

Hochschule Magdeburg-Stendal
Fachbereich Ingenieurwissenschaften
Bachelor-Studiengang Elektrotechnik

B a c h e l o r a r b e i t

Thema: Auswahl und Dimensionierung eines Speichersystems, unter Berücksichtigung von Technik und Wirtschaftlichkeit, für ein Beispielhaus.

vorgelegt von:

Name, Vorname: Helm, Sebastian

geb. am: 24.03.1989

Matrikel-Nr.: 20083341

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Jan Mugele

Zweitprüfer/in: B.Eng. Florian Müller

Magdeburg, den 25.03.2015 (Abgabetermin)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	5
Formelverzeichnis.....	6
Abkürzungsverzeichnis.....	7
1. Einleitung.....	8
2. Aufbau und Funktionsweise.....	10
2.1 Lithium-Ionen Batterie.....	10
2.2 Blei Batterien.....	12
2.3 Natrium-Schwefel Batterien.....	13
2.4 Redox-Flow Batterie	16
3. Ist-Betrachtung.....	19
3.1 Betrachtung des Hauses ohne Photovoltaik Anlage.....	19
3.2 Betrachtung des Hauses mit Photovoltaik Anlage.....	21
4. Anforderungen an ein Speichersystem.....	26
4.1 Rahmenbedingungen im Haus	26
4.2 Anforderungen an das Speichersystem.....	27
4.3 Dimensionierung der Speicherkapazität.....	30
5. Speichersysteme.....	33
5.1 Lithium-Ionen Akkumulator.....	33
5.2 Blei-Gel Batterie.....	39
5.3 Natrium-Schwefel Batterien.....	43
5.4 Redox-Flow Batterie.....	45
6. Wirtschaftliche Betrachtung.....	51
6.1 Fronius Symo Hybrid 6.0.....	52
6.2 SMA Sunny Island 6.0.....	53
6.3 Gildemeister CellCube.....	54
7. Auswahl des Speichersystems.....	55

7.1Auswahl anhand technischer Eigenschaften.....	55
7.2Auswahl anhand wirtschaftlicher Eigenschaften.....	58
7.3Auswahl des Systems.....	62
8.Fazit und Ausblick.....	63
Literaturverzeichnis.....	65

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau einer Natrium-Schwefel Zelle	10
Abbildung 2: Funktionsweise einer Natrium-Schwefel Zelle	11
Abbildung 3: Aufbau und Funktionsweise einer Redox-Flow Batterie	13
Abbildung 4: Analyse Gesamtverbrauch, Donnerstag, 15.01.2015	16
Abbildung 5: Analyse Gesamtverbrauch, Donnerstag, 17.07.2014.....	17
Abbildung 6: Analyse Gesamtverbrauch mit Photovoltaik Produktion, Donnerstag, 15.01.2015.....	19
Abbildung 7: Analyse Gesamtverbrauch mit Photovoltaik Produktion, Donnerstag, 17.07.2014.....	21
Abbildung 8: Analyse Netzbezug, Donnerstag, 17.07.2014.....	29
Abbildung 9: Analyse Netzbezug, Donnerstag, 15.01.2015.....	30
Abbildung 10: Aufbau Speichersystem Fronius Symo Hybrid.....	33
Abbildung 11: Aufbau Speichersystem SMA Sunny Island.....	39
Abbildung 12: Aufbau Speichersystem CellCube	43
Abbildung 13: Aufbau Speichersystem CellCube	44
Abbildung 14: Amortisation Symo Hybrid.....	50
Abbildung 15: Amortisation Sunny Island.....	51
Abbildung 16: Amortisation CellCube.....	52
Abbildung 17: Zusammenfassung Amortisation Speichersysteme.....	57
Abbildung 18: Fortsetzung Amortisation Sunny Island (Abb. 15).....	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften Lithium-Ionen Batterie.....	7
Tabelle 2: Eigenschaften Blei-Gel Batterie.....	9
Tabelle 3: Eigenschaften Natrium-Schwefel Batterie.....	12
Tabelle 4: Eigenschaften Redox-Flow Batterie.....	15
Tabelle 5: Anforderungen Speichersystem.....	27
Tabelle 6: Eigenschaften Fronius Symo Hybrid.....	34
Tabelle 7: Eigenschaften SMA Sunny Island.....	38
Tabelle 8: Eigenschaften Gildemeister CellCube.....	44
Tabelle 9: Berechnung Systemwirkungsgrad der Speichersysteme.....	50
Tabelle 10: Berechnung spezifische Energie der Speichersysteme.....	51
Tabelle 11: Berechnung spezifische Kosten der Speichersysteme.....	55

Formelverzeichnis

η	– Wirkungsgrad
P_{entladen}	– entladene Leistung
P_{laden}	– geladene Leistung
E_{entladen}	– entladene Energie
E_{laden}	– geladene Energie
e_{vol}	– Energie je Volumen
E	– Energie
V	– Volumen
m	– Masse
P_{vol}	– Leistung je Volumen
P_{spez}	– Leistung je Masse

Abkürzungsverzeichnis

DC	– Gleichstrom
AC	– Wechselstrom
PV	– Photovoltaik
DoD	– Depth of Discharge
EVU	– Energieversorgungsunternehmen
MPP	– Maximum Power Point

Einleitung

1. Einleitung

Die Strompreise sind in den letzten Jahren stark angestiegen. Im Jahr 2000 betragen die Kosten für eine Kilowattstunde 0,15€, wogegen man im Jahr 2013 für eine Kilowattstunde durchschnittlich 0,28€ bezahlt hat¹. Dies ist eine Steigerung von 86%. Daher haben viele Eigenheimbesitzer begonnen, ihren eigenen Strom zu produzieren, mit Hilfe von Photovoltaik- und kleinen Windkraftanlagen. Ziel ist es, die Stromkosten im Haus zu senken und unabhängiger von Energiepreisschwankungen zu werden.

Der Nachteil an der „grünen Energie“ ist jedoch, dass man sie nicht beeinflussen kann. Sie ist nicht steuerbar, sondern von Einflüssen wie Wetter, Tages- und Jahreszeit abhängig. Das macht es so gut wie nicht möglich den gesamten Verbrauch darüber abzudecken.

Um die Effizienz und den Eigenverbrauch zu steigern, werden Energiespeicher eingesetzt.

Ziel der Bachelorarbeit ist eine theoretische Betrachtung von Speichersystemen unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit. Dabei werden herkömmliche Speicherlösungen und neue Systeme untersucht, dimensioniert und verglichen. Welches Speichersystem eignet sich aus aktueller Sicht am besten für ein Einfamilienhaus?

Als Beispiel dient ein Einfamilienhaus mit vier Personen im Magdeburger Umfeld. Mit Hilfe eines Lastprofils für einen Tag im Sommer und einen Tag im Winter, soll veranschaulicht werden, wie sich die Energieerzeugung auf den Verbrauch auswirkt. Dafür wurden die Zählerstände aus dem Jahr 2013 abgelesen.

Im Anschluss werden auf nötige Eigenschaften der Anlagenkomponenten und ihre Relevanz für das Haus eingegangen.

¹ Oschmann 2012, <http://www.stromvergleich.de/strompreise>

Einleitung

Das anfolgende Kapitel beschäftigt sich mit den konkreten Systemen und deren Vorteilen und Nachteilen. Des Weiteren folgt eine Simulation für ein Jahr mit, einem Standard-Lastprofil.

Die Auswertung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit findet im nächsten Punkt statt, mit einer Tabelle über den Abbau der Investitionskosten von Jahr zu Jahr.

Abschließend werden die Energiespeicher jeweils aus dem Blickwinkel der Technik und der Wirtschaftlichkeit betrachtet und ein passendes System ausgewählt.

2. Aufbau und Funktionsweise

2.1 Lithium-Ionen Batterie

Beim Entladen einer Lithium-Ionen Batterie beginnen die Lithium-Ionen der negativen Elektrode ein Elektron abzugeben. Dieser Ionen-Fluss dient zum Erhalten der neutralen Ladung der Elektroden.

Das abgegebene Elektron gelangt über den äußeren Stromkreis, also den Verbraucher, zur positiven Elektrode. Zeitgleich bewegt sich die gleiche Anzahl von Ionen von der negativen Elektrode zur positiven Elektrode durch das Lithium-Salz Elektrolyt und den Separator. Durch den Separator können nur die Lithium-Ionen passieren, für Lösungsmittelmoleküle ist sie undurchlässig, so wird ein Kurzschluss in der Zelle verhindert. An der positiven Elektrode verweilen sie im stark ionisierten, geladenen Zustand in einem Lithium-Metalloxid (z.B. LiCoO_2).

Positive Elektrode:



Die positiv geladenen Lithium-Ionen werden an der negativen Elektrode meist in Graphit zwischen Kohlenstoffebenen gelagert ($n\text{C}$). Bei dieser Einlagerung entsteht eine Verbindung mit Lithium ($\text{Li}_x n\text{C}$), welche eine schützende Oxidationsschicht, auf der negativen Elektrode bildet.

Negative Elektrode:



Gesamtgleichung:



2 Wosnitza, Hilgers 2012: 71

3 Wosnitza, Hilgers 2012: 71

4 Wosnitza, Hilgers 2012: 72

Aufbau und Funktionsweise

Das Innere der Zelle muss stets wasserfrei gehalten werden, da es in Verbindung mit dem Elektrolyt zu einer starken Wärmeentwicklung und zur Beschädigung des Akkumulators kommen würde.⁵

Vorteil	Nachteil
hohe Energiedichte (100-120Wh/kg) und Leistungsdichte (1,8kW/kg)	aufwendige Herstellung, dem entsprechend Preisin-tensiv
hohe Zyklenzahl	besitzt leicht brennbare Komponenten und reagiert heftig mit Wasser
sind schnelllade- und entladefähig	benötigt thermische Überwachung im Betriebszu-stand
Wirkungsgrad von >95%	aufwendiges Lademanagement
die Technologie ist noch nicht völlig ausgeschöpft	Batterie-Packs benötigen Sicherheitsschaltung, um externe Kurzschlüsse in Zellen zu verhindern

Tabelle 1: Eigenschaften Lithium-Ionen Batterie⁶

⁵ Wosnitza, Hilgers 2012: 68-73, 76ff

⁶ Wosnitza, Hilgers 2012: 68-79

Aufbau und Funktionsweise

2.2 Blei Batterien

Bestandteile einer Blei Batterie sind positive und negative Elektrode und Elektrolyt. Die negative Elektrode besteht aus einer porösen Bleiplatte und die positive Elektrode aus Bleioxid, welches in Kunststoff eingebettet ist. Blei-Gel Batterien besitzen einen dickflüssigen Elektrolyten, eine Mischung aus Kiesel- und Schwefelsäure.

Bei Bleiakkumulatoren werden beim Entladen im geschlossenen Stromkreis die negative Elektrode und die positive Elektrode gleichzeitig betrachtet.

An der positiven Elektrode gibt das Blei in Verbindung mit der Schwefelsäure Elektronen an das Bleioxid weiter und es entsteht Bleisulfat 2PbSO_4 und Wasser.



Nun wird die negative Elektrode betrachtet. Hier entstehen Bleisulfat und Elektronen, wenn Bleiatome mit dem Elektrolyt zusammen kommen.



Durch die unterschiedlichen Spannungspotenziale die am Pluspol $U=1,67\text{V}$ bzw. Minuspol $U=-0,37$ vorliegen, ergibt sich eine Gesamtspannung von $U_{\text{Batterie}}=2,03\text{V}$.⁹



7 Wosnitza, Hilgers 2012: 61

8 Wosnitza, Hilgers 2012: 61

9 Vgl. Rummich 2007:154f, Vgl. Wosnitza, Hilgers 2012:60f, vgl. Richey Stand: 2013, http://biowasserstoff-magazin.richey-web.de/pdf/Themen_Akkumulatoren.pdf

10 Wosnitza, Hilgers 2012: 61

Aufbau und Funktionsweise

Vorteil	Nachteil
preiswert	geringe Energiedichte 30Wh/kg
ausgereifte Technologie	Entladetiefe von 50%
ausgebaute Infrastruktur bezüglich des Recyclings	geringe Zyklenzahl von 2000
kein Memory-Effekt	sind temperaturempfindlich - Leistungseinbußen bei <10°C
Wirkungsgrad 85%	Blei ist Umweltschädigend

Tabelle 2: Eigenschaften Blei-Gel Batterie¹¹

2.3 Natrium-Schwefel Batterien

Die Natrium-Schwefel-Zelle ist zylindrisch aufgebaut. Bestandteil ist hier zum einen die negative Elektrode, die mit flüssigem Natrium umgeben ist. Zum anderen hat die positive Elektrode zusätzlich flüssigen Schwefel und weist einen Kohlefilz auf. Zwischen beiden Elektroden befindet sich eine ionenleitende Keramik, bestehend aus Aluminiumoxid, als Elektrolyt.

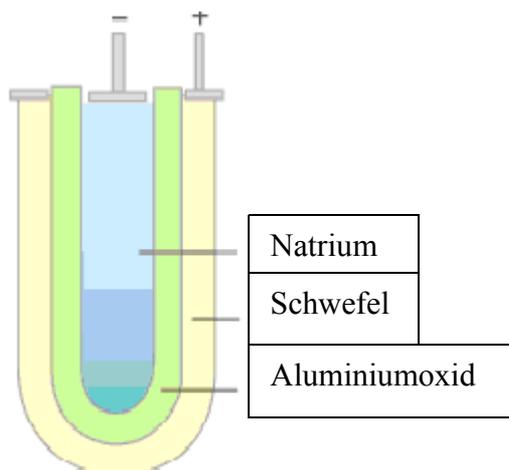


Abbildung 1: Aufbau einer Natrium-Schwefel Zelle ¹²

¹¹ Vgl. Sterner, Stadler 2014:212-217

¹² Firma NGK 2014, <http://www.ngk.co.jp/english/products/power/nas/principle/index.html>

Aufbau und Funktionsweise

Die Natrium-Schwefel-Batterie benötigt eine Betriebstemperatur von 300 °C bis 350 °C. Deshalb wird die Batterie mit Vakuumwärmedämmung versehen.

Natrium und Schwefel liegen nun in flüssiger Form vor und sind durch den Elektrolyt, meist aus keramisch dotiertem Aluminiumoxid bestehend, voneinander getrennt.

Beim Entladevorgang gibt Natrium an der negativen Elektrode ein Elektron ab, welches über den äußeren Stromkreis zur positiven Elektrode fließt. Zeitgleich wandert die gleich Anzahl von positiv geladenen Natrium Ionen (Na^+), durch das Elektrolyt zum flüssigen Schwefel (S) und es entsteht Natriumpolysulfid (Na_2S_x). Nur Ionen können das Aluminiumoxid passieren, für Elektronen wirkt es als Isolator. Beim Laden wird dieser Prozess umgekehrt.

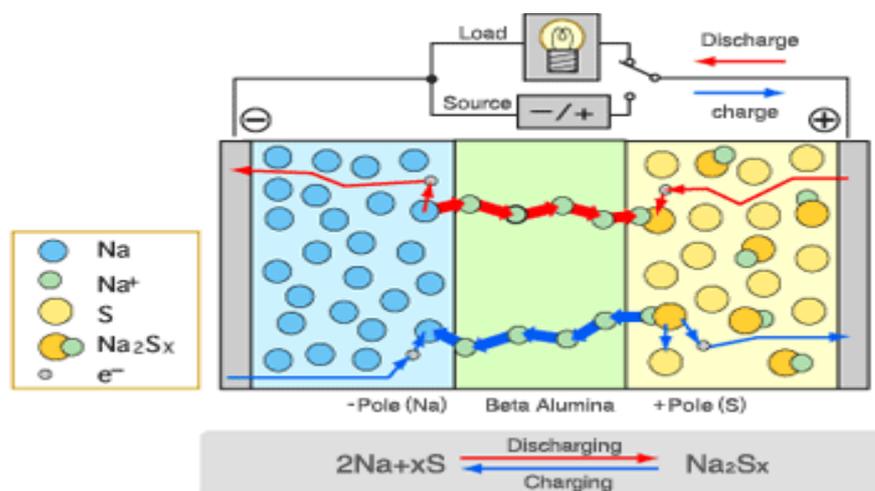


Abbildung 2: Funktionsweise einer Natrium-Schwefel Zelle

13

NaS-Zellen besitzen eine Entladetiefe von 65%. Bei tieferer Entladung bilden sich verschiedene Natriumpolysulfide (Na_2S_x), wodurch die Spannung beim Entladevorgang auf bis zu 1,78V sinkt.

