

Elektroautos und ihre Rolle im Stromnetz

Fabian Dreier

Departement für Informatik, ETH Zürich

fdreier@student.ethz.ch

Zusammenfassung

Da die Reserven an fossilen Treibstoffen in absehbarer Zeit erschöpft sind, müssen Fahrzeuge in Zukunft mit anderen Energieformen betrieben werden. Eine Alternative zu den fossilen Treibstoffen bietet der Antrieb durch elektrischen Strom, falls dieser aus erneuerbaren Quellen hergestellt wird. Wenn in Zukunft jedoch ein hoher Prozentsatz der Autos mit elektrischem Antrieb ausgestattet ist, ergibt sich daraus eine grosse Belastung für das Stromnetz, wenn die Elektroautos als reine Stromkonsumenten agieren. Die Netzbelastung kann reduziert werden, indem Elektroautos nicht nur Strom konsumieren, sondern auch Teile der gespeicherten Energie dem Stromnetz wieder zur Verfügung stellen. Wenn viele Elektroautos zu einem Verbund zusammengeschlossen werden, so kann dieser als grosser Stromspeicher dem Stromnetz selbst wieder von Nutzen sein.

1 Einführung

Die Idee des Elektroautos ist keineswegs neu, schon um 1881 wurde an der Internationalen Elektrizitätsausstellung ein erstes Elektroauto vorgestellt. In den darauf folgenden Jahren wurden die Elektroautos sehr beliebt, so wurden um 1900 in den USA 38% der Automobile mit Strom angetrieben, in der Stadt New York betrug dieser Anteil sogar 50% [13]. Auch wurde 1899 sogar der erste Geschwindigkeitsrekord eines Menschen mit über 100 km/h mit einem Elektromobil aufgestellt (Abbildung 1) [14].

In den folgenden Jahren wurden die Elektroautos allerdings zunehmend von Benzin und Diesel getriebenen Fahrzeugen verdrängt, vor allem aufgrund der höheren Reichweite. Seit 1990 erlebt die Idee des Elektroautos wieder eine Renaissance. Dies hauptsächlich durch Verbesserungen der Batterien, steigenden Treibstoffpreisen und erhöhtem Umweltbewusstsein. Daher beschäftigen sich heutzutage viele Autohersteller wieder mit der Entwicklung von Elektroautos. Durch die stetige Weiterentwicklung der Batterien konnte seither der grösste Nachteil der Elektroautos, die Reichweite, schon erheblich verbessert werden. Aktuelle Modelle, wie zum Beispiel der Tesla Roadster (Sportwagen), kommen auf eine Reichweite von bis zu 370 km [10]. Zudem wird erwartet, dass sich die Energiedichte von Lithium Batterien noch etwa um Faktor 8 – 10 steigern lässt [15, 6]. Technische Verbesserungen in diesem Bereich könnten daher dem Elektroauto diesmal zum Durchbruch verhelfen.

Dieser Bericht möchte jedoch nicht auf die Entwicklung des Elektroautos eingehen, sondern die Auswirkungen einer grossen Anzahl an Elektroautos auf das Stromnetz untersuchen. In einem ersten Teil werden kurz die verschiedenen Typen von Elektroautos vorgestellt. Es wird auch abgeschätzt, wie viel elektrische Energie die zukünftige Flotte an Elektroautos etwa brauchen wird, und wie deren Belastung auf das Stromnetz mit verschiedenen Ladestrategien reduziert werden kann. Der zweite Teil beschreibt Möglichkeiten, wie geparkte Elektroautos dem Stromnetz als Stromspeicher dienen können und zeigt Vorteile sowohl für Besitzer, als auch für Stromnetzbetreiber. Weiter wird auch untersucht, ob sich dieser Stromspeicher als Ausgleichsspeicher für Wind- oder Solarkraftwerke eignet, die eine schwankende Leistungsabgabe haben.



Abbildung 1: Erstes Fahrzeug mit über 100 km/h

2 Elektroautos als Stromkonsumenten

2.1 Kategorien von Elektroautos

Elektroautos lassen sich aufgrund ihrer Energiequelle in die drei Kategorien aufteilen. Die erste Kategorie bilden rein batteriebetriebene Elektroautos. Bei diesem Fahrzeugtyp liefert eine Batterie die gesamte Energie, die für den Antrieb benötigt wird. In den meisten Fahrzeugen befinden sich heutzutage Lithium-Ionenbatterien, da diese sehr hohe Leistungsdichten aufweisen und viele Ladezyklen möglich sind. Die Kapazitäten solcher Batterien reichen bei den meisten Modellen von ca. 1 bis 60 kWh [5, Seite 4382].

