

Home Batteriespeicher

Studie für solarspar

Autoren: ZHAW / IEFE
BSc Thomas Baumann
thomas.baumann@zhaw.ch

ZHAW / IEFE
Prof. Dr. Franz Baumgartner
franz.baumgartner@zhaw.ch

Datum: 06.01.2017

Zusammenfassung

Home Batteriespeicherprodukte der Firma Fronius, Leclanché, Sonnen, Tesla, Varta und E3/DC wurden auf die Steigerungsfähigkeit des Eigenverbrauchs, sowie die Wirtschaftlichkeit untersucht.

Der Eigenverbrauch mit einer 5 kWp PV-Anlage bei einem Jahresstrombedarf von 5200 kWh beträgt 29 % ohne Batteriespeicher. Dieser Wert lässt sich mit dem Batteriespeicher sonnenBatterie eco8.16 mit 16 kWh um 40 % auf total 69 % erhöhen. Wird anstatt der sonnenBatterie die Tesla Powerwall 2 eingesetzt und zusätzlich eine modulierende Wärmepumpe als Heizung im Haus eingesetzt, kann der Eigenverbrauchswert auf 80 % erhöht werden.

In der Schweiz belaufen sich die Installationskosten für Batteriespeicher im Mittel auf CHF 2000.-, wobei diese Kosten von Projekt zu Projekt variieren. Die totalen Investitionskosten für Batteriespeicher und Installation belaufen sich beim günstigsten Produkt sonnenBatterie eco 8.2 mit 2 kWh des Herstellers Sonnen auf CHF 7925. Die höchsten Investitionskosten mit CHF 27427 entstehen beim Produkt Family mit 13.8 kWh des Herstellers Varta. Bei beiden Produkten wird kein Batteriewechselrichter benötigt, da diese Batteriespeicher direkt an das AC-Hausnetz angeschlossen wird.

Die Kosten pro nutzbare Kilowattstunde inklusive Batteriewechselrichter und Installation belaufen sich bei der Tesla Powerwall 2 mit 13.5 kWh auf 706 CHF/kWh. Die höchsten Kosten pro Kilowattstunde belaufen sich auf 4237 CHF/kWh beim Batteriespeicher Varta Home mit 2.8 kWh.

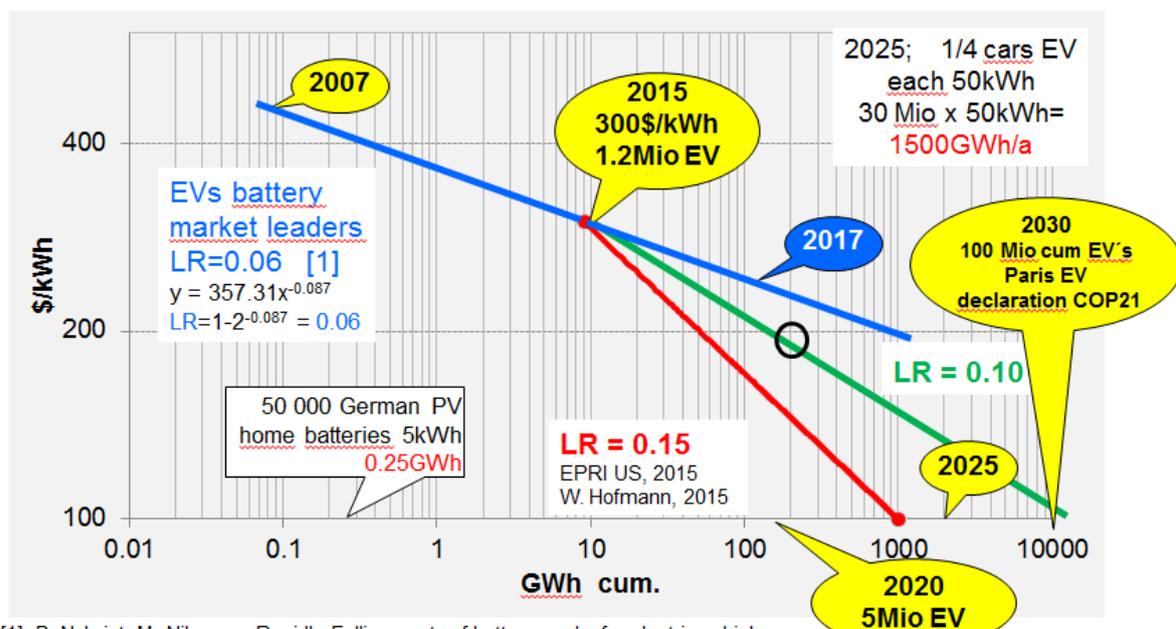
Die Swissolar geben in ihrem aktuellsten Merkblatt „PV-Speicher“ vom 19. Dezember 2016 [1] typische Investitionskosten von 1500 CHF/kWh, ohne Installation an. Dort werden auch nicht ganz nachvollziehbare Kosten von sehr niedrigen 25 Rp/kWh pro vom Speicher gelieferte kWh Solarstrom inklusive PV Erzeugung angegeben. Dies ist nicht realistisch wenn die typischen Investitionskosten bei bereits vorhandener PV Anlage und die vom Hersteller garantierten Lebensdauer von typisch 10 Jahre zu Grunde gelegt werden. Dies ist vor allem deshalb unrealistisch, da die Jahreszyklenzahlen mit 400 fast um den Faktor 2 zu hoch gewählt wurde und die Lebensdauer auch doppelt so hoch angenommen wurde, wie der Hersteller verspricht, was dann in der Multiplikation beider Annahmen um den Faktor 4 neben garantierten Werten von heute oder dann eben bei 100 Rp/kWh inkl. PV Erzeugung ist. Für Haushalte mit deutlich mehr Stromverbrauch von nahe 10000 kWh wird der kWh Preis aus dem Speicher allerdings wieder günstiger.

Der Kunde sollte stets mit realistischen Wirtschaftszahlen informiert werden, er kauft es im Regelfall aktuell auch, wenn der Preis höher liegt, ist aber enttäuscht wenn die zu euphorischen Zahlen sich dann wie eine Blase verflüchtigen.