13 Firma NGK 2014, <http://www.ngk.co.jp/english/products/power/nas/principle/index.html>

Aufbau und Funktionsweise

Wird der Akkumulator jedoch weiter entladen, bildet sich Natriumdisulfid (Na_2S_2), welches zu einem hohen Innenwiderstand führt, dadurch große thermische Verluste verursacht und zur Beschädigung der Zelle führt.¹⁴



Vorteil	Nachteil
keine Verluste bei der chemischen Reaktion, da keine Nebenreaktion	hohe Wärmeverluste,
hohe Zyklenbelastbarkeit von ca. 5000	aufwendige Steuerung zum Heizen und Kühlen
hohe Energiedichte 120Wh/kg	geringe thermische Zyklenzahl von ca. 30
Keine Selbstentladung	Batterie benötigt Wärme im Stand-By
Wartungsfrei	Aufheizen der Batterie aus kaltem Zustand 4-10h
	sehr wenige Anbieter von System weltweit
	Technologie noch nicht ausgereift

Tabelle 3: Eigenschaften Natrium-Schwefel Batterie¹⁸

¹⁴ Vgl. Wessel, Schabbach, Link, Fischer 2014:667ff, Vgl. Neupert, Euting, Kretschmer, Notthoff, Ruhlig, Weimert 2008:49f, <http://www.ngk.co.jp/english/products/power/nas/principle/index.html>

¹⁵ Rummich 2007:164

¹⁶ Rummich 2007:164

¹⁷ Rummich 2007:164

¹⁸ Vgl. Sterner, Stadler 2014:271-281

Aufbau und Funktionsweise

2.4 Redox-Flow Batterie

Redox-Flow Batterien besitzen ebenfalls wie die Natrium-Schwefel Batterie ein flüssiges Elektrolyt. Dieses befindet sich in zwei voneinander getrennten Tanks. Das Elektrolyt besteht je nach Batterie-Typ aus einer Salzlösung, wie z.B.: Natriumbromid, Zink-Brom, Uran, oder aus der am weitesten verbreiteten Variante mit Vanadium, auf die sich das Beispiel bezieht. Die Salzlösung wird mit Hilfe von jeweils einer Pumpe pro Tank in Richtung Membran gepumpt.

Die Membran besteht aus Nafion und dient auch wie bei den anderen Speichersystemen als Separator, der nur von Ionen passiert werden kann. Eine Vermischung beider Lösungen würde eine völlige Selbstentladung zur Folge haben. Mit einem Tausch hingegen könnte eine entladene Batterie wieder mit gesamter Kapazität genutzt werden.

Die Elektrolytmenge bzw. die Größe der Tanks bestimmen die zu speichernde Energie. Einfluss auf die Leistung hat der relativ kostenintensive Konverter. Bestandteile sind unter anderem Sensoren, Steuereinrichtungen, Pumpen, die eigentliche Membran und zwei Elektroden. Die Fläche der Elektroden ist hier ausschlaggebend für die Leistung. Sie bestehen meist aus Kohlenstoff-Filz, da dieser eine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzt.

Das Speichersystem kann mit Tanks und Convertern beliebig ergänzt werden, um die gewünschte Leistung oder Energie zu erhalten.

Aufbau und Funktionsweise

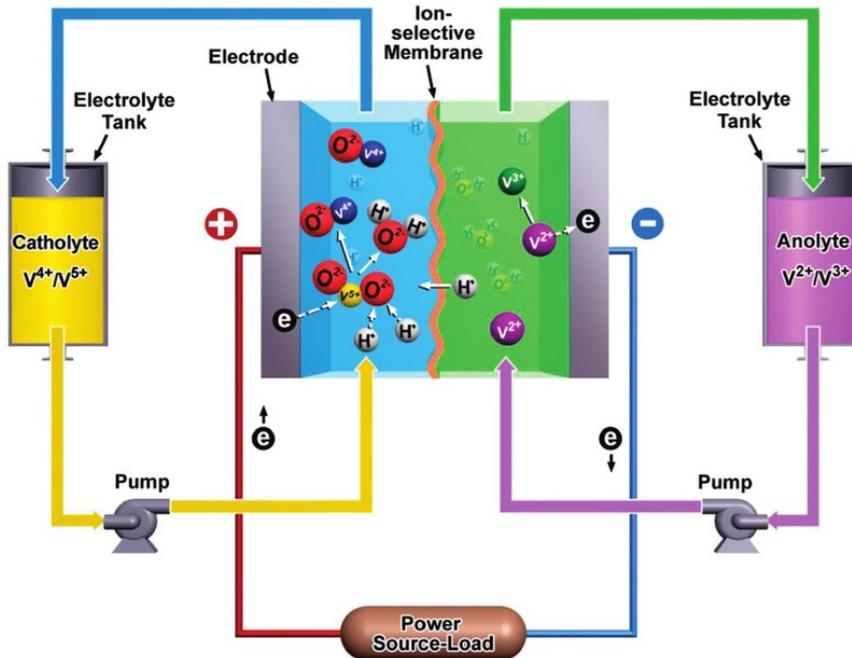


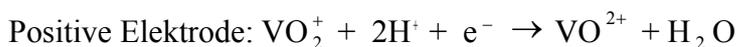
Abbildung 3: Aufbau und Funktionsweise einer Redox-Flow Batterie

19

Die Funktionsweise einer Vanadium-Redox-Flow Batterie macht sich die unterschiedlichen Wertigkeiten von Vanadium zu Nutze, wobei der Name des Batterietyps schon einiges über das System verrät. Re - dox - Flow, weil sich hinter dem Prozess eine Reduktion (Aufnahme von Elektronen) und eine Oxidation (Abgabe von Elektronen) verbergen. Flow bedeutet so viel wie „fließen“ und bezieht sich auf das Elektrolyt in flüssiger Form.

Beide Elektrolyte werden über die jeweiligen Pumpen zu der Membran transportiert.

An der negativen Elektrode zerfällt im ersten Schritt schweflige Säure mit dem Elektrolyt. Dabei werden Ionen freigesetzt, die durch die Membran wandern. Durch die Abgabe des Ionen bildet sich aus Sauerstoff und Wasserstoff, Wasser (H_2O) bzw. Sauerstoff und Vanadium, Dyvanadylkationen (VO^{2+}).



Gl. 10²⁰

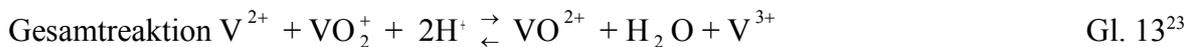
19 BioAge Group 2015, <http://bioage.typepad.com/.a/6a00d8341c4fbe53ef0147e3371789970b-800wi>
20 Sterner, Stadler 2014:284

Aufbau und Funktionsweise

Dies hat zur Folge, dass zweiwertiges Vanadium (V^{2+}) ein Elektron frei setzt, welches nun als dreiwertiges Vanadium (V^{3+}) vorliegt.



Gleichzeitig wandert ein Elektron zum Ladungsausgleich über den äußeren Stromkreis von der negativen zur positiven Elektrode. Dort wird es von fünfwertigen Vanadium (V^{5+}) aufgenommen und auf vierwertiges Vanadium (V^{4+}) reduziert.



Vorteil	Nachteil
keine Verluste beim Speichern, da keine Nebenreaktion	Verluste durch Pumpen ca.10%-15%
hohe Zyklenbelastbarkeit von ca. 10000	geringe Energiedichte
keine Begrenzung durch Entladetiefe	wenige Anbieter von Systemen
Keine Selbstentladung	Temperatursteuerung nötig
keine aufwendige Ladestrategie (keinen Einfluss auf Zyklen/Lebensdauer)	Technologie noch nicht ausgereift

Tabelle 4: Eigenschaften Redox-Flow Batterie

²¹ Sterner, Stadler 2014:284

²² Sterner, Stadler 2014:284

²³ Sterner, Stadler 2014:285

Ist-Betrachtung

3. Ist-Betrachtung

3.1 Betrachtung des Hauses ohne Photovoltaik Anlage

Bei dem zu betrachtenden Objekt handelt es sich um ein Einfamilien Haus im Magdeburger Umfeld.

Es leben dort vier berufstätige Personen, die zum Teil in Schichten arbeiten. Mittels Zählerablesung wurde im Jahr 2013 ein Verbrauch von 4030kWh ermittelt.

Die folgenden Abbildungen zeigen 2 Lastgänge. Untersucht wird der Lastgange am 15.01.2015 Abb. 3 und am 17.07.2014 Abb. 4. Durch die Diagramme soll aufgezeigt werden, wie sich der Verbrauch über den Tag im Sommer bzw. Winter verteilt.

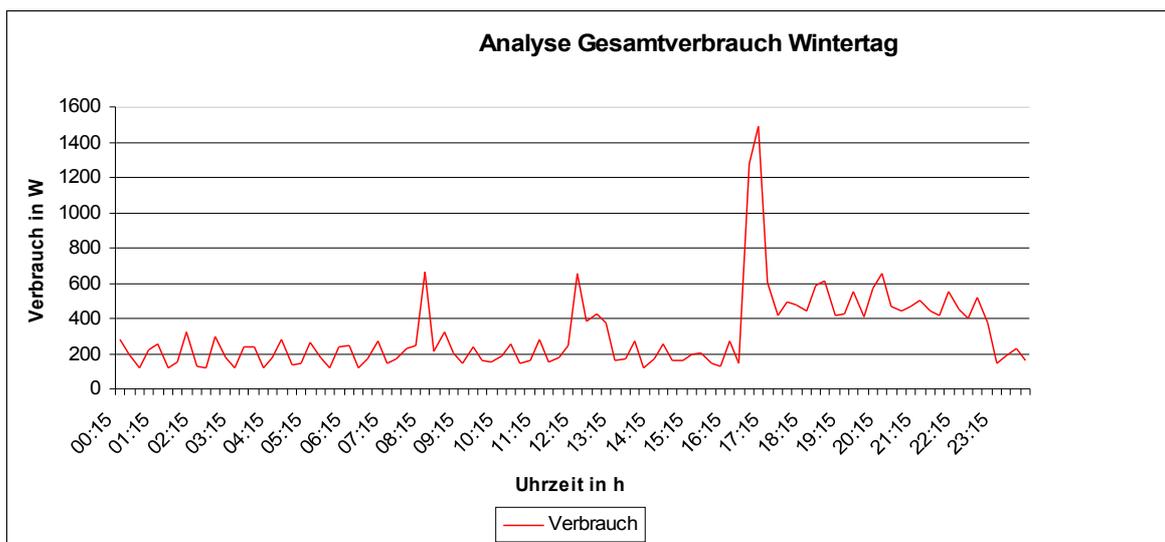


Abbildung 4: Analyse Gesamtverbrauch, Donnerstag, 15.01.2015

Abb. 4 zeigt den Gesamtverbrauch im Haushalt, im Winter. Zu sehen ist eine Grundlast von 150-300Wh bis 17Uhr.

Bis auf zwei Anstiege des Verbrauches, am Vormittag und zur Mittagszeit, gibt es keine Abweichungen. 17.15Uhr werden die ersten Familienmitglieder nach der Arbeit die Tätigkeit im Hause wieder aufnehmen und das Resultat ist ein starker Anstieg der Leistung.

Ist-Betrachtung

Ab 18.30Uhr pegelt sich der durchschnittliche Bezug auf rund 500Wh ein, bis er sich ab 23.30 Uhr wieder auf 150-300Wh absenkt. Der Gesamtverbrauch am Tag beträgt 7,4kWh

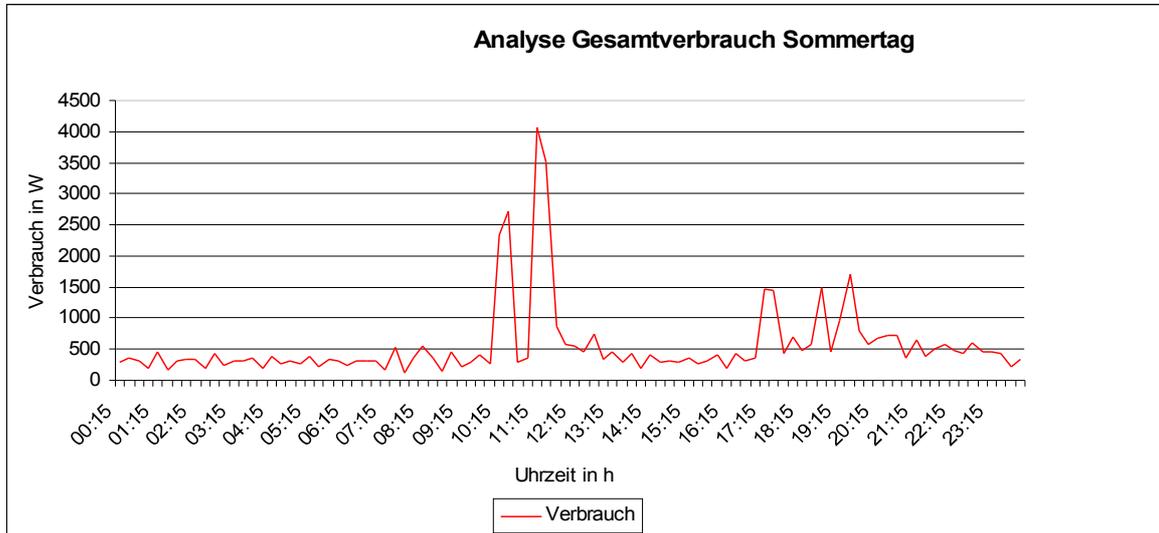


Abbildung 5: Analyse Gesamtverbrauch, Donnerstag, 17.07.2014

Wie im Winter verhält sich die Grundlast im Sommer Abb. 5 bis zum späten Vormittag relativ konstant, meist zwischen 250-450Wh. Ab 10.30Uhr gibt es zwei typische Spitzen in der Mittagszeit, in der Verbraucher wie z.B. ein Herd, oder Ofen genutzt werden, die eine größere Leistung benötigen. Der maximale Netzbezug beträgt hier 4066W. Im Anschluss fällt die Last wieder auf das vorherige Niveau ab. Am Abend steigt der Verbrauch an und pegelt sich um ca. 500W ein. Auch im Sommer lässt sich gut erkennen, dass ab 17.15Uhr die Familie von der Arbeit zurückgekehrt ist und vermehrt im Haus arbeitet.

Über den Tag fällt ein Verbrauch von 13,4kWh an.

Im Vergleich zwischen Sommer und Winter wird festgestellt, dass die beiden Lastprofile sich ähnlich verhalten. Der Verbrauch im Sommer ist höher, was relativ untypisch ist, da im Winter meist mehr Energie benötigt wird. Ausschlaggebend hierfür ist der hohe Bezug in der Mittagszeit und der Anstieg am Abend.

Ist-Betrachtung

Da im Haus weitestgehend energiesparende Haushaltsgeräte verwendet werden und auch die Beleuchtung mit LEDs realisiert worden ist, gibt es an dieser Stelle nur wenig Potential zur Verbrauchsminimierung.

Durch eine Photovoltaik Anlage kann Energie produziert werden. Dies hätte den Vorteil, dass man tagsüber selbst produzierte Energie zur Deckung des Eigenverbrauches verwendet. Energie, die nicht im Haus verwendet werden kann, weil der Eigenverbrauch abgedeckt ist, wird in das Stromnetz des Energieversorgungsunternehmens eingespeist und somit verkauft. Pro kWh erhält man, bei einer Installation der Anlage im Juni 2014, 13,01 Cent.²⁴

Dadurch können Stromkosten durch den Eigenverbrauch gesenkt und die Differenz verkauft werden.

3.2 Betrachtung des Hauses mit Photovoltaik Anlage

Die Photovoltaik-Anlage hat eine Leistung von 7,84kWp. Es befinden sich 28 Module mit je 280Wp auf dem Dach der Garage. Die Module sind exakt nach Osten und Westen ausgerichtet. Da die Sonne im Osten aufgeht und im Westen untergeht, ist eine gute Ausnutzung der Einstrahlung gewährleistet. Somit kann die Produktion früh starten und möglichst lange bis in den Abend hinein fortgesetzt werden. Weiterhin hat es zur Folge, dass eine unnötig hohe Spitze am Mittag vermieden wird. Ziel ist es, möglichst viel Energie selbst zu verbrauchen und den Eigenverbrauchsanteil auf einem hohen Niveau zu halten.

Der Eigenverbrauchsanteil beschreibt die Menge an Energie, die von der Photovoltaik-Anlage produziert und selbst im Haus verbraucht wird.