Die zweite Kategorie bilden die Hybridfahrzeuge. Diese werden sowohl durch Elektromotoren, als auch durch Verbrennungsmotoren angetrieben. Im Zusammenhang mit dem Stromnetz interessieren uns jedoch nur Hybridfahrzeuge, die auch an einer Steckdose eingesteckt werden können, um die Batterien zu laden. Im folgenden bezeichnet der Begriff nur Hybridfahrzeuge, welche am Netz eingesteckt werden können. Heutige Hybridfahrzeuge wie zum Beispiel der Toyota Prius, Honda Insight und Honda Civic Hybrid besitzen diese Möglichkeit nicht. Toyota will jedoch Ende 2010 eine Version des Prius auf den Markt bringen, welche man an einer Steckdose aufladen kann [11]. Bei den Batterien der Hybridfahrzeuge reichen die Kapazitäten von etwa 1 bis 8 kWh.

Zu der dritten Kategorie gehören Autos mit einer Brennstoffzelle. Diese speichern Energie in Form von Wasserstoff, welcher zusammen mit Sauerstoff in einer Brennstoffzelle zu Wasser reagiert. Bei diesem Prozess entsteht elektrische Energie. Diese Energie wird häufig direkt an die Elektromotoren abgegeben, es gibt aber auch Modelle, welche eine Batterie beinhalten, um dort Strom zwischenspeichern. Allerdings besitzen auch solche Modelle mit Batterie bisher keine Möglichkeit, die Batterie an einer Steckdose aufzuladen. Dies wäre aber mit wenig Mehraufwand realisierbar.

2.2 Energieverbrauch des Verkehrs

Aufgrund der sich erschöpfenden Reserven an fossilen Treibstoffen und deren steigender Preise, wird die Anzahl an Fahrzeugen, die mit alternativen Treibstoffen betrieben werden, längerfristig stark steigen. Dies wird zu einer Erhöhung des Stromverbrauchs führen, da ein Teil der Energie, die heute von fossilen Treibstoffen erzeugt wird, in Zukunft auch vom Stromnetz zur Verfügung gestellt werden muss. Nun eine kurze Übersichtsrechnung, um die Größenordnung dieses Zusatzverbrauchs zu verdeutlichen: In der Schweiz ist der Verkehr für rund 33% des Gesamtenergieverbrauchs verantwortlich (Abbildung 2)[3]. Von diesem Verbrauch fallen etwa 85% auf den Strassenverkehr, von dem wiederum etwa 70% auf den Personenverkehr fallen [2]. Nehmen wir nun an, dass in mittel- bis längerfristiger Zukunft etwa 50% der Personenwagen ¹ Elektroautos sind, so macht der Verbrauch der Elektroautos etwa 10% ($= 33\% \times 85\% \times 70\% \times 50\%$) des

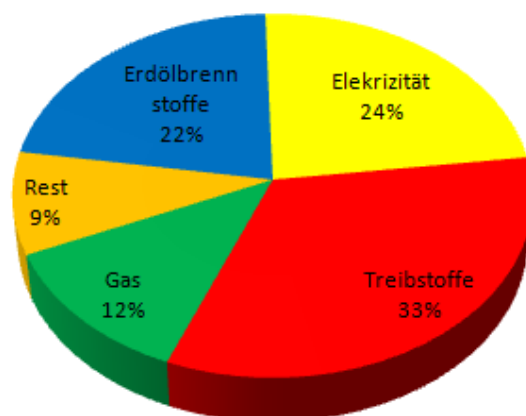


Abbildung 2: Energieverbrauch Schweiz [3]

¹[9, Seite 3] verwendet 52% als Wert in der Studie, jedoch ohne nähere Begründung.

Gesamtenergieverbrauchs aus. Der zukünftige Stromverbrauch der Elektroautos würde unter diesen Annahmen rund 40% des heutigen Stromverbrauchs ausmachen. Glücklicherweise haben Elektromotoren einen rund 3-mal höheren Wirkungsgrad als Verbrennungsmotoren² [16][13]. Daher würde die Zusatzlast der Elektroautos auf das Stromnetz etwa 13% ($=40\%/3$) ausmachen.

