \cdot \frac{d}{1 - (1+d)^{-n}}$																
7	Kosten, die in der Gesamtheit zu investieren sind	K_{Ges}								7794,51	7794,51	2450,48	€					
8	Kosten, die variabel pro kWh anfallen	k_{Var}								0,45	0,45	0,21	€/kWh					
9	Kosten für die Energie pro kWh	k_E								0,2282	0,2282	0,1	€/kWh				0,18256	0,27384
10	Wirkungsgrad der Energieumwandlung vom Stromnetz zum EV und wieder zum Stromnetz	η_{Strom}								0,73	0,73	0,73					0,657	0,803
11	Kosten, die variabel für die Abnutzung des Akkupacks anfallen	K_{Akkum}								0,1409	0,1409	0,0752	€/kWh					
12	Kosten für einen Akkupackersatz (Material- und Lohnkosten)	K_{Akkum}^{fix}								17115	17115	9890	€					
13	Kosten, die fix für das Akkupack anfallen (Materialkosten)	K_{Akkum}^{lohn}								16875	16875	9590	€				3000	78000
14	Kosten für Löhne für einen Akkupacktausch (Lohnkosten)	K_{Akkum}^{lohn}								240	240	300	€				150	350
15	Energieemenge, die sich kumuliert über die Lebensdauer des Akkupacks ergibt	E_{Akkum}								121500	121500	131520	kWh					
16	Zyklusfestigkeit des Akkupacks	Z								6000	6000	6000					500	8000
17	Energieemenge, die das Akkupack durch eine vollständige Ladung aufnehmen kann	E_{Akkum}								22,5	22,5	27,4	kWh				10	65
18	Entladungstiefe des Akkupacks, für die die Zyklusfestigkeit gilt	T								0,9	0,9	0,8					0,8	1
19	Energieemenge, die tatsächlich gelieferten ist	E_{Akkum}								16568,66	16568,66	10091,52	kWh					
20	Kosten, die fix für die Ausrüstung anfallen	K_0								281,17	281,17	309,22	€					
21	Kosten für die Anfangsinvestition in die Ausrüstung	K_0								1500	1500	1900	€				0	5000
22	Diskontierungssatz, mit dem die Anfangsinvestition abgezinst wird	d								0,1	0,1	0,1					0,05	0,15
23	Anzahl der Jahre, nach der der Break-Even erreicht wird	n								8	8	10					6	10

Bild 3: Ausschnitt des V2GPA-Arbeitsblatts für die Darstellung der V2G-Gewinnermittlung.

Der in [4][5][19] angegebene und im V2GPA ebenfalls aufgeführte Fall des US-amerikanischen Energiemarkts übertrifft die Annahmen des BC z.T. deutlich und unterscheidet sich von den in dieser Arbeit im AC verwendeten Daten im Wesentlichen durch die folgenden vier Faktoren:

- Der für den US-amerikanischen Energiemarkt angenommene Preis für die zuvor gekaufte Energie k_E liegt mit 0,1 €/kWh um rund 55 % unter dem hier angenommenen durchschnittlichen Strompreis in Deutschland im Jahr 2009.
- Der US-amerikanische Leistungspreis P_L liegt zwischen 25 und 400 % über den Leistungspreisen der entsprechenden Regelleistungsarten in Deutschland.
- Bei den fixen Materialkosten für das Akkupack K_{Akkum}^{fix} wird von 300 statt wie im V2GPA angegebenen AC von 1.000 €/kWh ausgegangen.
- Der Wert der angenommenen Zyklusfestigkeit Z wurde dreifach höher als im AC angesetzt. Dies erscheint für die Annahme sehr kurzer Lade-/Entladezyklen möglich, jedoch kann dieser Wert in Ermangelung entsprechender Studien nur als BC angenommen werden. In [6] wurden die Auswirkungen von V2G auf die Zyklusfestigkeit von Lithium-Ionen-basierten Akkupacks untersucht.

