

Gebäudeintegration von gebrauchten Batterien als Second-Life Stromspeichersysteme

Eine techno-ökonomische und ökologische Bewertung

Claudio Menn, Achim Geissler, David Kim

Kontaktperson: Claudio Menn, Claudio.menn@fhnw.ch, <http://www.fhnw.ch/habg/iebau>

Zusammenfassung

Abstract

In vorliegendem Beitrag wird die Untersuchung der Nachnutzung von gebrauchten Batterien aus der Elektromobilität als Second-Life Stromspeicher (engl.: "Battery Energy Storage" (BES)) in Gebäuden hinsichtlich technischer, ökonomischer und ökologischer Kriterien beschrieben. Basierend auf energiepolitischen Szenarien der Schweiz (Energieperspektiven 2050) werden eine Nettokapitalwert (engl.: „Net Present Value“ (NPV))- Analyse und eine Ökobilanzierung durchgeführt.

Die Ergebnisse zu einem typischen Einfamilienhaus mit variierenden PV und Second-Life BES Systemgrössen (1-30 kW_p und kWh) zeigen keinen positiven NPV₂₅ (Investitionszeitraum 25 Jahre) gegeben Rahmenbedingungen aus dem Jahre 2015 und einer betrachteten Anzahl CL (engl.: „Cycle Life“) von 800-6400. Für ein Second-Life BES mit mindestens 4800 CL resultiert eine optimale nutzbare Speicherkapazität von 2 kWh ($\approx 10.7 \text{ Wh/m}^2$ Energiebezugsfläche (A_E)). Die optimale Systemgrösse der PV-Anlage beträgt dabei 3 kW_p ($\approx 16 \text{ W}_p/\text{m}^2 A_E$). Demgegenüber zeigt die Gesamtsystem-Betrachtung (PV inkl. Second-Life BES) eines typischen Mehrfamilienhauses ein NPV₂₅ von durchschnittlich 1300-1500 CHF, gegeben eine Anzahl CL von 4800-6400. Die optimalen Systemgrössen betragen hierzu im Durchschnitt der betrachteten Szenarien 14 kW_p ($\approx 13 \text{ W}_p/\text{m}^2 A_E$) und 5 kWh ($\approx 4.7 \text{ Wh/m}^2 A_E$) Speicherkapazität.

Der Vergleich von Second-Life BES zu herkömmlichen Stromspeichern (engl.: „conventional“ (C)) zeigt beim MFH nahezu bei allen untersuchten Systemgrössen einen Kostenvorteil für Second-Life BES. Die Stromgestehungskosten des Second-Life BES betragen 57 Rp./ kWh bei 4800 resp. 49 Rp./ kWh bei 6400 CL (gemittelt zwischen den untersuchten Szenarien). Der Kostenvorteil gegenüber C-BES beträgt dabei 110 % resp. 80 %.

In einer Sensitivitätsanalyse werden die Basiskosten (Gehäuse, Verkabelung, Wechselrichter und Installation) und der Strompreis als Parameter mit grösstem Effekt auf die Profitabilität von BES identifiziert.

Basierend auf energiepolitischen Szenarien der Schweiz kann mit einer Substitution von C-BES durch Second-Life BES von 0.34 – 0.60 % im Jahre 2035 und 1.3 – 2.0 % im Jahre 2050 zum jährlichen Reduktionsziel der CO₂-Emissionen beigetragen werden. Vorausset-

zung dafür ist die Nutzung des verfügbaren Materials aus der Elektromobilität. Zudem liegt dieser Rechnung eine Substitutionsrate der Nennkapazität von C-BES Systemen mit Second-Life BES von 14 % zugrunde.

Ein Anschlusspunkt für nachfolgende Forschungsarbeiten liegt in der Gestaltung von Tarifsystemen, die einen höheren Anreiz zur Stromspeicherung geben. Dabei ist in der Betrachtung des Umweltnutzens von Second-Life BES die rasante Entwicklung von alternativen Batterietechnologien stärker zu berücksichtigen.

In this paper, the results from a techno-economic and ecological analysis of the extended usage of batteries from electric vehicles in residential as Second-Life Battery Energy Storage (BES) are given. The Net Present Value (NPV) and the ecological benefits of Second-Life BES are assessed in the framework of the energy perspectives 2050 of the Swiss federal government.

The results show no positive NPV_{25} (time frame investigated: 25 years) for a typical single-family house (SFH) with varying PV and Second-Life BES sizes (1 to 30 kW_p and kWh), given the framework conditions of 2015 and an assessed range of 800-6400 battery Cycle Life (CL). For a PV-Second-Life BES system with at least 4800 CL, an optimal size of 2 kWh ($\approx 10.7 \text{ Wh/m}^2$ energy reference area (A_E)) and 3 kW_p ($\approx 16 \text{ W}_p/\text{m}^2 A_E$) result for Second-Life BES and PV respectively. Compared with these findings, a typical multi-family house (MFH) yields a NPV_{25} of 1300 to 1500 CHF on average, provided that 4800-6400 CL are available. A system size of 14 kW_p ($\approx 13 \text{ W}_p/\text{m}^2 A_E$) and 5 kWh ($\approx 4.7 \text{ Wh/m}^2 A_E$) are found to be optimal here.

The comparison of Second-Life BES with Conventional (C)-BES systems generally shows a cost advantage of Second-Life BES for all assessed system sizes for MFH. The Levelized Cost of Electricity (LCOE) (averaged value of the energy scenarios) for the Second-Life BES are 57 Rp./ kWh and 49 Rp./ kWh for 4800 CL and 6400 CL respectively. This means a cost advantage of 110 % for 4800 CL and 80 % for 6400 CL compared to C-BES.

A sensitivity analysis shows that base costs (case, cabling, AC/DC inverter and installation) and the electricity price are most effective parameter to enhance the profitability of Second-Life BES systems.

Based on the Swiss energy policy scenarios, a 0.34 to 0.60 % contribution to the yearly CO_2 reduction objectives in the year 2035 and 1.3 – 2.0 % in the year 2050, respectively, can be achieved by the substitution of C-BES with Second-Life BES. This result implies a usage of the material potential of Second-Life BES provided by electric vehicles in Switzerland. Furthermore, a 14 % substitution rate of the nominal capacity of C-BES with Second-Life BES is assumed.

The development of tariff-schemes which give more incentives for BES and the consideration of alternative BES-technologies are subject of further research.

1. Ausgangslage

Stromspeicher, engl. „Battery Energy Storage“ (BES), stellen eine effektive Massnahme zur Bewahrung der Netzfrequenzstabilität dar [1]. In Wohngebäuden haben sich BES aus Lithium-basierten Batterien durchgesetzt, dies aufgrund einer hohen Effizienz und einer langen Lebensdauer gemessen in verfügbaren Lade/Entladezyklen bis Nutzungsende [2, S. 4].

Im Hinblick auf die Energiestrategie 2050 und den damit verbundenen Ausbau von PV-Kapazitäten wird in der Schweiz die dezentrale Energiespeicherung an Bedeutung gewinnen. Der Herstellungsprozess von herkömmlichen BES-Systemen (engl.: „Conventional“) (C-BES) ist energieintensiv und belastet die Umwelt.

Eine Nachnutzung von Batterien aus Elektrofahrzeugen in Wohngebäuden als Second-Life BES stellt hierzu eine umweltverträglichere Alternative dar. In dieser Anwendung werden rückgeführte Batterien aus der Elektromobilität, nach Prüfung der technischen Eignung, in ein BES zusammengeführt. Erste Anwendungsbeispiele zeigen, dass eine Wiederverwendung von gebrauchten Lithium-Ionen Batterien aus Elektrofahrzeugen in Second-Life BES eine technisch umsetzbare Alternative zur direkten Entsorgung darstellt [3], [4].

Die Elektromobilität gewinnt seit einigen Jahren an Bedeutung und das Angebot an Elektrofahrzeugen wird immer zahlreicher. In Anbetracht der fortschreitenden Verteuerung von CO₂-Emissionen und dem steigenden Umweltbewusstsein in der Bevölkerung, kann auch in Zukunft mit einem wachsenden Bestand an Elektrofahrzeugen gerechnet werden. In der Schweiz fallen bereits heute jährlich mehrere Tonnen an ausser Verkehr gesetzten Batterien von Elektrofahrzeugen und -autos an. Diese bestehen in erster Linie aus Lithiumverbindungen und werden derzeit lediglich energetisch recycelt, da eine Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen wirtschaftlich uninteressant ist.

In dieser Arbeit wird die Marktfähigkeit von Second-Life BES unter Berücksichtigung von politischen und technischen Gegebenheiten untersucht. Der Fokus liegt dabei auf Investitionsentscheidungen, die sich auf der Nachfrager-Seite stellen. Es wird u.a. geklärt, unter welchen Bedingungen Second-Life BES im Vergleich zu C-BES eine rentable Investition darstellen. Die Wirtschaftlichkeitsrechnung basiert auf der Kapitalwert-Methode und wird mit Sekundärdaten durchgeführt.