²⁴ BSW Solar 2014, http://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/eeg_verg_uebers.pdf

Ist-Betrachtung

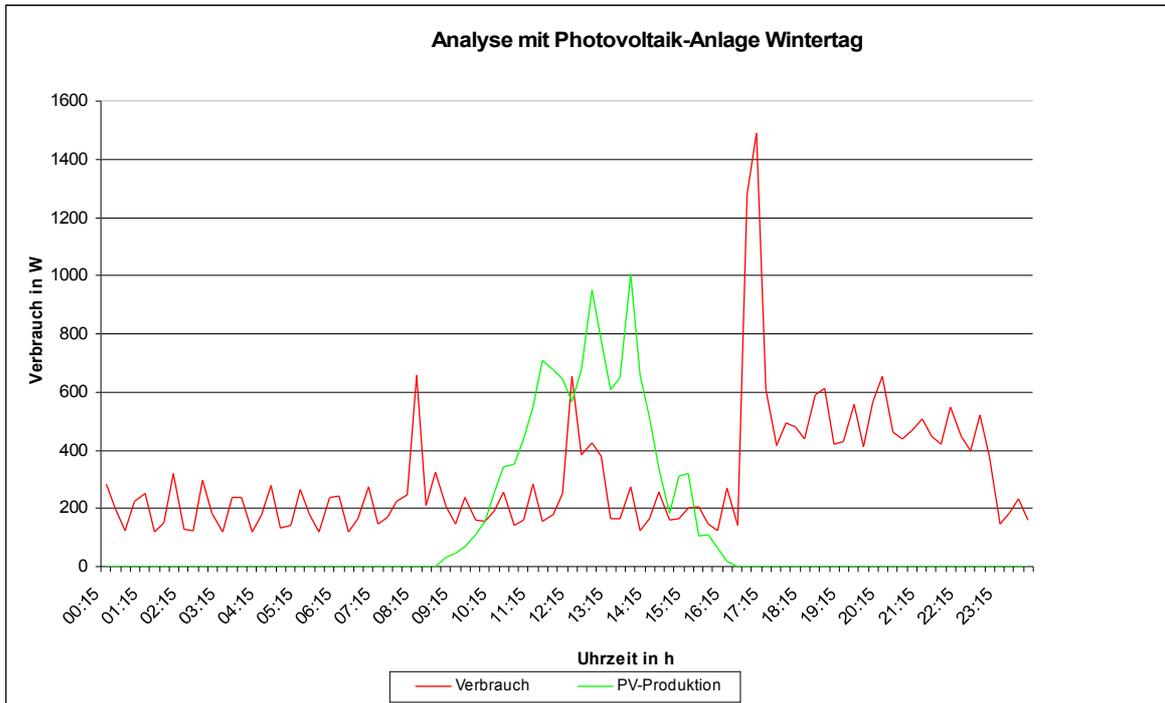


Abbildung 6: Analyse Gesamtverbrauch mit Photovoltaik Produktion, Donnerstag, 15.01.2015

Durch kürzere Sonneneinstrahlung im Winter, deckt die produzierte Energie nur einen Teil des Verbrauches im Haushalt ab. Weiterhin ist es oftmals nur trüb und bedeckt, so dass die Sonne nur sehr selten hervorkommt. Doch auch bei diffuser Einstrahlung produziert die Anlage Energie.

Somit wird von 10.30Uhr-16Uhr der Verbrauch nahezu vollständig im Haus abgedeckt (Abb. 6).

Etwa 3kWh werden im Laufe des Tages produziert. Davon werden 0,77kWh sofort genutzt und der Rest in das Netz des Energieversorgungsunternehmens eingespeist bzw. verkauft.

Eingespeiste Energie $w_{winter} = \text{produzierte Energie} - \text{Eigenverbrauch}$

Gl. 14

$$= 3\text{kWh} - 1,4\text{kWh} = 1,6\text{kWh}$$

Ist-Betrachtung

Da die Familie 0,26 € pro bezogener kWh bezahlt, aber nur 0,13 € für den Verkauf erhält, ist es das Ziel, diese erzeugten 1,6kWh größtenteils selbst im Haus zu verbrauchen.

Die Eigenverbrauchsquote ist das prozentuale Verhältnis von selbst genutzter zu produzierter Energie. Für den Tag im Winter würde das bedeuten²⁵:

$$\begin{aligned} \text{Eigenverbrauchsquote}_{w_{\text{inter}}} &= \frac{\text{Eigenverbrauch}}{\text{produzierteEnergie}} * 100\% && \text{Gl. 15} \\ &= \frac{1,4kWh}{3kWh} * 100\% = 46,6\% \end{aligned}$$

Ein anderes Maß ist der Autarkiegrad. Dieser gibt an, zu welchem Anteil sich der Haushalt selbst mit Strom aus der Produktion versorgt. Ein Autarkiegrad von 100% bedeutet, dass die Möglichkeit besteht, sich vollkommen selbst mit Strom zu versorgen und dass kein Bezug aus dem Netz nötig ist²⁶.

$$\begin{aligned} \text{Autarkiegrad}_{w_{\text{inter}}} &= \frac{\text{Eigenverbrauch}}{\text{Gesamtverbrauch}} * 100\% && \text{Gl. 16} \\ &= \frac{1,4kWh}{7,4kWh} * 100\% = 18,9\% \end{aligned}$$

25 Firma SMA 2012, <http://www.sma-sunny.com/2012/02/06/wie-funktioniert-eigenverbrauch-von-solarstrom/>

26 Firma SMA 2012 <http://www.sma-sunny.com/2012/02/06/wie-funktioniert-eigenverbrauch-von-solarstrom/>

Ist-Betrachtung

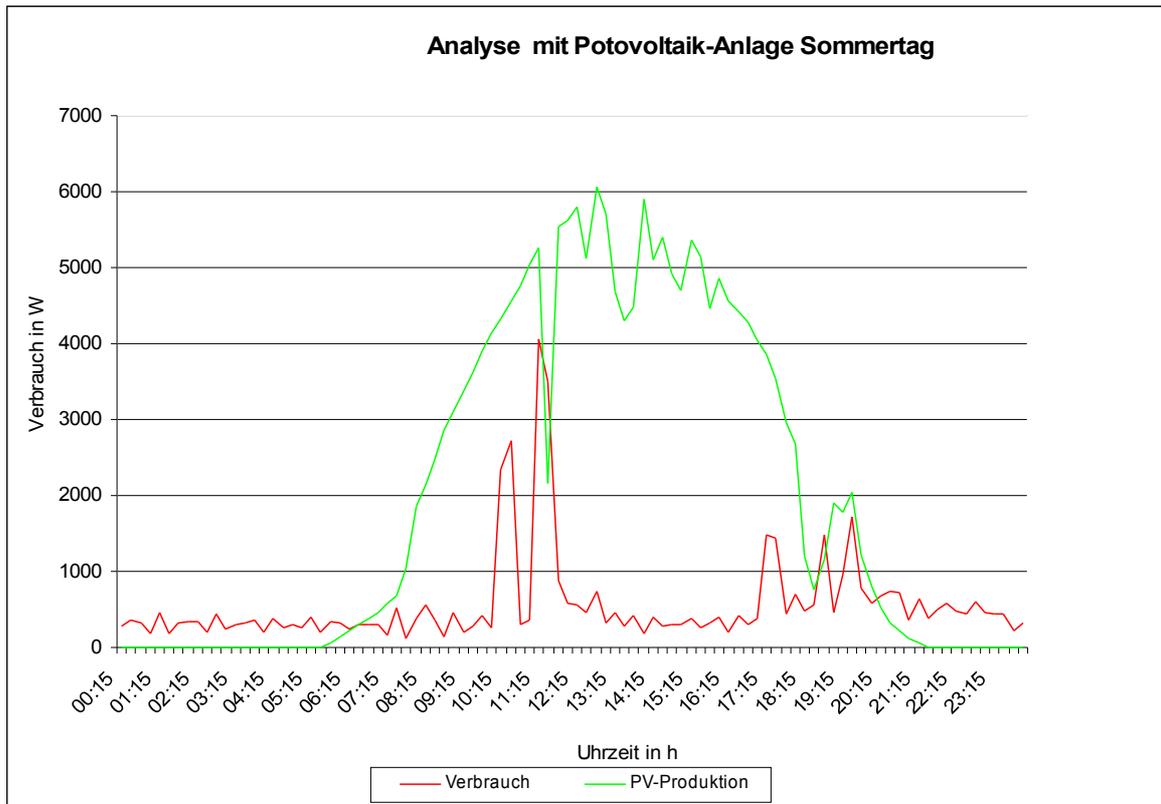


Abbildung 7: Analyse Gesamtverbrauch mit Photovoltaik Produktion, Donnerstag, 17.07.2014

Abb. 7 veranschaulicht die Verteilung des Verbrauches und der produzierten Energie im Sommer. Hier wird besonders gut sichtbar, wie wichtig direkte Sonneneinstrahlung und der Stand der Sonne ist. Die Photovoltaik Anlage deckt nahezu den kompletten Verbrauch von 7Uhr bis 21Uhr ab. Es werden 48,3kWh Energie erzeugt und davon 9,5kWh direkt im Haushalt genutzt.

$$\text{Eingespeiste Energie}_{\text{Sommer}} = \text{produzierte Energie} - \text{Eigenverbrauch}$$

Gl. 17

$$= 48,3\text{kWh} - 9,5\text{kWh} = 38,8\text{kWh}$$

Ist-Betrachtung

Im Sommer besteht ein Überschuss von 38,8kWh, die nicht im Haus verwendet werden können. Nun werden ebenfalls Eigenverbrauch und Autarkiegrad betrachtet, die sich aber zum Winter deutlich unterscheiden werden.

Die Eigenverbrauchsquote wird sinken, da deutlich mehr Energie produziert wird, aber der Eigenverbrauch dazu noch relativ gering ist. Im Gegensatz dazu ist die Versorgung im Sommer von 7Uhr bis 21Uhr gewährleistet, was zu einer erheblichen Steigerung des Autarkiegrades führt.

$$\begin{aligned} \text{Eigenverbrauchsquote}_{\text{Sommer}} &= \frac{\text{Eigenverbrauch}}{\text{produzierte Energie}} * 100\% && \text{Gl. 18} \\ &= \frac{9,5kWh}{48,3kWh} * 100\% = 19,7\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Autarkiegrad}_{\text{Sommer}} &= \frac{\text{Eigenverbrauch}}{\text{Gesamtverbrauch}} * 100\% && \text{Gl. 19} \\ &= \frac{9,5kWh}{13,4kWh} * 100\% = 70,9\% \end{aligned}$$

Wie erwartet sinkt der Eigenverbrauch, wohingegen die autarke Versorgung zunimmt.

In Abb. 7 wird gut sichtbar, wie viel Energie produziert wird. Mittels eines Speichersystems könnte die Energie der Netzeinspeisung genutzt werden, um mit ihr abends, nachts und in den frühen Morgenstunden den Verbrauch im Haus abzudecken. Dies hätte eine Steigerung von Autarkie und Eigenverbrauch zur Folge.

Anforderungen an ein Speichersystem

4. Anforderungen an ein Speichersystem

4.1 Rahmenbedingungen im Haus

Der Aufstellort des Speichers ist von dem jeweiligen Speichersystem abhängig.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, das Speichersystem in Nähe der PV-Anlage unterzubringen.

Im Haus selbst befinden sich ein Hauswirtschaftsraum und eine Aufstellmöglichkeit mit den Abmaßen (L x B x H) 3,5m x 1,5m x 2,5m.

Das Grundstück selbst bietet auch einen Stellplatz, wobei der Speicher den Witterungseinflüssen und den Temperaturbedingungen ausgesetzt wäre.

Des Weiteren ist die Garage, auf der die PV-Anlage montiert ist, ebenfalls als Installationsort geeignet. Hier ist eine Fläche (L x B x H) von 5m x 2m x 2,5m verfügbar. Die Garage ist jedoch nicht beheizt, so dass es im Winter möglicherweise zu Frost kommt.

Hierbei spielen Faktoren eine Rolle wie: die Temperatur, die Maße des Bereiches, ist eine Lüftung vorhanden und wie weit ist der Wechselrichter entfernt.

Anforderungen an ein Speichersystem

4.2 Anforderungen an das Speichersystem

Die Wirtschaftlichkeit entscheidet darüber, ob das System gewinnbringend ist, oder nur Kosten verursacht. Hierbei ist nicht nur die Anschaffung zu betrachten. Betriebskosten, Pumpenlaufzeit oder z.B. der Stand-by-Betrieb sind auch fest mit der Wirtschaftlichkeit verankert und werden dem Wirkungsgrad des Gesamtsystems zur Last gelegt.

Bezogen auf das Beispielhaus ist die Wirtschaftlichkeit der wichtigste Punkt überhaupt. Es ist erstrebenswert, die Investitionskosten niedrig zu halten, um eine schnelle Amortisation zu erreichen und möglichst viel Energiekosten zu sparen.

Die Lebensdauer wird unterteilt in Zyklenzahl und kalendarische Lebensdauer. Die kalendarische Lebensdauer entspricht einer Haltbarkeit nach Jahren. Meist wird jedoch die Zyklenzahl als Maß für die Lebensdauer angegeben. Sie beschreibt, wie oft ein System zu 100% geladen und wieder entladen werden kann. Die entsprechende Entladetiefe muss stets eingehalten werden, da das jeweilige System sonst Schaden nimmt.²⁷

Die Lebensdauer steht fest in Verbindung zur Wirtschaftlichkeit. Umso länger der Speicher in Betrieb ist, desto größer wird der finanzielle Vorteil. Daher ist eine hohe Lebensdauer wünschenswert.

Der Wirkungsgrad gibt durch das Verhältnis von entladener zu geladener Leistung bzw. Energie an, wie effizient ein System arbeitet.

$$\eta = \frac{P_{\text{entladen}}}{P_{\text{geladen}}} \quad \text{Gl. 20}$$

²⁷ Neupert, Euting, Kretschmer, Notthoff, Ruhlig, Weimert 2008:16

Anforderungen an ein Speichersystem

$$\eta = \frac{E_{entladen}}{E_{geladen}} \quad \text{Gl. 21}$$

Es wird ein Speicher mit einem hohen Wirkungsgrad gesucht, so dass ein möglichst hoher Anteil der produzierten Energie nach dem Speichern wieder entnommen werden kann.

Verluste können unter anderem durch Nebenreaktionen bei der Speicherung selbst auftreten, durch zu lange Leitungswege, Wandlungen oder z.B. Selbstentladung.

Bei der Installation eines Akkumulators im Einfamilienhaus ist sicheres Abschalten im Fehlerfall ein Muss, da Chemikalien bei einer Verbindung im Speicher stark reagieren und austreten können. Dies kann unter anderem enorme Temperaturentwicklungen, Verätzungen des Bereiches oder Explosionen zur Folge haben.

Die Sicherheit der Speichersysteme wird durch Normen, Richtlinien und Schutzeinrichtungen gewährleistet.

Eine hohe Energiedichte bzw. Leistungsdichte ist vorteilhaft. Sie ist das Verhältnis von Energie bzw. Leistung zum Volumen, oder dem Gewicht des gesamten Speichersystems. Durch die spezifischen Größen können unterschiedliche Systeme besser verglichen und beurteilt werden.

Das bedeutet für die Energie auf das Volumen bezogen

$$e_{vol} = \frac{E[Wh]}{V[m^3]} \quad \text{Gl. 22}^{28}$$

Und auf die Masse bezogen

Anforderungen an ein Speichersystem

$$e_{spez} = \frac{E[Wh]}{m[kg]} \quad \text{Gl. 23}^{29}$$

Bei der Leistung ist es

$$P_{vol} = \frac{P[W]}{V[m^3]} \quad \text{Gl. 24}^{30}$$

und

$$P_{spez} = \frac{P[W]}{m[kg]} \quad \text{Gl. 25}^{31}$$

Die Energie- und Leistungsdichte ist ausschlaggebend und wichtig, da der Platz im Beispielhaus begrenzt ist.

Durch die Notstromfähigkeit eines Speichers kann im Falle einer Unterbrechung das Haus weiterhin mit Energie versorgt werden. Die Entladetiefe des Speichers wird minimiert, um bei einem möglichen Stromausfall auf die Reserve zurückzugreifen.

Hier ist es wichtig, zu wissen: „Was soll betrieben werden?“ und „Wie lange muss es betrieben werden?“, um die benötigte Kapazität zur Verfügung stellen zu können.

Die Notstromfunktion ist nicht vom Vorteil, da das System größer ausgelegt werden müsste. Das beeinflusst negativ die Wirtschaftlichkeit, denn die Reserve bleibt größtenteils ungenutzt. Es befindet sich kein Verbraucher im Haus, der zwingend eine dauerhafte Stromversorgung benötigt.

29 Vorlesung 05.05.2014 Energiespeicher

30 Vorlesung 05.05.2014 Energiespeicher

31 Vorlesung 05.05.2014 Energiespeicher

Anforderungen an ein Speichersystem

4.3 Dimensionierung der Speicherkapazität

Für einen rentablen und optimal genutzten Speicher ist die Dimensionierung entscheidend.

Ist die Auslegung zu klein gewählt, wird das System in den frühen Morgenstunden entladen sein. Dies hätte zur Folge, dass der Strom aus dem Netz bezogen werden müsste. Es ist jedoch das Ziel, unter dem wirtschaftlichen Aspekt, möglichst autark zu leben.