5.2 Ergebnisse

Mittels des V2GPA konnten die Möglichkeiten zur Gewinnerzielung nach dem in Kapitel 4 dargestellten Kostenmodell in einer WC-, BC- und AC-Betrachtung für den Markt der Regelleistungen sowie der On- und Off-Peak Mittel- und Spitzenlast in Deutschland für das Jahr 2009 aufgezeigt werden. Die Resultate der Untersuchungen sind für die einzelnen Lastarten in Form von jährlichen Gewinnen je EV in Tabelle 3 dargestellt. Energie und Leistung wurden über das ganze Jahr hinweg angeboten und nicht durch einen monetären Grenzwert, der den Handel von V2G profitabel gestalten würde, beschränkt. Je nach Fahrzeugkonfiguration unterschiedliche Grenzwerte können innerhalb des V2GPA mittels der in Abschnitt 5.3 beschriebenen Zielwertsuche bestimmt werden. Auf eine Untersuchung der Auswirkung einer, bei einer Einführung einer großen¹ Anzahl an EVs eintretenden, Sättigung des Marktes auf die Gewinnerzielungsmöglichkeiten sei verzichtet und auf die Ausführungen in [8] verwiesen.

¹ In weiteren Berechnungen konnte ermittelt werden, dass die Sättigungsmenge im Regelleistungsmarkt in Deutschland im Jahr 2009 je nach Fahrzeugkonfiguration durchschnittlich zwischen 0,62 und 1,24 Mio EVs lag.

Lastart	Jährliche Gewinne je EV in... [€]							
	...negativer Energieflussrichtung (V2G)				...positiver Energieflussrichtung (G2V)			
	BC	AC	WC	eE-Tour	BC	AC	WC	eE-Tour
PRL	4.556	-11.437	-48.078	-6.320	20.240	3.327	1.065	3.327
SRL	0	-32.507	-58.455	-20.227	22.932	4.275	765	4.275
MRL	23.627	-2.614	-7.264	-406	12.622	1.621	189	2.220
On-Peak	0	-50.319	-161.313	-66.425	---	---	---	---
Off-Peak	0	-51.283	-163.199	-68.460	---	---	---	---

Tabelle 3: Mit V2G erzielbare Gewinne je EV pro Jahr in Deutschland im Jahr 2009.

Die Ergebnisse zeichnen ein gänzlich anderes Bild als die in [4][5][19] angegebenen. Dort konnte in jedem Bereich des US-amerikanischen Energiemarkts ein drei- bis vierstelliger Gewinn in US-Dollar pro Jahr erwirtschaftet werden. Dass das am deutschen Energiemarkt nicht möglich ist, liegt im Wesentlichen an den in Abschnitt 5.1 angegebenen Faktoren. Diese gravierenden Unterschiede lassen die Zukunft von V2G in Deutschland in einem weniger überzeugenden Licht erscheinen. Die Auswirkungen einer möglichen, zukünftigen Änderung der genannten Parameter werden in Abschnitt 5.3 behandelt.

Auf Basis der genannten Sachverhalte, der Werte aus Tabelle 3 und dem Wissen um die Bedeutung des WC und BC bleibt festzuhalten, dass sich der Verkauf von Energie in negativer Energieflussrichtung (V2G) derzeit lediglich in Ausnahmefällen finanziell lohnt. Für die positive Energieflussrichtung (G2V) gilt, dass EVs nicht nur kostenlos geladen werden können, sondern hierbei noch einen Betrag erwirtschaften, der je Regelleistungsart im durchschnittlichen Fall zwischen 1.621 und 4.275 € liegt. Kann das V2G-Angebot eines EV nicht vom G2V-Angebot entkoppelt werden, so bedarf es genauer Analysen, unter welchen Bedingungen sich der kombinierte Einsatz lohnt. Im Fall der für das eE-Tour-Projekt angenommenen Daten ergäbe sich für den MRL-Einsatz bei einem G2V-Umsatz von 2.220 € und einem V2G-Umsatz von -406 € ein Gesamtgewinn von 1.814 €.