Bei den betrachteten Batteriespeichern treten jährliche Vollzyklen von 122 (sonnenBatterie 8.16) bis 397 (sonnenBatterie 8.2) auf und bei einer Lebensdauer von 10 Jahren betragen die günstigen Stromkosten aus dem Speicher 0.51 CHF/kWh bei der Tesla Powerwall 2 und gehen bis zu 1.49 CHF/kWh beim Produkt Varta Family mit 13.8 kWh. Wird eine Lebensdauer von 15 Jahren angenommen ändern sich dieser Werte auf 0.34 CHF/kWh für die Powerwall 2 und 1.00 CHF/kWh für den Varta Speicher. Diese Werte wurden ohne Finanzierungskosten für die Batteriespeicher berechnet. Liegt der Hausstromverbrauch höher, reduzieren sich die spezifischen Batteriekosten pro kWh. Zukünftig werden mit der Entwicklung der Elektromobile auch die PV Homespeicher günstiger werden, allerdings werden die Installationskosten nicht so drastisch gesenkt werden können und die Netzanschlussgebühren werden auch bestehen bleiben um das Verteilnetz aufrecht zu erhalten, speziell um die Versorgung in den Wintermonaten zu garantieren.

Learning Curve Li-Ion Battery Packs

Ref. F. Baumgartner, EUPVSEC 2016, June, Munich



[1] B. Nykvist, M. Nilsson; «Rapidly Falling costs of battery packs for electric vehicles», Stockholm Environment Institute & KTH Royal Institute of Technology, Stockholm; Nature Climate Change; 9th Feb 2015

Franz Baumgartner, 2016-11-01; www.zhaw.ch/~bauf Slide 50

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung.....	1
2	Übersicht Batteriespeicher-Produkte	2
2.1	Installationskosten und Installateure im Raum Winterthur.....	4
2.2	Kosten pro nutzbare Kilowattstunde inklusive Batteriewechselrichter	5
3	Simulationen der Home Batteriespeicher.....	6
3.1	Begriffsdefinitionen.....	6
3.2	Simulationsparameter	7
3.3	Simulationsvarianten	8
3.4	Simulationsresultate.....	9
3.5	Diskussion der Simulationsresultate	10
4	Nutzung der Elektroautobatterie als Home Batteriespeicher	13
5	Literaturverzeichnis	14

1 Zielsetzung

Es sollen fünf am Markt verfügbare PV-Batteriesysteme für die Steigerung des Eigenverbrauchs von PV-Strom und die Wirtschaftlichkeit analysiert werden. Dazu werden die Batteriespeicher im Umfeld eines typischen Einfamilienhauses simuliert. Dabei wird die PV-Erzeugung sowie ein typisches Verbrauchsprofil berücksichtigt. In einem Fall soll auch eine Wärmepumpe berücksichtigt werden. Weiter werden die Kosten für die Batteriespeicher ermittelt und es werden Betrachtungen bezüglich der Wirtschaftlichkeit durchgeführt.

Gemäss Offerte sollen die folgenden Batteriehersteller mit unterschiedlichen Kapazitäten berücksichtigt werden: Tesla, Samsung, Sonnen, Leclanché und SenerTec. Seit der Erstellung der Offerte verkaufte Samsung die Sparte der Batteriespeicher an die südkoreanische Firma „Hansol Technics“, welche Ihre Speicher momentan nur in Australien, Deutschland und Italien vertreibt. Die Firma SenerTec konzentriert sich momentan ausschliesslich auf Blockheizkraftwerke. Als Ersatz für die beiden Hersteller wurden Fronius, Varta und E3DC gewählt. Wobei es sich beim E3DC Batteriespeicher um ein Gerät mit integriertem PV-Wechselrichter handelt.

Hauptsächlich sollen die spezifischen Kosten für die prozentuelle Steigerung des PV-Eigenverbrauchs ermittelt werden.

2 Übersicht Batteriespeicher-Produkte

Heute sind am Markt verschiedenste Batteriespeicher erhältlich. Tabelle 1 gibt einen Überblick über häufig eingesetzte Produkte, basierend auf den Anfangsbesprechungen mit dem Auftraggeber, sowie deren technischen Daten und aktuellen Preisen in der Schweiz. Bei den grau hinterlegten Zeilen handelt es sich um Produkte mit integriertem PV-Wechselrichter.

Tabelle 1 Überblick über häufig eingesetzte PV-Home Batteriespeicher nach Herstellerangaben und Richtpreisen aus dem Schweizer Marktumfeld

Hersteller	Typ	Inkl. PV-Inverter	Elektrische Anbindung	Zellen Technologie	Kapazität [kWh]	Entladetiefe DoD [%]	Wirkungsgrad [%]	Preis [CHF] ¹	Preis/nutzbare kWh	Bemerkungen
Fronius	Solar Battery	Nein	DC-DC	LiFePO4	4.5	80	>90 (round-trip)	5'703.72 ²	1584.37	PV-Batteriewechselrichter benötigt, Kalendarische Lebensdauer > 20 Jahre, 5 Jahre „Fronius Garantie Plus“, anschliessend 10 Jahre Kapazitätsgarantie auf Batteriemodule
					6.0			6'753.77	1407.04	
					7.5			7'803.83	1300.64	
					9.0			8'853.00	1229.58	
					10.5			9'903.06	1178.94	
					12.0			10'953.12	1140.95	
Leclanché	Appolion Cube 15S	Nein	DC-DC	Li-Ion (NMC)	6.7	80	<97 (round-trip)	4175.- ³	778.92	PV-Batteriewechselrichter benötigt (Leclanché, SMA, Studer). Bis zu 12 Geräte (80.4 kWh) können kombiniert werden. 7 Jahre Garantie, > 15'000 Zyklen
Leclanché	TiBox	Nein	DC-DC	LI-Ion (NCO Titanate)	3.2	95	>90	7069.- ⁴	2325.33	PV-Batteriewechselrichter (Leclanché oder SMA Sunny Island) benötigt. Bis zu 3 Geräte (9.6 kWh) parallel. Bis zu 15'000 Zyklen, bis zu 10 Jahre Garantie. System eher ausgelegt für Anwendung in GB, wo die TiBox über das Netz 3-4 Mal am Tag geladen wird (während Niedertarif).
Sonnen	sonnenBatterie eco 8	Nein	AC-AC 3ph	LiFePO4	2	100	89 (round-trip)	5924.50 ⁵	2962.25	PV-Wechselrichter benötigt, Garantie 10'000 Zyklen oder 10 Jahre
					4			9007.-	2251.75	
					6			11638.50	1939.75	
					8			14270.-	1783.75	
					10			16901.50	1690.15	
					12			19533.-	1627.75	
					14			22164.50	1583.18	
					16			24796.-	1549.75	

¹ Alle Preise von Schweizer Lieferanten exkl. Montage und exkl. MwSt.