Um die benötigte Kapazität passend für das Beispielhaus ermitteln zu können, ist das aufgenommene Lastprofil wichtig. In der Abb. 8 und der Abb. 9 ist der Netzbezug mit Photovoltaik-Anlage für den Tag im Sommer und den Tag im Winter abgebildet.

Hier unterscheidet sich die Produktion, in Beginn bzw. Ende und der Menge an produzierter Energie, die von der Sonneneinstrahlung abhängig ist. Dies beeinflusst den Bezug der Energie aus dem Netz des Energieversorgers.

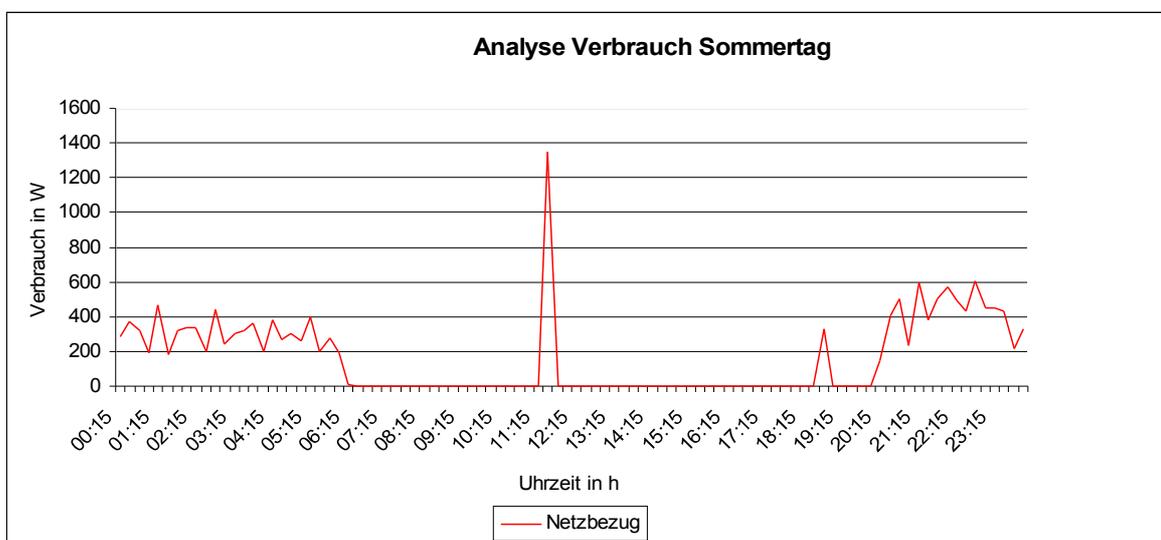


Abbildung 8: Analyse Netzbezug, Donnerstag, 17.07.2014

Im Sommer sollte der Speicher in der Zeit von 20.30Uhr bis 6.15Uhr den Verbrauch im Haus abdecken (Abb. 8). Die aus dem Netz des Energieversorgers bezogene Energie am 17.07.2014 beträgt 3.900Wh und die ins Netz eingespeiste Energie 38.760Wh.

Anforderungen an ein Speichersystem

Da ein deutlicher Produktionsüberschuss vorhanden ist, kann der Speicher ohne Probleme tagsüber geladen werden und die Energie am Abend bzw. nachts abgeben. Der Verbrauch weicht jedoch von Tag zu Tag ab und ist variabel. Somit sollte der Speicher etwas größer ausgelegt werden.

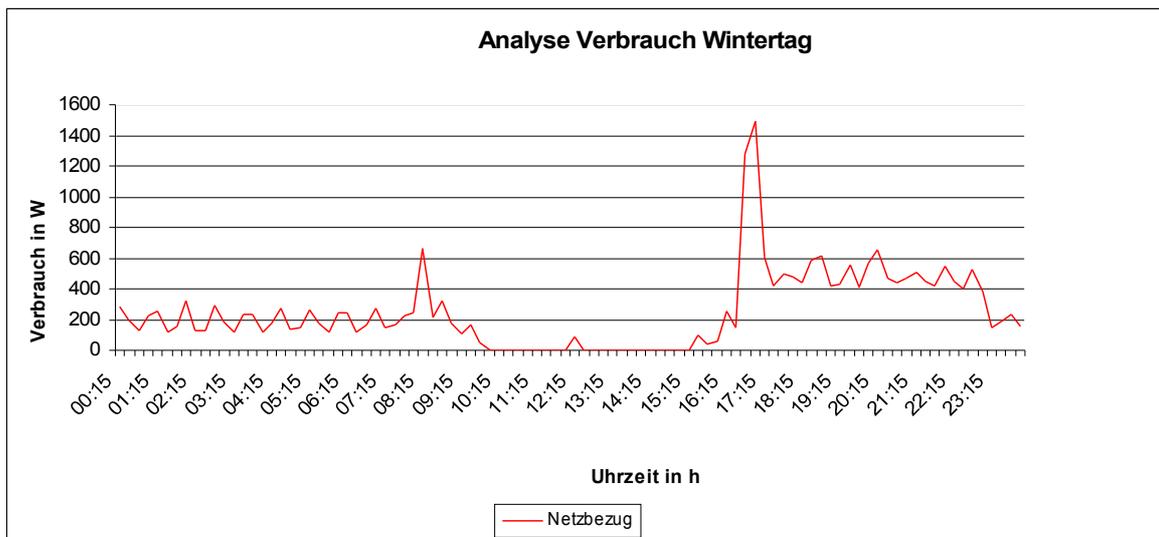


Abbildung 9: Analyse Netzbezug, Donnerstag, 15.01.2015

Im Winter hingegen wird oftmals, wie für diesen Tag, der Ertrag nicht ausreichen, um den Speicher vollständig zu laden. In dem Diagramm wird sichtbar (Abb. 9), dass erst ab 10.30 Uhr der Eigenverbrauch abgedeckt wird und ab 16 Uhr endet. Der Netzbezug beträgt 5956 Wh, eingespeist werden jedoch nur 1620 Wh.

Laut dem Speicherhersteller Fronius lässt sich die Größe der Speicherkapazität bestimmen, indem der Jahresstromverbrauch des Haushaltes durch 1000 dividiert wird, um die Spitzenleistung der Photovoltaik-Anlage zu berechnen. Im Anschluss wird die errechnete Leistung mit 1,2 und 1,5 multipliziert, um die minimale und maximale Speicherkapazität zu bestimmen.³²

32 Firma Fronius 2014, http://www.fronius.com/cps/rde/xbc/SID-1F033B5A-E463E830/fronius_deutschland/Fronius_Symo_Eintauschaktion_Planungsinformationen_v2_398013_snapshot.pdf

Anforderungen an ein Speichersystem

Der Jahresstromverbrauch dividiert durch 1000 entspricht ungefähr dem Stromverbrauch eines Tages Sommer. Daher ist die Analyse des Sommertages entscheidend. Der Faktor 1,2 bzw. 1,5 steht für eine geringe Reserve des Speichers.

Da bereits eine bestehende Photovoltaik-Anlage vorhanden ist, wird der Jahresstromverbrauch durch 1000 dividiert und mit 1,2 und 1,5 multipliziert.

$$\frac{\text{Jahresstromverbrauch}}{1000} * 1,2 = \text{minimale Speicherkapazität} \quad \text{Gl. 26}$$

$$\frac{4.030kWh}{1000} * 1,2 = 4,836 \text{ kWh}$$

$$\frac{\text{Jahresstromverbrauch}}{1000} * 1,5 = \text{maximale Speicherkapazität} \quad \text{Gl. 27}$$

$$\frac{4.030kWh}{1000} * 1,5 = 6,045 \text{ kWh}$$

Die Kapazität des Speichers sollte zwischen 4,836kWh und 6,045kWh liegen. Um die Speichersysteme möglichst gut vergleichen zu können, wird eine Kapazität von rund 5kWh gewählt.

5. Speichersysteme

5.1 Lithium-Ionen Akkumulator

Als Vertreter für das Lithium-Ionen System ist die Wahl auf den neuen Fronius Symo Hybrid gefallen.

Fronius ist seit Jahren auf dem Photovoltaik-Markt integriert und erfolgreich. Das Unternehmen beschäftigt sich nicht nur mit der Photovoltaik. Auch das Forschen und Entwickeln von Batterieladesystemen und die Schweißtechnik zählen zu den Standbeinen der Firma.

Ab dem ersten Quartal 2015 soll das System laut Fronius Datenblatt zur Verfügung stehen. Durch die sogenannte „Null-Serie“, die letzte Testreihe vor der Veröffentlichung, waren bereits einige positive Eigenschaften zu erkennen. Das System ist zum Beispiel sehr vielfältig in der Auslegung. Der Wechselrichter ist in den drei Leistungsklassen 3kW, 4kW und 5kW verfügbar³³.

Passend können die Akkumulatoren kombiniert werden. Die Batterien von Sony gibt es ab 4,5kWh in 1,5kWh-Schritten bis 12kWh Nennkapazität. Sie bestehen aus Lithium-Eisenphosphat.³⁴

In der Tab. 6 sind Eigenschaften von Lithium Systemen aufgelistet.

Lithium Verbindung	Energiedichte	Leistungsdichte	Kosten
Lithium-Eisenphosphat	100-120Wh/kg	3kW/kg	500€/kg
Lithiumkobaltoxid	160-180Wh/kg	0,3-1,5kW/kg	900€/kg
Lithium-Nickel-Kobalt	180-200Wh/kg	0,3-1,5kW/kg	900€/kg
Lithiumtitanat	70-90Wh/kg	4kW/kg	1400€/kg

Tabelle 5: Eigenschaften Lithium Systeme³⁵

33 Firma Fronius (2014), http://www.fronius.com/cps/rde/xbc/SID-00FD314D-075D792A/fronius_deutschland/DBL_Fronius_Symo_Hybrid_DE_0114_as16_low_384821_snapshot.pdf

34 Firma Fronius (2014), http://www.fronius.com/cps/rde/xbc/SID-00FD314D-075D792A/fronius_deutschland/DBL_Fronius_Symo_Hybrid_DE_0114_as16_low_384821_snapshot.pdf

35 Vgl. Wosnitza, Hilges 2012:72

Speichersysteme

Die Eisenphosphat Verbindung besitzt eine etwas geringere Energiedichte als die Verbindungen mit Kobalt. Lithiumtitanat besitzt die geringste Energiedichte, ist kostenintensive und somit ungeeignet. Das Eisenphosphat ist am günstigsten und kann eine beachtliche Leistungsdichte von 3kW/kg aufweisen.

Hierbei handelt es sich um ein DC-System, d.h. der Wechselrichter arbeitet als Solarwechselrichter und Batteriewechselrichter.

Ein Blick auf das Anlagenbild verrät mehr.

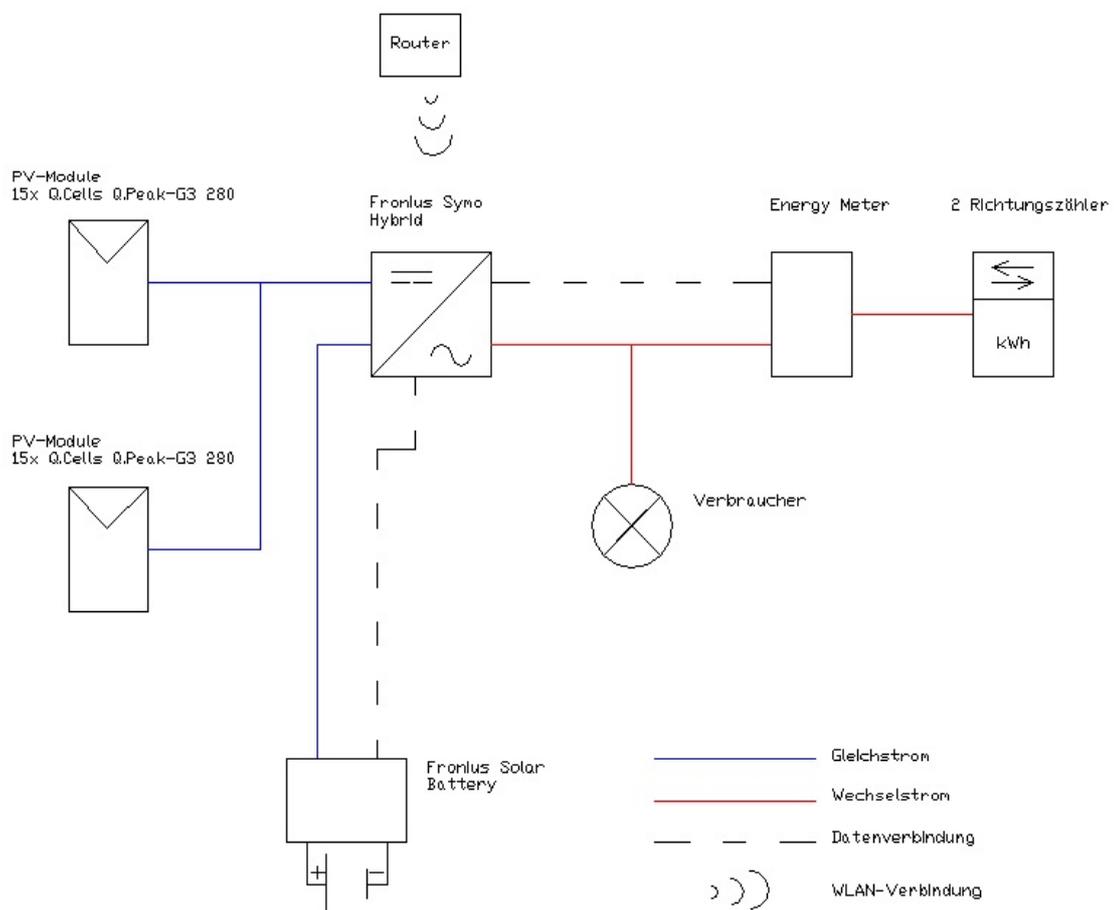


Abbildung 10: Aufbau Speichersystem Fronius Symo Hybrid

Bei diesem Speicher handelt es sich um ein 3-Phasen-System. Abb. 10 zeigt den Aufbau des Systems. Der Symo Hybrid prüft über das „Smart Meter“ ob Netzbezug, oder ein

Speichersysteme

Überschuss an Energie besteht, die ins Stromnetz eingespeist wird. Ist dies der Fall, kann der Speicher ggf. mit der überschüssigen Energie geladen werden. Diese Energie wird von der Photovoltaik-Anlage bereitgestellt.

Aus der produzierten Leistung bildet ein sogenannter MPP-Tracker einen Arbeitspunkt des angeschlossenen Strings. Das ist der Punkt der Strom-Spannungs-Kennlinie, an dem die Solarmodule die höchste Leistung erbringen.³⁶ Der MPP-Tracker hat nun die Aufgabe, den Maximum Power Point aus Gleichstrom/-spannung zu ermitteln, da dieser von der Sonneneinstrahlung, der Temperatur und Moduleigenschaften abhängig ist und sich somit ständig ändert. Wurde dieser Punkt ermittelt, kann ein DC/DC Wandler Strom bzw. Spannung auf die entsprechende Ladeleistung angleichen, die sich nun in einem Zwischenkreis befindet.

Von diesem Zwischenkreis kann die Energie zum Laden der Batterie, über einen weiteren DC/DC Wandler und/oder zum Erzeugen eines Wechselstromes über einen DC/AC Wandler genutzt werden.

Bei dem Ladevorgang leitet der Laderegler in der „Fronius Solar Battery“ das Lademanagement. Wobei ein Unterschied besteht zwischen einer schnellen Ladung mit konstantem Strom, oder einer langsameren Ladung mit konstanter Spannung. Die Ladung mit konstantem Strom beansprucht die Batterien stärker und wird somit nur anfangs, bei einem niedrigen Ladezustand verwendet. Nach dem Erreichen der Zellenspannung, wird mit dem Laden einer konstanten Spannung fortgefahren. Dies ist schonender für den Akkumulator, nimmt jedoch mehr Zeit in Anspruch.³⁷

Wird nun nicht mehr ausreichend Energie produziert um den Eigenverbrauch im Haushalt abzudecken, beginnt der Speicher mit der Entladung, gesteuert über den Symo Hybrid. Durch die Kommunikation mit dem „Smart Meter“ ist die Kontrolle über die Höhe des momentanen Verbrauchs stets gewährleistet.

³⁶ Doelling 2014, <http://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/wechselrichter/mpp-tracker.html>

³⁷ Vgl. Sterner, Stadler 2014:266

Speichersysteme

Um nun den Verbrauch im Haus abzudecken wird der Speicher entladen. Dabei wird die Energie aus der Batterie über einen DC/DC Wandler auf den Zwischenkreis geleitet. Nach der Wandlung von Gleichstrom zu Wechselstrom, mit Hilfe eines DC/AC Wandlers, kann die Energie im Haus verbraucht werden.

Der Symo Hybrid ist via WLAN mit dem Router verbunden, um die Ertragsdaten und Verbrauch zur Visualisierung bereit zu stellen.