5.3 Sensitivitätsanalyse

Durch die Microsoft Excel-Basis steht dem V2GPA unter anderem die Funktion der Zielwertsuche zur Verfügung. Hierdurch ist es möglich, eine Grenzbetrachtung der Ergebnisse durchzuführen und Break-even-Points für jeden Energiemarkt für einzelne Parameter zu bestimmen. Die zuvor klare Aussage, dass sich der Verkauf von Energie in negativer Energieflussrichtung (V2G) derzeit lediglich in Ausnahmefällen finanziell lohnt, ist so nicht länger aufrecht zu erhalten. Durch das Verändern jeweils eines, sich besonders auf das Gewinnerzielungspotenzial auswirkenden Parameters kann der zum Erreichen der Gewinnschwelle notwendige Wert dieses Parameters ceteris paribus bestimmt werden. Tabelle 4 zeigt die zum Erreichen der Gewinnschwelle notwendige Ausprägung einzelner Parameter für verschiedene Energiemärkte auf Basis des zugrunde gelegten AC in negativer Energieflussrichtung (V2G).

Die Werte in Tabelle 4 zeichnen ein eindeutiges Bild. Soll die Gewinnschwelle erreicht werden, so darf k_E ceteris paribus nicht nur nicht-existent, sondern muss sogar negativ sein. Bis auf den Markt der MRL gilt dies ebenfalls für K_{Akku}^{fix} . Die Zyklusfestigkeit ist ebenfalls nur auf

diesem Markt ein ausschlaggebender Faktor. Auf den anderen Märkten kann die Gewinnschwelle durch alleinige Variation dieses Parameters nicht erreicht werden. Die für eine Zielerreichung notwendige alleinige Erhöhung des jahresdurchschnittlichen LPs und APs liegt im Bereich von 69 % für den P_L der MRL und reicht bis zu 3.216 % für den P_A der SRL. Bis auf den Markt der MRL, bei dem die notwendigen Soll-Werte unter den in Abschnitt 3.3 aufgeführten und in Deutschland im Jahr 2009 realisierten Maximalwerten liegen, lässt sich auf den hier dargestellten Energiemärkten durch alleinige Veränderung eines Parameters kein Gewinn erzielen. Allein eine mittels des V2GPA einfach zu realisierende Kombination aus einer Reduzierung der Höhe der kostenverursachenden Parameter sowie einer gleichzeitigen Erhöhung der LPs und APs würde das Erreichen der Gewinnschwelle ermöglichen.

Parameter	Kennzahl ²	PRL	SRL	MRL	On-Peak	Off-Peak
Var. Energiekosten (k_E)	Ist [€/kWh]	0,2282	0,2282	0,2282	0,2282	0,2282
	Soll [€/kWh]	-0,2757	-0,3686	-0,0347	-0,3907	-0,3791
Fix. Akkupackkosten (K_{Akku}^{fix})	Ist [€/kWh]	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	Soll [€/kWh]	-242,46	-471,47	351,82	-526,13	-497,42
Zyklusfestigkeit (Z)	Ist [€/kWh]	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
	Soll [€/kWh]	---	---	5576	---	---
LP (P_L)	Ist [€/kW/h]	0,02008	0,00918	0,03123	0	0
	Soll [€/kW/h]	0,08911	0,20538	0,05284	0,84785	0,83190
AP (P_A)	Ist [€/kWh]	0	0,02542	0,03222	0,03088	0,04683
	Soll [€/kWh]	0,69025	0,84290	0,39232	0,87873	0,87873

Tabelle 4: Break-even-Points für ausgewählte Parameter auf den einzelnen Energiemärkten.

6 Fazit

Ein wirtschaftlicher Einsatz von V2G scheitert in den meisten untersuchten Szenarien aktuell an einem zu hohen Verhältnis der, hauptsächlich aus der begrenzten Zyklusfestigkeit der Akkupacks, entstehenden Kosten zu den erzielbaren Umsätzen. Gewinne ließen sich nur dann erwirtschaften, wenn die Kosten für die Energieabgabe und damit verbunden für die Abnutzung des Akkupacks entsprechend der Ergebnisse aus Abschnitt 5.3 geringer sind als die Vergütung, die einem jeden V2G-Teilnehmer zuteilwird. Von einer ökonomischen, praktischen Verwendung des gedanklich interessanten V2G Konzepts zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage am Energiemarkt kann aktuell noch nicht gesprochen werden.