Weiter wird der ökologische Mehrwert einer Nachnutzung von gebrauchten Batterien quantifiziert. Dabei wird der Ansatz verfolgt, dass eine bestimmte Kapazität an Second-Life-BES eine gewisse Kapazität von C-BES Systemen ersetzen kann: Die substituierbare Kapazität. Aufgrund eines verzögerten Rücklaufs gebrauchter Batterien aus der Elektromobilität wird die Frage des Umweltnutzens in dieser Untersuchung unter Einbezug der Zukunft beurteilt. Somit wird das Potential an vermindeter Umweltbelastung durch Second-Life BES für die Schweiz mithilfe von Szenarien untersucht, welche sich an den Energieperspektiven 2050 des Bundes orientieren [5]. Aus der eingesparten Produktion C-BES resultiert ein Umweltnutzen. Dieser wird mit ausgewählten Wirkindikatoren wie dem Treibhauspotenzial (GWP) ausgewertet. Ausserdem wird untersucht, zu welchem Anteil der dezentrale Speicherbedarf in der Schweiz durch Second-Life Speichersysteme gedeckt werden kann.

Des Weiteren wird ein Überblick bestehender Gebäude-Monitoring-Projekte von Second-Life BES Systemen der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) geben.

2. Vorgehen

2.1 Wirtschaftlichkeit

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Second-Life BES wird basierend auf der Nettokapitalwert-Methode durchgeführt. Hierbei werden Zahlungsflüsse (C_y), die in der Zukunft anfallen, mit dem Diskontierungszinssatz r abgezinst (1). Zudem gehen in diese Berechnung Anfangsinvestitionen ($-C_0$) mit ein. Der Untersuchungszeitraum ist von 2015 bis 2040 festgelegt (J : 25).

$$NPV_j = -C_0 + \sum_{j=1}^J \frac{C_j}{(1+r)^j} \quad [\text{CHF}] \quad (1)$$

In einem Second-Life BES System kombiniert mit einer PV-Anlage entstehen über den Betrachtungszeitraum positive Zahlungsflüsse in Form von Stromeinsparungen oder Vergütungen aus Netzeinspeisungen von PV-Überschüssen. Negative Zahlungsflüsse sind Kosten aus dem Betrieb der PV und BES. Als solche sind z.B. auch Aufwände für den Ersatz von Kapazitätsausfällen in einem Second-Life BES einzuordnen.

Neben dem NPV dienen der interne Zinsfuß (engl. "Internal Rate of Return" (IRR)) und die Amortisationszeit (engl. "Payback-Period" (PBP)) als Hilfsmittel zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit. Der IRR stellt die Rendite dar, die zu einem NPV von Null führt und ist somit ein Mass der Rentabilität. Für die Berechnung der IRR wird der NPV aus der Gleichung (1) gleich Null gesetzt und nach r aufgelöst. Die PBP zeigt die Anzahl Jahre j , die zur Amortisation der Investition notwendig sind. Für diese Berechnung wird ein Diskontierungszinssatz von $r=0$ verwendet.

Die Stromgestehungskosten (engl. „Levelized Costs of Electricity“ (LCOE)) stellen eine Vergleichsgrösse verschiedener Energiespeichertechnologien dar. Wie aus Formel (2) ersichtlich wird, berechnen sich die LCOE aus dem Verhältnis der gesamten Kosten des BES zum Zeitwert zur Netto entladenen Energie ($E_{Bdc,j}$) über den Untersuchungszeitraum J .

$$LCOE_{B,j} = \frac{NPC_j}{E_{Bdc,j}} \quad [\text{CHF/kWh}] \quad (2)$$

In der BES-Dimensionierung wird die nutzbare Kapazität (E_{Bav}) betrachtet. Für die Berechnung wird die Nennkapazität (E_{Bc}) des BES mit der max. Entladetiefe multipliziert (ρ_{mdod}) (3).

$$E_{Bav} = E_{Bc} \cdot \rho_{mdod} \quad [\text{kWh}] \quad (3)$$

Für die Abschätzung der BES Nutzungsdauer werden die Anzahl Entladezyklen p.a. berechnet und für den Betrachtungszeitraum aufsummiert (4). Ein Entladezyklus wird gezählt, sobald das BES bis zur ρ_{mdod} entladen wurde.

$$CL_{use,j} = \sum_{j=1}^J \theta_{CL,j} \quad [-] \quad (4)$$

In der Untersuchung wird eine PV-Systemgrösse von max. 30 kW_p und beim BES eine nutzbare Speicherkapazität von max. 30 kWh berücksichtigt.

Für C-BES ist eine max. Entladetiefe (ρ_{mdod}) von 80 % der Nennkapazität und eine Lade-/ Entladeeffizienz von 90 % berücksichtigt [6]–[8]. Zudem wird eine tägliche Selbstentladung von 0.1 % angenommen [9]. In der Berechnung sind die installierte Kapazität, AC/DC Wechselrichter sowie Kabel und Gehäuse von C-BES während des betrachteten Untersuchungszeitraums von 25 Jahren nicht zu ersetzen [10].

Second-Life BES weisen eine max. Entladetiefe von 60 % auf. Dies aufgrund von Abnutzungen, die während des Einsatzes im Elektrofahrzeug stattfinden. Zudem wird eine tägliche Selbstentladung von 0.3 % berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass jährlich 1 % der installierten Nennkapazität von Second-Life BES aufgrund von Abnutzungsprozessen ersetzt werden muss. Die verfügbaren Entladezyklen von Second-Life BES werden in der Berechnung von 200 bis 6400 variiert. Die Nutzungsdauer von AC/DC Wechselrichter, Gehäuse und Verkabelung sowie die Lade-/Entladeeffizienz von Second-Life Systemen entsprechen denen eines C-BES.

Für die BES Gebäudeanwendung werden ein Einfamilienhaus (EFH) und ein Mehrfamilienhaus (MFH) untersucht. Es handelt sich bei diesen Gebäuden um energieeffiziente Neubauprojekte aus der Praxis. Die Gebäude unterschreiten den Grenzwert zum Heizwärmebedarf (SIA 380/1:2009) um ca. 30 %. Der jährliche Strombedarf für die Wärmepumpe und die Hilfsenergie beträgt für das EFH 3'250 kWh und 11'540 kWh für das MFH. Diese Berechnung wird mit der Gebäudesimulationssoftware Polysun® [11] ausgeführt. Der Strombedarf für eine Komfortlüftung entspricht Pla-

nungsdaten der MINERGIE-A Datenbank und ergibt für das EFH 360 kWh/p.a. resp. 3'030 kWh/p.a. für das MFH [12]. Der Haushaltsstrom beträgt für das EFH 3'330 kWh/p.a. resp. 20'300 kWh/p.a. für das MFH und entspricht dem Median-Verbrauch aus einer Befragung von 1'200 Schweizer Haushalten [13].

In der Wirtschaftlichkeitsberechnung gehen beim C-BES Kosten von 1'040 CHF pro kWh Nennkapazität und 10'240 CHF für Gehäuse, Kabel und Wechselrichter mit ein. Diese Werte basieren auf einer linearen Regressionsanalyse von aktuell auf dem Markt erhältlichen C-BES (135 Beobachtungen, P-Wert: $2e-16$, R^2 : 56 %). Für das Second-Life BES entsprechen die Kosten für das Gehäuse, Kabel und Wechselrichter denen des C-BES. Die Kosten pro Nennkapazität betragen 140 CHF/kWh und entsprechen dem Preis eines Anbieters von Second-Life BES [14]. Für den Austausch defekter Batterien werden einmalige 100 CHF berücksichtigt.

Die Kosten für das PV-System betragen 1'870 CHF/kW_p [15]. Zudem werden Aufwände für Installation, Verkabelung und Wartung von 9.5 % der gesamten Kosten berücksichtigt [15]. Die Subventionen in Form einer Einmalvergütung betragen 1'400 CHF pro PV-System und 500 CHF/kW_p [16].

Ein Hochtarif (HT) und ein Niedertarif (NT) sind in der Berechnung von Stromeinsparungen berücksichtigt. Der HT ist während Arbeitstagen von 6-21:00 Uhr und an Samstagen von 6-12:00 gültig. Die Ausgangswerte betragen für den HT 0.23 CHF/kWh resp. 0.16 CHF/kWh für den NT und basieren auf einem Durchschnittswert der Schweizer Strompreise [17]. Für Netzeinspeisungen in das Stromnetz von überschüssiger Elektrizität aus der PV-Anlage wird eine Vergütung von 0.08 CHF/kWh angenommen [17], [18]. Die Strompreisentwicklung basiert auf den Szenarien „weiter wie bisher“ (WWB) und „neue Energiepolitik“ (NEP) aus den vom Bund definierten Energieperspektiven 2050 [5], [19]. Der jährliche Anstieg des Strompreises beträgt demzufolge im WWB 0.52 % und 0.9 % im NEP.

Es werden zudem eine durchschnittliche Inflation von 0.84 % p.a. [20] und ein Diskontierungszinssatz von 3 % berücksichtigt [21].

2.2 Quantifizierung Umweltnutzen

In einer Ökobilanz werden gemäss den Grundsätzen und Rahmenbedingungen nach ISO 14040:2006 die ökologischen Vorteile von gebrauchten Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen gegenüber herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterien als stationäre Stromspeicher verglichen. Dabei wird der gesamte Lebenszyklus der Batterie von der Herstellung bis zur Entsorgung untersucht. Der Umweltnutzen aus Second-Life BES wird für die Schweiz basierend auf energiepolitischen Szenarien für die Jahre 2035 und 2050 berechnet. Die Durchführung erfolgt mit der Simapro Software und der ecoinvent v2.2. Datenbank [22], [23].