Durch die Nullserie konnten schon erste Erkenntnisse gesammelt werden.

Das System besitzt eine Zyklenzahl von 8000 und eine DoD von 80%. DoD steht für „Depth of Discharge“ und entspricht der Entladetiefe.³⁸ Diese lässt sich aus dem Verhältnis von nutzbarer Kapazität zu Nennkapazität bestimmen.

$$\text{Entladetiefe} = \frac{\text{nutzbareKapazität}}{\text{Nennkapazität}} = \frac{4,8kWh}{6kWh} = 0,80 = 80\% \quad \text{Gl. 28}$$

Der Wechselrichter besitzt laut Datenblatt eine Photovoltaik-Eingangsleistung von 8kW und eine Ausgangsleistung von maximal 5kW.

Es ist angedacht ein Teil der produzierten Energie zum Laden des Speichers zu verwenden. Durch die vorhandene Ost/West Ausrichtung der Module wird eine Spitzenleistung in der Mittagszeit vermieden, so dass es äußerst unwahrscheinlich ist die maximale Anlagenleistung von 7,84kWp zu erreichen.

Der Aufstellort benötigt die Maße (L x B x H) von 0,611m x 0,57m x 0,955m für die Batterie-Packs. Deren Gewicht beträgt 108kg. Die Umgebungstemperatur sollte 5 - 35°C betragen, so dass nichts gegen eine Installation im Haus spricht.³⁹

38 Lipinski 2015, <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/DoD-depth-of-discharge-Entladungstiefe.html>

39 Firma Fronius 2014, <http://www.fronius.com/cps/rde/xbc/SID-00FD314D->

Speichersysteme

Laut dem Simulationsprogramm PV-Sol, ergeben sich folgende Simulationsergebnisse.

Gesamtverbrauch	4.085 kWh/Jahr (+ 55kWh Stand-By Verbrauch)
gedeckt durch PV	1.848 kWh/Jahr
gedeckt durch Netz	1.082 kWh/Jahr
gedeckt durch Batterie	1.155 kWh/Jahr
Batterieaufladung	1.311 kWh/Jahr
Netzeinspeisung	3.430 kWh/Jahr
Autarkiegrad	73,50%
Eigenverbrauchsanteil	47,90%
Lebensdauer	28,8 Jahre

Tabelle 6: Simulationsergebnisse PV-Sol Fronius Symo Hybrid

Aus den Simulationsergebnissen gehen alle relevanten Informationen über die PV-Anlage und das Speichersystem hervor. Im Anschluss kann die Zyklenzahl pro Jahr bestimmt werden. Dieser Wert kann leicht von der Realität abweichen, da es im Winter nicht immer möglich sein wird den Speicher vollständig zu Laden.

Der Wert der „Batterieaufladung“ beinhaltet nicht die Verluste der Wandlung in die Batterie. Gleichmaßen sind die Verluste beim entladen der Batterie im Wert von „gedeckt durch Batterie“ enthalten. Um eine möglichst genau Zyklenzahl pro Jahr bestimmen zu können, werden die Verluste einer Wandlung bestimmt und zu „gedeckt durch Batterie“ addiert, um die gespeicherte Energie zu bestimmen.

075D792A/fronius_deutschland/DBL_Fronius_Symo_Hybrid_DE_0114_as16_low_384821_snapshot.pdf

Speichersysteme

$$\begin{aligned} \text{Verluste einer Wandlung} &= \frac{\text{Batterieaufladung} - \text{gedeckt durch Batterie}}{2} && \text{Gl.29} \\ &= \frac{1.311 \text{ kWh/Jahr} - 1.155 \text{ kWh/Jahr}}{2} = 78 \text{ kWh/Jahr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Zyklenzahl pro Jahr} &= \frac{\text{gedeckt durch Batterie} + \text{Verluste einer Wandlung}}{\text{nutzbare Kapazität}} && \text{Gl.30} \\ &= \frac{1.155 \text{ kWh/Jahr} + 78 \text{ kWh/Jahr}}{4,8 \text{ kWh}} = 257 \frac{1}{\text{Jahr}} \end{aligned}$$

Das Speichersystem wird im Jahr rund 257 mal vollständig be- und entladen.

Vorteile	Nachteile
kompaktes und übersichtliches System, keine Separate Datenüberwachung, Steuerung oder Laderegler	Wechselrichter besitzt 8kW eingangsseitig, jedoch nur 5kW ausgangsseitig – Verluste im Sommer möglich
kann zusätzlich über weitere Wechselrichter als AC-System genutzt werden	System eignet sich nicht gut zum Nachrüsten, da Symo ebenfalls als Wechselrichter dient
geringer Ladestrom von 16A, d.h. längere Leitungswege möglich	neues System – sogenannte Kinderkrankheiten sind nicht ausgeschlossen
Sony Batterien sind erprobt und auf dem Markt etabliert	Nur 1 MPP-Tracker
hohe Zyklenzahl von 8000 entspricht über 26 Jahren	
Entladetiefe von 80%	
Hoher Wirkungsgrad über 90%	
3-Phase-System	
3-Phasen Notstromfähig	

Tabelle 7: Eigenschaften Fronius Symo Hybrid⁴⁰

⁴⁰ Firma Fronius 2014, http://www.fronius.com/cps/rde/xbc/SID-00FD314D-075D792A/fronius_deutschland/DBL_Fronius_Symo_Hybrid_DE_0114_as16_low_384821_snapshot.pdf

Speichersysteme

5.2 Blei-Gel Batterie

Das „Sunny-Island 6.0“ ist ein Blei-Gel System der Firma SMA.

Diese entwickelt und vertreibt seit über 30 Jahren Solar-Wechselrichter und Technologien, um Energie intelligent zu steuern und effizient zu nutzen.

Das Unternehmen SMA ist ein großer Hersteller von Wechselrichtern. In 21 Ländern werden Produkte und Systemlösungen vertrieben, was auf die bedeutende Stellung hinweist.⁴¹

Die Wahl fiel auf ein Blei-Gel System und nicht auf ein Blei-Säure System, da es hier entscheidende Unterschiede gibt. Bei Säure-Akkumulatoren muss destilliertes Wasser nachgefüllt werden, da sich an der negativen Elektrode durch Sauerstoff und Wasserstoff Knallgas bildet. Dies senkt den Elektrolyt-Spiegel. In verschlossenen Blei-Gel Systemen befinden sich Gaskanäle innerhalb des Elektrolyts zwischen den Elektroden, die zum Abführen des sich bildenden Gases nötig sind. Voraussetzung für den Installationsort des Speichers ist eine gute Durchlüftung, um die von der Batterie abgegebenen Gase abzuführen. Da Blei-Gel Batterien verschlossen sind, ist ein Auslaufen während des Transportes oder dem Aufbau nicht möglich.⁴²

Das Sunny Island besitzt eine Nennleistung von 4,6kWh. Es werden Hoppecke Batterien mit einer Nennkapazität von 9,84kWh verwendet. Blei-Gel Batterien besitzen, wie bereits festgestellt, eine weitaus niedrigere Zyklenzahl als Lithium Akkumulatoren. Die acht Batterien „OPzV“ mit je 6V besitzen eine Zyklenzahl von ca. 2500, bei einem DoD von 50%.

f

41 Vgl. Firma SMA 2014, <http://www.sma.de/unternehmen/ueber-sma.html>

42 Vgl. Sterner, Stadler 2014:226ff

Speichersysteme

Das System hat durch den extra „Sunny Remote Control“ (Steuerung Batteriewechselrichter), den „Home Manager“ (Steuereinheit und Datenüberwachung) und den Batteriewechselrichter deutlich mehr Komponenten die separat untergebracht und verkabelt werden müssen.

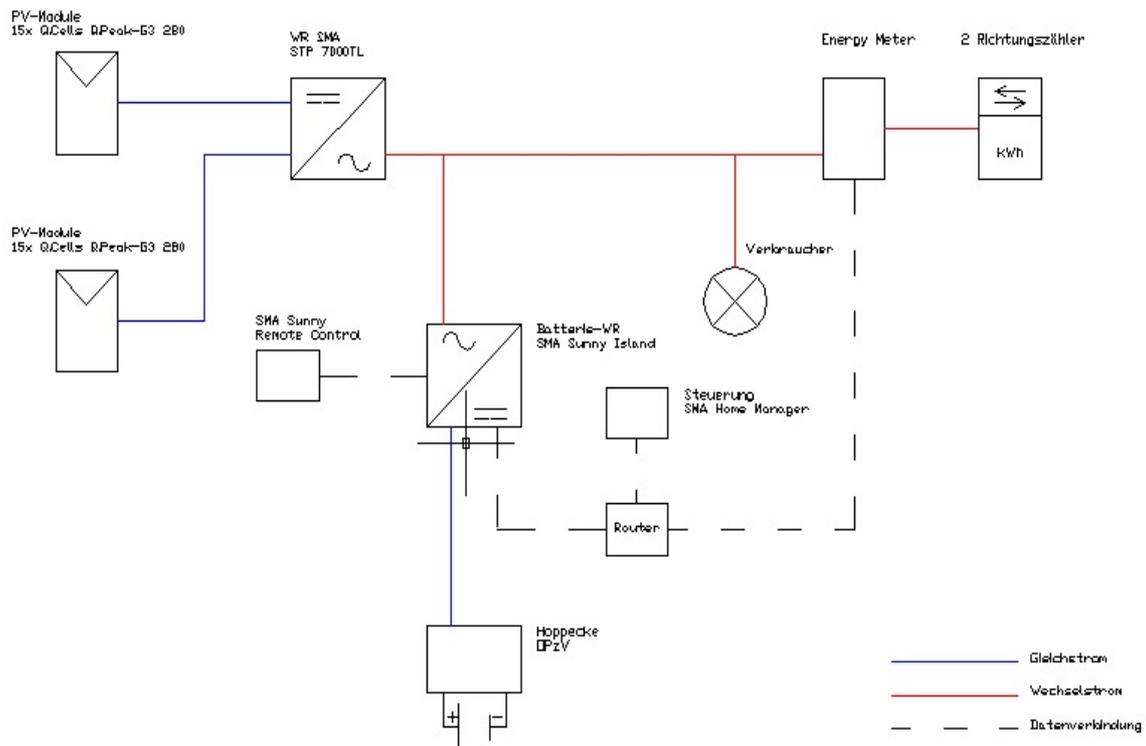


Abbildung 11: Aufbau Speichersystem SMA Sunny Island

Die Funktionsweise ähnelt dem System von Fronius, wie unter Punkt 5.1 beschrieben. Der große Unterschied ist hier, dass es sich um ein Wechselstrom System handelt und ein separater Batterie-Wechselrichter nötig ist (Abb. 11).

Die Steuerungseinheit, der „Home Manager“, benötigt ein kleines Netzwerk, um mit allen Komponenten zu kommunizieren. Über das Netzwerk erhält er Daten über den Bezug, oder die Lieferung vom „Energy Meter“, steuert den Laderegler, oder stellt Ertragsdaten für die Visualisierung bereit.

Speichersysteme

Die zwei Strings der Photovoltaik-Anlage führen zum Wechselrichter und gehen dort auf je einen MPP-Tracker. DC/AC Wandler erzeugen wieder einen Wechselstrom ausgangsseitig.

Das Sunny Island ist einphasig in der Hausverteilung angeschlossen. Im Falle eines Energieüberschusses im Haushalt durch die PV-Anlage wird der Speicher geladen. Hierbei wird der Wechselstrom in Gleichstrom gewandelt. Der Laderegler beeinflusst wie zuvor die Art und Weise, wie der Speicher geladen wird. Zu den beiden Ladevarianten mit konstanten Strom und Spannung gibt es zusätzlich eine sogenannte Erhaltungsladung. Die Erhaltungsladung wird noch einmal mit konstanter Spannung durchgeführt, die jedoch niedriger ist als die vorherige.

Erkennt nun der „Home Manager“, dass nicht mehr ausreichend PV-Energie zur Verfügung steht, um den Eigenverbrauch abzudecken, erhält der Speicher den Befehl zum Entladen.

Gleichstrom fließt von den Batterien über einen Trafo des „Sunny Island“, der mit Hilfe eines DC/AC Wandler in Wechselstrom gewandelt und in die Hausverteilung gespeist wird.

Nun kann die entladene Energie vom Speicher genutzt werden.

Speichersysteme

Laut dem Simulationsprogramm PV-Sol ergeben sich folgende Simulationswerte.

Gesamtverbrauch	4.056 kWh/Jahr (+ 26kWh Stand-By Verbrauch)
gedeckt durch PV	1.834 kWh/Jahr
gedeckt durch Netz	1.070 kWh/Jahr
gedeckt durch Batterie	1.152 kWh/Jahr
Batterieaufladung	1.597 kWh/Jahr
Netzeinspeisung	1.597 kWh/Jahr
Autarkiegrad	73,60%
Eigenverbrauchsanteil	51,00%
Lebensdauer	10,1 Jahre

Tabelle 8: Simulationsergebnisse PV-Sol SMA Sunny Island

Das Berechnen der Zyklen im Jahr geschieht unter gleicher Herangehensweise. Bestimmung der Verluste einer Wandlungen und anschließende Berechnung der Zyklenzahl pro Jahr.

$$\begin{aligned}\text{Verluste einer Wandlung} &= \frac{\text{Batterieaufladung} - \text{gedeckt durch Batterie}}{2} && \text{Gl.31} \\ &= \frac{1.597 \text{ kWh/Jahr} - 1.152 \text{ kWh/Jahr}}{2} = 222 \frac{\text{kWh}}{\text{Jahr}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Zyklenzahl pro Jahr} &= \frac{\text{gedeckt durch Batterie} + \text{Verluste einer Wandlung}}{\text{nutzbare Kapazität}} && \text{Gl.32} \\ &= \frac{1.152 \text{ kWh/Jahr} + 222 \text{ kWh/Jahr}}{4,92 \text{ kWh}} = 279 \frac{1}{\text{Jahr}}\end{aligned}$$

Speichersysteme

Vorteile	Nachteile
Blei-Gel Systeme sind preisgünstig	Durch mehrere Wandlungen von AC/DC sinkt der Systemwirkungsgrad = 70%
Es handelt sich um ein erprobtes System	geringe Zyklenzahl 2500 = ca. 8,3 Jahre laut Simulation 11,2 Jahre
Es ist einfach Nachzurüsten auch in vorhandenen PV-Anlagen	Batterien müssen nach Verlust der Kapazität erneuert werden
Ist einfach Nachrüstbar	Benötigt eine Umgebungstemperatur von 10°C bis 30°C
Integrierte Datenüberwachung	Besitzt eine Entladetiefe von 50%
System ist trotz vieler Komponenten relativ platzsparend und für die Unterbringung im Haus geeignet	

Tabelle 9: Eigenschaften SMA Sunny Island

5.3 Natrium-Schwefel Batterien

Über die Natrium-Schwefel Batterien gibt es noch nicht viele Erkenntnisse. Sehr wenige Firmen beschäftigen sich mit diesem Thema, da eine Arbeitstemperatur von 300 °C vorerst sehr abschreckend klingt und ein aufwendiges Temperaturmanagement voraussetzt.

Seit 2009 setzt sich die Firma Younicos mit dem Thema auseinander und kann schon 90 Megawatt installierter Speicherleistung vorweisen. Die Younicos aus Berlin ist eine Tochterfirma der NGK INSULATORS, LDT. Das Japanische Unternehmen beschäftigt sich seit

Speichersysteme

der Gründung 1919 unter anderem mit Hochspannungstechnik und nun mit nachhaltigen Energiesystemen.⁴³

Die Na-S Systeme werden momentan zum Netzausgleich, in Kombination mit großen Photovoltaik- oder Windparks, genutzt. Das bedeutet, sie beschäftigen sich hauptsächlich mit großen Anlagen zum Lastausgleich zwischen Tag und Nacht. Hier wird ein Überschuss an produzierter Energie am Mittag abgefangen, um sie am Abend zu entladen, wenn keine PV-Energie mehr zur Verfügung steht.

Typische Systeme besitzen eine Nennleistung von 2.000kW und 12.000kWh Kapazität. Die Analyse der erzeugten Energie und des restlichen Verbrauches, in Kapitel 4.3 zeigt das Verhalten im Haus auf. Die Photovoltaik-Anlage produziert nicht ausreichend Energie zum Laden und der Verbrauch ist nicht ausreichend, um den Speicher optimal auszulasten.

Durch ein Gespräch mit einem Mitarbeiter der Firma Younicos hat sich ergeben, dass es keine Speichersysteme in entsprechender Größe für ein Einfamilienhaus gibt. Vorhandene Natrium-Schwefel-Batterien sind ausschließlich für den Netzausgleich und zur Bereitstellung von Regelenergie konzipiert.⁴⁴

Da dies eine umfangreiche Technik ist, die durch viele Variablen beeinflusst werden kann, gibt es keine Möglichkeit das System auf eine geeignete Größe für ein Einfamilienhaus anzupassen.