² Winterhalter + Fenner AG; 04.01.2017

³ Stefan Schneider, Firma Leclanché, Preis für 1 Gerät, bei Bestellungen > 21 Geräte CHF 3735.- pro Gerät; 03.01.2017

⁴ Stefan Schneider, Firma Leclanché, Preis für 1 Gerät, bei Bestellungen > 21 Geräte CHF 6349.- pro Gerät; 03.01.2017

⁵ Florian Schweizer, Firma Helion Solar; 23.12.2016

Hersteller	Typ	Inkl. PV-Inverter	Elektrische Anbindung	Zellen Technologie	Kapazität [kWh]	Entladetiefe DoD [%]	Wirkungsgrad [%]	Preis [CHF] ⁶	Preis/nutzbare kWh [CHF]	Bemerkungen
Tesla	Powerwall 1	Nein	DC-DC	Li-Ion	6.4	100	92.5 (DC-η)	4521.- ⁷	706.41	PV-Batteriewechselrichter benötigt, 10 Jahre Garantie
Tesla	Powerwall 2 AC	Nein	AC-AC 1ph	Li-Ion	13.2	100	89.0	5520.- ⁸	418.18	PV-Wechselrichter benötigt, 10 Jahre Garantie; in der Schweiz nicht erlaubt, da einphasige AC Einspeisung
Tesla	Powerwall 2 DC	Nein	DC-DC	Li-Ion	13.5	100	91.8	5520.- ⁹	408.89	PV-Batteriewechselrichter benötigt, 10 Jahre Garantie
Varta	Element	Nein	AC-AC 3ph	Li-Ion	3.2 6.4	90	k.A.	6'150.55 10 7'950.72	2135.61 1380.33	7 Jahre Instandsetzungsgarantie, Garantie auf Batterien: 10 Jahre oder 4.000 Zyklen
Varta	Family	Nein	AC-AC 3ph	LiFePO4	3.7 ... 13.8	90	k.A.	10938.99 9 ... 25427.31	3284.98 ... 2047.29	7 Jahre Instandsetzungsgarantie, 10 Jahre auf Batteriezellen (80 % Restkapazität), Kapazität in 461 Wh Schritten wählbar
Varta	Home	Nein	AC-AC 3ph	LiFePO4	2.8 ... 6.9	90	k.A.	8676.79 ⁹ ... 14603.83	3443.17 ... 2351.66	7 Jahre Instandsetzungsgarantie, 10 Jahre auf Batteriezellen (80 % Restkapazität), Kapazität in 461 Wh Schritten wählbar
E3/DC	S10E	Ja	DC-String/ AC-AC 3ph	Panasonic Lithium-Ionen DCB-Z	4.6 9.2	92	>88	9'915.- ¹¹ 11'545.-	2342.86 1364.01	Kein zusätzlicher Wechselrichter benötigt, 10 Jahre Garantie, keine Zyklen Beschränkung, Batteriekapazität von 4.6 bis 13.8 kWh erhältlich
E3/DC	S10 MINI	Ja	DC-String/ AC-AC 1ph	Panasonic Lithium-Ionen DCB-Z	4.6 9.2	92	>88	7350.- 9250.-	1736.77 1092.86	Kein zusätzlicher Wechselrichter benötigt, 10 Jahre Garantie, keine Zyklen Beschränkung, Batteriekapazität von 2.3 bis 9.2 kWh erhältlich

Das Straubinger „Centrale Agrar-Rohstoff Marketing-und Energie-Netzwerk“ bietet zudem eine Übersicht von verbreiteten Batteriespeichern in Deutschland [2].

⁶ Alle Preise von Schweizer Lieferanten exkl. Montage und exkl. MwSt.

⁷ Stefan Roth, Firma solarville AG; evt. nicht mehr lieferbar; 21.12.2016

⁸ Tobias Kathan, Tesla Energy; Preis der Powerwall 2 AC ist identisch wie die DC-Version, jedoch ist bei der AC-Version die Kapazität leicht geringer; in der Schweiz ist die AC-Version nicht erlaubt, da sie nur einphasig einspeist; deshalb wird die AC-Version in den weiteren Betrachtungen nicht mehr berücksichtigt

⁹ https://www.tesla.com/de_CH/powerwall#design (Zusätzlich Installation und Material: CHF 1700.- inkl. MwSt.); Installationen in der Schweiz ab Februar 2017; bislang unbekannt, ob Preis für AC und DC Version identisch ist; 03.01.2017

¹⁰ Winterhalter + Fenner AG; 04.01.2017

¹¹ Fabian Kraemer, Senero AG; 17.12.2016

2.1 Installationskosten und Installateure im Raum Winterthur

Die Installationskosten für einen Batteriespeicher sind abhängig von den Gegebenheiten beim Kunden und variieren somit von Projekt zu Projekt. Im Gespräch mit diversen Installateuren zeigte sich, dass sich die Installationskosten im Mittel auf ungefähr CHF 2000.- belaufen. Diese setzen sich aus CHF 1500.- Installationsaufwand und CHF 500.- Material zusammen.

In Deutschland belaufen sich die Installationskosten für ein Gesamtsystem gemäss einer Studie aus dem Jahr 2014 auf 400 bis 800 Euro [3].

Die Installateure und Lieferanten (hauptsächlich im Raum Winterthur) in Tabelle 2 bieten Batteriespeicher.

Tabelle 2 Übersicht von Installateuren und Lieferanten

Installateur	Produkte	Hinweise
Elektrizitätswerke des Kantons Zürich Daniela Sauter-Kohler Überlandstrasse 2 CH-8953 Dietikon T +41 58 359 25 38 M +41 76 484 20 70 daniela.sauter@ekz.ch	verschiedene	Bieten ab Q1 2017 Speicher für Ein- und Mehrfamilienhäuser an, vorerst für „Testkunden“ im Stil von Pilotprojekten. Ab Sommer 2017 wird das Angebot auf eine breitere Kundengruppe ausgeweitet.
Solarville AG Stefan Roth Technoparkstrasse 2 8406 Winterthur T +41 52 238 37 37 M +41 76 347 93 63 stefan.roth@solarville.ch	Tesla, weitere auf Anfrage	
Senero AG Fabian Kraemer In der Au 5 8406 Winterthur T +41 52 203 66 57 fabian.kraemer@senero.ch	E3DC	
Helion Solar AG Florian Schweizer Hofstrasse 17/19 8181 Höri T +41 44 872 35 07 florian.schweizer@helion-solar.ch	Tesla, Sonnen	
Leclanché GmbH Stefan Schneider Industriestr. 1 Avenue des Sports 42 DE-77731 Willstätt CH- 1401 Yverdon-les-Bains T +49 (0)7852- 81857 M +49 (0)162-1374 291 stefan.schneider@leclanche.com	Leclanché	Firmen welche einen Jahresumsatz von mehr als CHF 120'000 tätigen werden direkt beliefert. Kleinere Umsätze werden über den Elektrogrosshandel und Vertriebspartner abgewickelt.