Die substituierbare Nennkapazität dient als wesentliche Eingabegrösse zur Berechnung des Umweltnutzens und wird in folgenden Schritten hergeleitet:

Basierend auf der Anzahl Elektro-Neuwagen NEM_j und der mittleren Nennkapazität der Elektro-Neuwagen ($\overline{E_{EF,j}}$) wird gemäss (5) die verfügbare Nennkapazität ($E_{EM,j}$) im Jahr j berechnet.

$$E_{EM,j} = NEM_j \cdot \overline{E_{EF,j}} \quad [\text{kWh}] \quad (5)$$

Dieses Potential an brauchbarem Material für Second-Life BES kann aufgrund von Beschädigung und Verschleiss nicht vollends ausgeschöpft werden. Die wiederverwendbare Kapazität $E_{WV,j}$ berechnet sich mit dem wiederverwendbaren Anteil WVR gemäss (6).

$$E_{WV,j} = E_{EM,j} \cdot WVR \quad [\text{kWh}] \quad (6)$$

Aufgrund der vorangegangenen Nutzung in Elektrofahrzeugen wird von einer reduzierten max. zulässigen Entladetiefe ausgegangen ($\rho_{mdod,2nd}$). Die wiederverwendbare Kapazität kann daher in Second-Life BES im Vergleich zu C-BES Anwendungen lediglich zu einem tieferen Grad genutzt werden. Dieser Effekt wird mithilfe eines Minderungsfaktors der max. Entladetiefe $\eta\rho_{mdod}$ berücksichtigt und aus dem Verhältnis der max. Entladetiefe von Second-Life BES $\rho_{mdod,2nd}$ und der max. Entladetiefe von C-BES $\rho_{mdod,c}$ gemäss

$$\eta\rho_{mdod} = \frac{\rho_{mdod,2nd}}{\rho_{mdod,c}} \quad [-] \quad (7)$$

berechnet. Neben einer verminderten max. Entladetiefe wird bei Second-Life BES von einer reduzierten Anzahl Restentladezyklen (engl.: „Cycle Life“ (CL)) ausgegangen. Die Anzahl für Second-Life BES (CL_{2ndf}) berücksichtigen die Kapazitätsausfälle f unter Einbezug der Nutzungsdauer N gemäss

$$CL_{2ndf} = CL_{2nd} \cdot (1 - f \cdot (N - 1)) + \sum_{k=1}^{N-1} \frac{CL_{2nd} \cdot f \cdot k}{N} \quad [-] \quad (8)$$

Der Minderungsfaktor für die verfügbaren Entladezyklen ηCL ist das Verhältnis der CL CL_{2ndf} zu den Entladezyklen eines C-BES ab Werk CL_c gemäss

$$\eta CL = \frac{CL_{2ndf}}{CL_c} \quad [-] \quad (9)$$

Die im Jahr j substituierbare Nennkapazität $E_{SB,j}$ wird schliesslich mit den Minderungsfaktoren $\eta\rho_{mdod}$ und ηCL gemäss

$$E_{SB,j} = E_{WV,j} \cdot \eta\rho_{mdod} \cdot \eta CL \quad [\text{kWh}] \quad (10)$$

berechnet.

In Tabelle 1 sind die verwendeten Zahlenwerte der Basis-Parameter wiedergegeben.

Tabelle 1: Ausgangsparameter Berechnung Umweltnutzen Quelle: [24].

Parameter		Wert
Wiederverwendbarer Anteil	WVR	0.95 [-]
Verminderte Entladetiefe Second-Life	$\rho_{mdod,2nd}$	0.6 [-]
Entladetiefe herkömmlich	$\rho_{mdod,c}$	0.8 [-]
Entladezyklen herkömmlich	CL_c	5000 [-]
Restentladezyklen Second-Life	CL_{2nd}	1000 [-]
Kapazitätsausfallrate jährlich	f	0.01 [-]
Nutzungsdauer Second-Life	N	5 [-]

Folgende Wirkindikatoren werden für die Berechnung des Umweltnutzens angewendet: Treibhauspotenzial (GWP) mit einem Zeithorizont von 100 Jahren gemäss Weltklimarat (IPCC 2007) [25], Kumulierter Energieaufwand (CED) [26], sowie der Abiotische Ressourcenverbrauch (ADP), Wirkungskategorie aus der CML 2001-Methode [27]. Als Summenindikator wird die Methode der ökologischen Knappheit - Ökofaktoren 2006 (UBP) [28] angewendet, bei der alle Umweltwirkungen nach in der Schweiz gültigen umweltpolitischen Gesichtspunkten gewichtet und zusammengefasst sind.

Es werden drei energiepolitische Szenarien für die Berechnung des Umweltnutzens von Second-Life BES verwendet. Wie in der Untersuchung der Wirtschaftlichkeit dienen dafür die Energieperspektiven 2050 des Bundes als Grundlage [5], [19]. Neben den massnahmenorientierten Szenarien WWB und „Politische Massnahmen“ (POM) wird das zielorientierte NEP Szenario berücksichtigt.

In den Szenarien wird eine zukünftige Steigerung der Energiedichte von Batterien angenommen (2013: 0.114 kWh/kg [29]; 2050: 0.4 kWh/kg [30], [31]). Unter der Annahme einer gleichbleibenden Speicherkapazität nimmt bei steigender Energiedichte die benötigte Masse der Batterien umgekehrt proportional ab. Eine Zunahme der Energiedichte reduziert somit die Umweltbelastung pro kWh substituierter Nennkapazität.

Eine weitere Abnahme der zukünftigen Umweltbelastung wird durch effizientere Herstellungsprozesse, den Einsatz von umweltverträglicheren Materialien sowie den Einsatz von Erneuerbaren Energien während der Produktion erzielt. Für die Analyse werden die Prozesse der Herstellung von Li-Ionen-Batterien aus der ecoinvent v2.2 entsprechend an die Rahmenbedingungen der Szenarien angepasst.

Der „Batterie-Prozess“ zeigt, dass die für einzelne Produktionsschritte benötigte Elektrizität einen wesentlichen Anteil der Umweltbelastung verursacht; beim CED sind 48 %, beim GWP 43 %, beim ADP 39 % und bei den UBPs 13 % der jeweils ausgewiesenen Umweltbelastung der verwendeten Elektrizität zuzuschreiben. Den grössten Anteil an den UBPs haben mit rund 55 % die Prozesse der Kupfergewinnung zur Fabrikation der Anode. Die meisten UBPs werden dabei durch das Schmelzen von Kupferkonzentrat zur Gewinnung von Rohkupfer verursacht. Für die durchgeführten Berechnungen werden daher die in der ecoinvent v2.2 hinterlegten Prozesse hinsichtlich der Elektrizität und der Kupfergewinnung modifiziert.

Tabelle 2: Modifikation Wirkungsgrade der Kohle- und Gaskraftwerke (GuD) in den betrachteten Szenarien. Quelle: [24]

Kraftwerktyp	Original-Prozess	NEP/POM 2035	NEP/POM 2050
Kohle	36 %	40 %	45 %
Kohle CCS		36 %	41 %
Gas	43 %	45 %	50 %
Gas CCS		41 %	46 %

3. Resultate

3.1 Wirtschaftlichkeit von Second-Life BES inkl. PV

Anzahl Restentladezyklen

Die Wirtschaftlichkeit von Second-Life BES inkl. netzverbundener PV-Anlage unterscheidet sich zwischen Gebäudetypen und Anzahl CL der verfügbaren Batterien. Zudem spielt die Entwicklung der Strompreise gemäss den Szenarien WWB und NEP eine bedeutende Rolle.

Beim EFH zeigt die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Gesamtsystems (Second-Life BES inkl. PV-Anlage) in den untersuchten Systemgrössen und bei variierender Anzahl CL keine Kombination, die zu einem positiven NPV₂₅ (Untersuchungszeitraum: 25 Jahre) führt (siehe Abbildung 1). Mit zunehmender Anzahl CL verbessert sich der NPV₂₅ nur unwesentlich. Zudem zeigen die Ergebnisse keinen grossen Unterschied zwischen den Szenarien NEP und WWB. Die optimale Systemgrösse der PV-Anlage beträgt 3 kW_p (≈ 16 W_p/m² A_E) unabhängig von dem betrachteten Szenario. Second-Life BES sind bis und mit 4000 CL nicht grösser als 1 kWh (min. untersuchte Speichergrösse ≈ 5.4 Wh/m² A_E) zu dimensionieren. Innerhalb einer Anzahl CL von 4800 bis 6400 ist ein Second-Life BES von 2 kWh (≈ 10.7 Wh/m² A_E) nutzbarer Kapazität die wirtschaftlich sinnvollste Systemgrösse (dies entspricht einer Nennkapazität von 3 $\frac{1}{3}$ kWh).

Second-Life BES in Kombination mit PV kann im Jahr 2015 eine wirtschaftliche Investition darstellen. Im MFH resultiert ein positiver NPV₂₅ (Mittelwert aus den Szenarien WWB und NEP) für das Gesamtsystem bei 800 CL (Ø NPV₂₅: 276 CHF; Ø IRR: 4 %, Ø PBP: 16.5 Jahre). Die optimale Systemgrösse variiert mit dem betrachteten Szenario und der Anzahl CL. Mit einer Anzahl CL von 3200 beträgt die optimale nutzbare Speicherkapazität 2 kWh (≈ 1.9 Wh/m² A_E). Bei einem System mit 6400 CL ist die optimale nutzbare Speicherkapazität 7 kWh (≈ 6.5 Wh/m² A_E). Die optimale PV-Grösse steigt bei grösseren BES-Speicherkapazitäten und entsprechend der Szenarien auf bis zu 15 kW_p (≈ 13.9 W_p/m² A_E).

Die Profitabilität unterscheidet sich je nach Systemkomponenten und ist somit gesondert zu betrachten. Eine 3 kW_p (≈ 16 W_p/m² A_E) PV-Anlage im EFH reduziert die jährlichen Stromkosten um 452 CHF (-33 %) und resultiert in einem NPV₂₅ von 3'200 CHF (NEP Szenario, PB: 9 Jahre, IRR:

12%). Eine Systemerweiterung mit einem 2 kWh Second-Life BES ($\approx 10.7 \text{ Wh/m}^2 A_E$) ermöglicht die Substitution von weiteren Stromnetzbezügen in der Höhe von 86 CHF p.a. Dieser Anstieg im Eigenverbrauch (57 % auf 71 %) führt zu Mindererträgen aus der Stromnetzeinspeisung von PV-Überschüssen (-40 CHF p.a.). Der jährliche Beitrag aus dem BES ist somit 46 CHF p.a. Dieser Ertrag kann die Systemkosten eines beispielhaften Second-Life BES mit 6400 CL über den betrachteten Zeitraum nicht decken (NPV_{25} : -11'600 CHF). Es entsteht somit ein NPV_{25} von -8'400 CHF für das PV-Second-Life BES Gesamtsystem.

Im Gegensatz zum EFH ist beim MFH ein positiver NPV_{25} des Gesamtsystems möglich. Eine 15 kW_p PV-Anlage ($\approx 13.9 \text{ W}_p/\text{m}^2 A_E$) deckt die jährlichen Stromkosten des MFH um 2'405 CHF p.a. (-34 %). Hierzu resultiert ein NPV_{25} von 13'000 CHF (NEP Szenario, PB: 11 Jahre, IRR: 9 %). Ein zusätzlicher 7 kWh ($\approx 6.5 \text{ Wh/m}^2 A_E$) Second-Life BES mit 6400 CL führt zu jährlichen Erträgen von 164 CHF. Diese können die BES Investitionskosten über den Untersuchungszeitraum nicht decken (NPV_{25} : -11'100 CHF). In Kombination mit den Erträgen aus der PV-Anlage resultiert allerdings ein positiver NPV_{25} von 2'200 CHF (NEP Szenario, PB: 16 Jahre, IRR: 4 %).

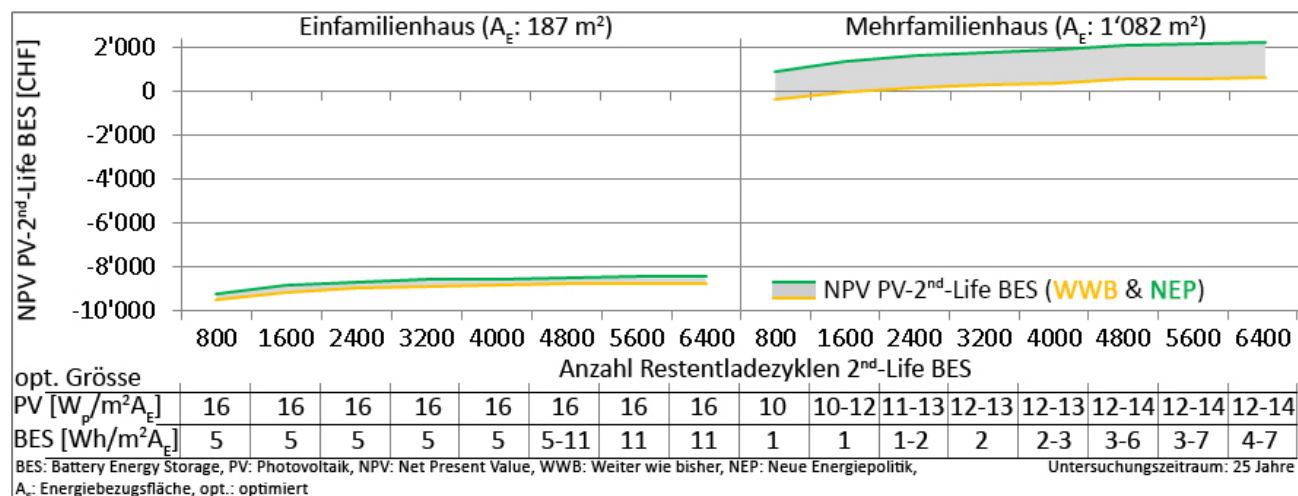


Abbildung 1: NPV_{25} für EFH und MFH PV-Second-Life-BES-Systeme mit unterschiedlicher Anzahl CL Quelle:[32].

Optimale Systemgrößen

Die optimale Systemgrösse des Second-Life BES ist abhängig vom Stromverbrauch des Gebäudes, der Grösse der PV-Anlage, dem berücksichtigten Strommarkt-Szenario sowie der Anzahl CL. Den folgenden Resultaten liegt hinsichtlich des Strommarkts eine Berechnung mit Durchschnittswerten aus dem WWB und NEP Szenario zugrunde.

Die Gesamtsystembetrachtung des EFH zeigt eine optimale PV-Grösse von 3 kW_p ($\approx 16 \text{ W}_p/\text{m}^2 A_E$) und einen Second-Life BES mit 2 kWh ($\approx 10.7 \text{ Wh/m}^2 A_E$) nutzbarer Kapazität (Systembetrachtung bei 6400 CL). Mit dieser Systemkonfiguration entstehen jährlich 368 Entladezyklen und es wird eine Eigendeckungsrate (EDR) von ca. 30 % erreicht (ohne BES 24 %). Die Eigenverbrauchsrate (EVR) beträgt hierzu 71 % (57 % ohne BES). Wie aus Abbildung 2 ersichtlich wird (hell-oranger Bereich), ist mit einer PV-Leistung von bis 7 kW_p ($\approx 37.4 \text{ W}_p/\text{m}^2 A_E$) und einer Second-Life BES Kapazität von bis zu 12 kWh ($\approx 64.2 \text{ Wh/m}^2 A_E$) ein ähnliches Ergebnis zu erzielen (163 Entladezyklen p.a.; EDR: 57 % (31 % ohne BES); EVR: 58 % (32 % ohne BES)). Aufgrund des relativ tiefen Stromverbrauchs p.a. ist die durch eine grösser dimensionierte PV-Anlage zu verzeichnende Verringerung des Netzbezugs vernachlässigbar klein und der NPV_{25} des Gesamtsystems verschlechtert sich. Zusätzliche Verringerungen des Netzbezugs durch den Second-Life BES können die damit entstehenden Systemkosten nicht decken und reduzieren die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems weiter (siehe Abbildung 2).

Ein wirtschaftliches Gesamtsystem (PV inkl. Second-Life BES mit 6400 CL) zum MFH kann mit einer nutzbaren Kapazität des BES von bis zu 26 kWh ($\approx 24 \text{ Wh/m}^2 A_E$) erzielt werden. Dies setzt eine hinreichend dimensionierte PV-Anlage (ca. 9-24 $\text{kW}_p \approx 8.3-22 \text{ W}_p/\text{m}^2 A_E$) voraus (siehe dunkelgrüne Markierung in Abbildung 2). Den maximalen NPV_{25} weist ein System mit einer nutzbaren

Kapazität von 5 kWh ($\approx 4.6 \text{ Wh/m}^2 A_E$) und einer 14 kW_p ($\approx 12.9 \text{ W}_p/\text{m}^2 A_E$) PV Leistung auf (Entladezyklen p.a. 383; EDR: 29 % (26 % ohne BES); EVR: 75 %; (67 % ohne BES)).

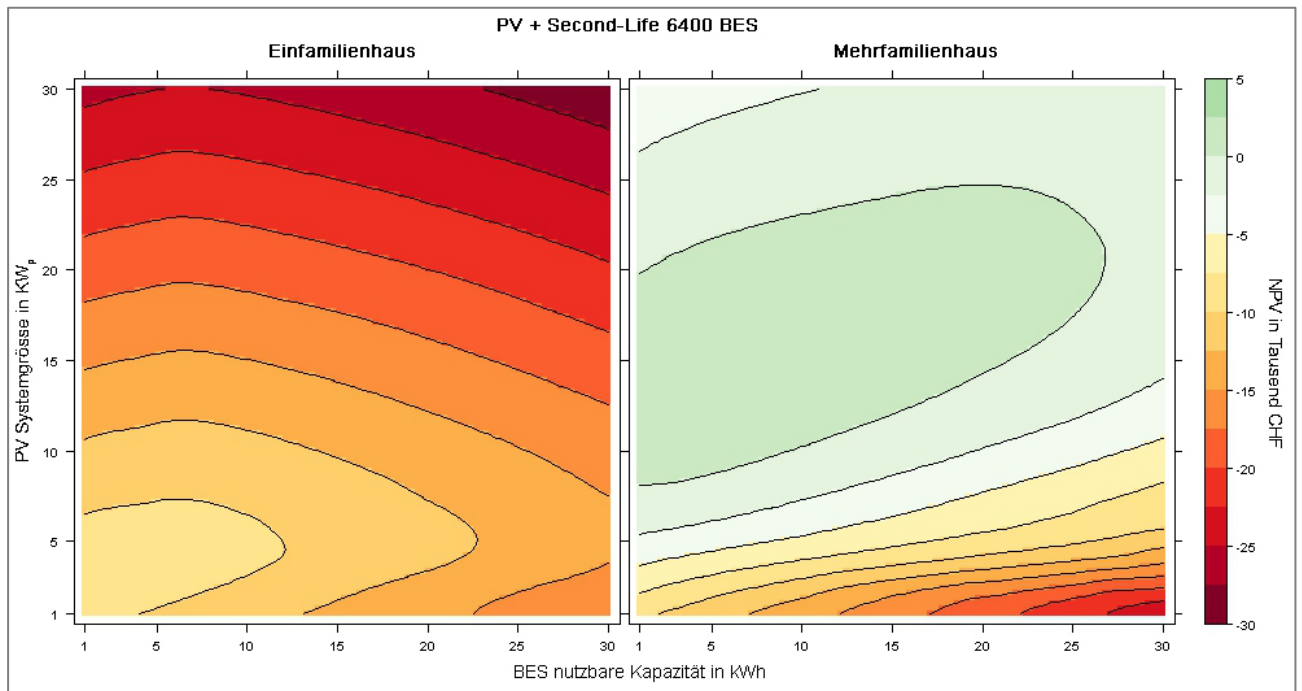


Abbildung 2: NPV₂₅ Gesamtsystem (PV inkl. 6400-Second-Life BES) bei unterschiedlicher Systemgrösse (gemittelt aus WWB und NEP Szenario).