43 Vgl. Firma Younicos 2013, http://www.yunicos.com/de/republik_yunicos/unsere_geschichte/

44 Telefonat mit einem Mitarbeiter der Firma Younicos 16.02.2015

Speichersysteme

5.4 Redox-Flow Batterie

Der CellCube von Gildemeister ist ein Redox-Flow System auf der Basis von Vanadium. Die Firma stammt aus Österreich und besteht bereits seit 140 Jahren. Unter den acht Niederlassungen befindet sich eine in Würzburg. Gildemeister beschäftigt sich unter anderen mit PV-Anlagen und deren Nachführung, kleine Windkraftanlagen und den Vanadium Redox-Flow Batterien.⁴⁵

Die Technologie der Redox-Flow Batterien ist noch nicht ausgereift. Es besteht ein Entwicklungsbedarf hinsichtlich neuer Elektrolyte mit höherer Energiedichte, Optimierung der Elektroden und der Membran.

Das System ist fertig aufgebaut und wird als Container ohne Elektrolyt versendet.

⁴⁵ Firma Gildemeister 2015, <http://energy.gildemeister.com/de/unternehmen/ueber-uns>

Speichersysteme

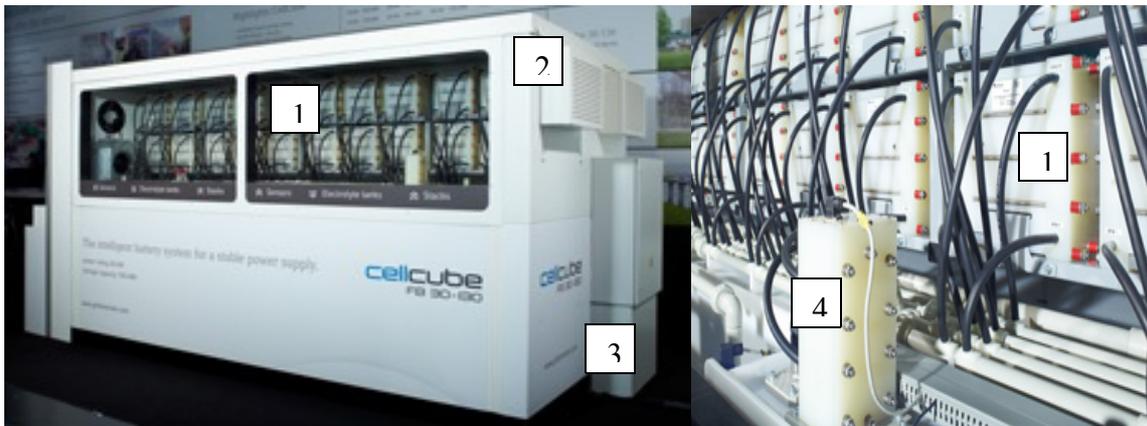


Abbildung 12: Aufbau Speichersystem CellCube

46

Der genaue Aufbau des Containers wird von Gildemeister leider nicht Preis gegeben.

Aus Recherchen geht jedoch folgender Aufbau hervor.

In zwei Reihen der oberen Hälfte des Containers befinden sich die Tanks mit dem Elektrolyt (Abb. 12 (1)). Zu sehen sind rechts außen die Lüftungsanlagen, um das System auf einer Betriebstemperatur von 20°C bis 30°C zu halten (2). Dies hat mit der Bildung von Vanadiumpentoxid zu tun, welches sich in den Zellen, oder den Schläuchen ablagern kann und zu einer Verstopfung führt. Unter dem Lüftungssystem befindet sich der dreiphasige Anschluss (3) des CellCubes. Es handelt sich auch hierbei wieder um ein Wechselstromsystem.

Auf der gegenüberliegenden Seite des Containers befinden sich die Batteriewechselrichter und der „Battery Controller“.

46 Firma Gildemeister 2015, <http://energy.gildemeister.com/de/speichern/cellcube-fb-10-20-30#Technologie>

Speichersysteme

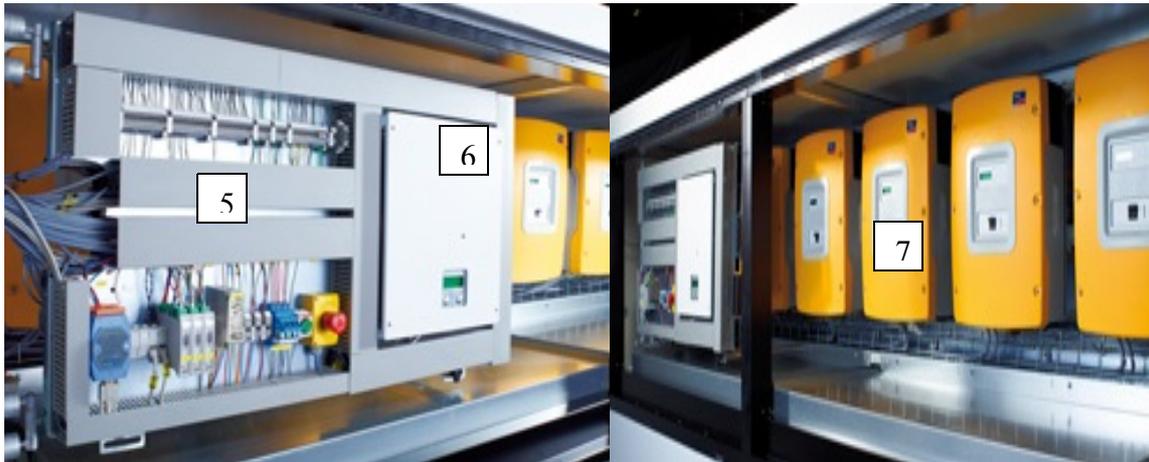


Abbildung 13: Aufbau Speichersystem
CellCube

47

In Abb. 13 sind Sicherheitseinrichtungen (5) und die Steuerungseinrichtung, der „Battery Controller“ (6), abgebildet. Dieser ist nicht nur für das Steuern der Batterie zuständig, sondern auch für die Temperaturüberwachung und das damit verbundene Lüften bzw. Heizen und die Steuerung der Pumpen.

Die Batteriewechselrichter (7) sind „Sunny Island‘ s“ von SMA.

Somit wird das Anlagenbild annähernd dem der Hoppecke Batterien entsprechen.

Das kleinste CellCube System hat eine Leistung von 10kW. Weiterhin kann eine Energiemenge von 40kWh aufgenommen werden.

Es wird jedoch nur eine Kapazität von etwa 4,8kWh bis 6,0kWh benötigt. Somit würde das System über eine unnötig hohe Kapazität verfügen, die nicht genutzt werden kann, was sich wiederum auf die Wirtschaftlichkeit negativ auswirkt. Das CellCube besteht aus einem Container mit den Maßen (L x B x H) 4,66m × 2,20m × 2,42 m.⁴⁸

Redox-Flow-Batterien werden momentan größtenteils als Mittel- oder Langzeitspeicher verwendet.

47 Firma Gildemeister 2015, <http://energy.gildemeister.com/de/speichern/cellcube-fb-10-20-30#Technologie>

48 Firma Gildemeister 2015, <http://energy.gildemeister.com/de/speichern/cellcube-fb-10-20-30#Technische-Daten>

Speichersysteme

Unter einer Mittel- oder Langzeitspeicherung versteht man ein System, das seine Ladung über einen längeren Zeitraum erhalten kann. Dies muss eine geringe Selbstentladung besitzen, um möglichst verlustfrei eine große Energiemenge z.B. über mehrere Tage, Wochen oder sogar eine Saison zu speichern.⁴⁹

Was muss an dem CellCube verändert werden, um diesen für ein Einfamilienhaus sinnvoll zu dimensionieren?

1.) Die Leistung ist abhängig von der Größe der Elektroden in dem Konverter. Mit einer Verkleinerung der Fläche werden weniger Elektronen abgegeben und aufgenommen, welches zu einer Verringerung der Leistung führt. Durch die Leistungsreduzierung ist ein 1-Phasen-Batteriewechselrichter ausreichend, da eine Schiefast von 4,6kW nicht mehr überschritten wird.⁵⁰ Um an dem System selbst wird nichts geändert, nur die Baugrößen werden reduziert. Als Batteriewechselrichter dient das „Sunny Island 3.0M“ mit einer Nennleistung von 2,3kW. Um möglichst effizient mit dem Speicher zu arbeiten und die Grundlast abzudecken, wird die Leistung bewusst gering gewählt. Im Falle eines hohen Verbrauches der nicht durch den Speicher gedeckt werden kann, wird Energie aus dem Netz bezogen.

Eine Leistung von 1kW ist hierfür ausreichend, um die Kosten des Konverters gering zu halten.

49 Rüdiger Paschotta 2012, <https://www.energie-lexikon.info/energiespeicher.html>

50 Firma SMA 2012, http://files.sma.de/dl/7418/Flyer_Niederspr-ADE123016w.pdf

Speichersysteme

2.) Die Kapazität wird durch das Elektrolyt beeinflusst. Bei der Reduzierung der Kapazität von 40kWh auf 5kWh, wird nur ein Achtel der Flüssigkeit und damit verbunden, auch eine geringere Pumpenleistung benötigt.

Die Tanks mit dem Elektrolyt, die dafür vorgesehenen Pumpen und die Batteriewechselrichter haben einen großen Teil des Gewichtes von dem CellCube ausgemacht und viel Platz in Anspruch genommen. Laut der Firma könnte sich der Container auf die Maße (L x B x H) 2m x 1,5m x 1,5m verkleinern.⁵¹ Die Verkleidung des Systems müsste jedoch bestehen bleiben, um die Temperatur im inneren noch regulieren zu können.

Laut dem Simulationsprogramm PV-Sol ergeben sich folgende Simulationsergebnisse:

⁵¹ Telefonat mit einem Mitarbeiter der Firma Gildemeister 20.02.2015

Speichersysteme

Gesamtverbrauch	4.051 kWh/Jahr (+21 kWh/Jahr Stand-By Verbrauch)
gedeckt durch PV	1.841 kWh/Jahr
gedeckt durch Netz	1.120 kWh/Jahr
gedeckt durch Batterie	1.090 kWh/Jahr
Batterieaufladung	1.419 kWh/Jahr
Netzeinspeisung	3.501 kWh/Jahr
Autarkiegrad	72,30%
Eigenverbrauchsanteil	48,20%
Lebensdauer	-

Tabelle 10: Simulationsergebnisse PV-Sol SMA Sunny Island

Die Lebensdauer kann für das CellCube System nicht berücksichtigt werden, da PV-Sol nicht für Redox-Flow Batterien ausgelegt ist. Hier wird die berechnete Zyklenzahl verwendet. Von CellCube ausgeschrieben ist eine „praktisch unbegrenzter Zyklenzahl“, da das Elektrolyt ohne weiteres gewechselt werden kann.⁵² Da die Komponenten auch Alterungserscheinungen unterliegen.

$$\begin{aligned}
 \text{Verluste einer Wandlung} &= \frac{\text{Batterieaufladung} - \text{gedeckt durch Batterie}}{2} && \text{Gl.33} \\
 &= \frac{1.419 \text{ kWh/Jahr} - 1.090 \text{ kWh/Jahr}}{2} = 165 \frac{\text{kWh}}{\text{Jahr}}
 \end{aligned}$$

$$\text{Zyklenzahl pro Jahr} = \frac{\text{gedeckt durch Batterie} + \text{Verluste einer Wandlung}}{\text{nutzbare Kapazität}} \quad \text{Gl.34}$$

⁵² Firma Gildemeister 2014, <http://energy.gildemeister.com/de/speichern/cellcube-fb-10-20-30#%C3%9Cbbersicht>

Speichersysteme

$$= \frac{1.152 \text{ kWh/Jahr} + 222 \text{ kWh/Jahr}}{4,92 \text{ kWh}} = 279 \frac{1}{\text{Jahr}}$$

In der Theorie wurde in Kapitel 2.4 eine Zyklenzahl von 10.000 angegeben. Wird die Zyklenzahl durch die Zyklen pro Jahr dividiert, so ergibt sich die Lebensdauer.

$$\text{Lebensdauer} = \frac{10.000}{279/\text{Jahr}} = 35,8 \text{ Jahre} \quad \text{Gl.35}$$

Vorteile	Nachteile
Sehr hohe Zyklenzahl – bei Kapazitätsverlust kann Elektrolyt gewechselt werden	Container ist trotz Verkleinerung noch groß und schwer, daher schwer im Einfamilienhaus unterzubringen
keine Selbstentladung (>1% pro Jahr)	Datenüberwachung nur per Anfrage
hoher Wirkungsgrad des Speichers, da keine Nebenreaktionen – Gesamtsystem bis zu 80%	Membran ist Momentan der Schwachpunkt des Systems und verhältnismäßig „anfällig“
Trennung von Energiespeicher und –wandler möglich	Kostenintensiv, da die Technologie noch nicht ausgereift ist
Volle Nutzung der Kapazität	Container ist unansehnlich
Individuelle Kombination von Leistung und Energie	CellCube ist ein AC-System, d.h. Verluste durch mehrere Wandlungen
Eignet sich gut zur Nachrüstung	Pumpen führen zur geringen Geräusentwicklung

Tabelle 11: Eigenschaften Gildemeister CellCube

6. Wirtschaftliche Betrachtung

Die wirtschaftliche Betrachtung der Systeme ist der ausschlaggebende Punkt, der über das Scheitern oder die Realisierung eines Projektes entscheidet. Deshalb wird auf die Wirtschaftlichkeit großen Wert gelegt. Die Speichersysteme werden unter Berücksichtigung von Lebensdauer bzw. Zyklenzahl auf ihre Amortisation untersucht.

Anhand der Simulationen in den Kapiteln 5.1 bis 5.4 konnte eine Prognose erstellt werden mit der Auslastung und dem Nutzen der Speicher.

Eine entscheidende Größe sind die zusätzlich umgesetzte Energie durch das System, die zu einer weiteren Steigerung des Autarkiegrades und der Eigenverbrauchsquote führen.

Der Nutzen eines Speichers ergibt sich aus den Stromkosten, in diesem Fall 0,26€, der Einspeisevergütung von 0,13€ und der entladenen Energie des Systems.

Bei den Stromkosten muss beachtet werden, dass diese nicht gleich bleiben, sondern Jahr für Jahr ansteigen. Natürlich kann niemand genau sagen, wie sich die Kosten entwickeln werden. Im Jahr 2010 betragen die Kosten durchschnittlich 0,2369€ pro kWh. Laut einer Prognose sollen es im Jahr 2020 0,3366€ sein und die Preise bis zum Jahr 2030 ansteigen.⁵³ Das entspräche einer jährlichen Strompreissteigerung von prozentual 4,2% .

Die entladene Energie wird mit den Stromkosten für das jeweilige Jahr multipliziert. Energie die zum Laden des Speichers genutzt wird, kann nicht mehr an das Energieversorgungsunternehmen verkauft werden. Daher muss die Einspeisevergütung pro geladener kWh von den erwirtschafteten Kosten abgezogen werden.

$$\text{„Gewinn pro Jahr“} = (E_{\text{entladen}} * \text{Stromkosten}) - (E_{\text{geladen}} * \text{Einspeisevergütung}) \quad \text{Gl. 36}$$

53 Oschmann 2012, <http://www.stromvergleich.de/strompreise>

Wirtschaftliche Betrachtung

Somit ergibt sich der Gewinn des Energiespeichers pro Jahr. Wird dies auf die Lebensdauer hochgerechnet, lässt sich die Amortisationszeit bestimmen. Diese beschreibt den Zeitraum des Rückflusses einer Investition.⁵⁴

Nachfolgend werden die einzelnen Systeme betrachtet.

6.1 Fronius Symo Hybrid 6.0

Das Fronius System hat laut Simulation eine Lebensdauer von aufgerundet 29 Jahren. Mit Aufbau und Installation kostet das System 9988,40€.⁵⁵ Folgende Abbildung zeigt die preisliche Entwicklung für die nächsten Jahre.