Auf dem Markt für Spitzenlast deckt die zu erzielende Vergütung in Form des jahresdurchschnittlichen APs meist weder die Energiebeschaffungskosten des V2G-Teilnehmers, noch die zusätzlich anfallenden variablen Kosten für die Akkupackabnutzung. Ein wirtschaftlicher Dauereinsatz von V2G auf diesem Markt über das ganze Jahr hinweg betrachtet kann somit unter den aktuellen Rahmenbedingungen ausgeschlossen werden. Es bedarf demnach eines wesentlich höheren jahresdurchschnittlichen APs, einer Beschränkung des Energieangebots durch V2G auf entsprechend hochpreisige Zeiträume oder der Einführung einer zusätzlichen Vergütung in Form eines LPs, um als V2G-Teilnehmer Gewinne zu erwirtschaften.

² *Ist* beschreibt den aktuellen Wert des entsprechenden Parameters im AC, *Soll* den Wert, den der entsprechende Parameter im AC ceteris paribus annehmen muss, um die Gewinnschwelle zu erreichen.

Diese Voraussetzungen sind für den Regelleistungsmarkt zumindest teilweise gegeben. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit des V2G-Konzepts muss an dieser Stelle ergebnisbedingt differenziert nach der Energieflussrichtung erfolgen.

Für den Fall der negativen Energieflussrichtung, also V2G, konnte gezeigt werden, dass zur Kostendeckung die Höhe beider Teile der Vergütung lediglich in zwei Szenarien ausreicht. Nur im aktuell schwer realisierbaren und höchst unwahrscheinlichen BC kann in den Märkten der PRL und MRL ein Gewinn erwirtschaftet werden. Im praxisnäheren AC reicht indes meist nicht einmal die alleine Variation eines Parameters. Zum Erreichen des Break-even ist die kombinierte Veränderung mehrerer Parameter zugunsten des Anbieters erforderlich. Im Fall der positiven Energieflussrichtung, also G2V, wird das EV nicht nur kostenlos geladen, sondern der Fahrzeugbesitzer sogar für die Abnahme der Energie bezahlt. Im naheliegenden AC reicht der jährliche Gewinn je EV von 1.621 € bei der MRL bis zu 4.275 € bei der SRL.

Ungeachtet der derzeitigen Unwirtschaftlichkeit einer Nutzung von V2G in Deutschland besteht die Notwendigkeit einer weiterführenden, genaueren Untersuchung der Ökonomie dieses Konzepts. Dies gilt vor allem vor dem Hintergrund eines Mangels an Energiespeichermöglichkeiten zum Ausgleich von Schwankungen in der Energiebereitstellung bei einer verstärkten Einführung von Energieerzeugern auf Basis erneuerbarer Energien.

7 Ausblick

Der auf einem statischen Kostenmodell aufbauende V2GPA stellt einen nützlichen Ansatz für eine einfache, szenariobasierte Bestimmung der ökonomischen Potenziale von V2G dar und dient als Basis weiterer, in einem dynamischen Ansatz mündender, Optimierungen. Hierzu wird ein Simulationsmodell entwickelt, welches keinen Gebrauch von statischen Durchschnittswerten wie der V2GPA macht, sondern stattdessen stochastische Funktionen für Regelleistungspreise, Stromtarife für Kunden, Verfügbarkeit von Leistung und Energie der EVs, zeitliche Verfügbarkeit der EVs, Energiebedarf der verschiedenen Lastarten, Entladungstiefe der Akkupacks etc. verwendet. Ferner wird die Möglichkeit der Teilnahme am Energiehandel erst ab Erreichen eines bestimmten, jedoch variablen monetären Grenzwerts betrachtet. Hierdurch können neue oder bisher unrentable Energiemärkte zumindest teilweise erschlossen und die Gewinnerzielungsmöglichkeiten je EV maximiert werden. Resultierend aus diesen Überlegungen kann eine zeitraumbezogene Evaluierung des tatsächlichen Potenzials von V2G für die Umsetzung neuer Geschäftsmodelle durchgeführt werden.

8 Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
d	$d \in [0, 1]$	Diskontierungssatz für die Anfangsinvestition
d_d	km	Distanz, die seit der letzten vollständigen Ladung zurückgelegt wurde
d_p	km	Distanz, die zu jedem Zeitpunkt zurückgelegt werden kann
E_A	kWh	Energiemenge, die tatsächlich geflossen ist
E_{Akku}	kWh	Energiemenge, die das Akkupack durch eine vollständige Ladung aufnimmt
E_L	kWh	Energiemenge, die vertraglich vereinbart wurde
F	km/kWh	Fahrleistung, die pro kWh zurückgelegt werden kann
G_{Ges}	€	Gewinn, der in der Gesamtheit pro Jahr zu erzielen ist

I	A	Stromstärke der Stromnetz-EV-Verbindung
K_0	€	Kosten für die Anfangsinvestition in die Ausrüstung
K_{Ges}	€	Kosten, die in der Gesamtheit zu investieren sind
K_{Arbeit}^{Arbeit}	€	Kosten für Löhne für einen Akkupacktausch (Lohnkosten)
K_{Akku}^{fix}	€	Kosten, die fix für das Akkupack anfallen (Materialkosten)
k_E	€/kWh	Kosten, die variabel für die Energie pro kWh anfallen
K_{fix}	€	Kosten, die fix für die Ausrüstung anfallen
k_{var}	€/kWh	Kosten, die variabel pro kWh anfallen
$L_{A,i}$	kW	Leistung, die zum Zeitpunkt $t_{A,i}$ tatsächlich genutzt wurde
L_L	kW	Leistung, die vertraglich vereinbart wurde
n	$n \geq 0$	Anzahl der Jahre, nach der der Break-Even erreicht wird
η_{el}	$\eta_{el} \in [0, 1]$	Wirkungsgrad der Bauteile des EV
η_{Umw}	$\eta_{Umw} \in [0, 1]$	Wirkungsgrad der Energieumwandlung Stromnetz-EV-Stromnetz
P_A	€/kWh	Preis für die zur Verfügungstellung von Energie (Arbeitspreis)
P_L	€/kW/h ³	Preis für die zur Verfügungstellung von Leistung (Leistungspreis)
S	$S \geq 0$	Anzahl der Phasen des Stromanschlusses
T	$T \in [0, 1]$	Entladungstiefe des Akkupacks, für die die Zyklusfestigkeit gilt
$t_{A,i}$	h	Zeitdauer des i-ten Energieflusses mit der tatsächlich genutzten Leistung
t_A^{max}	h	Max. Zeitdauer aller Energieflüsse mit der tatsächlich genutzten Leistung
t_L	h	Zeitdauer des Vorhaltens der vertraglich vereinbarten Leistung
U	V	Spannung der Stromnetz-EV-Verbindung
U_{Ges}	€	Umsatz, der in der Gesamtheit pro Jahr zu erzielen ist
V_{LA}	$V_{LA} \in [0, 1]$	Verhältnis der abgegebenen zur vereinbarten Energiemenge
Z	$Z > 0$	Zyklusfestigkeit des Akkupacks

9 Literatur

Bücher

- [1] Beck, L (2009): V2G – 101. A text about Vehicle-to-Grid (V2G), the technology which enables a future of clean and efficient electric-powered transportation. Delaware.

Zeitschriftenbeiträge

- [2] Clement-Nyns, K; Haesen, E; Driesen, J (2011): The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid. *Electric Power Systems Research* 81: 185-192.
- [3] Kempton, W; Letendre, S (1997): Electric Vehicles As A New Power Source for Electric Utilities. *Transportation Research* 2(3): 157-175.
- [4] Kempton, W; Tomic, J (2007): Using fleets of electric-drive vehicles for grid support. *Journal of Power Sources* 168: 459-468.
- [5] Kempton, W; Tomic, J (2005): Vehicle-to-grid power fundamentals. Calculating capacity and net revenue. *Journal of Power Sources* 144: 268-279.
- [6] Peterson, S; Apt, J; Whitacre, J (2010): Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and v2g utilization. *Journal of Power Sources* 195: 2385-2392.
- [7] Peterson, S; Whitacre, J; Apt, J (2010): The economics of using plug-in hybrid electric vehicle battery packs for grid storage. *Journal of Power Sources* 195: 2377-2384.

³ Die Einheit kW/h ist von der Einheit kWh abzugrenzen. Erstere bezieht sich auf das Angebot einer Leistung von 1kW über einen Zeitraum von 1h, unabhängig davon, ob von dieser Leistung Gebrauch gemacht wird. Letztere gibt die über 1h geflossene Energiemenge an.

- [8] White, C; Zhang, K (2011): Using vehicle-to-grid technology for frequency regulation and peak-load reduction. *Journal of Power Sources* 196: 3972-3980.

Konferenzbeiträge (ohne Verlag)

- [9] Binding, C; Gantenbein, D; Jansen, B; Sundström, O (2010): Electric Vehicle Fleet Integration in the Danish EDISON Project – A Virtual Power Plant on the Island of Bornholm. *Proc. of IEEE Power & Energy Society General Meeting*. Minneapolis, USA.
- [10] Jansen, B; Binding, C; Sundström, O; Gantenbein, D (2010): Architecture and Communication of an electric Vehicle Virtual Power Plant. *Proc. of 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications*. Gaithersburg, Maryland, USA.
- [11] Kamboj, S; Kempton, W; Decker, K (2011): Deploying Power Grid-Integrated Electric Vehicles as a Multi-Agent System. *Proceedings of 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. Taipei, Taiwan.

Online-Beitrag

- [12] 50Hertz (2011): Netzkennzahlen.
<http://www.50hertz-transmission.net/de/Netzkennzahlen.htm>. Abgerufen am 25.07.2011.
- [13] Amprion (2011): Netzkennzahlen.
<http://www.amprion.net/netzkennzahlen>. Abgerufen am 25.07.2011.
- [14] Brooks, A (2002): Vehicle-to-Grid Demonstration Project. <http://www.udel.edu/V2G/docs/V2G-Demo-Brooks-02-R5.pdf>. Abgerufen am 20.05.2011.
- [15] BDEW (2009): Strompreiszusammensetzung. [http://www.bdew.de/bdew.nsf/res/Staats-Last%20171x85_4c.jpg/\\$file/Staats-Last%20171x85_4c.jpg](http://www.bdew.de/bdew.nsf/res/Staats-Last%20171x85_4c.jpg/$file/Staats-Last%20171x85_4c.jpg). Abgerufen am 29.07.2011.
- [16] eE-Tour Allgäu (2011): Effiziente Elektromobilität im Allgäu.
<http://www.ee-tour.de/>. Abgerufen am 26.07.2011.
- [17] EEX (2011): Einführung in den Börsenhandel an der EEX auf Xetra und Eurex.
http://www.eex.com/de/document/4423/Einf%C3%BChrung%20B%C3%B6rsenhandel_Release_01B.pdf. Abgerufen am 25.05.2011.
- [18] EnBW (2011): Netzkennzahlen.
<http://www.enbw-transportnetze.de/kennzahlen/>. Abgerufen am 20.07.2011.
- [19] Kempton, W; Tomic, J; Letendre, S; Brooks, A; Lipman, T (2001): Vehicle-to-Grid Power. Battery, hybrid, and Fuel Cell Vehicles as Resources for Distributed Electric Power in California. <http://www.udel.edu/V2G/docs/V2G-Cal-2001.pdf>. Abgerufen am 20.05.2011.
- [20] Regelleistungen (2011). <http://www.regelleistung.net>. Abgerufen am 20.05.2011.
- [21] TenneT (2011): Netzkennzahlen.
http://www.tennetso.de/pages/tennetso_de/Transparenz/Veroeffentlichungen/Netzkennzahlen/Uebersicht/index.htm. Abgerufen am 20.07.2011.
- [22] Theobald, C; Hummel, K; Jung, C (2003): Regelmarkt. Gutachten zur Marktgestaltung, Beschaffungskosten und Abrechnung von Regelleistung und Regelenergie durch die deutschen Übertragungsnetzbetreiber. http://www.bet-aachen.de/fileadmin/redaktion/PDF/Veroeffentlichungen/2003/BET-Studie_REM.pdf. Abgerufen am 20.07.2011.