Second-BES vs. C-BES

Second-Life BES sind in den meisten untersuchten Systemkombinationen wirtschaftlicher als C-BES (siehe Abbildung 3). Beim EFH übersteigen die LCOE des C-BES die eines Second-Life BES sobald die nutzbare Kapazität von 1 kWh ($\approx 5.4 \text{ Wh/m}^2 A_E$) überschritten wird (ab 4800 CL). Dieser Kostenvorteil bleibt jedoch relativ gering. Beim MFH ist das Second-Life BES wirtschaftlicher als das C-BES sobald mehr als 800 CL zur Verfügung stehen. Die Kosten sinken bei zunehmender Anzahl CL (57 Rp./ kWh bei 4800 resp. 49 Rp./ kWh bei 6400 CL).

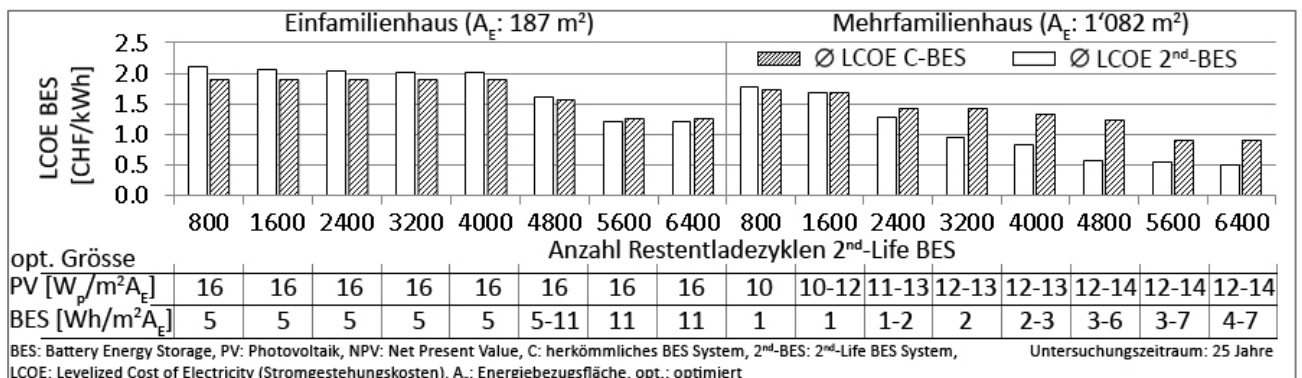


Abbildung 3: Stromgestehungskosten Second-Life BES im Vergleich zu herkömmlichen BES (optimale Systemgrösse, Durchschnittswerte der NEP und WWB Szenarien) Quelle: [32].

Die LCOE eines Second-Life BES mit 6400 CL (49 Rp./ kWh) übersteigen den höchsten kantonalen Stromtarif für Haushalte aus dem Jahre 2015 (40 Rp./ kWh inkl. MWST; Verbraucherprofil H1) noch um ca. 22,5 % [17].

Sensitivitätsanalyse

Die Resultate einer $\pm 33 \%$ Variation der Ausgangswerte zeigen einen relativ grossen Einfluss der Parameter „Basiskosten“ und „Hochtarif“ auf den NPV₂₅ des Second-Life BES (siehe Abbildung 4). Eine Reduktion der Basiskosten um 33 % erhöht den NPV₂₅ für das Second-Life BES um 31 %. Ein 33 % Anstieg im Hochtarif erhöht den NPV₂₅ um 13 %. Zudem wird ersichtlich, dass die Ver-

ringerung des DOD-max. von 60 % auf 40 % einen relativ starken negativen Einfluss auf den NPV₂₅ mit sich bringt. In der Sensitivitätsanalyse werden keine Interdependenzen berücksichtigt. Es ist z.B. davon auszugehen, dass eine Herabsetzung des DOD-max. die Anzahl CL positiv beeinflusst. Für eine Systemoptimierung sollten solche Effekte berücksichtigt werden.

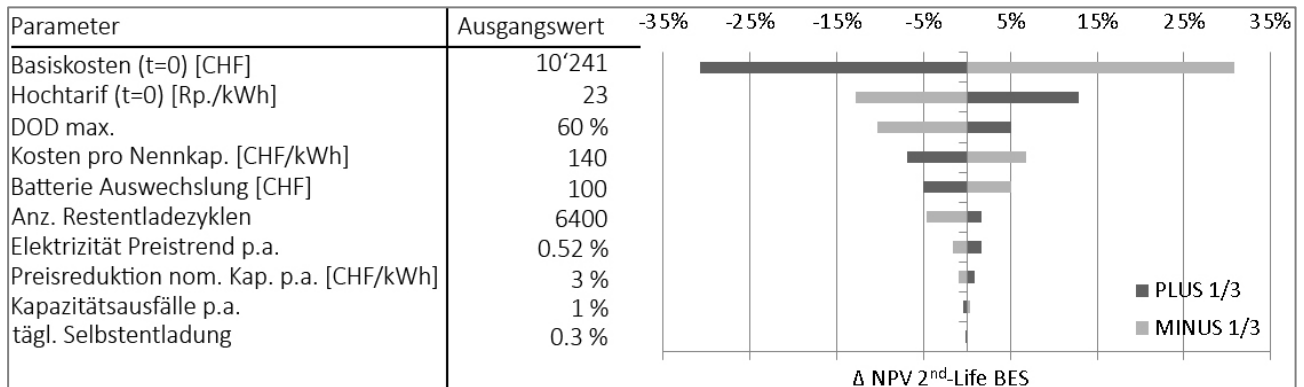


Abbildung 4 Sensitivitätsanalyse für MFH, Szenario NEP, 15 kW_p PV- 7 kWh Second-Life-BES (6400 CL) Quelle:[32].

Eine Senkung der Basiskosten von Second-Life BES ist als realistisch einzustufen. Aus der jüngsten Entwicklung von C-BES Systemen wird ersichtlich, dass der Trend von einer AC/DC hin zu einer DC/DC Systemeinbindung geht [33], [34]. Diese veränderte Systemtopologie führt zur Einsparung eines Wechselrichters. Die Installation von Second-Life BES in Wohngebäude unterscheidet sich nicht von C-BES Systemen. Mithilfe einer DC-seitigen Einbindung von Second-Life BES könnten somit substanziell Kosten eingespart werden.

Die Entwicklung des Strommarktes ist mit vielen Unsicherheiten behaftet. Ein massiver Ausbau von PV Kapazitäten kann Grosshandelspreise während den Spitzenzeiten senken (z.B. Mittag) [15, S. 1107]. Dies geschieht aufgrund tiefer variabler Kosten von PV-Anlagen. Dezentral generierte Elektrizität kann sich destabilisierend auf das Stromnetz auswirken. Die verfügbaren Kapazitäten aus BES wirken dieser Gefahr entgegen. Es ist denkbar, dass dieser Beitrag zur Netzstabilität in der Zukunft von Netzbetreibern entlohnt wird und sich somit positiv auf die Ertragslage von BES auswirkt.

3.2 Quantifizierung Umweltutzen

Substituierbare Kapazität

Damit eine kWh Nennkapazität von einem C-BES ersetzt werden kann, wird eine Nennkapazität von 7.2 kWh in Form von Second-Life BES benötigt. Dafür sind die im Kapitel 2.2 beschriebenen Qualitätsmerkmale von Second-Life BES verantwortlich (Wiederverwendbarkeitsanteil, Entladetiefe, Kapazitätsausfallrate, Nutzungsdauer und CL).

In Abbildung 5 ist die Anzahl der Elektro-Neuwagen und die daraus resultierende substituierbare Kapazität $E_{SB,j}$ für die betrachteten Szenarien wiedergegeben. Mit der hier zugrunde gelegten Nutzungsdauer der Batterien in der Mobilität von 12 Jahren stammen die Second-Life BES zu Beginn der Betrachtungsdauer (2025) von den Neuwagen des Jahrgangs 2013 und die zum Ende der Betrachtungsdauer (2050) von den Neuwagen des Jahrgangs 2038. Der direkte Zusammenhang zwischen der substituierbaren Kapazität und der Anzahl Elektro-Neuwagen ist aus Abbildung 5 ersichtlich.

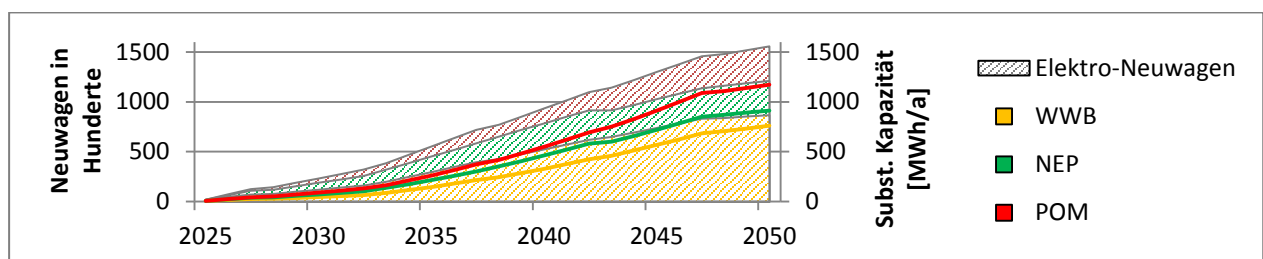


Abbildung 5 Entwicklung der Anzahl Elektro-Neuwagen und der substituierbaren Kapazität.

Umweltauswirkungen von Batterien

In Abbildung 6 sind die Umweltauswirkungen unter Berücksichtigung aller hier betrachteten Szenarien und der damit einhergehenden Änderungen im Strom-Mix, der Kupfergewinnung und Energiedichte aufgeführt. Der Umweltschaden einer Batterie, gemessen anhand von vier Wirkindikatoren, wird je nach Szenario bis 2035 um 64 % - 69 % reduziert resp. 73 % - 76 % bis 2050.

Wie zu erwarten, verursacht die Anpassung der Sachbilanz im Szenario NEP die grösste Reduktion in der Umweltauswirkung im Vergleich zu den Szenarien WWB und POM. Dies ist auf den relativ hohen Anteil an erneuerbaren Energien im Produktionsprozess zurückzuführen. Beim Szenario POM liegen bis auf die UBPs die Umweltauswirkungen zwischen WWB und NEP.

In allen drei Szenarien und bei allen vier Wirkindikatoren beruht die Reduktion der Umweltauswirkungen gegenüber einer Batterie von heute überwiegend auf der erwarteten Energiedichtesteigerung. Für das Szenario POM sind im Jahr 2035 lediglich geringe Auswirkungen auf den Umweltschaden aufgrund von den Anpassungen der Sachbilanzen im Strommix und der Kupfergewinnung zu beobachten. Hinsichtlich des ADP bewirkt die Anpassung sogar eine Erhöhung des Umweltschadens. Dies ist auf den relativ geringen Anteil Erneuerbarer Energie im Strommix zurückzuführen (2035: 31 %, 2050: 36 %). Die Strommixdaten der ecoinvent v2.2 weisen bereits heute einen Anteil von 34 % aus erneuerbarer Energie aus. Aufgrund des gleich hohen Anteils an Sekundärkupfer in den Szenarien NEP und POM zeigen die UBPs zwischen den Jahren 2035 und 2050 nur geringe Unterschiede.

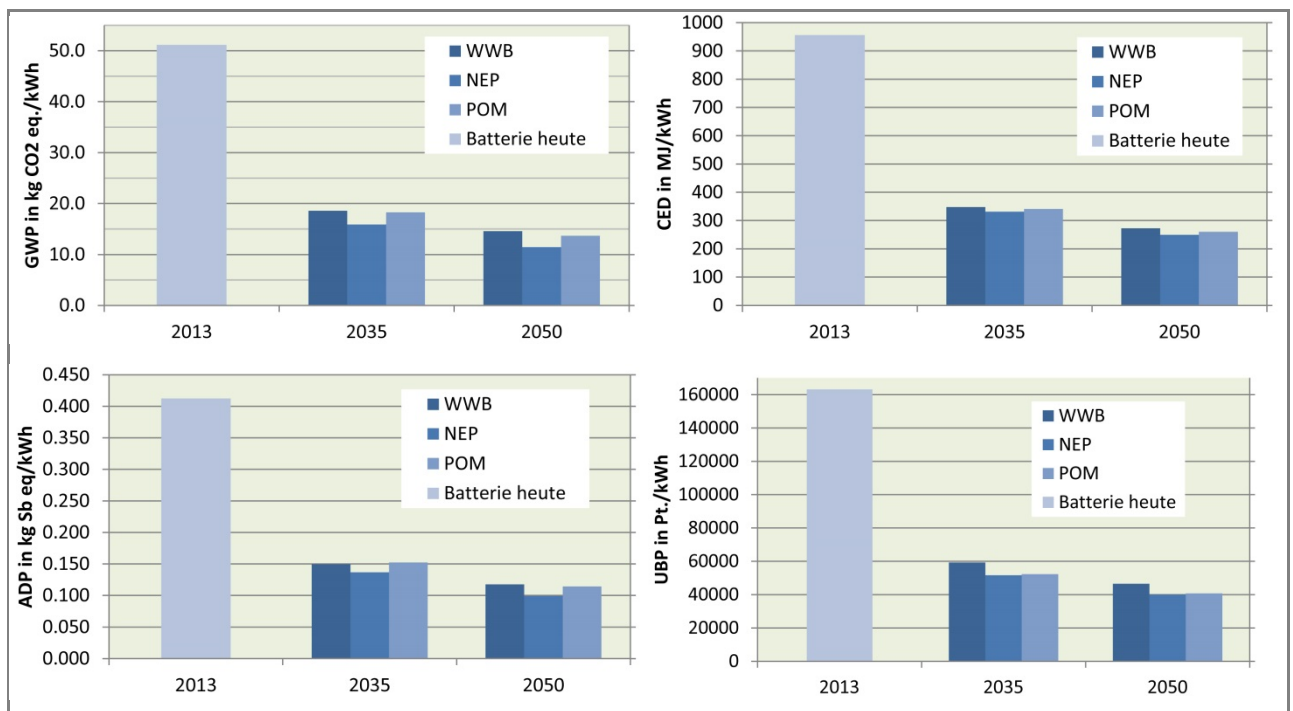


Abbildung 6 GWP, CED, ADP und UBP in der funktionellen Einheit pro kWh Speicherkapazität heute und in den drei Szenarien. In der zukünftigen Batterie sind die Modifikationen der Prozesse hinsichtlich Strommix und Kupfer-Gewinnung sowie die Energiedichtesteigerung berücksichtigt Quelle: [24].

Umweltnutzen Second-Life BES

Die im vorangegangenen Abschnitt für die Jahre 2035 und 2050 genannten *Umweltauswirkungen* beziehen sich jeweils auf die Herstellung von Neubatterien in den genannten Jahren. Diese Umweltauswirkungen können durch Substitution der Neubatterien mit Second-Life BES vermieden werden. Damit hat der Einsatz von Second-Life BES einen *Umweltnutzen*.

In Abbildung 7 sind die Ergebnisse zum Umweltnutzen bezüglich des GWP, des CED, des ADP und der UBP wiedergegeben. Die Untersuchungen zeigen, dass der Umweltnutzen von Second-Life BES beim Szenario POM hinsichtlich aller Wirkindikatoren am höchsten ausfällt. Beim Szenario WWB ist – mit Ausnahme des GWP im Jahre 2050 – der ermittelte Umweltnutzen am geringsten. Alle vier genannten Wirkindikatoren weisen im Jahr 2050 in den Szenarien NEP und WWB praktisch denselben Nutzen aus. Dies liegt daran, dass sich die Umweltauswirkung pro kWh Neu-

batterie im Szenario NEP im Vergleich zum Szenario WWB bis zum Jahr 2050 stetig reduziert und somit ebenso das Vermeidungspotenzial durch Substitution sinkt. Beim Szenario WWB können bezüglich GWP im Jahr 2050 rund 11'100 t CO₂ Äq. eingespart werden. Das entspricht etwa dem aktuellen jährlichen CO₂-Ausstoss von 890 Schweizer Einwohnern (12,5 t CO₂ pro Einwohner) und 1280 Einwohner (16'000 t CO₂ Äq.) im Szenario POM. Im Szenario WWB umfasst das Vermeidungspotenzial 2050 durch Substitution hinsichtlich CED rund 207'000 GJ. Das entspricht etwa dem Heizwert von 14'000 Tonnen Holz (14,4 MJ/kg). Beim Szenario POM kommt dies dem Heizwert von rund 21'000 Tonnen Holz (305'000 GJ CED) gleich. Im 2050 werden im Szenario WWB etwa 89 t Sb eq und im Szenario POM ca. 134 t Sb eq. vermieden, was in etwa mit 360 Tonnen respektive 540 Tonnen Primärkupfer gleichzusetzen ist. Die Bewertung des Umweltnutzens mithilfe von UBP zeigt ein Vermeidungspotential von rund 35 Milliarden (WWB-Szenario) bis 50 Milliarden (POM-Szenario) UBPs. Dieser Wert ist vergleichbar mit der jährlichen Umweltbelastung aus dem privaten Konsum von 1800 bzw. 2400 Personen [35].

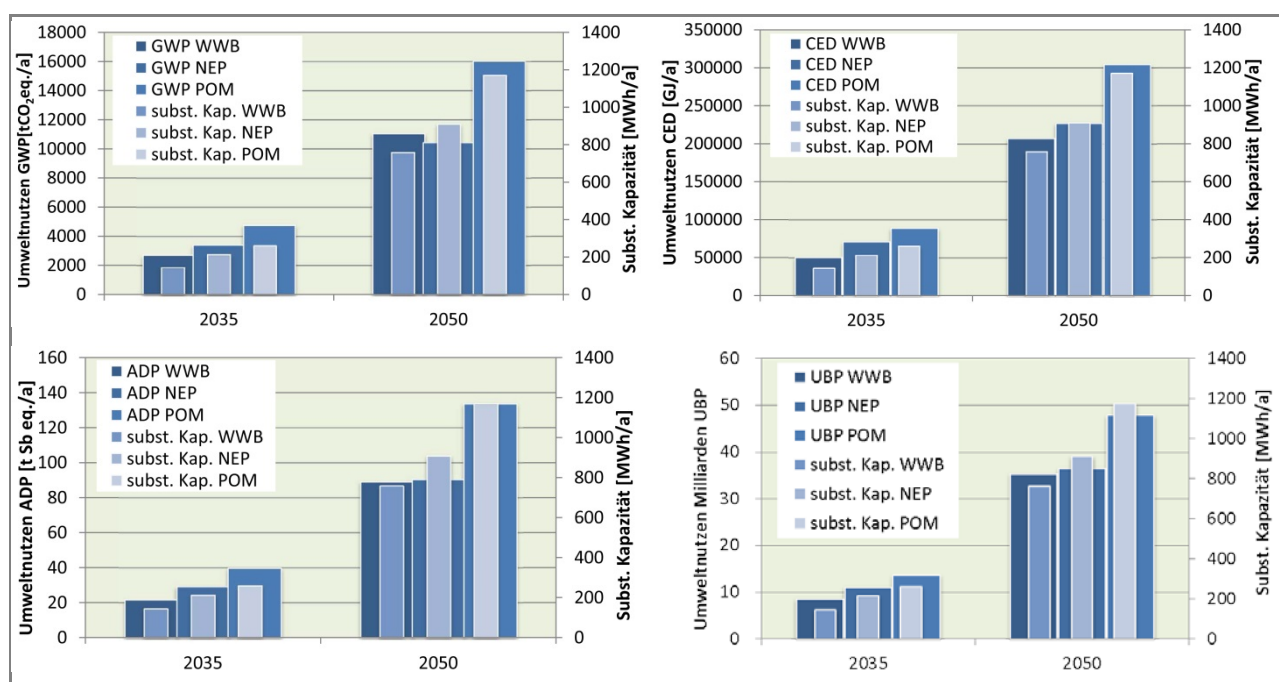


Abbildung 7 Umweltnutzen, ausgedrückt in den Grössen GWP, CED, ADP und UBP sowie die substituierebare Nennkapazität.

3.3 Pilot und Demonstration

Zurzeit werden drei Pilot- und Demonstrationsprojekte vom Institut Energie am Bau der Fachhochschule Nordwestschweiz fachlich begleitet (siehe Tabelle 3). Die Projekte werden im Rahmen des Programms 2000-Watt-Gesellschaft - Pilotregion Basel finanziell gefördert.

Im Gundeldinger Feld in Basel [36] wurde das Kohlesilo der ehemaligen Maschinenfabrik Sulzer Burckhardt AG energetisch saniert und mit neuartigen farbigen PV-Modulen an den Fassaden sowie auf dem Dach versehen. Hinzu kommt ein Second-Life BES aus gebrauchten Batterien von „TWIKE“ Elektrofahrzeugen. Die Kathode dieser prismatisch geformten Batteriezelle besteht aus Lithium-Eisenphosphat (LiFePO₄) und wird in der Schweiz von der Firma Dreifels AG vertrieben [37]. Der durch die PV-Anlage erzeugte Strom wird im angrenzenden Bürogebäude genutzt und der Eigenverbrauch mithilfe des Stromspeichers maximiert. In einem Energiemess- und Monitoring-Projekt werden während den Jahren 2015-2019 Forschungsfragen zur gebäudeintegrierten farbigen PV-Anlage sowie zum Second-Life BES angegangen. Neben einer kantonalen Förderung wird das Projekt vom Bundesamt für Energie finanziell unterstützt.

Ein weiteres Second-Life BES der Marke ReeVOLT! [4] befindet sich in einem EFH in der Gemeinde Riehen. Dieses BES ist mit gebrauchten Batterien aus Elektrofahrzeugen der Marke „Flyer“ ausgerüstet.

Ein in Planung befindliches Second-Life BES besteht voraussichtlich aus demselben Typ Batterie wie die Anlage im Gundeldinger Feld in Basel. Das System wird in einer Alterssiedlung zum Einsatz kommen und voraussichtlich Ende 2017 in Betrieb genommen.

Tabelle 3: Pilot und Demonstration Second-Life BES.

Standort	Gebäudetyp	PV [kW _p]	Second-Life BES [kWh]	Inbetriebnahme	Forschungsauftrag
Basel-Stadt	Dienstleistung	22	39	2015	Baubegleitung, Monitoring
Basel-Riehen	Einfamilienhaus	4.5	2.5	2015	Baubegleitung, Monitoring
Basel-Riehen	Alterssiedlung	195	100	2017	Baubegleitung

In den Pilot- und Demonstrationsprojekten (mit Ausnahme des EFH) werden Massnahmen zum Brandschutz gemäss Schweizerischer Regelwerke VKF-17-3 und VKF-27-3 durchgeführt. Dazu zählen die Aufstellung in einem feuerwiderständigen (EL 30 (nbb)) Raum und die Installation einer Absaugvorrichtung.

4. Konklusion und Ausblick

Vorliegender Beitrag stellt Ergebnisse zu der Wirtschaftlichkeit, dem technischen Potential und dem Umweltnutzen einer Nachnutzung von Batterien aus der Elektromobilität als Stromspeicher in Wohngebäuden für die Schweiz vor. Der Analyse liegen die Nettokapitalwert-Methode und eine Ökobilanzierung zugrunde. Als Datengrundlage dienen Szenarien aus den Energieperspektiven 2050 des Bundes und aktuelle Ergebnisse aus sekundärer Literatur.

Die Gesamtsystembewertung basierend auf dem Nettokapitalwert zeigt, dass ausgehend von der aktuellen Schweizer Marktsituation PV in Kombination mit BES für EFH keine wirtschaftliche Investition darstellt. Eine relativ kleine Systemgrösse mit geringem Ertragspotential sind die Hauptgründe für dieses Ergebnis. Im Gegensatz dazu ist die Anwendung von PV-Second-Life BES Systemen in MFH bereits heute wirtschaftlich möglich.

Die optimale Systemgrösse in EFH von PV Second-Life BES aufgrund ökonomischer Bewertungskriterien beträgt 3 kW_p ($\approx 16 \text{ W}_p/\text{m}^2 \text{ A}_E$) und 2 kWh ($\approx 10.7 \text{ Wh}/\text{m}^2 \text{ A}_E$) nutzbare Speicherkapazität als bald mehr als 4800 CL zur Verfügung stehen. Die optimale Systemgrösse für ein typisches MFH ist in Abhängigkeit des Energiepreisszenarios 13-15 kW_p ($\approx 12\text{-}13.9 \text{ W}_p/\text{m}^2 \text{ A}_E$) und 3-7 kWh ($\approx 2.8\text{-}6.5 \text{ Wh}/\text{m}^2 \text{ A}_E$) Speicherkapazität, vorausgesetzt 4800-6400 CL stehen zur Verfügung.

Der Systemvergleich zwischen C- und Second-Life-BES zeigt einen klaren Kostenvorteil für Second-Life BES auf. Insbesondere bei grösseren Systemen, wie diese bei MFH sinnvoll erscheinen, liegen die LCOE deutlich tiefer als bei C-BES. In dieser Systemgrösse entstehen in einigen Kantonen lediglich geringe Differenzen zwischen den gültigen Strompreisen der Schweiz für das Jahr 2015 und den Stromgestehungskosten von Second-Life BES.

Die Betrachtung von Second-Life BES zeigt, dass sich die Systeme mit aktuellen Tarifmodellen und Kostenstrukturen nicht selber finanzieren können. Aus der Sensitivitätsanalyse gehen die Basiskosten von Second-Life BES und der Hochtarif als mögliche Ansatzpunkte hervor, die zu einem selbsttragenden System führen. Eine denkbare Massnahme zur Kostensenkung ist die gleichstromseitige Einbindung von BES Systemen.

Die Ergebnisse aus vorliegender Untersuchung weisen auf die Notwendigkeit neuer Tarifmodelle hin. Es ist denkbar, dass eine stärkere Entlohnung von netzdienlichen Dienstleistungen zu selbsttragenden Second-Life BES Systemen führt. Die Entwicklung von neuen Tarifmodellen ist ein Anknüpfungspunkt zukünftiger Untersuchungen.

Aus den Ergebnissen ist – abgeleitet aus der zu erwartenden Entwicklung in der Elektromobilität – ein grosses Potenzial von Second-Life BES ersichtlich. Basierend auf den Szenarien der Energieperspektiven des Bundes ist für das Jahr 2050 eine substituierbare Kapazität von 760 MWh (Szenario WWB) bis 1'170 MWh (Szenario POM) zu erwarten. Dies entspricht ca. 152'000 bis 234'000

Speichern mit je einer 5 kWh Nennkapazität. In der Schweiz gibt es laut Bundesamt für Statistik (BFS) rund 1,7 Mio. Wohngebäude. Somit könnten im Jahr 2050 bei gleichem Gebäudebestand 9 bis 14 % der Wohngebäude mit Second-Life-Speicher ausgerüstet werden.

In einer Mitteilung vom 27.2.2015 kommunizierte der schweizerische Bundesrat die Absicht, die CO₂-Emissionen bis 2050 gegenüber 1990 um 70 bis 85 % senken zu wollen. Die Reduktion beliefe sich bei diesem Ziel um 0,8 Mio. t CO₂ jährlich, von 41,5 Mio. t CO₂ im Jahr 2010 auf 10 Mio. t CO₂ im Jahr 2050 [38]. Die GWP-Berechnung zeigt, dass Second-Life BES hierzu im Jahre 2035 mit 0,34 % (WWB) bis 0,6 % (POM) und im Jahre 2050 mit 1,30 % (NEP) bis 2,0 % (POM) einen bedeutsamen Beitrag zur jährlichen Reduktion leisten können.

Der in dieser Studie verwendete lineare Zusammenhang von Umweltsauwirkungen und Energiedichte wird zur Vereinfachung angenommen. Eine markante Energiedichtesteigerung setzt die Einführung neuer Technologien voraus (z.B. Lithium-Silizium-Anoden oder Lithium-Schwefel-Kathoden) [30]. Entsprechend ist anzunehmen, dass sich die Umweltauswirkungen aufgrund unterschiedlicher Herstellungsprozessen der Batterie sowie unterschiedlicher Gewinnung und Verfügbarkeit der Ressourcen nicht linear zur Energiedichte verhalten werden.

Die technische Entwicklung bei Batterien ist derzeit stark in Bewegung. Eine Ausdehnung der hier beschriebenen Betrachtung auf andere Batterietypen ist daher anstrebenswert. Eine weitere Fragestellung innerhalb dieses Themenbereichs ist die Gegenüberstellung der gesamthaften Umweltbelastung aus Second-Life BES mit anderen Netzausbaumassnahmen. Dadurch kann beurteilt werden, ob dezentrale Batteriespeicher nicht nur die kostengünstigste sondern auch die ökologisch sinnvollste Massnahme zur Bewahrung der Netzstabilität sind.

Literatur/Referenzen

- [1] T. Ehara, «Overcoming PV grid issues in urban areas», *Int. Energy Agency Photovolt. Power Syst. Program Rep IEA-PVPS T10-06-2009*, 2009.
- [2] X. Wang, P. Adelman, und T. Reindl, «Use of LiFePO₄ Batteries in Stand-Alone Solar System», *PV Asia Pac. Conf. 2011*, Bd. 25, Nr. 0, S. 135–140, 2012.
- [3] BMW, *Der MINI E liefert nicht nur Fahrspass, sondern gebrauchte Energiespeicher für das Effizienzhaus Plus des Bundesverkehrsministeriums in Berlin*. 2012.
- [4] WEMAG, *Green-Tech: gebrauchte Akkumulatoren für die private Energiewende*. 2014.
- [5] Prognos, *Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050: Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000 - 2050*. Basel: Bundesamt für Energie, 2012.
- [6] C.A.R.M.E.N., *C.A.R.M.E.N. - Marktübersicht für Batteriespeichersysteme*. Straubing, 2014.
- [7] C. Märtel, *Hersteller von Lithium Akkus (AC) für Photovoltaik Anlagen*. 2014.
- [8] M. Forst, *Marktüberblick: Diese Speichersysteme gibt es derzeit - Solarstrom-*. 2013.
- [9] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, und Y. Ding, «Progress in electrical energy storage system: A critical review», *Prog. Nat. Sci.*, Bd. 19, Nr. 3, S. 291–312, 2009.
- [10] B. Battke, T. S. Schmidt, D. Grosspietsch, und V. H. Hoffmann, «A review and probabilistic model of lifecycle costs of stationary batteries in multiple applications», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Bd. 25, Nr. 0, S. 240–250, 2013.
- [11] vela solaris, «Polysun», 2015. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.velasolaris.com/>. [Zugegriffen: 21-Apr-2015].
- [12] MINERGIE, «MINERGIE-A Datenbank», MINERGIE Agentur Bau, Muttenz, 2014.
- [13] J. Nipkow, *Der typische Haushalt-Stromverbrauch: Neue Haushalt-Kategorien und typische Stromverbrauchswerte*. Zürich, 2013.
- [14] Biketec, *Preis für gebrauchte Flyer Batterien. (inkl. Transport)*. Huttwil, 2014.
- [15] J. Hoppmann, J. Volland, T. S. Schmidt, und V. H. Hoffmann, «The economic viability of battery storage for residential solar photovoltaic systems – A review and a simulation model», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Bd. 39, Nr. 0, S. 1101–1118, 2014.
- [16] Swissgrid, «Swissgrid - Vergütung», 2015. [Online]. Verfügbar unter: http://www.swissgrid.ch/swissgrid/de/home/experts/topics/renewable_energies/remuneration_re/eiv/compensation.html. [Zugegriffen: 13-März-2015].
- [17] EICom, «Tarif-Rohdaten der schweizerischen Verteilnetzbetreiber», Eidgenössische Elektrizitätskommission EICom, 2015.

- [18] R. Neukomm, Hrsg., *Einspeisen mit Orientierung am Bezugstarif*. Bern: Schweizerische Vereinigung für Sonnenenergie SSES, 2013.
- [19] IEA, *World energy outlook 2010*. Paris: International Energy Agency (IEA), 2010.
- [20] BFS, *Schweizerische Preisindizes 1914-2014*. 2014a.
- [21] SIA, «480: Wirtschaftlichkeitsrechnung für Investitionen im Hochbau», Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2004.
- [22] Simapro, «Simapro-LCA software», 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.simapro.co.uk/>. [Zugegriffen: 13-Juni-2016].
- [23] ecoinvent, «ecoinvent life cycle inventory database», 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.ecoinvent.org/>. [Zugegriffen: 13-Juni-2016].
- [24] D. Kim, C. Menn, A. Geissler, und D. Hengevoss, «Quantifizierung des Umweltnutzens von gebrauchten Batterien aus der Elektromobilität als gebäudeintegrierte Second-Life Stromspeichersysteme», *Bauphysik*, Bd. 4, Nr. Nr. 022, 2015.
- [25] M.-A. Wolf, R. Pant, K. Chomkhamsri, S. Sala, und D. Pennington, *The International reference Life Cycle Data system (ILCD) handbook: Towards more sustainable production and consumption for a resource-efficient Europe*, Bd. 24982. Luxembourg: Publications Office, 2012.
- [26] R. Hischier, B. Weidema, H.-J. Althaus, C. Bauer, G. Doka, R. Dones, R. Frischknecht, S. Hellweg, Humbert Sébastien, N. Jungbluth, T. Köllner, Y. Loerincik, M. Margni, und T. Nemecek, *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: ecoinvent report No. 3, v2.1*. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2009.
- [27] J. B. Guinée, M. Gorreóe, R. Heijungs, G. Huppes, R. Kleijn, A. de Koning, L. van Oers, A. Wegener Sleeswijk, S. Suh, Udo de Haes, H. A., H. de Bruijn, R. van Duin, Huijbregts, M. A. J., E. Lindeijer, Roorda, A. A. H., und B. P. Weidema, *Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards, Part 3: Scientific Background*. Den Haag und Leiden, Niederlande: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science, 2001.
- [28] R. Frischknecht, R. Steiner, und Jungbluth Niels, *Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006: Methode für die Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen*. Bern: Bundesamt für Umwelt, 2009.
- [29] Protoscar, *Specifications*. Protoscar, 2010.
- [30] G. Duleep, H. van Essen, B. Kampmann, und M. Grüning, *Impacts of Electric Vehicles - Deliverable 2: Assessment of electric vehicle and battery technology*. Delft: ICF International, Ecologic institute, 2011.
- [31] IEA, *Technology Roadmap: Electric and plug-in Hybrid Electric Vehicles*. Paris Cedex: International Energy Agency IEA, 2011.
- [32] C. Menn und A. Geissler, «Electric Vehicle Batteries in Energy Storage Systems: An Economic Analysis For Swiss Residential», gehalten auf der CISBAT, Lausanne, 2015.
- [33] TESLA, «POWERWALL. TESLA HOME BATTERY.», 2015.
- [34] SOLARWATT, «Die Solarspeicherezukunft ist da. Mit dem Effizientweltmeister.», 2015.
- [35] N. Jungbluth, R. Itten, und M. Stucki, «Umweltbelastungen des privaten Konsums und Reduktionspotenziale», ESU-Services, Uster, 2012.
- [36] Gundeldinger Geld, «willkommen auf gundeldingerfelds Webseite!», *Offizielle Webseite*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.gundeldingerfeld.ch/>. [Zugegriffen: 13-Juni-2016].
- [37] Dreifels AG, «dreifels Lithium Power Batterie Typ 40138-10 Einzelzelle und 12V Block», *Produkte*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: http://www.dreifels.ch/images/1_090522_dreifels_Lithium_Zelle_de.pdf. [Zugegriffen: 14-Juni-2016].
- [38] prognos, *Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050: Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000 - 2050*. Basel: Bundesamt für Energie, 2012.