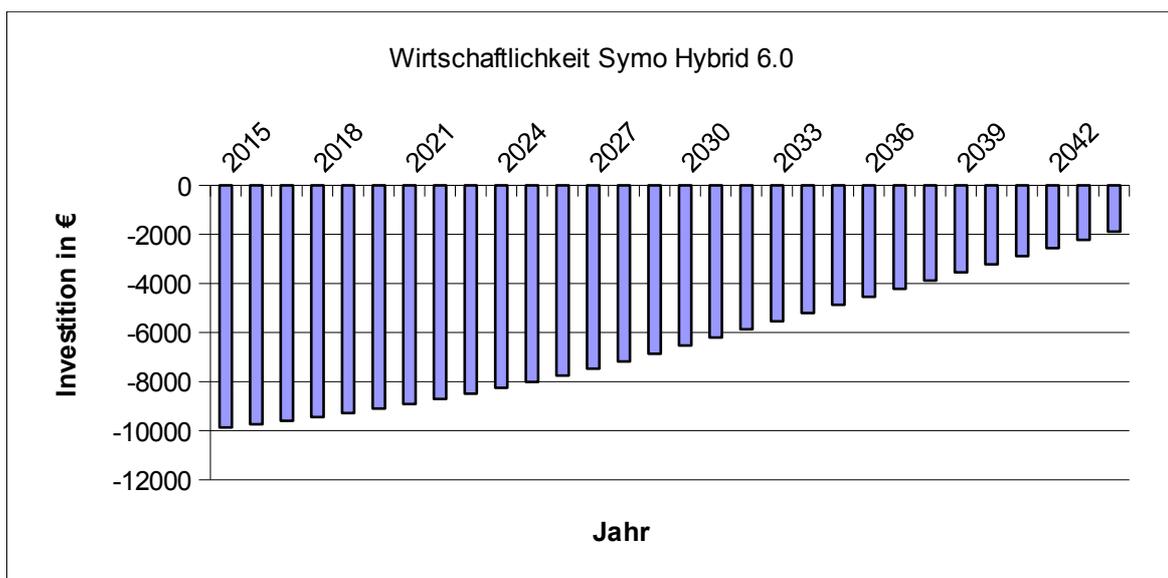


Abbildung 14: Amortisation Symo Hybrid

Bei einer Strompreissteigerung von 4,2% pro Jahr bis 2030 verbleibt nach 29 Jahren Betrieb des Systems ein Minus von 1894,80€.

⁵⁴ Springer Gabler 2013, <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/amortisationsdauer.html>

⁵⁵ Installationspreis Firma EAB-Solar

Wirtschaftliche Betrachtung

6.2 SMA Sunny Island 6.0

Die Blei-Gel Batterien besitzen laut Simulation eine Haltbarkeit von zehn Jahren und die Investitionskosten betragen 6.322,90€.⁵⁶ Für eine Rentabilität des Systems müssen die Kosten nach dieser Zeit gedeckt werden.

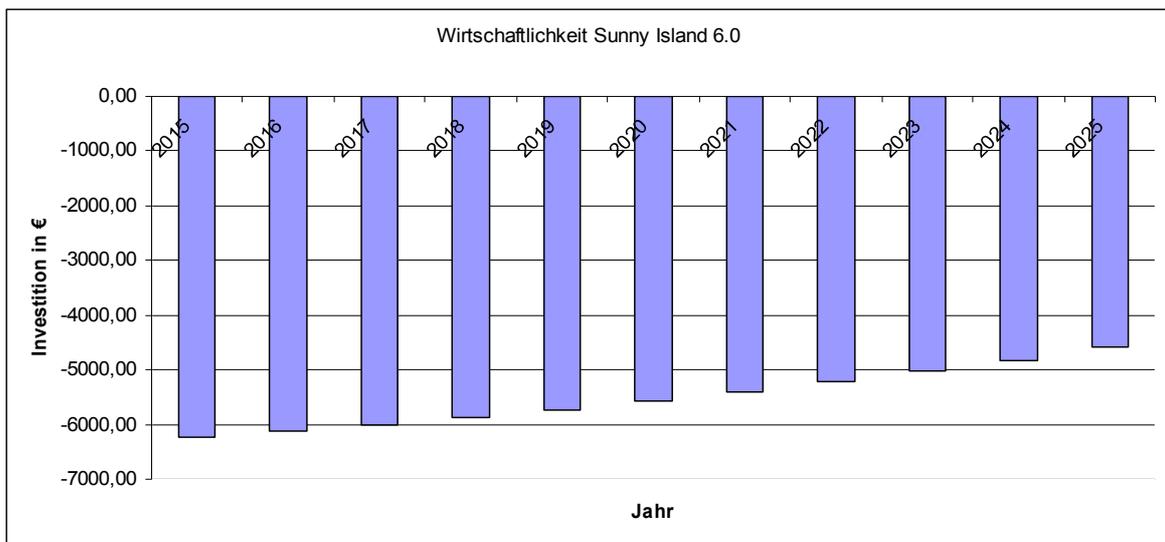


Abbildung 15: Amortisation Sunny Island

Das Sunny Island von SMA hat nach 10 Jahren verbleibende Kosten von 4.627,38€. Danach ist das System jedoch nicht unbrauchbar. Es müssen lediglich die Batterien erneuert werden, der Anlagenaufbau wird ohne Probleme weiter verwendet.

⁵⁶ Installationspreis Firma EAB-Solar

Wirtschaftliche Betrachtung

6.3 Gildemeister CellCube

Da es sich um eine theoretische Betrachtung für das CellCube handelt, wird die angegebene Zyklenzahl von 10.000 verwendet, was einer berechneten Lebensdauer von fast 36 Jahren entspricht. Durch die Verkleinerung des gesamten Systems, verringert sich auch der Preis.

Der „CellCube FB 10kW“ mit einer Kapazität von 40kWh hat einen Preis von 80.000€.⁵⁷

Die Änderung der Leistung von 10kW auf 1kW hat zur Folge, dass der kostenintensive Konverter verkleinert werden kann. Aufwendige Heiz- und Kühltechnik, die Pumpen, verringertes Elektrolyt, Verkleinerung der Containergröße und die Reduzierung auf einen kleinen Batteriewechselrichter führen zu einem deutlich geringeren Preis.

Dieser könnte in etwa 11.000€ betragen. Nach Rücksprache mit der Firma Gildemeister wäre dies eine realistische Größenordnung.

⁵⁷ Telefonat mit einem Mitarbeiter der Firma Gildemeister 20.02.2015

Wirtschaftliche Betrachtung

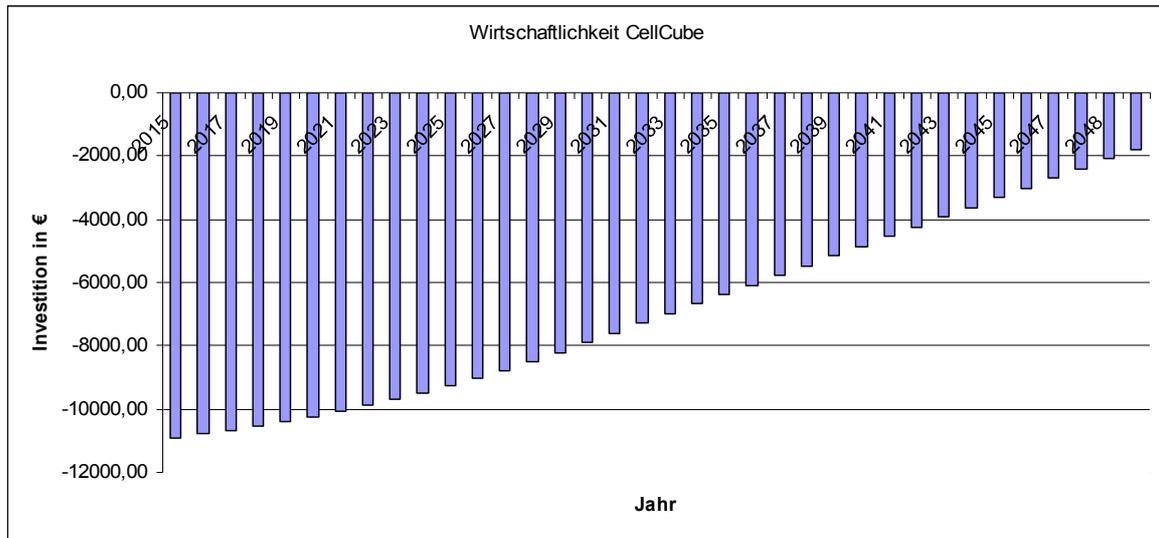


Abbildung 16: Amortisation CellCube

Durch die lange Lebensdauer amortisiert sich das System bis auf 1.787,53€.

7. Auswahl des Speichersystems

7.1 Auswahl anhand technischer Eigenschaften

Die Auswahl eines Speichersystems unter technischen Voraussetzungen entscheidet sich zwischen dem Fronius Symo Hybrid, dem Sunny Island von SMA mit den Hoppecke Batterien und dem veränderten CellCube von Gildemeister. Das Natrium-Schwefel System von Younicos gibt es momentan ausschließlich als Speicher für Großanlagen und konnte deshalb nicht weiter betrachtet werden.

Ein großer Unterschied zwischen den Systemen ist der Anlagenaufbau. Die DC-Kopplung des Symo Hybrid's erspart zwei verlustbehaftete Wandlungen. In Kombination mit Lithium Batterien, die geringe Verluste durch ihren Innenwiderstand verursachen, ergibt sich ein hoher Systemwirkungsgrad.⁵⁸

Die Hoppecke Batterien und das CellCube System basieren auf den gleichen Batterie-wechselrichter, dem Sunny Island. Der Unterschied liegt am Speichersystem.

Blei-Gel Batterien besitzen, wie in den Grundlagen in Kapitel 2.2 beschrieben, einen niedrigeren Wirkungsgrad von etwa 85%. Redox-Flow Systeme haben sehr geringe Speicher-verluste, jedoch benötigen die Pumpen Energie. Der Transport, um das Elektrolyt aus den Tanks in den Konverter zu pumpen, reduziert den Gesamtwirkungsgrad um 10-15%.⁵⁹

Durch die Simulation mit einem Standardlastprofil wurde die geladene und entladene Energie berechnet. Wie unter Kapitel 4.2 beschrieben, lässt sich daraus der Wirkungsgrad für

das gesamte System berechnen. $\eta = \frac{E_{entladen}}{E_{geladen}}$ Gl. 37

58 Produkt-Schulung Fronius Symo Hybrid 26.01.2015

59 Telefonat mit einem Mitarbeiter der Firma Gildemeister 20.02.2015

Auswahl des Speichersystems

	Fronius Symo Hybrid	SMA Sunny Island	Gildemeister CellCube
Entladene Energie in $\frac{kWh}{Jahr}$	1.155	1152	1.090
Geladene Energie in $\frac{kWh}{Jahr}$	1.311	1597	1.419
Systemwirkungsgrad in [%]	88	72	77

Tabelle 12: Berechnung Systemwirkungsgrad der Speichersysteme

Tab. 10 zeigt, dass der Symo Hybrid einen sehr hohen Systemwirkungsgrad aufzuweisen hat. Die Verluste der Blei-Gel Batterien beim Speichern von Energie sind höher als die Verluste durch die zusätzliche Pumpenleistung des CellCubes.

Die spezifische Energie, auf das Volumen des Systems bezogen, hilft die unterschiedlichen Speicher zu vergleichen. Das Volumen ist hier der eingenommene Raum von Batteriewechselrichter und Batterien bzw. der veränderte Container des Cellcubes.

$$e_{vol} = \frac{E[Wh]}{V[m^3]}$$

Gl. 38

Auswahl des Speichersystems

	Fronius Symo Hybrid	SMA Sunny Island	Gildemeister CellCube
Volumen des Speichers in [mm]	955 x 570 x 611	2*(660 x 247 x 862)	4660 x 2200 x 2420
Volumen des Batterie- wechslerichters in [mm]	+ 645 x 431 x 204	+ 467 x 612 x 242	
Volumen gesamt in [m ³]	1,3	2,1	24,8
Nutzbare Kapazität in [kWh]	4,8	4,92	5,0
Spezifische Energie in [$\frac{kWh}{m^3}$]	3,7	2,3	0,2

Tabelle 13: Berechnung spezifische Energie der Speichersysteme

Durch die relativ große Fläche, die der Container benötigt, ist die Energiedichte der Redox-Flow Batterie sehr gering. Die Elektrolyt Tanks sind im Vergleich zu einer Lithium oder Blei Batterie relativ groß. Des Weiteren wäre eine Unterbringung im Haus durch Gewicht und Maße nicht möglich. Eine Garage wäre vorteilhaft, da sie vor äußeren Einflüssen schützt und die Temperatur im Winter nicht zu stark abfällt bzw. im Sommer ansteigt. Der Fronius Symo Hybrid benötigt einen Temperaturbereich von ca. 5°C bis 35°C und das SMA Sunny Island eine Raumtemperatur von ca. 10°C bis 30°C. Beide sind für die Innenmontage vorgesehen.

Die auf dem Sunny Island basierenden Systeme eignen sich gut zum Nachrüsten, weil sie ohne Schwierigkeiten in eine bestehende Anlage integriert werden können. Der Symo Hybrid dient als Wechselrichter und Batteriewechselrichter. Bei einer Nachrüstung muss der

Auswahl des Speichersystems

Wechselrichter der Photovoltaik-Anlage ersetzt werden, was gegebenenfalls eine Änderung der verschalteten Module zur Folge hat, da nur ein MPP-Tracker vorhanden ist.⁶⁰

Für das Beispielhaus ist aufgrund der technischen Eigenschaften der Fronius Hybrid das passende System. Der hohe Wirkungsgrad trägt dazu bei, dass möglichst viel der eingespeicherten Energie wieder entnommen werden kann. Das System ist platzsparend wie durch die Betrachtung der spezifischen Energie nachgewiesen wurde. Aufgrund der Ost/West Ausrichtung hat der Unterschied zwischen der Eingangsleistung von 8kW und der Ausgangsleistung von 5kW nur wenig Auswirkung.

7.2 Auswahl anhand wirtschaftlicher Eigenschaften

Die drei verbleibenden Systeme wurden in den Kapiteln von 6.1 bis 6.3 auf ihre Amortisationszeit untersucht. Dabei sind die Investitionskosten und die Betriebskosten mit eingeflossen. Die folgende Abbildung zeigt die Kostenentwicklung der Systeme über ihrer Lebensdauer.

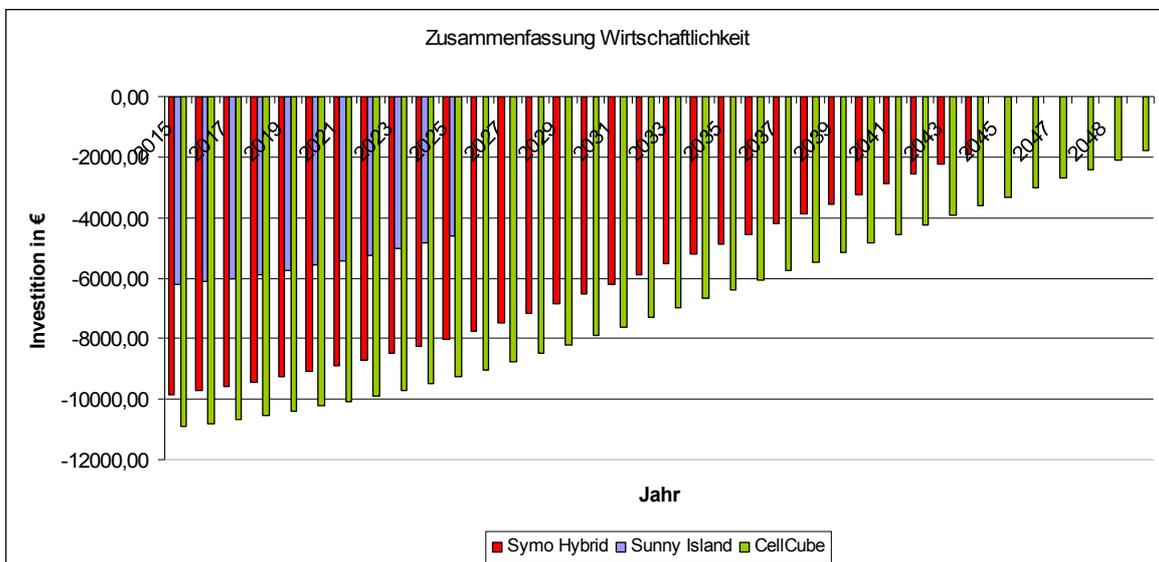


Abbildung 17: Zusammenfassung Amortisation Speichersysteme

60 Firma Fronius 2014, http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-4D940707-3BA2FEFF/fronius_deutschland/SE_DS_Fronius_Energy_Package_DE_386730_snapshot.pdf

Auswahl des Speichersystems

Das Sunny Island hat einen Kaufpreis von 6322,90€. Nach 11 Jahren Betrieb verbleibenden Kosten in Höhe von 4.627,38€. Durch Berechnung der „Investitionskosten“ – „verbleibende Kosten“ ergibt sich der erwirtschaftete Betrag.

$$\text{Erwirtschafteter Betrag} = 6322,90\text{€} - 4.627,38\text{€} = 1.695,52\text{€}$$

Der relativ niedrige Betrag ergibt sich durch eine geringe Zyklenzahl und den Wirkungsgrad von 72%. Um die Lebensdauer zu verlängern, besteht die Möglichkeit einen zweiten Batteriesatz in die Investitionskosten mit einzuberechnen. Der Preis der Hoppecke Batterien beträgt momentan um die 3100€. ⁶¹ Die Abb. 18 zeigt die Fortsetzung der Strompreisentwicklung und des Gewinns pro Jahr, ohne eine Änderung der Investitionskosten (Abb. 15).