2.2 Kosten pro nutzbare Kilowattstunde inklusive Batteriewechselrichter

Bei der vorhergehenden Tabelle 1 ist der Preis pro nutzbare kWh angegeben worden. Um die Produkte vergleichen zu können, müssen bei den Produkten welche nur über eine DC-Anbindung verfügen, zusätzlich der Preis eines Batteriewechselrichters addiert werden. Ein weit verbreitetes Produkt der Kategorie Batteriewechselrichter für eine 5 kWp Anlage ist der Symo Hybrid 3.0-3-S vom Hersteller Fronius. Dieser ist momentan zum Preis von CHF 2008.85¹² erhältlich.

Wenn bei den Batterieherstellern Fronius, Leclanché und Tesla der Preis dieses Batteriewechselrichters (WR) addiert wird, sowie bei allen Herstellern die Installationskosten gemäss Abschnitt 2.1 addiert werden, resultieren die Kosten pro nutzbare kWh in Tabelle 3 in aufsteigender Reihenfolge. Zudem sind die totalen Investitionskosten inkl. Batteriewechselrichter (sofern benötigt) und Installationskosten dargestellt.

Tabelle 3 Kostenübersicht der Batteriespeicher, sortiert nach Kosten pro nutzbare Kilowattstunde inkl. Wechselrichter und Installation und Angabe der totalen Investition inkl. Installation

Hersteller	Typ	Kapazität [kWh]	Kosten/nutzbare kWh [CHF/kWh]	Totale Investition [CHF]
Tesla	Powerwall 2 DC	13.5	705.84	9528.85
E3DC	S10 MINI	9.2	1329.16	11250.00
Tesla	Powerwall 1	6.4	1332.79	8529.85
Leclanché	Appolion Cube 15S	6.7	1526.84	8183.85
Fronius	Solar Battery	12.0	1558.54	14961.97
E3DC	S10E	9.2	1600.31	13545.00
Fronius	Solar Battery	10.5	1656.18	13911.91
Sonnen	sonnenBatterie eco	16.0	1674.75	26796.00
Sonnen	sonnenBatterie eco	14.0	1726.04	24164.50
Varta	Element	6.4	1727.56	9950.72
Fronius	Solar Battery	9.0	1786.37	12861.85
Sonnen	sonnenBatterie eco	12.0	1794.42	21533.00
Sonnen	sonnenBatterie eco	10.0	1890.15	18901.50
Fronius	Solar Battery	7.5	1968.78	11812.68
Sonnen	sonnenBatterie eco	8.0	2033.75	16270.00
Varta	Family	13.8	2208.32	27427.31
E3DC	S10 MINI	4.6	2209.36	9350.00
Fronius	Solar Battery	6.0	2242.21	10762.62
Sonnen	sonnenBatterie eco	6.0	2273.08	13638.50
Varta	Home	6.9	2673.72	16603.83
Fronius	Solar Battery	4.5	2697.94	9712.57
Sonnen	sonnenBatterie eco	4.0	2751.75	11007.00
E3DC	S10E	4.6	2815.45	11915.00
Varta	Element	3.2	2830.05	8150.55
Leclanché	TiBox	3.2	3644.03	11077.85
Varta	Family	3.7	3885.58	12938.99
Sonnen	sonnenBatterie eco	2.0	3962.25	7924.50
Varta	Home	2.8	4236.82	10676.79

Es zeigt sich, dass die Tesla Powerwall 2 DC, welche ab Februar 2017 in der Schweiz installiert wird, mit Abstand den besten Preis pro kWh bietet.

Die Geräte von Sonnen und Varta mit einer dreiphasigen AC-Anbindung eignen sich sehr gut für Objekte, bei welchen bereits eine PV-Anlage installiert ist, welche nicht mit einem Batteriewechselrichter ausgerüstet sind. Somit kann die bestehende PV-Anlage ohne Anpassungen weiter betrieben werden.

¹² Winterhalter + Fenner AG; 05.01.2017

3 Simulationen der Home Batteriespeicher

3.1 Begriffsdefinitionen

Die nachfolgende Tabelle 4 definiert die verwendeten Begriffe in den Simulationen mit Einheit, Symbol und Berechnung.

Tabelle 4 Begriffsdefinition mit Einheit, Symbol und Berechnungsformel

Bezeichnung [Einheit]	Symbol	Kommentar
Eigenstromproduktion [kWh]	Eacp	Eigenproduzierter Wechselstrom z.B. aus Photovoltaik
Gesamter Stromverbrauch [kWh]	Ecs	Summe des eigenen Stromverbrauchs gemäss den Verbrauchsprofilen
Batterieladeenergie [kWh]	Ebch	Energie zum Laden der Batterie <i>Berechnung: $\min(Eacp-Ecs, EBatMaxCh)$</i>
Batterieentladeenergie [kWh]	Ebdis	Energie vom Entladen der Batterie <i>Berechnung: $\min(Ecs-Eacp, EBatMaxDis)$</i>
Eigenverbrauch [kWh]	Eocs	Eigener Stromverbrauch, der durch die eigene Stromproduktion gedeckt ist <i>Berechnung: $\min(Ecs, Eacp+Ebdis)$</i>
Eigenverbrauchsverhältnis [%]	Rocs	Eigenverbrauch über Eigenstromproduktion <i>Berechnung: $Eocs/Eacp$</i>
Autarkiegrad [%]	Raut	Verhältnis zwischen dem Eigenverbrauch und dem gesamten Verbrauch <i>Berechnung: $Eocs/Ecs$</i>
Netzeinspeisung [kWh]	Eteg	Einspeisung ins externe Stromnetz <i>Berechnung: $Eacp-Ecs-Ebch$; für $Eacp \geq Ecs$</i>
Netzbezug [kWh]	Efeg	Bezug vom externen Stromnetz <i>Berechnung: $Ecs-Eacp-Ebdis$; für $Eacp < Ecs$</i>
Batterieentladetiefe [%]	DoD	Mögliche Entladungstiefe
Batterienennkapazität [kWh]	Cbn	Nennkapazität gemäss Datenblatt
Nutzbare Batteriekapazität [kWh]	Cbu	Die effektiv nutzbare Kapazität <i>Berechnung: $Cbn \cdot DoD$</i>
Anzahl Vollzyklen [n]	Fc	Ein Vollzyklus entspricht 100 % der nutzbaren Batteriekapazität geladen und wieder entladen. <i>Berechnung: $Ebdis/Cbu$</i>

3.2 Simulationsparameter

Folgenden Parameter wurden für die Simulationen verwendet:

Netz

Stromnetz:	Dreiphasen 230V/400V, 50 Hz, Stern
Maximale Phasenschieflast:	4.6
Cos φ :	1

PV Generatorfeld

Modul:	PV-Modul-250W, monokristallin (Anonym)
Ausrichtung:	0°, horizontal
Anstellwinkel:	30°
Anzahl Module:	20
Min. Modultemperatur:	-10.7 °C
Max. Modultemperatur:	67 °C

PV Auslegung

Min. Leistungsverhältnis:	0.78
Max. Leistungsverhältnis:	1.05
Wechselrichter:	Inverter 4000 (Anonym)
Kabelverluste:	2 %

Elektrische Verbraucher

Verbrauchsprofil:	15 min Lastprofil H63: Familie mit 2 Kindern, ein Elternteil berufstätig
Jahresverbrauch:	5200 kWh [4]

Warmwasser

Anzahl Personen:	4
Temperatur:	50 °C
Täglicher Warmwasserbedarf:	200 l

Gebäude

Gebäudetyp:	Einfamilienhaus, Niedrigenergiegebäude
Gebäudedimensionen:	10.7 x 7 m
Anzahl Stockwerke:	2
Beheizte Wohnfläche:	149.8 m ²
Soll-Raumtemperatur:	19
Konvektor:	Fussbodenheizung

Wärmeerzeuger

Luft-Wasser-Wärmepumpe:	Wärmepumpe 10 kW / Modulierende Wärmepumpe 10 kW
Freigabe Wärmepumpe:	3 und 4, 8 bis 17, 21 und 22 (Tagesstunden)

Simulationszeitraum:	1 Jahr
Geografische Lage:	Winterthur

3.3 Simulationsvarianten

Die in Tabelle 5 aufgelisteten Simulationsvarianten wurden mittels der Software Polysun 9.1 simuliert. Bei jeder Variante wurde zudem die PV Produktion und das elektrische Verbrauchsprofil gemäss Abschnitt 3.2 berücksichtigt.

Tabelle 5 Definition der Simulationsvarianten mit Bezeichnung, verwendete Wärmepumpe und Batterie

Bezeichnung	Wärmepumpe	Batterie
A	ohne	ohne
B01	Standard	ohne
B02	Inverter	ohne
C01	ohne	Fronius Solar Battery 4.5 kWh
C02	ohne	Fronius Solar Battery 6.0 kWh
C03	ohne	Fronius Solar Battery 7.5 kWh
C04	ohne	Fronius Solar Battery 9.0 kWh
C05	ohne	Fronius Solar Battery 10.5 kWh
C06	ohne	Fronius Solar Battery 12.0 kWh
C10	ohne	Leclanché Appolion Cube 15S 6.7 kWh
C11	ohne	1 x Leclanché TiBox 3.2 kWh
C12	ohne	2 x Leclanché TiBox 3.2 kWh = 6.4 kWh
C20	ohne	Sonnen sonnenBatterie eco 8 2 kWh
C21	ohne	Sonnen sonnenBatterie eco 8 4 kWh
C22	ohne	Sonnen sonnenBatterie eco 8 6 kWh
C23	ohne	Sonnen sonnenBatterie eco 8 8 kWh
C24	ohne	Sonnen sonnenBatterie eco 8 10 kWh
C25	ohne	Sonnen sonnenBatterie eco 8 12 kWh
C26	ohne	Sonnen sonnenBatterie eco 8 14 kWh
C27	ohne	Sonnen sonnenBatterie eco 8 16 kWh
C30	ohne	Tesla Powerwall 1 6.4 kWh
C31	ohne	Tesla Powerwall 2 DC 13.5 kWh
C40	ohne	Varta Element 3.2 kWh
C41	ohne	Varta Element 6.4 kWh
C42	ohne	Varta Family 3.7 kWh
C43	ohne	Varta Family 13.8 kWh
C44	ohne	Varta Home 2.8 kWh
C45	ohne	Varta Home 6.9 kWh
C50	ohne	E3DC S10E 4.6 kWh
C51	ohne	E3DC S10E 9.2 kWh
C52	ohne	E3DC S10 MINI 4.6 kWh
C53	ohne	E3DC S10 MINI 9.2 kWh
D01	Standard	Tesla Powerwall 2 13.5 kWh
D02	Inverter	Tesla Powerwall 2 13.5 kWh

Für die beiden Varianten Batteriespeicher mit Wärmepumpe (D01 und D02) wurde die Tesla Powerwall 2 als Batteriespeicher verwendet, da diese das beste Preis zu kWh Verhältnis bietet (siehe Abschnitt 2.2).

3.4 Simulationsresultate

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Simulationsresultate der verschiedenen Simulationsvarianten (siehe Abschnitt 3.3).

Tabelle 6 Simulationsresultate aus den Polysun Simulationen und Kennzahlen berechnet aus Kosten und Resultaten

Bez.	Nutzbare Batteriekapazität Cbu [kWh]	Eigenverbrauch Rocs [%]	Autarkiegrad Raut [%]	Gesamter Stromverbrauch Ecs [kWh]	Netzeinspeisung Eteg [kWh]	Netzbezug Eteg [kWh]	Batterie-ladeenergie Ebch [kWh]	Batterieent-ladeenergie Ebdis [kWh]	Batterie-füllgrad SOC [%]	Vollzyklen Fc [n]	Total Investitionskosten [CHF]	Kosten/nutzbare kWh [CHF/kWh]	Kosten / 1%-Eigenverbrauchsteigerung [CHF/%]	Kosten/kWh bei 10 Jahren Betriebsdauer [CHF/kWh]	Kosten/kWh bei 15 Jahren Betriebsdauer [CHF/kWh]
A	0.0	29.1	27.3	5200	3456	3780	0	0	0.0	0	0	0	0	0.00	0.00
B01	0.0	32.5	16.5	9625	3292	8042	0	0	0.0	0	0	0	0	0.00	0.00
B02	0.0	47.6	25.9	8956	2553	6633	0	0	0.0	0	0	0	0	0.00	0.00
C01	3.6	50.2	47.0	5200	2069	2754	1386	1026	38.4	285	9'713	2'698	366	0.95	0.63
C02	4.8	54.0	50.6	5200	1816	2567	1640	1213	38.9	253	10'763	2'242	352	0.89	0.59
C03	6.0	57.2	53.6	5200	1606	2412	1850	1369	39.5	228	11'813	1'969	349	0.86	0.58
C04	7.2	59.8	56.1	5200	1432	2283	2023	1497	40.2	208	12'862	1'786	354	0.86	0.57
C05	8.4	61.8	58.0	5200	1301	2186	2154	1594	40.9	190	13'912	1'656	364	0.87	0.58
C06	9.6	63.4	59.4	5200	1198	2109	2258	1671	41.7	174	14'962	1'559	378	0.90	0.60
C10	5.4	57.8	54.2	5200	1568	2384	1887	1397	29.8	261	8'184	1'527	215	0.59	0.39
C11	3.0	50.4	47.3	5200	2051	2741	1405	1039	29.2	342	11'078	3'644	426	1.07	0.71
C12	6.1	60.3	56.6	5200	1399	2258	2057	1522	30.5	250	18'147	2'985	518	1.19	0.79
C20	2.0	45.4	42.6	5200	2384	2987	1071	793	25.7	397	7'925	3'962	363	1.00	0.67
C21	4.0	54.1	50.8	5200	1808	2561	1648	1220	25.8	305	11'007	2'752	360	0.90	0.60
C22	6.0	60.1	56.3	5200	1416	2271	2040	1510	26.9	252	13'639	2'273	375	0.90	0.60
C23	8.0	63.6	59.7	5200	1181	2097	2274	1683	28.5	210	16'270	2'034	414	0.97	0.64
C24	10.0	65.8	61.7	5200	1038	1991	2418	1789	30.0	179	18'902	1'890	461	1.06	0.70
C25	12.0	67.3	63.1	5200	940	1919	2515	1861	31.3	155	21'533	1'794	511	1.16	0.77
C26	14.0	68.4	64.1	5200	867	1865	2589	1916	31.9	137	24'165	1'726	564	1.26	0.84
C27	16.0	69.2	64.9	5200	813	1825	2643	1956	32.5	122	26'796	1'675	618	1.37	0.91
C30	6.4	60.6	56.8	5200	1338	2247	2118	1533	26.9	240	8'530	1'333	207	0.56	0.37
C31	13.5	67.7	63.5	5200	857	1900	2598	1880	31.2	139	9'529	706	195	0.51	0.34
C40	2.9	48.9	45.8	5200	2155	2818	1301	962	30.9	334	8'151	2'830	311	0.85	0.56
C41	5.8	58.5	54.9	5200	1518	2346	1938	1434	31.9	249	9'951	1'728	270	0.69	0.46
C42	3.3	50.3	47.1	5200	2062	2749	1393	1031	32.3	310	12'939	3'886	516	1.25	0.84
C43	12.4	66.8	62.6	5200	976	1945	2480	1835	37.7	148	27'427	2'208	674	1.49	1.00
C44	2.5	46.9	44.0	5200	2284	2913	1172	867	32.3	344	10'677	4'237	487	1.23	0.82
C45	6.2	59.2	55.5	5200	1474	2314	1981	1466	33.5	236	16'604	2'674	485	1.13	0.76
C50	4.2	51.5	48.3	5200	1810	2690	1646	1090	34.3	258	11'915	2'815	443	1.09	0.73
C51	8.5	60.6	56.8	5200	1136	2244	2320	1536	36.2	181	13'545	1'600	367	0.88	0.59
C52	4.2	51.5	48.3	5200	1810	2690	1646	1090	34.3	258	9'350	2'209	328	0.86	0.57
C53	8.5	60.6	56.8	5200	1136	2244	2320	1536	36.2	181	11'250	1'329	294	0.73	0.49
D01	13.5	74.6	37.6	9625	453	5987	2839	2055	22.7	152	9'529	706	165	0.46	0.31
D02	13.5	80.3	43.7	8956	351	5040	2202	1594	21.7	118	9'529	706	147	0.60	0.40

3.5 Diskussion der Simulationsresultate

Bei allen Simulationsvarianten beträgt die Strom- respektive Eigenstromproduktion (Eacp) der PV-Anlage 4875.3 kWh.

Der mittlere Wirkungsgrad der Batteriespeicher (Ebdis/Ebch) befindet sich gemäss der Simulation im Jahresmittel im Bereich von 66 bis 74 %. Im Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering (IEFE) der ZHAW wurden eigene Messungen an kommerziellen Batteriespeichern durchgeführt. Diese zeigten, dass die DC-DC Verluste im Mittel beim Laden und Entladen je ca. sechs Prozent betragen. Dazu kommen mittlere Verluste der DC-AC Umwandlung von ca. vier Prozent sowie Standby-Verluste und Selbstentladung der Batterie. Es gilt anzumerken, dass Wirkungsgrade auch abhängig sind vom Ladezustand der Batterie und dem Spannungsniveau des PV Generators bei direkt gekoppelten Systemen.

Die Eigenverbrauchsrate (Rocs) mit einem der betrachteten Batteriespeicher lässt sich im Bereich von 16 (Variante C20) bis 40 (Variante C27) Prozent steigern gegenüber der Simulationsvariante A ohne Batteriespeicher. Wird der Batteriespeicher Tesla Powerwall 2 mit einer Standard („Ein-Aus“) Wärmepumpe kombiniert (Variante D01), lässt sich die Eigenverbrauchsrate um weitere 45 % gegenüber der Variante A auf 75 % steigern. Wenn anstatt der Standard Wärmepumpe eine Inverter (modulierende) Wärmepumpe eingesetzt wird (Variante D02), lässt sich eine Eigenverbrauchsrate von 80 % erreichen, was aber noch stark von den tatsächlichen Lastdynamiken und Batterie-Dynamik inkl. Stromzähler-Kommunikation abhängt.

Die Vollzyklen (Fc) bewegen sich bei den betrachteten Speichern mit den definierten Simulationsparametern im Bereich von 122 (Variante C27) und 397 (Variante C20). Typisch sind im optimalen Fall um die 200 Vollzyklen [5]. Die Vollzyklen sind ein Indiz für die Nutzung des Speichers pro Jahr bzw. über die gesamte zu erwartende Lebensdauer so entnommene Energie. Je tiefer der Wert pro Jahr, umso weniger kWh werden über die kalendarisch limitierte Lebensdauer von typisch 10 Jahren entnommen und die entnommene kWh ist entsprechend teurer. Diese Relation der Vollzyklen zu den Investitionskosten der Batteriespeicher und Wechselrichter (mit Installation) ist resultierend in Abbildung 1 angegeben.

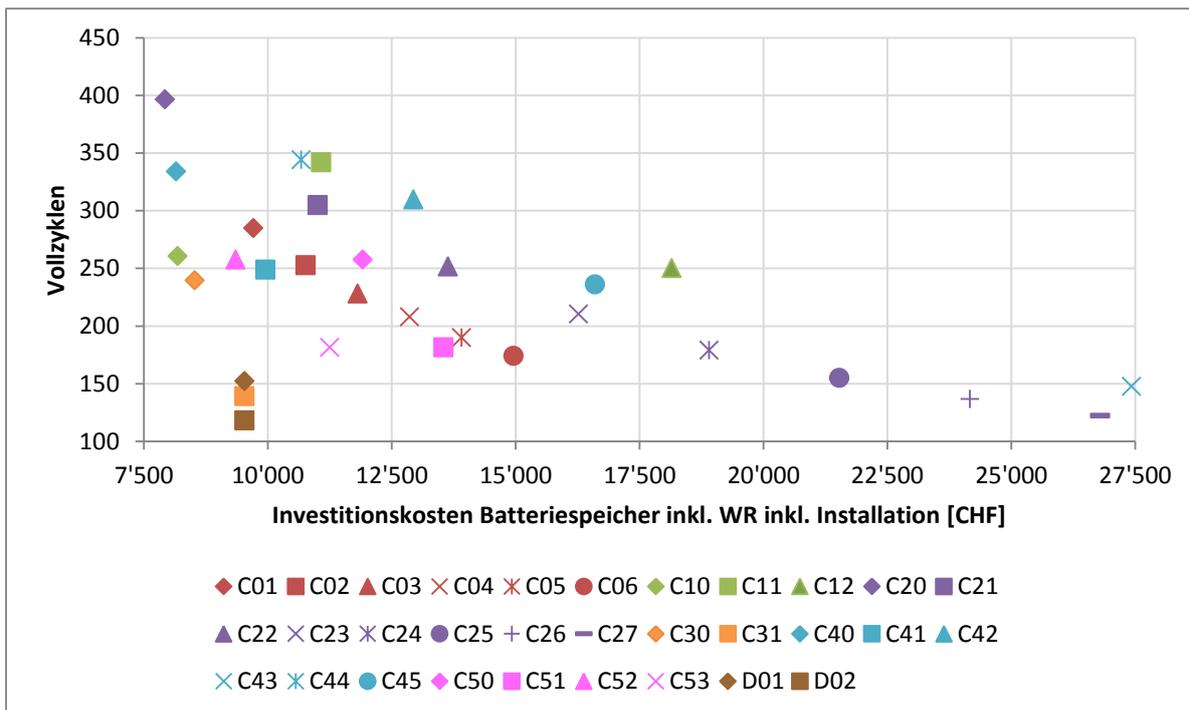


Abbildung 1 Vollzyklen in Abhängigkeit der Investitionskosten (Batteriespeicher + Wechselrichter, jedoch ohne Installation); (gleiche Farbe = identischer Hersteller)

Die spezifischen Kosten für die Steigerung des Eigenverbrauchs um ein Prozent liegen im Bereich von CHF 247.- (C31) bis CHF 728.- (C43) ohne Betrachtung der Simulationsvarianten D01 und D02. Werden diese beiden Varianten ebenfalls berücksichtigt, liegt der tiefste Wert der prozentuellen Eigenverbrauchssteigerung bei CHF 186.- (D02). Dies ist in Abbildung 2 grafisch dargestellt.

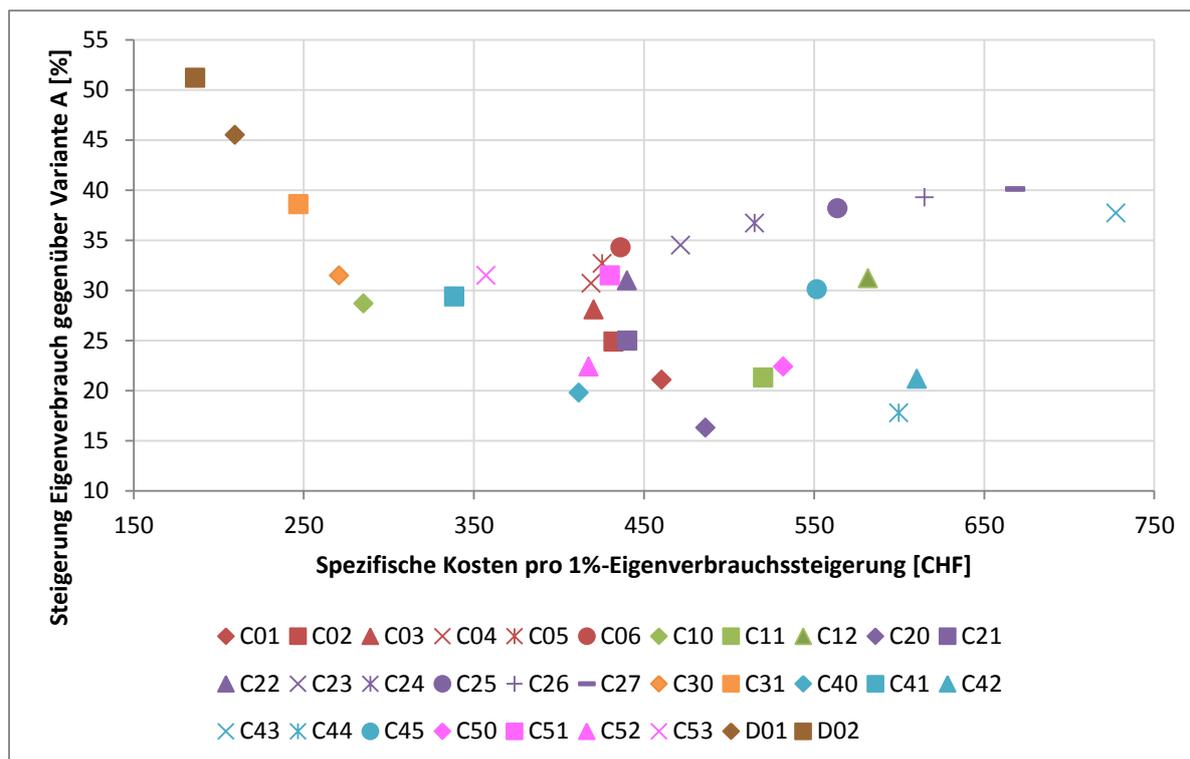


Abbildung 2 zeigt die Steigerung des Eigenverbrauchs gegenüber Variante A bezogen zu den spezifischen Kosten pro 1%-Eigenverbrauchssteigerung; (gleiche Farbe = identischer Hersteller)

Mit der Tesla Powerwall 2 DC kann somit der Eigenverbrauch von ursprünglich 29 % ohne Batterie auf 68 % gesteigert werden (ohne Wärmepumpe). Dies zu den tiefen spezifischen Kosten von CHF 247.- pro 1 % Eigenverbrauchssteigerung, oder anders ausgedrückt für Investitionskosten von CHF 9529.- inklusive Batteriewechselrichter und Installation.

Bei einer angenommenen Lebensdauer von 10 Jahren kostet die Energie aus der Batterie (LCOE) im günstigsten Fall mit der Tesla Powerwall 2 (C31) 0.46 CHF/kWh, was immer noch mehr als doppelt so teuer ist wie der mit der PV-Anlage produzierte Strom. Wird eine Lebensdauer von 15 Jahren angenommen, sinkt dieser Wert auf 0.34 CHF/kWh. Es gilt jedoch zu beachten, dass Tesla nur 10 Jahre Garantie gibt auf Ihr Produkt. Fronius gewährt auf Ihre Produkte insgesamt 15 Jahre Garantie. Diese Werte wurden ohne Berücksichtigung von Finanzierungskosten für den Speicher berechnet. Ähnliche Werte für die Energiekosten aus der Batterie erscheinen auch in gleichartigen Publikationen [6] [5].

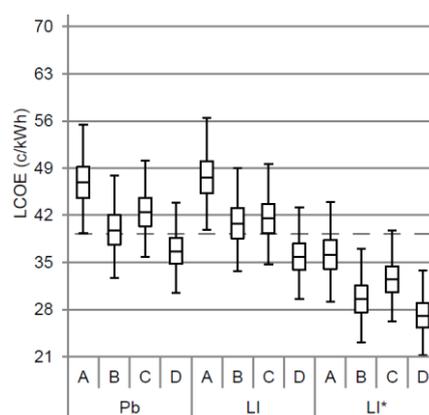


Abbildung 3 LCOE für verschiedene Batteriespeichertechnologien und verschiedene Szenarien [6]

4 Nutzung der Elektroautobatterie als Home Batteriespeicher

Anstatt der Installation eines Home Batteriespeichers zur Steigerung des Eigenverbrauchs könnte auch die Batterie eines Elektroautos verwendet werden. Dies wird auch als Vehicle-to-Home (V2H) bezeichnet. Auch möglich ist die Nutzung der Elektroautobatterie zur Einspeisung ins Stromnetz um Netzschwankungen aufzufangen, was als Vehicle-to-Grid (V2G) bezeichnet wird.

Damit dies möglich ist, müssen eine bidirektionale Ladestation, sowie eine bidirektionale Ladefunktion im Elektroauto vorhanden sein. Im Bereich V2H gibt heute bereits erste Produkte, welche diese Funktionen anbieten. Zum Beispiel die Ladestation „DIVA“ des Herstellers e8energy GmbH, welche mit allen Elektroautos mit dem weltweit etablierten CHAdeMO-Schnellladeanschluss ausgerüstet sind kompatibel ist. Zudem beinhaltet die Ladestation eine stationäre 10 kWh Batterie, welche verwendet wird als Heimspeicher wenn das Elektroauto nicht angeschlossen ist. Es sind auch viele Autohersteller daran V2H-fähige Ladestationen zu entwickeln oder bieten diese bereits an.

Die Eigenverbrauchssteigerung einer solchen V2H-Lösung wird erwartungsgemäss im selben Bereich wie die untersuchten Home Batteriespeicher liegen, abhängig von der Batteriekapazität, welche durch das Elektrofahrzeug zur Nutzung zur Verfügung gestellt wird.

Im Bereich V2G wurde in Deutschland ein Forschungsprojekt mit 20 Elektroautos durchgeführt [7]. Es zeigte sich jedoch, dass diese Anwendung zu einer hohen zusätzlichen Alterung der Fahrzeugbatterie führt. Bei der Verwendung Vehicle-to-Home wird diese zusätzliche Alterung vermutlich etwas geringer ausfallen.

5 Literaturverzeichnis

- [1] «PV-Anlagen mit Batterien», Swissolar, Zürich, Merkblatt, Dez. 2016.
- [2] «Marktübersicht für Batteriespeichersysteme», Centrale Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerke, Straubing DE, Oktober 2016.
- [3] «Wirtschaftlichkeit Batteriespeicher», Leipziger Institut für Energie GmbH, Leipzig DE, Kurzexpertise, Jan. 2014.
- [4] J. Nipkow, «Typischer Haushalt-Stromverbrauch», Bundesamt für Energie BFE, Schlussbericht, Sep. 2013.
- [5] N. Pearsall, *The performance of photovoltaic (PV) systems modelling, measurement and assessment*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017.
- [6] C. Stegner, P. Luchscheider, J. Bogenrieder, R. German, und C. Brabec, «PROFITABILITY AND LCOE OF SMALL SOLAR BATTERY SYSTEMS - THE GERMAN CASE», in *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2015.
- [7] «Intelligente Netzanbindung von Elektrofahrzeugen zur Erbringung von Systemdienstleistungen – INEES», Fraunhofer IWES, LichtBlick SE, SMA Solar Technology AG, Volkswagen AG, Projektabschlussbericht, Juni 2016.