2.3 Auswirkung der Ladestrategie auf die Last

Zusätzlich zu der vorher beschriebenen Zusatzlast, fällt ein Grossteil dieser Last in jene Zeiten, in denen schon sonst eher viel Strom verbraucht wird. Dies ist vor allem am frühen Abend, wenn die meisten Leute von der Arbeit nach Hause kommen. Gerade dann würden viele Elektroautos an das Stromnetz angehängt werden, um die Batterien nach dem Arbeitsweg wieder aufzuladen. Mit einer naiven Ladestrategie, also wenn die Batterie einfach aufgeladen wird, sobald man das Auto einsteckt, würde sich die Spitzenlast durch die Elektroautos nochmals verstärken. Ein grosser Teil der Autos wird meist am Abend nicht noch einmal verwendet, es würde daher Sinn machen, diejenigen Autos, welche am Abend nicht nochmals verwendet werden, erst in der Nacht aufzuladen. Einen Anreiz dazu bietet ein Hoch- und Niedertarifsysteem, wie wir es hier aus der Schweiz kennen. Der Konsument spart Geld, falls er das Auto zu Niedertarifszeiten auflädt und hat somit einen Beweggrund, dies zu tun. Wenn jedoch die meisten Elektroautos beginnen ihre Batterien aufzuladen, sobald der Niedertarif einsetzt (z.B. aufgrund von Zeitschaltuhren o.ä.), so kann dadurch wieder eine Spitzenlast entstehen. Lopes und Soares [9, Seite 1] schlagen daher eine Smart-Charging-Strategie vor. Dabei kommunizieren die Elektroautos oder auch die Ladestationen mit dem jeweils nächsten Knoten im Stromnetz (z.B. lokale Transformationsstation). Dieser nächstgelegene Knoten hat Informationen über die momentane Netzlast, indem Spannung und Frequenz überwacht werden, oder indem er mit anderen Knoten kommuniziert. Aufgrund dieser Informationen kann der Knoten Entscheidungen treffen, wie viele der angeschlossenen Elektroautos nun aufgeladen werden sollen und mit welcher Leistung. Dies führt dazu, dass die Batterien der Elektroautos hauptsächlich in der Nacht aufgeladen werden, wenn die gesamte Netzlast tief ist. Natürlich muss der Benutzer bei dieser Strategie die Möglichkeit haben, das Aufladen des Autos unabhängig von der Netzlast zu erzwingen, z.B. falls die Batterie fast leer ist und das Auto noch am selben Tag wieder gebraucht wird.

²Annahme Wirkungsgrad: rund 30% bei modernen Verbrennungsmotoren, etwa 90% bei Elektromotoren

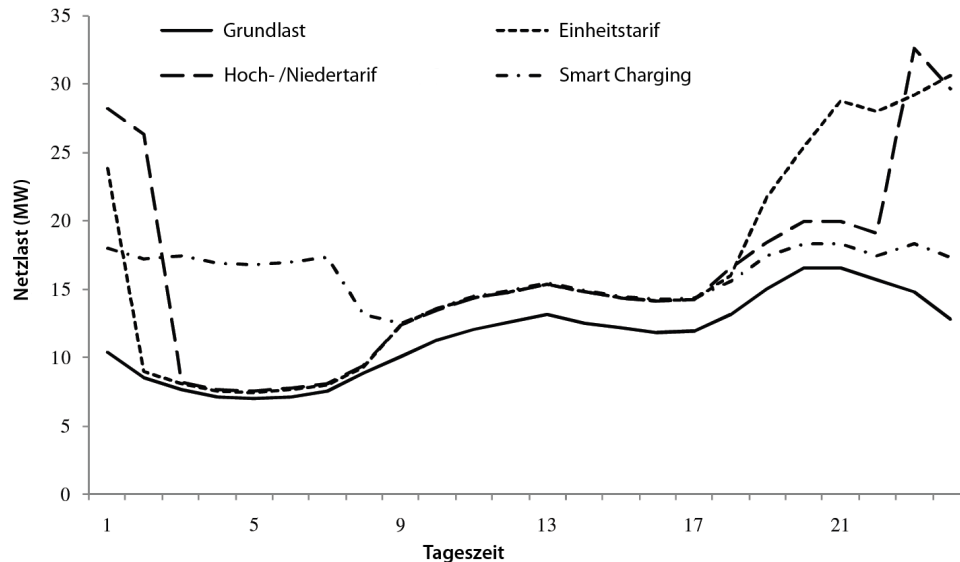


Abbildung 3: Tageslast mit verschiedenen Ladestrategien [9, Seite 7].

Abbildung 3 vergleicht die verschiedenen Ladestrategien und ihre Auswirkungen auf die Tageslast anhand einer Studie aus Portugal [9]. Die der Abbildung zugrunde liegenden Daten wurden anhand eines bestehenden Netzes in einem vorstädtischen Gebiet berechnet. In diesem Gebiet besaßen die Einwohner insgesamt 12744 Autos. Die durchgezogene Linie ist die Stromnetzbelastung ohne Elektroautos. Für den Vergleich der Ladestrategien wurde ein Elektroautoanteil von 52% (= 6608) angenommen. Wenn nur ein Einheitstarif verwendet wird, so steigt die Last nach 18 Uhr stark an, dann wenn viele Leute von der Arbeit nach Hause kommen und gleich ihre Elektroautos aufladen. Falls ein Hoch- und Niedertarifsystem verwendet wird, so steigt die Last nach Beginn des Niedertarifs sprunghaft an und erreicht eine höhere Spitzenbelastung als mit dem Einheitstarif. Mit der Smart-Charging-Strategie verteilt sich die Last viel gleichmässiger über die Nacht und die Spitzenbelastungen sind viel kleiner als mit den anderen Ladestrategien. Eine solche Lastverteilung ist für die Netzbetreiber einfacher zu handhaben, weil dadurch die Kraftwerke mit gleichbleibender Leistung produzieren können und nicht immer reguliert werden muss. Da durch Smart-Charging die höchste Spitzenlast nur wenig steigt, ist es möglich, den zusätzlich benötigten Strom durch bestehende Kraftwerke (mit höherer Auslastung) zu liefern.

3 Elektroautos als Stromspeicher

Autos sind heutzutage das am meisten benutzte Verkehrsmittel, dennoch wird ein Auto im Schnitt nur 4% der Zeit genutzt [7, Seite 268]. Bei Elektroautos bestünde somit die Möglichkeit, das Auto während der restlichen Zeit als Stromspeicher zu nutzen. Um Elektroautos als Stromspeicher nutzen zu können, sind kaum Änderungen im Vergleich zu heutigen Modellen nötig. Elektroautos besitzen inhärent schon einen Wechselrichter, welcher aus Gleichstrom Wechselstrom in verschiedenen Frequenzen produzieren kann. Somit ist es ohne grössere zusätzliche Kosten möglich, Strom aus den Batterien der Elektroautos ins Netz einzuspeisen.

3.1 Stromarten

Für das bessere Verständnis des folgenden Kapitels ist es notwendig, die verschiedenen Leistungsarten im Strommarkt zu verstehen. Darum folgt in diesem Abschnitt ein Exkurs zu den verschiedenen Typen von Leistungen.

3.1.1 Grundleistung

Die Grundleistung ist der Teil der Leistung, die rund um die Uhr benötigt wird. Sie wird typischerweise von sehr grossen Kraftwerken hergestellt, in der Schweiz sind dies die Kernkraftwerke und die grossen Wasserkraftwerke. In anderen Ländern sind dies häufig grosse Kohlekraftwerke oder auch Kernkraftwerke.

3.1.2 Spitzenleistung

Die Spitzenleistung ist der Teil der Leistung, der tagsüber zusätzlich zur Grundleistung benötigt wird. Die Lastkurve der Spitzenlast ist an verschiedenen Tagen meist ähnlich, daher können zur Produktion der vorhersehbaren Spitzenleistung auch Kraftwerke mit langsamen Reaktionszeiten verwendet werden (Kohle- und Kernkraftwerke). In der Schweiz wird die Produktion der Spitzenleistung hauptsächlich von den Wasserkraftwerken übernommen.

3.1.3 Minutenreserve

Die Minutenreserve ist eine Reserveleistung, die innert kurzer Zeit (etwa 10 – 15 Minuten) zur Verfügung stehen muss. Diese Reserve wird benötigt, falls der aktuelle Verbrauch nicht mit dem prognostizierten Verbrauch übereinstimmt oder als Ersatz, falls andere Generatoren ausfallen. Die Minutenreserve wird nur solange benötigt bis sich die reaktionsträgen, grossen Kraftwerke auf den neuen Verbrauch eingestellt haben (im Bereich von 1 h). Speziell an den Minutenreserven ist, dass dafür im Strommarkt schon für das Vorhandensein bezahlt wird. Wenn also zum Beispiel ein 1 MW Generator für 24 Stunden bereit steht, so kann dies als 24 MW-h (\neq MWh³) verkauft werden [7, Seite 271]. Wird die Reserve dann tatsächlich gebraucht, so wird für die gelieferte Energie zusätzlich bezahlt.

³MW-h ist bereitstehende Leistung \times Zeit, MWh hingegen ist erbrachte Leistung. Preise dafür sind unterschiedlich

3.1.4 Regelleistung

Die Regelleistung wird benötigt um die Frequenz des Stromnetzes konstant zu halten⁴. Die Regelleistung muss innerhalb weniger Sekunden verfügbar sein, jedoch nur für die Dauer von wenigen Minuten bis die Leistung der Minutenreserven aufgeschaltet wird. Wie bei der Minutenreserve wird auch bei der Regelleistung für die Bereitschaft bezahlt, Strom zu liefern (regulation up), zudem wird hier auch für die Bereitschaft Strom aufzunehmen bezahlt (regulation down).

3.2 Vom Elektroauto ins Stromnetz (Vehicle-to-Grid)

Wie schon früher in diesem Bericht erwähnt, ist zu erwarten, dass der Anteil von Elektroautos in Zukunft stark steigen wird. Einzelne Elektroautos haben aber im Vergleich zu Stromgeneratoren eine sehr kleine Leistung. Kombiniert man jedoch die Leistung von einigen Tausend Fahrzeugen, so resultiert daraus eine Gesamtleistung, die mit der eines Generators durchaus vergleichbar ist. Wenn in Zukunft ein grosser Teil der Personenwagen Elektroautos sind, so würde sich daraus eine enorme kombinierte Leistung ergeben.

Tabelle 1 zeigt einen Vergleich zwischen dem Elektrizitätssystem und der Fahrzeugflotte⁵ in den USA. Die

| | Elektrizitätssystem (elektrische Energie) | Fahrzeugflotte (mechanische Energie) |
|--------------------------|--|---|
| Anzahl Erzeuger | 17'658 | 176'000'000 |
| Durchschnittsleistung kW | 62548 | 111 (ca. 150 PS) |
| Totale Leistung (GW) | 1104 | 19500 |

Tabelle 1: Vergleich Elektrizitätssystem mit Fahrzeugflotte in den USA [8, Seite 281][12]

kombinierte mechanische Leistung der Fahrzeugflotte ist um ein Vielfaches grösser als die Gesamtleistung des Elektrizitätssystems. Allerdings wäre es unsinnig, Strom aus Batterien von Elektroautos als Grundlast ins Netz zu speisen, denn diese Energie musste im Vorfeld produziert werden, um die Batterien zu laden. Grössere Verbände von Elektroautos als Stromlieferanten könnten jedoch in den Märkten eingesetzt werden, in denen schnelle Reaktionszeiten benötigt werden, da Batterien innerhalb von wenigen Millisekunden bis Sekunden ihre volle Leistung erreichen können. Dies sind die Märkte der Regelleistung und der Minutenreserve, denn hier sind kurze Reaktionszeiten notwendig, welche mit konventionellen Kraftwerken nur schwierig und teuer zu realisieren sind.

3.3 Wirtschaftlichkeit der Stromeinspeisung

Damit die Nutzer von Elektroautos überhaupt einen Anreiz haben, ihr Auto für Dienste an das Stromnetz zur Verfügung zu stellen, muss für sie ein Vorteil daraus entstehen. Denn durch das Anbieten dieser Dienste wird die Batterie des Autos mit zusätzlichen Lade- und Entladezyklen belastet, was die Lebensdauer der Batterie verkürzt. Die folgende detaillierte Berechnung des Nutzens für Besitzer eines Elektroautos zeigt auf, dass es sich für einen Besitzer durchaus lohnen könnte, wenn er sein Auto für solche Dienste zur Verfügung stellt. Diese Berechnung stammt von W. Kempton [7, Seiten 271-275], der Daten aus Kalifornien verwendet hat,

⁴In Wechselstromnetzen sinkt die Frequenz, wenn der Verbrauch grösser ist als die Produktion und sie steigt, wenn mehr produziert wird als verbraucht wird.

⁵Darin sind nur Personenwagen oder ähnliche Fahrzeuge, jedoch keine Lastwagen enthalten.

um den Ertrag aus der zur Verfügungsstellung von Regelleistung zu berechnen.

Als Grundlage der Berechnung dient ein Toyota RAV4 EV mit einer Batteriekapazität von 27.4 kWh. Davon werden nur 21.9 kWh (80%) als nutzbar angesehen, um die Batterie zu schonen (kein zu tiefes Entladen). Zudem wird von dieser Kapazität noch eine Reserve abgezogen, sodass der Besitzer noch 32 km (20 Meilen) fahren kann bis die Batterie leer ist (exkl. Reserve). Der Stromverbrauch des Fahrzeugs ist mit 0.25 kWh/km angegeben, dies ergibt einen weiteren Abzug der nutzbaren Kapazität von $0.25 \text{ kWh/km} \times 32 \text{ km} = 8 \text{ kWh}$. Weiter wird angenommen, dass der Besitzer schon die Hälfte der durchschnittlichen Tagesstrecke zurückgelegt hat und die Batterie dementsprechend entleert wurde. Diese Tagesstrecke entspricht in Kalifornien 51.5 km (32 Meilen) am Tag (in der Schweiz nur 25.5 km [4]), also werden nochmals $51.5/2 \text{ km} \times 0.25 \text{ kWh} = 6.438 \text{ kWh}$ abgezogen. Somit bleiben $21.9 - 8 - 6.438 = 7.462 \text{ kWh}$ übrig. Berücksichtigt man auch den Wirkungsgrad des Wechselrichters von Gleich- zu Wechselstrom (93%), so stehen noch rund 7 kWh für Dienste am Stromnetz zur Verfügung. Weiter wird angenommen, dass das Auto rund 18 Stunden am Tag an der Steckdose eingesteckt ist, was 6570 Stunden ($= t_{plug}$) pro Jahr ergibt. Die maximale Leistung die ins Netz eingespielen werden kann liegt bei 15 kW ($= P$). Dieser Wert ist meistens vom Anschluss des Haushaltes an das Stromnetz limitiert und nicht durch die Leistung der Batterie selbst, denn die Leistung der Batterie liegt bei über 100 kW. Bei der Regelleistung wird sowohl für die Bereitschaft Leistung zu liefern, als auch die gelieferte oder aufgenommene Energie selbst bezahlt. Dabei liegt das Verhältnis von Lieferung zu Bereitschaft etwa bei 10% ($= v_r$). Die typische Dauer, während welcher Regelleistung benötigt wird, liegt zwischen 1 – 4 Minuten. Den meisten Teil der Zeit wird der Besitzer nur dafür bezahlt, dass er das Auto an der Steckdose angeschlossen hat. Der resultierende Ertrag errechnet sich wie folgt:

$$E = \underbrace{p_{kap}}_{\text{Kapazitaetspreis}} \times \underbrace{P}_{\text{Leistung}} \times \underbrace{t_{plug}}_{\text{Zeit}} + \underbrace{p_{el}}_{\text{Strompreis}} \times \underbrace{v_r}_{\text{Verhaeltnis}} \times \underbrace{P}_{\text{Leistung}} \times \underbrace{t_{plug}}_{\text{Zeit}}$$

Mit Marktpreisen (2003) von 0.04\$ pro kW-h und 0.10\$ pro kWh ergibt sich dadurch ein Ertrag von 4928\$ pro Jahr. Diesem Ertrag gegenüber stehen, gemäss Studie, Kosten von 1500\$ für die Aufrüstung des Hausanschlusses auf 15 kW Leistung und weitere 400\$ werden zum Kaufpreis des Autos addiert, für die Fähigkeit Strom einzuspeisen (Verdrahtung und Kontrolle). Zusätzlich werden die Abnutzungskosten der Batterie durch Anschluss ans Netz mit 474\$ pro Jahr beziffert⁶. Mit dieser Berechnung liegt der Ertrag im ersten Jahr bei $4928\$ - 1900\$ - 400\$ - 474\$ = 2554\$$ und bei $4928\$ - 474\$ = 4454\$$ in den weiteren Jahren.

Das obige Beispiel zeigt deutlich, dass mit den jetzigen Strompreisen für Regelleistung durchaus Geld verdient werden kann. Zudem ist der Preis für regulation down häufig höher als der für regulation up. Abbildung 4 verdeutlicht, dass der Ertrag von regulation down gerade während der Nacht meist sehr hoch ist. Während der Nacht war der Preis⁷ für regulation down etwa jeden dritten Tag grösser als 0.25\$ (im vorherigen Beispiel wurde konservativ mit 0.10\$ gerechnet). Durch diesen höheren Bedarf an regulation down in der Nacht können die Besitzer ihre Elektroautos aufladen und zudem dabei Geld verdienen.

Berechnungen wie die oben ausgeführte können auch für Hybrid- und Brennstoffzellenautos durchgeführt werden. Da diese aber eine geringere Batteriekapazität besitzen, ist der Ertrag geringer. Bei den Autos mit Brennstoffzelle bestände auch die Möglichkeit, durch die Brennstoffzelle Energie produzieren zu lassen. Finanziell würde sich dies für den Besitzer lohnen, jedoch macht es ökologisch kaum Sinn, da der Wasserstoff durch Elektrolyse (mittels Strom) hergestellt wird und dieses Verfahren (mit Verflüssigung und Transport)

⁶Neupreis Batterie mit Installation = 9890\$

⁷Daten der Preise stammen aus Kalifornien

nur einen Wirkungsgrad von 20 – 25% hat [1]. Es gibt auch die Möglichkeit Wasserstoff aus Erdgas herzustellen, jedoch entstehen dabei grosse Mengen an CO_2 .

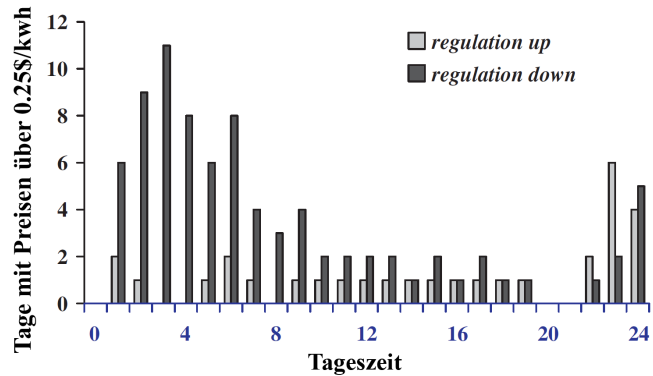


Abbildung 4: Tage innerhalb eines Monats mit über 0.25\$/kWh [5]

3.4 Zusammenschluss mehrerer Elektroautos

Um überhaupt mit der Speicherkapazität von Elektroautos auf dem Strommarkt handeln zu können, müssen mehrere Elektroautos als Verbund organisiert werden, weil es im Strommarkt eine untere Limite für die zu handelnde Leistung gibt. Daher ist es notwendig, dass eine grössere Gruppe von Elektroautos als eine einzige Einheit im Strommarkt vertreten wird. Eine solche Einheit kann als virtuelles Kraftwerk bezeichnet werden, welches auch die Möglichkeit besitzt, Strom zu speichern. Die Zusammenführung der Leistung der Elektroautos zu einem solchen virtuellen Kraftwerk könnte vom lokalen Stromanbieter übernommen werden oder auch von einem Drittanbieter [9, Seite 4384]. Wenn der lokale Stromanbieter diese Aufgabe übernimmt, hätte dies den Vorteil, dass zum einen bereits eine Geschäftsbeziehung besteht und zum Beispiel die erbrachten Leistungen von der Stromrechnung abgezogen werden könnten. Zudem besitzt der Stromanbieter die Informationen über die momentane Netzlast und kann dementsprechend bestimmen, ob und wie viel Energie gespeichert oder bezogen werden soll. Ein weiterer möglicher Vorteil eines solchen virtuellen Kraftwerks ist, dass der Betreiber den Benutzern verbilligt Batterien zur Verfügung stellen könnte, da der Betreiber grosse Mengen einkaufen kann. Er könnte Batterien sogar gratis zur Verfügung stellen als Gegenleistung für die zur Verfügung gestellten Services des Besitzers.

3.5 Elektroautos als Speicher für erneuerbare Energien?

In Zukunft wird ein erheblich grösserer Teil der elektrischen Energie aus erneuerbaren Energiequellen stammen als heute. Bei einem grossen Anteil an Wind und Photovoltaik, bei welchen die Leistung vor allem von den Wetterverhältnissen abhängt, steigt auch der Bedarf an Regelleistung und Minutenreserven. Mit Hilfe von Wetterprognosen kann man zwar die Leistung über einen Tag ungefähr abschätzen, jedoch können z.B. kurzzeitige Flauten oder Windböen zu einer schwankenden Leistung von Windkraftwerken führen. In einer Studie [8, Seite 286] hat W. Kempton berechnet, wie viele Elektroautos ans Stromnetz angeschlossen sein müssen, um solche kurzzeitigen Schwankungen auszugleichen. Dabei wurde angenommen, dass die Hälfte der elektrischen Energie in den USA von Windkraftwerken geliefert wird. Daraus wurde eine benötigte Re-

gelleistung von 42 GW errechnet, was bei 15 kW pro Fahrzeug 2.8 Millionen Fahrzeugen entspricht. Nimmt man an, dass jeweils nur die Hälfte der Fahrzeuge gleichzeitig am Netz angeschlossen sind, so ergibt dies 5.6 Millionen Fahrzeuge, dies ist nur 3.3% des Autobestandes der USA (176 Millionen insgesamt).

Weiter wurde auch untersucht, ob der Speicher von Elektroautos dazu in der Lage wäre, längerfristige Leistungsdefizite zu kompensieren. Dazu wurde aus Daten bestehender Windkraftwerke⁸ geschätzt, wieviel Speicher diese Windkraftanlagen haben müssen, um eine garantierte Leistung von 20% ihrer Maximalleistung zu erbringen. Bei der extremsten Windstille in der beobachteten Zeit, bei welcher die geplante Kapazität durchgehend unterschritten wurde (während 22 h), fehlte das 1.7-fache der Stundenleistung (d.h. auf 1 MW Leistung fehlten insgesamt 1.7 MWh). Hochgerechnet auf das Szenario mit 50% Windenergie (700 GW Leistung) ergibt dies 1190 GWh an benötigtem Speicher. Da angenommen wird, dass über eine Dauer von 22 h das Elektroauto vom Fahrer benutzt wird und daher keine Reserven mehr für Dienste am Stromnetz übrig bleiben, kommen die rein batteriebetriebenen Autos als Speicher nicht in Frage. Daher kommen nur Plug-in Hybride oder Brennstoffzellen getriebene Autos für diese Art von Speicher in Frage, da diese die Batterie unabhängig von Stromnetz aufladen können. Wenn man zulässt, dass die mit Brennstoffzellen betriebenen Autos während des Parkens Strom produzieren⁹ und damit pro Auto 36 kWh Strom produziert werden kann, so müssten 33 Millionen Fahrzeuge am Netz angeschlossen sein. Das entspricht etwa 19% der gesamten Fahrzeugflotte der USA. Das Beispiel zeigt also, dass es machbar wäre, dazu müsste jedoch die Anzahl an Autos mit Brennstoffzelle und die Anzahl an Teilnehmern sehr hoch sein, um ein solch grosses Leistungsdefizit kompensieren zu können.

4 Schlussfolgerungen

Durch technische Verbesserungen im Bereich der Batterietechnik und durch steigende Preise der herkömmlichen Treibstoffe wird sich der Anteil an Elektroautos stark erhöhen. Da dadurch ein Teil der Energie, die bisher von fossilen Treibstoffen geliefert worden war, vom Stromnetz geliefert werden muss, wird sich dessen Belastung erhöhen. Mit einer intelligenten Ladestrategie kann jedoch eine starke Erhöhung der Spitzenlast verhindert werden. Dadurch werden kaum neue Kraftwerke benötigt, um den zusätzlich benötigten Strom zu liefern.

Da die meisten Autos den grössten Teil der Zeit geparkt sind, könnte man in Zukunft geparkte Elektroautos als Anbieter von Regelleistungen und Minutenreserven nutzen. Um diese beiden Services im Strommarkt anbieten zu können, muss die Leistung von vielen Elektroautos kombiniert werden. Diese Aufgabe könnte zum Beispiel der lokale Stromanbieter oder eine dritte Instanz übernehmen und dann einen Teil der Einnahmen aus den angebotenen Services, an die Besitzer der einzelnen Elektroautos weitergeben. Diese haben damit einen Anreiz, ihr Auto zur Verfügung zu stellen. Eine weitere Möglichkeit die Speicherkapazität der Elektroautos zu nutzen, ist die Speicherung von Strom zum Ausgleich der Leistungsschwankungen von Wind- oder Solarkraftwerken. Dazu muss aber der Beteiligungsgrad an Elektroautos (mit Brennstoffzellen) hoch sein, um auch in Zeiten extremer Leistungsdefizite genügend Energie liefern zu können.

⁸Anlagen über 500x400km verteilt, reduziert Einfluss von lokalen Wetterverhältnissen

⁹bei sehr seltenen Ereignissen macht dies Sinn

Literatur

- [1] BOSSEL, ULF: *Does a Hydrogen Economy Make Sense? Proceedings of the IEEE*, 2006.
<http://www.efcf.com/reports/E21.pdf>.
- [2] BUNDESAMT FÜR ENERGIE: *Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2006 nach Verwendungszwecken*. Online; Stand 18.04.2010.
http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_287056702.pdf&endung=Analyse%20des%20schweizerischen%20Energieverbrauchs%202000%20-%202006%20nach%20Verwendungszwecken.
- [3] BUNDESAMT FÜR ENERGIE: *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2008*. Online; Stand 18.04.2010.
http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_893380831.pdf&endung=Schweizerische%20Gesamtenergiestatistik%202008.
- [4] BUNDESAMT FÜR STATISTIK: *Verkehrverhalten Mobilität*. Online, Stand 25.04.2010.
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11/07/01/01/unterwegszeiten.html>.
- [5] GUILLE, CHRISTOPHE GEORGE GROSS: *A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation*. *Energy Policy*, 37:4379–4390, June 2009.
- [6] IBM: *Battery Technologies*. Online, Stand 24.04.2010. http://www.almaden.ibm.com/st/smarter_planet/battery/technologies.
- [7] KEMPTON, W. J.TOMIC: *Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue*. *Journal of Power Sources*, 144:268–279, April 2005.
- [8] KEMPTON, W. J.TOMIC: *Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy*. *Journal of Power Sources*, 144:280–294, April 2005.
- [9] LOPES, J. A. PECAS, F.J. SOARES P.M. ROCHA ALMEIDA: *Identifying Management Procedures to Deal with Connection of Electric Vehicles in the Grid*. *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, 2009.
- [10] TESLA MOTORS INC: *Tesla Roadster - Technische Daten*. Online; Stand 24.04.2010. http://www.teslamotors.com/performance/perf_specs.php.
- [11] TOYOTA: *Toyota Prius*. Online, Stand 09.04.2010. http://www.toyota.at/innovation/design/concept_cars/prius_plugin/index.aspx.
- [12] U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION: *Annual Electric Generator Report*, 2008.
<http://www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/epa/epat1p2.html>.
- [13] WIKIPEDIA: *Elektroauto, Die freie Enzyklopädie*. Online; Stand 24.04.2010.
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Elektroauto&oldid=73542060>.

- [14] WIKIPEDIA: *La Jamais Contente - Geschwindigkeitsrekordwagen*, *Die freie Enzyklopädie*. Online; Stand 24.04.2010. http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=La_Jamais_Contente&oldid=70734457.
- [15] WIKIPEDIA: *Lithium-Ionen-Akkumulator*, *Die freie Enzyklopädie*. Online; Stand 24.04.2010. <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Lithium-Ionen-Akkumulator&oldid=73151217>.
- [16] WIKIPEDIA: *Motoren aus technischer Sicht*, *Die freie Enzyklopädie*. Online; Stand 24.04.2010. http://de.wikibooks.org/w/index.php?title=Motoren_aus_technischer_Sicht/_Vergleich_zwischen_dem_Otto-_und_dem_Dieselmotor&oldid=504751.