⁶¹ Wechsel der Batterien - Installationspreis Firma EAB-Solar

Auswahl des Speichersystems

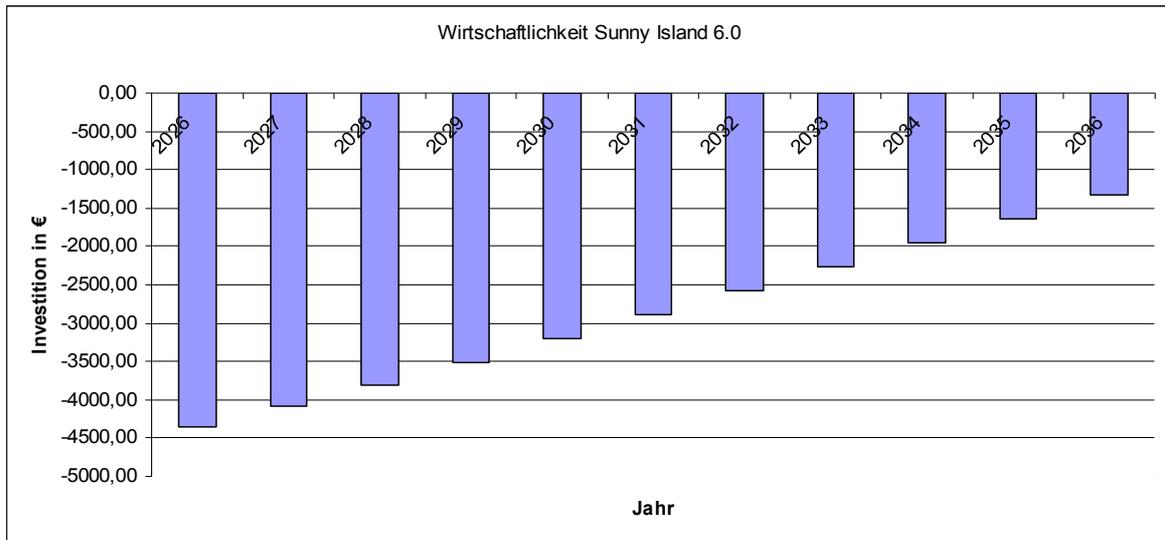


Abbildung 18: Fortsetzung Amortisation Sunny Island (Abb. 15)

Durch die Steigerung des Strompreises könnte in den Jahren von 2026 bis 2036 ein Betrag von 3.234,6€ erwirtschaftet werden.

Jedoch kann nicht prognostiziert werden, was ähnliche Blei-Gel Batterien in 10 Jahren kosten. Somit kann ein zweiter Satz Batterien nicht in die Investitionskosten mit einberechnet werden. Der Fronius Symo Hybrid hingegen weist eine lange Lebensdauer von 28,8 Jahren auf, in der sich das System amortisieren kann.

Aus Investitionskosten und verbleibenden Kosten lässt sich wieder der erwirtschaftete Betrag bestimmen.

$$\text{Erwirtschafteter Betrag} = 9988,40\text{€} - 1.984,80\text{€} = 8015,55\text{€}$$

Auch das selbst erstellte CellCube-System hat eine hohe Lebenserwartung. Daher kann bei Investitionskosten von in etwa 11.000€ und verbleibenden Kosten von 1.787,53€, ein Betrag von 9.212,47€ erwirtschaftet werden.

Auswahl des Speichersystems

$$\text{Erwirtschafteter Betrag} = 11.000\text{€} - 1.787,53\text{€} = 9.212,47\text{€}$$

Ein Vergleich der Systeme ist auch durch den Preis pro nutzbarer Kilowattstunde und Preis pro gespeicherte Kilowattstunde“ möglich. Im ersten Schritt werden die Kosten des Systems, durch die Anzahl der genutzten Kilowattstunden dividiert. Anschließend werden die unter Kapitel 5.1 – 5.4 errechneten Zyklenzahlen, durch die „Kosten pro nutzbare Kilowattstunde“ dividiert, um den Preis für eine gespeicherte Kilowattstunde zu ermitteln.

$$\text{Kosten pro nutzbare Kilowattstunde} = \frac{\text{Investitionskosten}}{\text{nutzbareEnergie}} \quad \text{Gl. 39}$$

$$\text{Kosten pro gespeicherte Kilowattstunde} = \frac{\text{Kosten pro nutzbare Kilowattstunde}}{\text{Zyklenzahl}} \quad \text{Gl. 40}$$

	Fronius Symo Hybrid	SMA Sunny Island	Gildemeister CellCube
Nutzbare Energie in [kWh]	4,8	4,92	5,0
Investitionskosten in [€]	9988,40	6322,90	11.000
Kosten pro nutzbare Kilowattstunde in $\left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}}\right]$	2080,92	1285,14	2200
Zyklenzahl	8000	2500	10000
Kosten pro gespeicherte Kilowattstunde in $\left[\frac{\text{cent}}{\text{kWh}}\right]$	26	51,4	22

Tabelle 14: Berechnung spezifische Kosten der Speichersysteme

Auswahl des Speichersystems

Die spezifischen Kosten sind mit der nutzbaren Energie ermittelt worden, da auf diese Weise der direkte Vergleich zwischen den Systemen sichtbar wird. Das Ergebnis wird verfälscht, wenn die gesamte Energie eingerechnet wird. Das Sunny Island und der Fronius Symo Hybrid können nicht zu 100% entladen werden, wodurch nicht nutzbare Energie in den „Kosten pro nutzbare Kilowattstunde“ enthalten wäre.

Der Preis je gespeicherter Kilowattstunde zeigt noch einmal auf, wie hoch die Kosten einer Blei-Batterie im Vergleich zu den anderen Systemen sind.

Im Vergleich zwischen dem Fronius Symo Hybrid und dem CellCube bestehen nur geringe wirtschaftliche Unterschiede. Das System von Fronius hat verbleibende Kosten von 1.984,80€ und bei dem selbst erstellten System von Gildemeister betragen die verbleibenden Kosten 1.392,78€. Aufgrund der relativ neuen Technologie des Lithium-Eisenphosphats und der nicht weit verbreiteten neuen Technologie der Redox-Flow-Batterie liegen die spezifischen Kosten im Gegensatz zur erprobten Blei-Gel-Batterie noch ziemlich hoch. Dies kann jedoch durch die lange Lebensdauer der neueren Systeme kompensiert werden, wie in Kapitel 6.1 und 6.3 gezeigt wird. Der Blei-Gel-Speicher ist aus wirtschaftlicher Sicht unpassend für ein Einfamilienhaus, da nach 10 Jahren Kosten von 4.627,38€ nicht gedeckt sind.

Auch der Fronius Symo Hybrid und das CellCube-System decken die Investitionskosten nach ihrer Betriebszeit nicht ab, aber die verbleibenden Kosten sind gering.

Somit könnten der Lithium-Speicher als auch der Redox-Flow-Speicher aus wirtschaftlicher Sicht für dieses Einfamilienhaus gewählt werden.

7.3 Auswahl des Systems

Auswahl des Speichersystems

Das Speichersystem der Firma Fronius hat sowohl bei der technischen Betrachtung als auch bei der wirtschaftlichen Betrachtung am besten abgeschnitten. Die nötigen Eigenschaften, die ein Speichersystem besitzen sollte, wurden in Kapitel 4.2 zusammengetragen und werden alle erfüllt. Die Investitionskosten deckt jedoch auch der Fronius Symo Hybrid nicht ab.

8. Fazit und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, aus technischer und wirtschaftlicher Sicht ein passendes Speichersystem für ein Beispielhaus zu finden. Dazu wurden verschiedene Speichertechnologien in Erwägung gezogen. Mit Hilfe von Lastprofilen eines Sommertages und Wintertages konnte der Verbrauch in Kapitel drei mit Photovoltaik-Anlage und ohne Photovoltaik-Anlage analysiert werden. Im Anschluss wurden nötige Anforderungen an das Speichersystem zusammen getragen und eine passende Speicherkapazität zwischen 4,8kWh und 6,0kWh ermittelt. Um die Systeme möglichst gut vergleichen zu können, wurde für alle Systeme eine Kapazität von rund 5kWh nutzbar gewählt.

In Kapitel fünf wurden konkret technische Systeme zu den jeweiligen Speichertechnologien vorgestellt. Besondere Eigenschaften und Funktionen wurden genannt und erklärt. Bei der Betrachtung der unterschiedlichen Systeme ist aufgefallen, dass es wenige Anbieter weltweit für Natrium-Schwefel Batterien gibt. Die Deutsche Firma Younicos hat ausschließlich Anwendungen für den Netzausgleich und keine passenden Systeme für Einfamilienhäuser. Somit musste die Natrium-Schwefel Batterie aus den nachfolgenden Betrachtungen ausgeschlossen werden.

Die Vanadium-Redox-Flow Batterie von Gildemeister ist ebenfalls in keiner passenden Größenordnung für das Beispielhaus vorhanden. Da Leistung und Energie dieser Technologie leicht veränderbar sind, konnte ein System für das Beispielhaus selbst angepasst werden. Das neue System besitzt eine Kapazität von 5kWh und wurde auf eine Leistung von 1kW begrenzt, um möglichst effektiv zu arbeiten bzw. den Speicher optimal auszunutzen.

Im Anschluss wurden die drei verbleibenden Systeme auf ihre Wirtschaftlichkeit hin untersucht. Mittels einer Prognose zur Steigerung des Strompreises bis 2020 konnte der prozentuale Anstieg für ein Jahr bestimmt werden. Mit Hilfe der Strompreis Steigerung konnte

Fazit und Ausblick

der erwirtschaftete Betrag pro Jahr und die Amortisation berechnet werden. Als Ergebnis ließ sich feststellen, dass sich keines der Systeme innerhalb der Betriebszeit amortisierte.

In Kapitel sieben war es das Ziel, Speichersysteme auszuwählen. Dies geschah aus technischer Sicht und wirtschaftlicher Sicht. Abschließend wurde ein Speichersystem für das Beispielhaus ausgewählt. Der Speicher der Firma Fronius schnitt technisch sowie wirtschaftlich am besten ab. Der hohe Wirkungsgrad, das platzsparende System und die hohe Lebensdauer der Batterien waren dafür ausschlaggebend. Die Investitionskosten können bis auf 1.984,80€ gedeckt werden, was etwa 20% der Gesamtkosten ausmacht. Somit sind Lithium Speicher aus aktueller Sicht auf Technik und Wirtschaftlichkeit die optimalen Speichersysteme für Einfamilienhäuser.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Speichersysteme eine sinnvolle Ergänzung zu einer Energieerzeugungsanlage sind. Überschüssige Energie, die zu niedrigen Konditionen in das Netz des Energiebetreibers eingespeist werden würde, dient zur Abdeckung des Eigenverbrauchs im Haus. Durch diese Verschiebung der Energie, kann der Autarkiegrad erheblich gesteigert werden. Momentan sind die Investitionskosten für Speichersysteme jedoch zu hoch, weswegen die Nachfrage noch gering ist. Eigenheimbesitzer für die Unabhängigkeit im Vordergrund steht können in einen Energiespeicher investieren, aber aus wirtschaftlicher Sichtweise lohnt sich eine Investition momentan noch nicht.

Da die Einspeisevergütung, geregelt durch das EEG, weiterhin absinkt, werden Energiespeicher in Zukunft noch interessanter für Eigenheimbesitzer.⁶² Durch Forschung und Optimierung könnten neuere Technologie wie die Redox-Flow Batterie oder Natrium-Schwefel Batterie eventuell attraktiver für Einfamilienhäuser werden. Nachteile beider Systeme sind bisher die Pumpen sowie eine Arbeitstemperatur von 300°C. Bei aktuellen Speichern ist eine Kostensenkung erstrebenswert.

62 BSW Solar 2014, http://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/eeg_verg_uebers.pdf

Literaturverzeichnis

BioAge Group (2015),
<http://bioage.typepad.com/.a/6a00d8341c4fbe53ef0147e3371789970b-800wi>, zuletzt
aufgerufen 16.03.2015

BSW Solar (2014),
http://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/eeg_verg_uebers.pdf, zuletzt
aufgerufen 10.03.2015

Doelling Robert (2014),
<http://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/wechselrichter/mpp-tracker.html>, zuletzt aufgerufen 08.03.2015

Firma Fronius (2014), http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-1F033B5A-E463E830/fronius_deutschland/Fronius_Symo_Eintauschaktion_Planungsinformationen_v2_398013_snapshot.pdf, zuletzt aufgerufen 15.03.2015

Firma Fronius (2014), http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-00FD314D-075D792A/fronius_deutschland/DBL_Fronius_Symo_Hybrid_DE_0114_as16_low_384821_snapshot.pdf, zuletzt aufgerufen 15.03.2015

Firma Gildemeister (2014) <http://energy.gildemeister.com/de/speichern/cellcube-fb-10-20-30#%C3%9Cbersicht>, zuletzt aufgerufen 19.03.2015

Firma Gildemeister (2015) <http://energy.gildemeister.com/de/unternehmen/ueber-uns>,
zuletzt aufgerufen 17.03.2015

Firma Gildemeister (2015) <http://energy.gildemeister.com/de/speichern/cellcube-fb-10-20-30#Technologie>, zuletzt aufgerufen 17.03.2015

Firma Gildemeister (2015) <http://energy.gildemeister.com/de/speichern/cellcube-fb-10-20-30#Technische-Daten>, zuletzt aufgerufen 17.03.2015

Firma Hoppecke (2014)
http://www.hoppecke.de/content/download/brochures/rp/sun.power_pack_de.pdf,
zuletzt aufgerufen 10.03.2015

Firma NGK (2014),
<http://www.ngk.co.jp/english/products/power/nas/principle/index.html>, zuletzt aufgerufen
18.03.2015

Firma NGK (2014),
<http://www.ngk.co.jp/english/products/power/nas/principle/index.html>, zuletzt aufgerufen
18.03.2015

Firma SMA (2012) http://files.sma.de/dl/7418/Flyer_Niederspr-ADE123016w.pdf zuletzt aufgerufen 21.03.2015

Firma SMA (2014), <http://www.sma.de/unternehmen/ueber-sma.html>, zuletzt aufgerufen 07.03.2015

Firma SMA (2012),
<http://www.sma-sunny.com/2012/02/06/wie-funktioniert-eigenverbrauch-von-solarstrom/>,
zuletzt aufgerufen 10.03.2015

Firma Younicos (2013)
http://www.younicos.com/de/republik_younicos/unsere_geschichte/, zuletzt aufgerufen 13.03.2015

Installationspreise der Firma EAB-Solar Stand 03.01.2015

Lipinski Klaus (2015), <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/DoD-depth-of-discharge-Entladungstiefe.html>, zuletzt aufgerufen 16.03.2015

Neupert Ulrik, Thomaus Euting, Thomas Kretschmer, Claudia Notthoff, Klaus Ruhlig, Birgit Weimert (2009): Energiespeicher – Technische Grundlagen und energiewirtschaftliches Potenzial, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart

Oschmann Dirk (2012): <http://www.stromvergleich.de/strompreise>, zuletzt aufgerufen 16.03.2015

Paschotta Rüdiger (Stand 2012) <https://www.energie-lexikon.info/energiespeicher.html>,
zuletzt aufgerufen 21.03.2015

Produkt-Schulung Thema Fronius Symo Hybrid durch Veit Werner 26.01.2015

Rummich Erich (2007): Energiespeicher - Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen. 4. Aufl., Expert Verlag, Renningen

Richey Manfred (2013):
http://biowasserstoff-magazin.richey-web.de/pdf/Themen_Akkumulatoren.pdf, zuletzt aufgerufen 02.03.2015

Springer Gabler (2013)
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/amortisationsdauer.html>, zuletzt aufgerufen 12.03.2015

Sterner Michael, Ingo Stadler (2014): Energiespeicher – Bedarf, Technologie, Integration, Springer Spektrum, Aachen

Telefonat mit einem Mitarbeiter der Firma Gildemeister 20.02.2015

Telefonat mit einem Mitarbeiter der Firma Younicos 16.02.2015

Wesselak Viktor, Thomas Schabbach, Thomas Link, Joachim Fischer (2013): Regenerative Energietechnik. 2. Aufl., Springer Spektrum, Aachen

Wosnitza Franz, Hans Gerd Hilgers (2012): Energieeffizienz und Energiemanagement – Ein Überblick heutiger Möglichkeiten und Notwendigkeiten, Springer Spektrum, Aachen

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Magdeburg, 25.03.2015

Ort, Datum

.....

Unterschrift des Verfassers

Anlage

PV-Sol für Fronius Symo Hybrid 6.0 - 6kWh

für SMA Sunny Island 6.0H - 9,84kWh

für Gildemeister CellCube – 5kWh

Tabellen zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit