



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

MASTERARBEIT

Erstellung eines Berechnungstools zur Dimensionierung von
Akkuspeichersystemen für netzgekoppelte Photovoltaikanlagen

Vorgelegt von

Siti Hajar Ibrahim

2067904

Masterstudiengang Renewable Energy Systems

Gutachter: Prof. Dr. Timon Kampschulte

Zweitgutachter: Dipl.-Ing. Ulrich Hoseas

Angefertigt in der Zeit vom 1. März 2013 bis 31. August 2013

Hamburg, August 2013

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Praktikant bei der Firma Yandalux GmbH von März 2013 bis August 2013. Allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich an dieser Stelle danken.

Die Realisierung dieses Projekts wäre ohne Mithilfe und Unterstützung vieler Personen, die ich jetzt hier nennen möchte nicht möglich gewesen. Mein besonderer Dank gilt meinen Betreuern, Herrn Prof. Dr. Timon Kampschulte und Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Hoseas, die diese Arbeit initiiert haben und mir während der gesamten Forschungs- und Entwicklungszeit, und auch während des Schreibens dieser Arbeit mit zahlreichen Anregungen sehr behilflich waren.

Besonders dankbar bin ich ebenfalls Herrn Dipl.-Ing. Fode Youssouf Minthe und Frau Annette Wichers-Minthe für ihre Unterstützung und stetiges Interesse am Fortschritt der Arbeit.

Dieses Projekt wäre auch ohne alle anderen Mitarbeiter der Firma Yandalux ohne Erfolg geblieben.

Die Masterarbeit ist die interessanteste Zeit des Masterstudiums. So kann man endlich sehen, dass sich die letzten Jahre des Studierens gelohnt haben. Allerdings wäre es niemals so weit gekommen, wenn meine Eltern mich nicht unterstützt hätten. Daher möchte ich mich an dieser Stelle ganz herzlich auch bei ihnen bedanken.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Siti Hajar Ibrahim', is written over a horizontal line. The signature is enclosed within a hand-drawn circle.

Siti Hajar Ibrahim

Hamburg, den 31.08.2013

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

„Ich versichere, dass ich die beiliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quelle und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzen Quellen wörtlich und inhaltlich entnommen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.“

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Hajar Ibrahim', written over a horizontal line.

Siti Hajar Ibrahim

Hamburg, den 31.08.2013

INHALTSVERZEICHNIS

DANKSAGUNG	ii
EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG	iii
FORMELZEICHEN UND INDIZES	vi
1. EINLEITUNG	7
2. GRUNDSZENARIEN IN DEUTSCHLAND	9
2.1 Solarstromeinspeisung und Speicherbedarf in Deutschland	9
2.2 Solarstromspeicherung zur Eigenverbrauchsoptimierung	12
3. ZWISCHENSPEICHERUNG VON PV-ENERGIE.....	14
3.1 Solarstromspeicherung mit Akkumulatoren.....	14
3.2 Vergleich verschiedener Akkutechnologien	15
3.2.1 Bleisäureakkumulator	16
3.2.2 Lithium-Ionen-Akkumulator.....	17
3.2.3 Nickel-Cadmium-Akkumulator (NiCd).....	17
3.2.4 Nickel-Metallhydrid-Akkumulator (NiMH).....	18
3.3 Prinzip der Zwischenspeicherung in netzgekoppelten Anlagen	20
3.4 Netzgekoppelte PV-Anlagen mit integriertem Speichersystem.....	21
3.4.1 Netzgekoppeltes PV-System mit AC-gekoppeltem Speichersystem.....	21
3.4.2 Netzgekoppeltes PV-System mit DC-gekoppeltem Speichersystem.....	21
3.5 Das Speichersystem.....	22
3.5.1 Aufbau und Funktionsprinzip	22
3.5.2 Speicherkapazität	24
4. SIMULATION UND DIMENSIONIERUNG DES SPEICHERSYSTEMS.....	25
4.1 Modellierung des Speichersystems	25
4.2 Last- und Erzeugungsgänge	26
4.2.1 Ermittlung des Lastprofils.....	26
4.2.2 Ermittlung des Erzeugungsprofils einer PV-Anlage.....	27
4.3 Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad	27
4.3.1 Bestimmung des natürlichen Eigenverbrauchsanteils und Autarkiegrades	27
4.3.2 Bestimmung des optimierten Eigenverbrauchsanteils und Autarkiegrades....	28
4.4 Entwicklung eines Speicherberechnungstools mit Microsoft Excel	29
4.4.1 Erstellung des Berechnungstools	29
4.4.2 Verwendung des Berechnungstools	30
4.5 Simulation einer PV-Anlage mit und ohne Speichersystem am Beispiel eines Modellhaushalts.....	46
4.6 Ergebnisse	47

4.7	Dimensionierung des Speichersystems	51
4.7.1	Ermittlung der optimalen SpeichergroÙe	54
4.7.2	Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit von PV-Anlagenleistung und nutzbarer Akkukapazität.....	57
5.	WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE UND MARKTÜBERSICHT	60
5.1	Analyse der Wirtschaftlichkeit.....	60
5.1.1	Annahmen und Prognosen	60
5.1.2	Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse	61
5.1.3	Analyse verschiedener Szenarien	65
5.2	Marktübersicht der Akkuspeichersysteme verschiedener Hersteller	68
5.2.1	Vergleich von Speichersystemen verschiedener Hersteller.....	69
5.2.2	Speicherkosten verschiedener Akkutechnologien	73
5.3	Auslegung einer PV-Anlage mit und ohne Speichersystem	76
6.	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSBEMERKUNG.....	81
6.1.1	Ergebniszusammenfassung	81
6.1.2	Schlussbemerkung	81
	LITERATURVERZEICHNIS.....	vii
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	xi
	TABELLENVERZEICHNIS	xiii
	ANHANG.....	xiv

FORMELZEICHEN UND INDIZES

A	Ampere
AC	Alternating current (<i>deutsch</i> Wechselstrom)
AG	Autarkiegrad
Ah	Amperestunden
Akku	Akkumulator
BMS	Batteriemanagementsystem
C_{10}	Kapazität bei 10-stündiger Entladung
ct/kWh	Cent pro Kilowattstunde
DC	Direct current (<i>deutsch</i> Gleichstrom)
DoD	Depth of discharge (<i>deutsch</i> Entladetiefe)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EMS	Energiemanagementsystem
EV	Eigenverbrauchsanteil
GW	Gigawatt
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
kWp	Kilowatt-peak
Li-Ion	Lithium-Ionen
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-Metall-Hydrid
PV	Photovoltaik
PVGIS	Photovoltaik Geographical Information System
ÜG1	Übergangsmonate 1
ÜG2	Übergangsmonate 2
V	Volt
W	Watt
η_{Ah}	Amperestundenwirkungsgrad

1. EINLEITUNG

Heutzutage sind die Stromerzeugungskosten für selbstproduzierten Solarstrom günstiger als die Bezugskosten für Strom, den Privathaushalte vom Energieversorger beziehen. Solarstrom lässt sich inzwischen für rund 15 ct/kWh erzeugen, im Gegensatz dazu kostet der Netzstrom im Durchschnitt 26 ct/kWh [1]. Das Problem ist allerdings, dass Solarstrom nicht immer dann zur Verfügung steht, wenn er auch benötigt wird, sondern abhängig von den lokalen Einstrahlungsbedingungen.

Parallel dazu nimmt die gemäß Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) garantierte Vergütung für den ins Netz eingespeisten Solarstrom immer weiter ab. Für die Netzeinspeisung des Solarstroms bekommen Photovoltaik (PV)-Anlagenbetreiber heute weniger als 15 ct/kWh [2]. Zudem ist im aktuellen EEG festgeschrieben, dass die garantierte Einspeisevergütung auf 0 ct/kWh sinkt, sobald deutschlandweit erstmals 52 GW geförderte Anlagenleistung installiert sind. Zurzeit sind insgesamt über 34 GW PV-Anlagenleistungen in Deutschland am Netz. Allein, im ersten Halbjahr 2013 wurden in Deutschland insgesamt 1,8 GW solare Anlageleistung neu installiert [3]. Experten schätzen, dass die 52-GW-Grenze schon in zwei bis drei Jahren erreicht werden könnte [4]. Für die Betreiber von neuen Anlagen verlagert sich dadurch der ökonomische Anreiz darauf, möglichst viel des erzeugten Solarstroms selbst zu nutzen. Durch die Nutzung von Akkuspeichersystemen können PV-Anlagenbetreiber den Eigenverbrauchsanteil, je nach Betriebsweise und Auslegung der Anlage, von 20-30% auf 60% und mehr erhöhen [5], indem der nicht zeitgleich zur Erzeugung selbst verbrauchte Strom aufgenommen und bei Bedarf wieder abgegeben wird. Ferner, wird seit dem 1. Mai 2013 mit dem neuen KfW-Förderprogramm die Investitionen in Speichersysteme bezuschusst und dadurch ein Markt für Solarstromspeicher in Bewegung gebracht. Auf der Intersolar 2013 präsentierten etwa 200 Unternehmen Produkte und Dienstleistungen rund um Speichersysteme. Bei Anbietern von PV-Anlagesystemen wird daher inzwischen das Thema Akkuspeichersysteme vorangetrieben. Nach dem heutigen Stand sind Akkuspeichersysteme zwar vorteilhaft, erfordern allerdings hohe Investitionskosten. Je größer die Speicherkapazität, desto höher werden die Investitionskosten. Die Ermittlung der optimalen Speicherkapazität ist aus diesem Grund unbedingt erforderlich.

Dazu wird in dieser Arbeit ein Berechnungstool erstellt, mit dessen Hilfe Akkuspeichersysteme für netzgekoppelte PV-Anlagen unter Berücksichtigung technischer Gesichtspunkte wie Speichertyp, Zyklenlebensdauer, Entladetiefe (DoD) usw. modelliert und optimal dimensioniert werden können. Es wird methodisch wie folgt vorgegangen:

- Ermittlung der Erzeugungsprofile von PV-Anlagen (in Abhängigkeit der Größe und des Standortes)
- Ermittlung der Lastprofile vorwiegend privater Haushalte
- Ermittlung der zur Simulation benötigten Daten wie z.B. ungedeckter Energieverbrauch, überschüssige PV-Energie, möglicher Akkuaufladung- und entladung, Netzeinspeisung und Netzbezug durch den Einsatz der ermittelten Erzeugungs- und Lastprofile als Basisdaten
- Ermittlung der möglichen Anhebung des Eigenverbrauchsanteils und Autarkiegrades eines Modellhaushalts mit und ohne Speicher durch Simulation mithilfe des Berechnungstools
- Untersuchung der Abhängigkeit des Eigenverbrauchsanteils und des Autarkiegrades im Zusammenhang von Akkukapazität und PV-Anlagenleistung

Auf der Grundlage dieser Ermittlungen wird eine Wirtschaftlichkeitsberechnung von netzgekoppelten PV-Anlagen mit Akkuspeichern unter Berücksichtigung u.a. der Stromkostensparnis, Investitionskosten und Fördermittel durchgeführt. Für den Zweck der Wirtschaftlichkeitsanalyse wird wie folgt vorgegangen:

- Erstellung einer Marktübersicht verschiedener Hersteller von Akkuspeichersystemen
- Bestimmung der Kosten pro gespeicherter kWh Solarstrom unterschiedlicher Akkuspeichersysteme über die Lebensdauer des Akkus
- Ermittlung der über die gesamte Anlagenlebensdauer möglichen Einsparungen und des finanziellen Aufwands durch das Akkuspeichersystem und die Eigenkapital- bzw. Gesamtkapitalrendite

2. GRUNDSZENARIEN IN DEUTSCHLAND

2.1 Solarstromeinspeisung und Speicherbedarf in Deutschland

In der Vergangenheit sind viele PV Anlagen installiert worden, nur weil sie durch die garantierte Einspeisevergütung eine hohe Rendite versprochen. Die Vergütung sollte am Ende die Anschaffungskosten aufwiegen und dem Anlagenbetreiber monetären Gewinn erwirtschaften.

Heute lohnt sich das renditegetriebene Bauen nicht mehr, da in Deutschland die sogenannte Netzparität erreicht ist. Aufgrund des jährlich ansteigenden Strompreises, liegt die Einspeisevergütung von PV-Strom jetzt niedriger als der Bruttopreis von Haushaltsstrom [6].

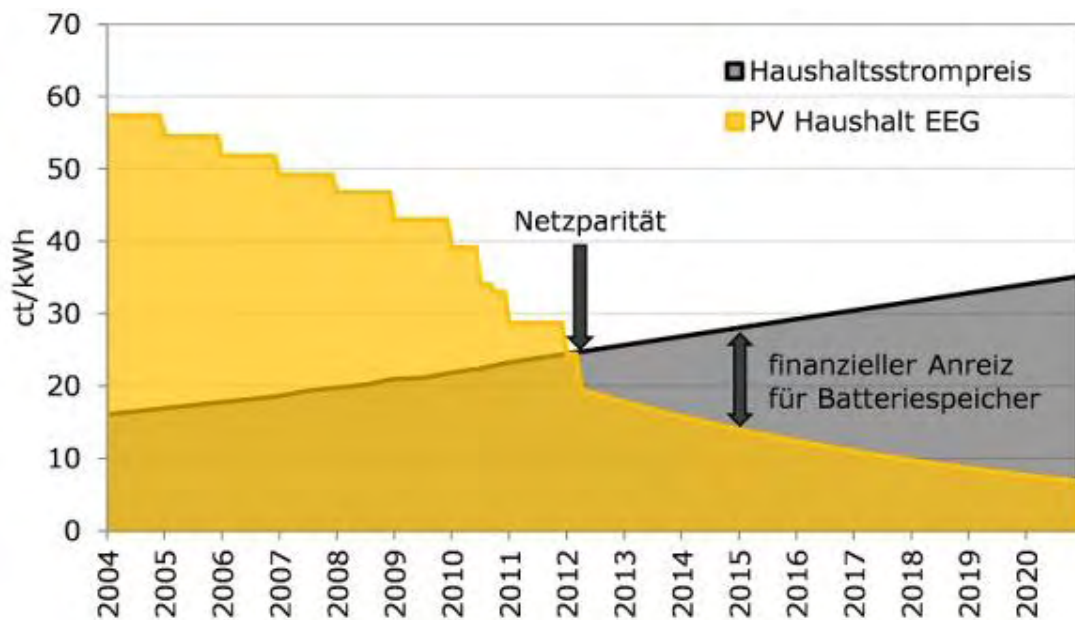


Abbildung 1: „Vergleich der Kostenentwicklung der Haushaltsstrompreise mit der EEG-Vergütung für PV-Anlagen mit einer installierten Leistung von weniger als zehn Kilowattpeak. Die Kurven zeigen, dass sich die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu einer Anlage, die nur einspeist, weiter verbessern wird.“ [6]

Das bedeutet, es ist bereits heute günstiger, den erzeugten Strom vom Dach selbst zu verbrauchen, anstatt ihn weiterhin einzuspeisen, um ihn im Anschluss daran teurer vom Energieversorger wieder einzukaufen. In vielen Regionen zahlt man derzeit schon mehr als

26 ct/kWh [7] mehr als man für den selbst erzeugten Solarstrom bei der Netzeinspeisung vergütet erhielt.

Laut der Strompreisanalyse des Bundesverbands der Energie und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) Berlin, stieg der Strompreis für Privathaushalte in den letzten fünf Jahren von durchschnittlich 20,64 ct/kWh im Jahr 2007 auf 25,89 ct/kWh im Jahr 2012 [7]. Abgesehen davon, ist die Einspeisevergütung innerhalb weniger Jahre rapide gefallen. PV-Anlagen, die 2004 ans Netz gingen, bekamen 57,4 ct/kWh vergütet, die für 20 Jahre garantiert wurden. Im Juli 2013 in Betrieb gegangene Anlagen wird nur noch abhängig von Anlagengröße und –bauart, mit 10,44 ct/kWh, 15,07 ct/kWh oder rund 17 ct/kWh vergütet [8]. Die Vergütung hat sich demnach in den letzten 9 Jahren um mehr als 50% verringert. Laut der Bundesnetzagentur, mit der Neuregelung des EEG wurde festgelegt, dass die Vergütung für neu ans Netz gegangene Anlagen künftig jeden Monat um bis zu 1,8 Prozent pro Monat sinkt [3].

Das EEG sah vom 2009 bis 2012 für den eigen genutzten Strom eine zusätzliche Eigenverbrauchsvergütung vor. Das bot den PV-Anlagebetreibern den Anreiz, den produzierten Solarstrom selbst zu nutzen. Von Eigenverbrauch bei PV-Anlagen spricht man, wenn der generierte Solarstrom nicht in das Stromnetz eingespeist, sondern selbst genutzt wird. In 2012 übersteigen die Stromkosten teilweise die Einspeisevergütung. In diesem Fall ist jede Kilowattstunde, die selbst verbraucht wird, wirtschaftlicher als wenn diese ins Netz eingespeist wird. Allerdings wurde seit dem 1. April 2012 der Eigenverbrauch nicht mehr zusätzlich vergütet.

Vor diesem Hintergrund spielt die Eigenverbrauchsoptimierung eine immer wichtigere Rolle zur Rentabilität einer PV-Anlage. In der Regel können in der Praxis nur 20-30% des erzeugten Strom selbst verbraucht werden, da Solarstrom nicht immer dann erzeugt wird, wenn er benötigt wird.

Der Eigenverbrauchsanteil kann auf unterschiedliche Weise optimiert werden:

- **Reduzierung der PV-Leistungsgröße**

Die Reduzierung der Leistungsgröße kann zu einem erhöhten Eigenverbrauchsanteil führen. Es muss dabei aber beachtet werden, dass die Systemgröße nicht zu klein ist, so dass der Anteil des Stromverbrauchs durch selbst erzeugten Strom nicht optimal gedeckt werden kann, da es dann letztendlich wieder zu weniger Einsparungen führt.

- **Parallelisieren von Erzeugung und Verbrauch**

- ***Änderung des persönlichen Verbraucherverhaltens***

Die Verbraucher werden in Zeiten eines hohen Stromangebots oder eines geringeren Strombedarfs eingeschaltet.

Der Eigenverbrauchsanteil kann durch angepasstes Verbraucherverhalten (z.B. Waschmaschine und Trockner zu sonnenreichen Zeiten anstellen) auf rund 30% erhöht werden [9].

- ***Lastmanagement mit einfachen Timer- oder Steuergeräten***

Steuerbare, verbrauchsintensive Geräte werden nur dann eingeschaltet, wenn die PV-Anlage besonders viel Strom produziert. Eine noch größere Anhebung des Eigenverbrauchsanteils kann mit einem intelligenten Energiemanagementsystem (EMS) erzielt werden. Das Gerät liefert einen schnellen Überblick über die aktuell produzierte Solarstrommenge und schaltet verbrauchsintensive Elektrogeräte dann, bei hoher PV-Stromproduktion ein.

- **Integration von Speichersystemen**

PV- Strom, der während der Erzeugungszeit nicht direkt verbraucht wird, wird gespeichert und zu Zeitpunkten, in denen die PV-Anlage keinen oder nichtgenügend Strom produziert verbraucht.

Mit Speichern können Hausbesitzer bis zu 80 % ihres Solarstroms selbst verbrauchen je nach Größe der Speicher und der Höhe des Wirkungsgrades ab. [9]

2.2 Solarstromspeicherung zur Eigenverbrauchsoptimierung

Solar angetriebene Generatoren erzeugen Energie nur zeitweise, wenn die Sonne scheint. Aber oft muss Energie auch dann zur Verfügung stehen, wenn das System gerade keine generiert. Solarstromspeicherung ermöglicht die Verwendung von Energie aus den Solargeneratoren dann einsatzbereit, wann immer sie gebraucht wird. Überschüssige PV-Energie, die sonst in das Stromnetz eingespeist werden würde, wird tagsüber vom Speicher aufgenommen. Später, wenn die selbst erzeugte Energie nicht mehr zur Deckung des Verbrauchs ausreicht, kann die gespeicherte PV-Energie zur Verwendung im Haus genutzt werden.

In diesem Sinne macht die Solarstromspeicherung den Anlagenbetreiber unabhängiger von Stromversorgern und es kann ein höherer Autarkiegrad erreicht werden.

Der Autarkiegrad gibt an, welcher Anteil des Stromverbrauchs durch eigene Erzeugung gedeckt wird und wie viel Netzstrom dadurch eingespart werden kann. Ein höherer Autarkiegrad bedeutet somit eine höhere Einsparung der Netzstromkosten.

$$\text{Autarkiegrad} = \frac{\text{eigenverbraucher Solarstrom}}{\text{Gesamtstromverbrauch}} \quad [10]$$

Ferner könnte ein höherer Eigenverbrauchsanteil durch die Speicherung erreicht werden, was zu einer schnellen Rentabilität und Amortisierung der Investitionskosten führen kann. Der Eigenverbrauchsanteil gibt an, wie viel erzeugter Strom selbst verbraucht werden kann.

$$\text{Eigenverbrauchsanteil} = \frac{\text{eigenverbraucher Solarstrom}}{\text{erzeugter PV-Strom}} \quad [11]$$

Obwohl, der Eigenverbrauchbonus seit der Umstellung der EEG am 1. April 2012 abgeschafft wurde, kann, ab dem 1. Mai 2013 der Eigenverbrauch von Solarstrom in Privathaushalten und Gewerbebetrieben durch die KfW-Förderung mit bis zu 100% der Nettoinvestitionskosten, der Einsatz eines Akkuspeichers finanziert werden [12]. Gefördert werden neu errichtete Photovoltaikanlagen mit Solarstromspeicher sowie nachträglich installierte Solarstromspeicher für Photovoltaikanlagen, mit Anlagenleistungen bis maximal 30 kWp die nach dem 31. Dezember 2012 in Betrieb genommen wurden und bereits über ein halbes Jahr im Betrieb sind [13].

Die sinkende Einspeisevergütung, steigende Strombezugspreise und die Förderung für Solarstromspeicher machen den Einsatz von Solarstromspeichern zunehmend interessant. Zudem kann mit Hilfe des Solarstromspeichers Sonnenenergie tagsüber geladen werden, so dass die Energie in Zeiten mit geringer oder keiner PV-Stromproduktion verfügbar ist. Dadurch kann neben dem Eigenverbrauchsanteil gleichzeitig das öffentliche Stromnetz entlastet werden, indem Produktionsspitzen vermieden werden.

Durch die geringere Stromeinspeisung ins Netz wird dann auch der Bedarf an neuen Stromstraßen sinken. Außerdem wird der selbst verbrauchte Solarstrom nicht vergütet und führt zu einer bedeutenden Entlastung des Umlagekontos für Ökostrom.

Je nach Speicherzeit und Einsätze lässt sich Strom auf unterschiedliche Weise speichern:

- Pumpspeicherkraftwerke
- Druckluftspeicher
- Schwungradspeicher
- Superkondensatoren
- Elektrochemische Speicher
- Chemische Energieträger [14]

In dieser Arbeit wird hauptsächlich die Eigenverbrauchsoptimierung durch Zwischenspeicherung von Solarstrom in elektrochemischen Speichern, den Akkumulatoren diskutiert.

3. ZWISCHENSPEICHERUNG VON PV-ENERGIE

3.1 Solarstromspeicherung mit Akkumulatoren

Als Stromspeicher werden Energiespeicher bezeichnet, in denen elektrische Energie über einen Energiewandler in einer anderen Energieform gespeichert wird. Die Entnahme erfolgt dann entweder über den gleichen oder durch einen anderen Wandler der die gespeicherte Energie wieder in elektrischen Strom umwandelt [14].

Obwohl es viele Möglichkeiten zur Solarstromspeicherung gibt, kommen für die Anwendungen in privaten Haushalten in erster Linie Solarakkumulatoren als Tagespufferspeicher zum Einsatz. Ein Solarakkumulator speichert die durch PV-Anlagen erzeugte elektrische Energie indirekt in elektrochemischer Form. Durch die so gespeicherte Energie kann der Verbraucher dann auch außerhalb der Ertragszeiten auf den, durch die eigene Solaranlage produzierten Strom zurückgreifen und wird dadurch nahezu unabhängig von den gängigen Stromanbietern.

Alle Akkumulatoren funktionieren im Prinzip nach einem ähnlichen Schema. Das Elektrodenmaterial (z. B. Blei, Nickel, Lithium, Zink, Eisen,) wird in einem Behälter in einen Elektrolyt getaucht. Der Elektrolyt besteht nicht bei allen Akkutypen aus einer flüssigen Lösung, sondern es kann sich dabei auch um ein Gel oder sogar um einen Feststoff handeln [15]. Die verschiedenen Akkutypen unterscheiden sich durch das verwendete Elektrodenmaterial und den Elektrolyten. Beim Laden lässt man den Solarstrom durch den Akku fließen. Dadurch kommt eine chemische Reaktion in Gange, wodurch beide Elektroden sich chemisch verändern. Die chemischen Reaktionen hängen wiederum vom Akkutyp ab.

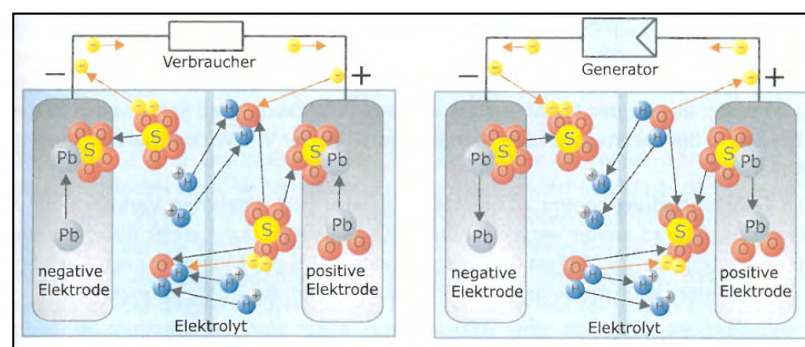


Abbildung 2: Entladen und Laden eines Bleiakkumulators [22]

Betrachtet man die gesamte Lebensdauer eines PV-Systems, werden Akkumulatoren aufgrund intensiver Wartungs- und Ersatzkosten, der teuerste Bestandteil des Systems sein. Deshalb, ist die Auswahl des besten Akkus für eine bestimmte Anwendung sehr wichtig. Leider gibt es keinem besten Akku für alle Anwendungen.

Um eine Speicherung des Solarstroms in Akkus langfristig und effizient zu realisieren, bedarf es für Akkus bei dem Einsatz in PV-Anlagen einiger wichtiger Eigenschaften:

- Große Kapazität
- Hohe Zyklenlebensdauer
- Relativ kleine Zykltiefe
- Gelegentliche Tiefentladezyklen
- Bereits sehr kleine Ladeströme sollen für die Energiespeicherung ausgenutzt werden können
- Geringe Selbstentladung
- Guter Amperestundenwirkungsgrad η_{Ah}
- Geringe oder gar keine Wartung erforderlich [16]

Zusammenschaltung von Akkumulatoren

Bei der Serienschaltung einer bestimmten Anzahl n von gleichartigen Akkus addieren sich die Spannungen und Innenwiderstände bei gleichbleibender Kapazität.

Bei der Parallelschaltung einer bestimmten Anzahl n von gleichartigen Akkus bleibt die Akkuspannung unverändert und es addieren sich die Kapazitäten und Innenleitwerte, der Innenwiderstand sinkt.

3.2 Vergleich verschiedener Akkutechnologien

Derzeit sind sehr viele verschiedene Akkutypen mit unterschiedlicher Lebensdauer und Speicherdichte auf dem Markt. Die wichtigsten Akkutypen die kommerziell verfügbar sind, sind Bleisäure-Akkus, Lithium-Ionen-Akkus, Nickel-Cadmium-Akkus und Nickel Metallhydrid-Akkus.

3.2.1 Bleisäureakkumulator

Die Verwendung von Bleiakkumulatoren ist eine erprobte Technologie mit langjährigen Erfahrungswerten, die relativ zu anderen Akkutechnologien niedrige Kosten aufweist. Ein Bleiakkumulator ist ein Akkumulator, bei dem die Elektroden im geladenen Zustand aus Blei und Bleidioxid bestehen und der Elektrolyt verdünnte Schwefelsäure ist [17]. Sie unterscheiden sich durch ihre Bauart, deren Eigenschaften und ihre Einsatzmöglichkeit.

Bei den Bleiakkumulatoren unterscheidet man zwei Typen von Systemen, geschlossene und verschlossene Akku:

- **Geschlossene Bleiakkus (mit flüssigem Elektrolyt)**
Entstandene Gase können durch den Deckel, der mit einer oder mehreren Öffnungen versehen ist, entweichen. Wasser muss in regelmäßigen Abständen nachgefüllt werden.
- **Verschlossene Bleiakkus (mit Gel- oder Vlies-Technologie)**
Wird auch VRLA-Akkumulator genannt (englisch: *valve-regulated lead-acid battery*). Mit interner Gasrekombination er ist unter üblichen Bedingungen mit einer Einrichtung verschlossen, die den Gasaustritt erlaubt, wenn der innere Druck einen vorbestimmten Wert überschreitet. [16]

Während die verschlossenen Akkus einen geringeren Wartungsaufwand aufweisen und durch geringere Ausgasung auch verringert Belüftungsförderung für den Aufstellungsraum bieten, wird mit geschlossenen Akkus eine hohe Lebensdauer erreicht.

Die typischen geschlossene Blei- Akkutypen für die Anwendung in PV-Anlagen sind:

- Solarbatterien mit verstärkten positiven und negativen Gitterplatten
- OPzS-Akkus mit positiven Panzerplatten und negativen Gitterplatten
- Akkus mit positiven Stabplatten und negativen Gitterplatten
- Verschlossene Blei-Kalzium-Akkus mit Gitterplatten
- Verschlossene Blei-Akkus mit Gel-Elektrolyt (OPzV) [16]

Der Vorteil der Blei-Säure-Akkus liegt vor allem in den geringen Kosten. Der Nachteil ist aber eine relativ geringere Lebensdauer und der hohe Wartungsaufwand. Aus diesem

Grund kann es jedoch erforderlich sein, den Akku während der Betriebsdauer der PV-Anlage, zu ersetzen.

3.2.2 Lithium-Ionen-Akkumulator

Neben Bleiakkumulatoren kommen inzwischen vermehrt Lithium-Akkumulatoren zum Einsatz. Diese verfügen über eine höhere Lebensdauer und einen besseren Wirkungsgrad als Bleiakkus, sie sind aber auch teurer.

Die negative Elektrode besteht aus Graphit, die positive Elektrode besteht häufig aus Lithium Metalloxid. Die positive Elektrode muss aus einem möglichst leichten Material bestehen, um die Lithium-Ionen, die beim Entladen von der negativen Elektrode abgegeben werden, aufnehmen zu können [18].

Die verschiedenen Lithium-Ionen-Akkus unterscheiden sich hauptsächlich im Kathodenwerkstoff, der Kobalt, Mangan, Nickel-Kobalt, Nickel-Kobalt-Mangan, Eisenphosphat oder Titanat sein kann. Die verschiedenen Kathodenwerkstoffe bewirken unterschiedliche Energiedichten, Leistungsdichten, Nennspannungen und Ladezyklen [19].

Lithium-Ionen-Akkumulatoren weisen im Vergleich zu anderen Akkutypen eine hohe Energiedichte auf, erfordern jedoch in den meisten Anwendungen elektronische Schutzschaltungen. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Lithium-Akkutechnologie zusammen mit der Blei-Akkutechnologie die wichtigste Akkutechnologie der nächsten 20 Jahren sein wird.

3.2.3 Nickel-Cadmium-Akkumulator (NiCd)

Nickel-Cadmium-Akkus bestehen aus zwei Elektroden, die in geladenem Zustand aus Platten, die am Minuspol mit fein verteiltem Cadmium und am Pluspol mit Nickel(III)-oxidhydroxid beladen sind. Als Elektrolyt dient ein alkalischer Elektrolyt z.B. 20%-tige Kaliumhydroxidlösung. Die Elektroden beinhalten zusätzlich Graphitpulver, welches die Leitfähigkeit erhöht [20].

Im Gegensatz zum Blei-Akku hat der NiCd-Akku eine höhere spezifische Energie und eine höhere Lebensdauer. Außerdem ist der NiCd-Akku extrem robust. Es können damit Lastwechsel von 1000 bis zu 2000 Lade- und Entladezyklen erreicht werden. Weitere Vorteile sind, dass der Akku ohne Probleme monatelang gelagert werden kann ohne Schaden zu nehmen und sehr temperaturunempfindlich ist (bis -40° Celsius). Nachteilig ist, dass ein Memory-Effekt entstehen kann wenn diese nicht vollständig entladen sind oder überladen werden. Wird der NiCd-Akku vor dem Laden nur teilentladen, dann tritt dieser Effekt auf. Der Akku wird sich diese Teilentladung “merken“ und stellt dann bei den folgenden Entladungen nicht mehr seine volle Nennkapazität zur Verfügung [20].

3.2.4 Nickel-Metallhydrid-Akkumulator (NiMH)

Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren weisen einen ähnlichen Aufbau wie Nickel-Cadmium-Akkus auf. Sie sind vor allem als Ersatztechnologie für NiCd-Akku entwickelt worden. Im Gegensatz zu NiCd-Akkus, die Cadmium in Cadmiumhydroxid umsetzen, werden beim Nickel-Metallhydrid-Akku Wasserstoffatome ein- bzw. ausgelagert. Für einen umweltverträglichen Ersatz zum NiCd-Akku wurde das Cadmium durch eine Metalllegierung ersetzt. Da NiMH-Akkus keine Cadmium-Elektrode besitzen, kann im Gegensatz zu den NiCd-Akkus auch kein Memory-Effekt auftreten [21].

In Tabelle 1 unten werden zum Vergleich verschiedenen Akkutypen zusammengefasst und dargestellt. Alle Angaben können unter Umständen im realen Betrieb von den hier angegebenen Richtwerten abweichen.

Tabelle 1: Vergleich der Akkutechnologien [14] [22] [23]

Akkutechnologie	Energiedichte (gravimetrisch)	Energiedichte (volumetrisch)	Spannung	Zyklusfestigkeit	Wirkungsgrad	Arbeitstemperatur	Selbstentladung	Spezifische Investitionskosten
	[Wh/kg]	[Wh/l]	[V/Zelle]	[Zyklen]	[%]	[°C]	[% monatlich]	€/kWh
Bleisäure	30 – 40	60 – 75	2,12	750 – 1500 (bei 80% DoD)	80 – 90	-20 bis 50	3 – 4	100 bis 300
Lithium-Ionen	100 – 200	220 – 350	3,2 – 3,7	2000 – 8000 (bei 100% DoD)	90 – 95	-20 bis 50	< 2	800 bis 1500
Nickel-Cadmium	40 – 60	50 – 150	1,2	2000 – 4000 (bei 100% DoD)	90	-40 bis 60	20	160 bis 500
Nickel-Metallhydrid	60 – 80	140 – 300	1,2	2000 – 4000 (bei 100% DoD)	80	-20 bis 50	30	600

3.3 Prinzip der Zwischenspeicherung in netzgekoppelten Anlagen

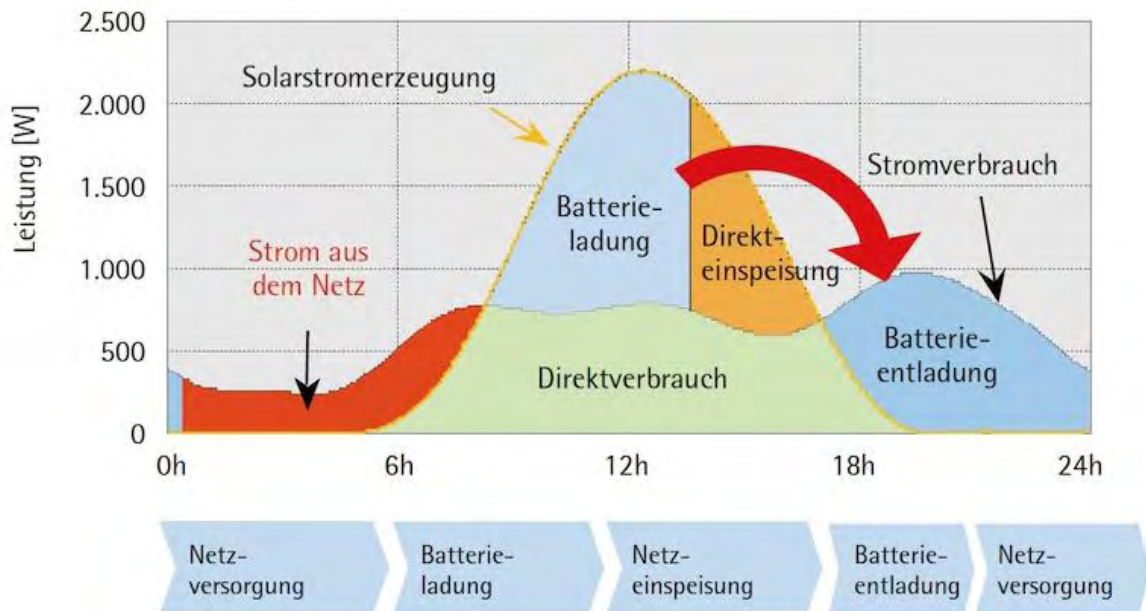


Abbildung 3: Zwischenspeicherung von PV-Energie [24]

Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, wird der Akku erst mit Solarenergie geladen, wenn die Stromerzeugung höher ist als der Verbrauch (Batterie-ladung). Der Akku speichert überschüssigen selbst erzeugten Solarstrom und macht ihn bei Bedarf nachts oder an bewölkten Tagen verfügbar. Nachdem der Akku vollgeladen und die Stromerzeugung immer noch höher als der Stromverbrauch ist, fließt der Überschuss direkt ins Netz (Netzeinspeisung). Wenn mehr verbraucht als erzeugt wird, wird der Akku entladen (Batterieentladung). Der im Akku geladene PV-Strom zählt als indirekter Eigenverbrauch und könnte den Eigenverbrauchsanteil erhöhen. Bei Erreichen eines eingestellten Ladezustandes, z. B. 50 % für Blei-Akkus und 70-100% für Lithium-Akkus, wird die Entladung gestoppt und falls in dieser Zeit noch Strom verbraucht wird, erfolgt der Bezug wieder aus dem öffentlichen Netz (Netzversorgung). Im Falle eines Stromausfalls im öffentlichen Netz erzeugt das Akkuspeichersystem ein Inselnetz und versorgt die angeschlossenen Verbraucher.

3.4 Netzgekoppelte PV-Anlagen mit integriertem Speichersystem

Akkuspeichersysteme in PV-Anlagen lassen sich prinzipiell in AC- und DC-Systeme unterscheiden. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Position der Akkuspeicher innerhalb des Anlagensystems.

3.4.1 Netzgekoppeltes PV-System mit AC-gekoppeltem Speichersystem

In AC gekoppelten Speichersystemen ist der Akkuspeicher im Wechselstromnetz des Hauses angeschlossen. Der generierte Solarstrom wird von einem PV-Wechselrichter von Gleichstrom in Wechselstrom umgewandelt. Damit der Solarstrom auch in einem Akku gespeichert werden kann, wird ein zweiter Wechselrichter benötigt, der den Wechselstrom wieder in Gleichstrom umwandelt. Durch die zweifache Umwandlung $DC \rightarrow AC \rightarrow DC$ entstehen höhere Verluste.

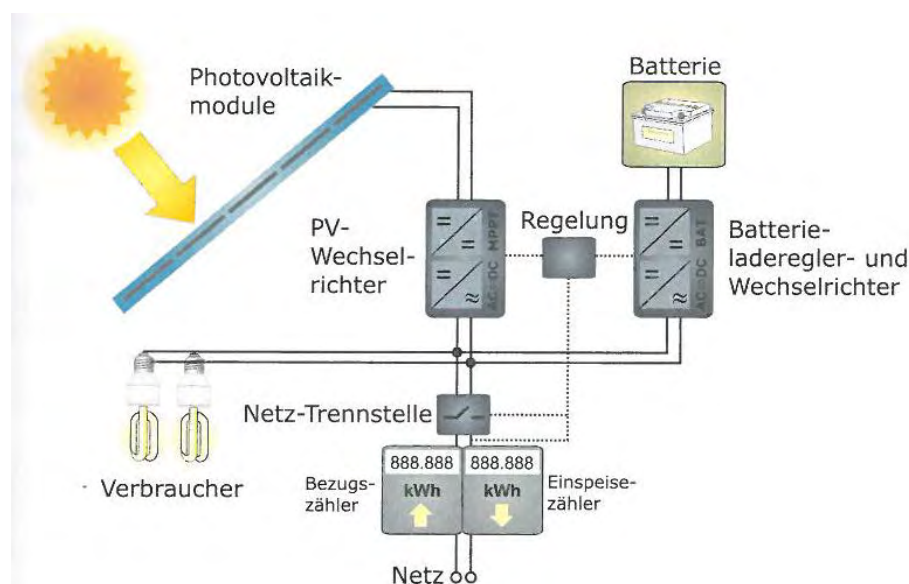


Abbildung 4: AC-gekoppeltes Speichersystem [25]

3.4.2 Netzgekoppeltes PV-System mit DC-gekoppeltem Speichersystem

In DC gekoppelten Speichersystemen befindet sich der Akkuspeicher im Zwischenkreis des PV-Wechselrichters. Bei der DC-Kopplung ist nur ein gemeinsamer Wechselrichter für

Akku und PV-Anlage vorgesehen. Dadurch kann ein gegenüber AC-gekoppelte Systemen ein höherer Gesamtwirkungsgrad des Speichersystems erreicht werden [25].

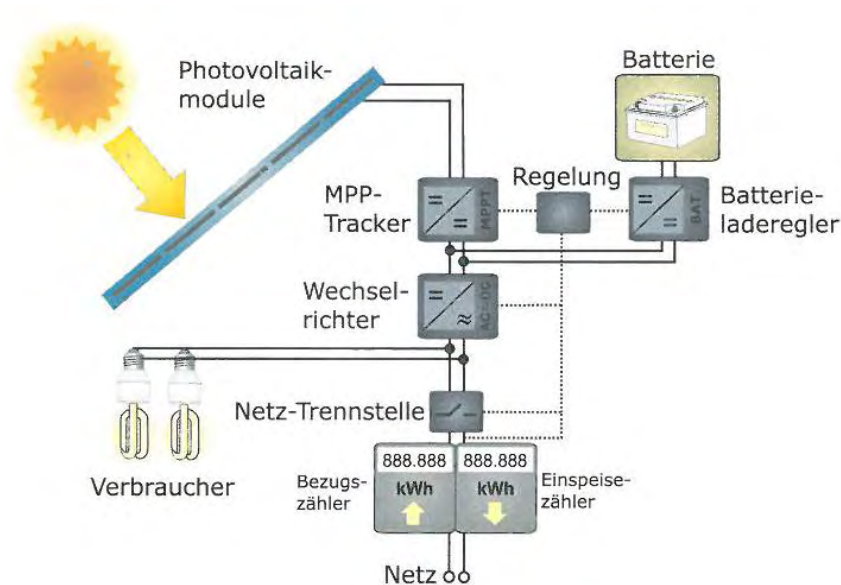


Abbildung 5: DC-gekoppeltes Speichersystem [25]

3.5 Das Speichersystem

3.5.1 Aufbau und Funktionsprinzip

Für die Realisierung von einem Speichersystem für Photovoltaikanlagen werden zumindest folgende Komponenten benötigt:

- PV-Wechselrichter
- Akkusystem mit Laderegler
- Elektronik für Speichermanagement
- Gleichstromwandler
- Akku-Wechselrichter (für AC-Lösung)
- Zählerinfrastruktur: ein Zweirichtungszähler, der als Verbrauchs- und Einspeisezähler dient und ein PV-Zähler, der die Erzeugung vom Solarstrom ermittelt [26]

Die Einbindung eines Speichersystems in das Anlagendesign kann wie im Kapitel 3.4 beschrieben entweder auf der Gleichspannungsebene oder auf der Wechselspannungsebene erfolgen (siehe Abbildung 6).

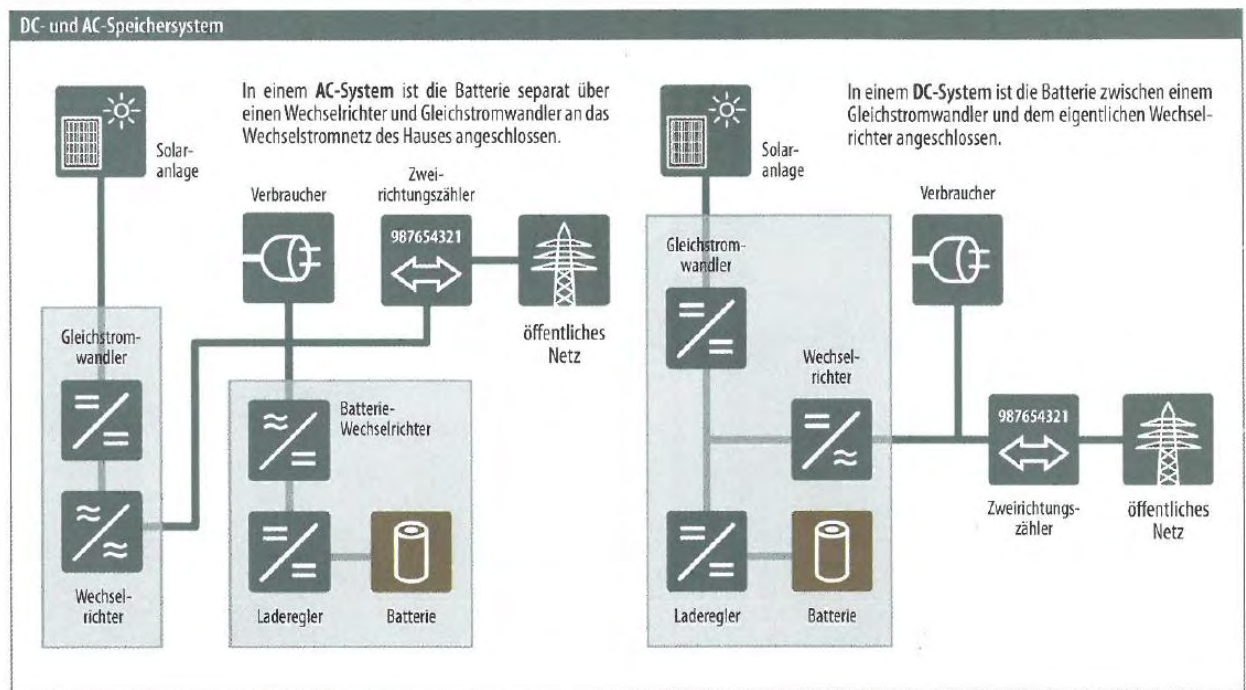


Abbildung 6: Einbindung des Speichersystems: DC (rechts) / AC (links) [27]

Im ersten Fall (rechts) besteht die Lösung aus einem einzelnen Gerät, in dem Speicher, Laderegler und Wechselrichter zusammen eine Einheit bilden. Das Speichersystem wird vor dem Wechselrichter an den Gleichstromkreis der Solarstromanlage angeschlossen. Der Ladevorgang des Speichersystems wird mit Hilfe eines speziellen Wechselrichters gesteuert, der für diese Aufgabe ausgelegt sein muss. Zusätzlich steuert ein Laderegler das Laden des Akkus mit Gleichspannungsstrom aus den PV-Modulen. Wird im Haus elektrische Energie benötigt, werden die Akkus entladen und der Wechselrichter wandelt den gespeicherten Gleichstrom in nutzbaren Wechselstrom um. Überschüssiger Strom wird von dem Wechselrichter in das Stromnetz eingespeist. Normalerweise ist dies eine kostengünstige Lösung für neue Anlagen.

Im zweiten Fall (links), sind die Wechselrichter und Laderegler sowie Batterie getrennt und bilden keine Einheit. Der Stromspeicher wird im Wechselstromkreis angeschlossen, nach der Umwandlung des Solarstroms durch den Gleichstromwandler und

Wechselrichter. Der erzeugte Solarstrom fließt zunächst zum Wechselrichter der PV-Anlage, der den Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt. Die elektrische Energie, die nicht unmittelbar im Haushalt verbraucht wird, fließt weiter in den Akku. Bei dieser Aufgabe findet ein spezieller Batteriewechselrichter Verwendung, der den Wechselstrom wieder zurück in Gleichstrom transformiert, damit dieser in einem Akku gespeichert werden kann. In der Regel ist dies eine kostengünstige Option bei bestehenden Anlagen.

3.5.2 Speicherkapazität

Die Speicherkapazität des Akkus gibt an, wieviel Strom mit einer vollen Aufladung gespeichert werden kann. Sie ist eine technische Angabe des Herstellers und wird normalerweise in kWh oder Ah angegeben [28]. Die Speicherkapazität wird so ausgelegt, dass der Speicher den Haushalt, solange von der PV-Anlage keine Energie erzeugt wird mit der im Speichersystem gespeicherten Energie versorgen kann. D.h. möglichst bis zum nächsten Ladevorgang wenn die PV-Anlage wieder Strom produziert. Tritt zwischenzeitlich eine höhere Spitzenlast auf, wenn z.B. der Herd und andere stromintensive Elektrogeräte gleichzeitig betrieben werden, dann wird zusätzlich Strom aus dem Netz bezogen.

4. SIMULATION UND DIMENSIONIERUNG DES SPEICHERSYSTEMS

4.1 Modellierung des Speichersystems

Für die Modellierung des Speichersystems zum Einsatz in einer netzgekoppelten PV-Anlage wird anhand dieser Arbeit ein Berechnungstool entwickelt, welches die Stromversorgung von Haushalten durch eine PV-Anlage mit Speichersystem und Netzanschluss simuliert. Für einen vorgegebenen Haushaltlastgang, solare Einstrahlung sowie PV-Anlagenleistung und die entsprechende Akkukapazität berechnet dieses Tool den resultierenden Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad.

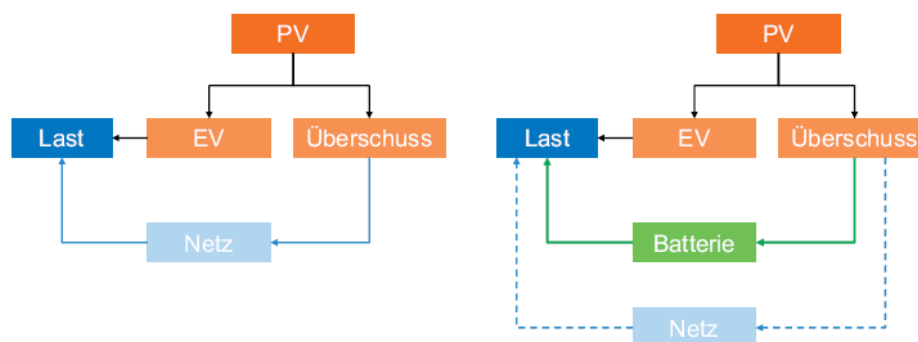


Abbildung 7: Vorgehen bei der Modellierung des Eigenverbrauchs mit und ohne Akku [29]

Zur Modellierung wird folgendermaßen vorgegangen:

Die in einer PV-Anlage erzeugte elektrische Energie kann entweder nur teilweise oder vollständig verbraucht werden.

- Bei einem Überschuss an PV-Energie wird von einem System ohne Akku die überschüssige Energie ins Netz eingespeist.
- Bei einem System mit Akku wird der Akku durch eine Regelschaltung bevorzugt um überschüssige PV-Energie zu speichern. Nachdem der Akku einen maximalen Ladezustand erreicht hat, wird der verbleibende Überschuss in das öffentliche Stromnetz eingespeist.

Mit einem im Bezug auf die Kapazität optimierten Akkumulator ist es möglich, die Versorgung des Haushalts zu gewährleisten. Wenn nicht genügend PV-Energie zur

Deckung des Energieverbrauchs erzeugt wird, hat der Akku die Priorität, diese Energie zu liefern. Erst beim Erreichen der vollständigen Entladung des Akkus wird die zusätzlich benötigte Energie über das Netz bezogen.

4.2 Last- und Erzeugungsgänge


4.2.1 Ermittlung des Lastprofils

Für den Eigenverbrauch zählt nur die erzeugte Kilowattstunde, die bei vorhandenem Bedarf zeitgleich zur Erzeugung verbraucht wird. Laut einer Veröffentlichung von SMA ergeben sich bei Eigenverbrauchsberechnungen mit realen Lastprofilen im Vergleich zu Standardlastprofilen Abweichungen von bis zu 50 Prozent. Normalerweise weist der Einsatz von Standardlastprofilen bei der Berechnung eines Haushalts eine überschätzte Eigenverbrauchsquote aus [30].

Aus diesem Grund, wird für die Simulation zur Modellierung des Speichersystems ein reales Lastprofil verwendet. Die für diese Arbeit verwendeten Stromverbrauchsdaten stammen von einem privaten Haushalt mit einem Jahresenergieverbrauch von durchschnittlich 4000 kWh/Jahr. Die Daten wurden mittels eines Smart Meters in 15-Minuten-Auflösung für ein ganzes Jahr erfasst. Dadurch entstehen 96 Datenwerte für jeden Tag von 01.01.2012 bis 31.12.2012 von 00:00 Uhr bis 23:45 Uhr. Durch die Differenz der Werte ($\text{Zählerdaten}_{t_2} - \text{Zählerdaten}_{t_1}$), lässt sich dann der Verbrauch [Wh] ermitteln (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Ermittlung des Stromverbrauchs von Zählerdaten

Datum	Zeit	Zählerdaten [Wh]	Verbrauch [Wh]	
01.01.2012	00:00:00	4096968	48,159	
01.01.2012	00:15:00	4097024	56,743	
01.01.2012	00:30:00	4097133	109,073	
01.01.2012	00:45:00	4097222	88,745	
01.01.2012	01:00:00	4097396	173,744	} → $\text{Zählerdaten}_{t_2} - \text{Zählerdaten}_{t_1}$
01.01.2012	01:15:00	4097592	195,671	
01.01.2012	01:30:00	4097751	159,612	



01.01.2012	23:00:00	4114650	1295,054
01.01.2012	23:15:00	4115808	1158,241
01.01.2012	23:30:00	4116450	641,286
01.01.2012	23:45:00	4116994	543,992

Anhand dieser so ermittelten Werte wird ein reales Lastprofil erzeugt. Diese Daten entsprechen einem 3-Personen Haushalt mit Jahresenergieverbrauch von ca. 4000 kWh wie zuvor erwähnt. Um diese Daten auch für die Simulation einsetzen zu können, werden die Werte auf 1000 kWh normiert. Daraus ergibt sich dann ein reales Lastprofil aus dem Referenzhaushalt. In dem erzeugten Lastprofil findet man für jeden 15-Minuten Bereich eines Tages einen Verbrauchswert in Kilowattstunden (kWh). Der Verbrauch eines beliebigen Haushaltes kann so durch Eingabe des individuellen Jahresstromverbrauchs simuliert werden.

4.2.2 Ermittlung des Erzeugungsprofils einer PV-Anlage

Die Erzeugungsdaten der PV-Anlage stammen ebenfalls von einem privaten Anlagenbetreiber und werden abhängig vom Standort modelliert. Damit die Erzeugungswerte auch für beliebige Anlagengrößen simuliert werden können, wurden auch hier die Erzeugungswerte auf 1000 Wp normiert. Diese Werte werden dann je nach Eingabe der Anlageleistung automatisch durch das Berechnungstool angepasst.

4.3 Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad

4.3.1 Bestimmung des natürlichen Eigenverbrauchsanteils und Autarkiegrades

Der sogenannte natürliche Eigenverbrauchsanteil bezeichnet den Anteil an erzeugtem Solarstrom, den ein Haushalt bei einer PV-Anlage selbst verbrauchen kann, ohne ihn durch Verhaltensänderung oder Einsatz technischer Komponenten wie Akkuspeicher zu erhöhen. Theoretisch lässt sich der natürliche EV durch den Formel unten ermitteln.

$$EV = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_{PV,EV}(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{PV}(t) dt}$$

Der Autarkiegrad gibt an, wie viel Prozent des Strombedarfs durch eigene Erzeugung gedeckt wird und bestimmt die Höhe der Einsparungen. Er kann mit der folgenden Formel bestimmt werden.

$$AG = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_{PV,EV}(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{Last}(t) dt}$$

EV	Eigenverbrauchsanteil	
AG	Autarkiegrad	
$P_{PV}(t)$	Leistung des PV-Systems	
$P_{PV,EV}(t)$	Eigenverbraucher Anteil von $P_{PV}(t)$	
$P_{Last}(t)$	Verbrauchslast	[29]

4.3.2 Bestimmung des optimierten Eigenverbrauchsanteils und Autarkiegrades

Wie in Kapitel 2 schon erwähnt wurde, kann mithilfe von Optimierungsmaßnahmen durch angepasste Speicherlösungen die Eigenverbrauchsquote gesteigert werden. Der durch den Einsatz von Akkus optimierte Eigenverbrauchsanteil lässt sich mit folgender Formel berechnen. Die in einem bestimmten Zeitraum für das Laden der Akkus verwendete Leistung wird hierbei zusätzlich zu dem eigenverbrauchten Anteil von PV-Energie addiert.

$$EV = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_{PV,EV}(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{Akku,Laden}(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{PV}(t) dt}$$

Bei der Bestimmung des optimierten Autarkiegrades bei der Verwendung von Akkuspeichern wird die aus den Akkus bezogene Leistung zu der ursprünglichen Formel für den Autarkiegrad hinzuaddiert.

$$AG = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_{PV,EV}(t)dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{Akku,Entladen}(t)dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{Last}(t)dt}$$

[29]

$P_{Akku,Laden}(t)$ Für das Laden der Akkus verwendete Leistung
 $P_{Akku,Entladen}(t)$ Aus der Akkus bezogene Leistung

4.4 Entwicklung eines Speicherberechnungstools mit Microsoft Excel

4.4.1 Erstellung des Berechnungstools

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Speicherberechnungstools anhand von Visual Basic (VBA)-Programmierung in Microsoft Excel. Unter der Eingabe diverser Parameter, die im nächsten Abschnitt erklärt werden, kann das Speicherberechnungstool die Eigenverbrauchsquote und den Autarkiegrad abhängig von Stromverbrauch und der PV-Energieerzeugung berechnen.

Die Simulation erfolgt mit den vorliegenden Daten aus Unterpunkt 4.2. In der Analyse wird die dort beschriebene 15-Minuten-Zeitauflösung für alle Last- und Erzeugungsgänge verwendet. Jedoch kann die Simulation auch mit beliebigen Zeitauflösungen wie z.B. 5-min. oder 1-min. arbeiten.

Laut einer Studie des Fraunhofer-Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) vermindert sich die Eigenverbrauchsquote bei einer 15-Minuten-Auflösung um 20- und bei einer 1-Minute-Auflösung um 10% gegenüber einer sekundlichen Auflösung [29]. Bei 15-Minuten-genauer Betrachtung würde sich also ein Eigenverbrauchsanteil von 30% auf rund 36% erhöhen. Je nach Daten Verfügbarkeit sind für zukünftige Untersuchungen, Lastgänge und Erzeugungsdaten in höherer Auflösung wie z.B. 1-Minuten-Auflösung zu verwenden, um eine optimale Simulation sicherstellen zu können.

4.4.2 Verwendung des Berechnungstools

Das Berechnungstool besteht aus mehreren Excel-Arbeitsmappen. In jeder Arbeitsmappe, können in den nicht gesperrten Zellen Werte eingegeben werden. Diese sind schwarz und rot umrandet. Die rot umrandeten Zellen zeigen auf, dass die Eingaben in diesen Zellen eine hohe Priorität für die Simulation besitzen. Wenn eines dieser rot umrandeten Felder leer ist, kann die Simulation nicht richtig durchgeführt werden. Die Eingaben in den schwarz umrandeten Feldern sind nicht zwingend erforderlich.

Damit die Datentabellen nicht bei jeder Eingabe des Benutzers neu berechnet und aktualisiert werden, wird unter **Excel-Optionen** → **Formeln**, die Berechnungsoptionen der Arbeitsmappe bei „**Automatisch außer bei Datentabellen**“ festgelegt (siehe Abbildung 8). Dieses muss bei jedem Anfahren des Programms überprüft werden um eine leichtgängige Nutzung des Programms zu sicherstellen.

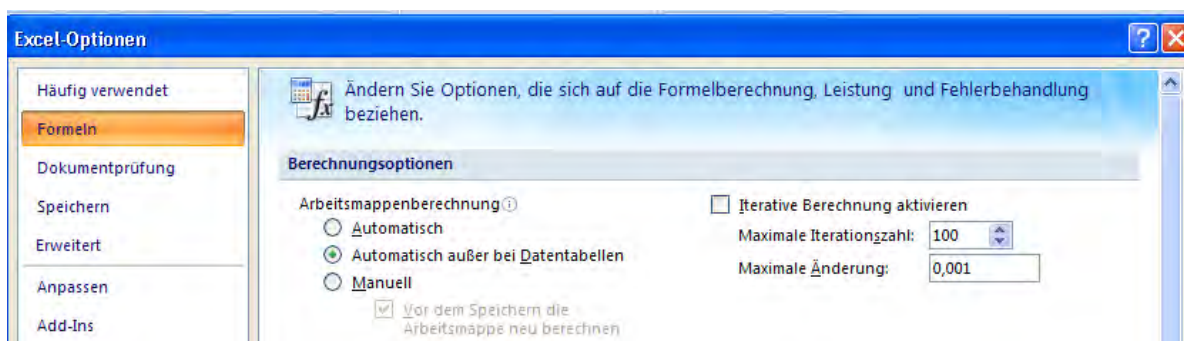


Abbildung 8: Berechnungsoptionen

Zur manuellen Durchführung oder Aktualisierung der Analyse, wird dann dadurch die Taste „F9“ verwendet. Das Speicherberechnungstool ist dann, zur Anwendung wie folgt zu verwenden:

i. Allgemein:

In dieser Arbeitsmappe kann man die allgemeinen Angaben der PV-Anlage, wie z.B. den Standort der Anlage, eingeben. Dazu gibt es ein Feld indem man die Adresse eingeben kann. Durch aktivieren des Schaltflächenkastens „Suchen mit GoogleMap“ kann man auf dem eingefügten Microsoft Web Browser eine Google-Map auf der Arbeitsmappe darstellen und den Standort direkt sehen. Bei Bedarf kann die Dachfläche der zu installierenden PV-Anlage so grob ausgemessen werden.

Hier kann auch der „Haushalts-Typ“: „1-, 2- oder 4-Personen Haushalt“ auswählen. Dadurch wird dann automatisch ein geschätzter „Jahresenergieverbrauch“ ausgegeben. Wählt man hier „Benutzerdefiniert“ kann man ein spezifischen Jahresenergieverbrauchs-Wert direkt eingeben (siehe Abbildung 9).

The image shows the 'Speicherberechnungstool' interface. At the top, there is a header with the tool name and the 'YANDALUX' logo. Below this is a section titled 'Allgemeine Angaben' (General Information). The form contains the following fields and values:

- Standort: Hamburg
- Haushalt-Typ: Benutzerdefiniert
- Jahresenergieverbrauch: 4500 [kWh/a]
- Adresse:
 - Strasse: Schellerdamm 4
 - PLZ: 21079
 - Ort: Hamburg
 - Land: Germany

There is a button labeled 'Suchen mit GoogleMap' to the right of the address fields. Below the form is a screenshot of a Google Maps interface. The search bar contains 'Schellerdamm'. The map shows a street view of the area around Schellerdamm in Hamburg, with various landmarks and street names visible, including 'Seehafenbrücke', 'Buxtehuder Straße', and 'Kanalplatz'. A red location pin is placed on the map.

Abbildung 9: Darstellung der Arbeitsmappe „Allgemein“

Zur Auslegung der Anlage können Hintergrund Informationen wie „**Spezifischer Energieertrag pro Jahr**“ und „**Einstrahlung nach Angabe der Ausrichtung**“ beliebig eingegeben werden. Zusammen mit der Eingabe zur gewünschten Größe der Anlage: „**Anlagenleistung**“ wird dann der „**Erwartete Jahresertrag**“ ausgegeben. Zusätzlich kann hier auch auf die „**Ausrichtung**“ der Anlage und die „**Aufstellung**“ (Winkel der Module) eingegangen werden. Wenn die Werte „**Spezifischer Energieertrag pro Jahr**“ und „**Einstrahlung nach Angabe der Ausrichtung**“ nicht bekannt sind, kann man durch aktivieren des Schaltflächenkastens „**Suchen mit PVGIS**“ auf dem gleichen Microsoft Web Browser wie weiter oben schon beschrieben, die Einstrahlungsdatenbank-Webseite PVGIS [31] aufrufen und nach Eingabe des Standorts und aller anderer, benötigten Spezifikationen, wie Neigung und Azimut, die beiden Werte für den Standort generieren lassen (siehe Abbildung 11). Diese Werte können dann in die Arbeitsmappe übertragen werden (siehe Abbildung 10).

Festes System: Neigung=30°, Orientierung=0°				
Monat	E_z	E_m	H_z	H_m
Jan	0.73	22.7	0.90	27.8
Feb	1.38	38.6	1.72	48.3
Mär	2.49	77.2	3.22	99.8
Apr	3.70	111	5.00	150
Mai	3.93	122	5.46	169
Jun	3.81	114	5.41	162
Jul	3.60	112	5.16	160
Aug	3.27	101	4.65	144
Sep	2.70	81.0	3.72	112
Okt	1.81	56.1	2.38	73.8
Nov	0.88	26.3	1.10	32.9
Dez	0.68	21.1	0.83	25.9
Jahresdurchschnitt	2.42	73.6	3.30	100
Total für Jahr		883		1210

Abbildung 10: Schätzung der Solarenergieproduktion von PVGIS [31]

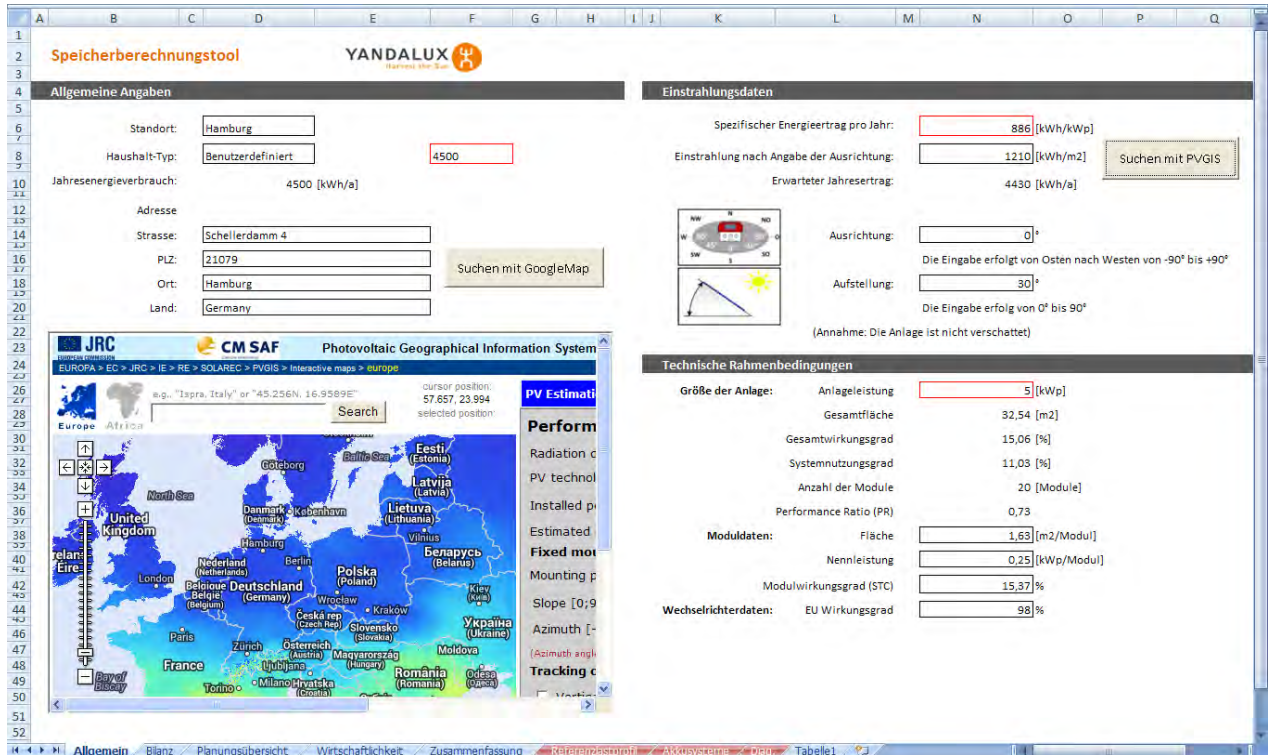


Abbildung 11: Benutzeroberfläche - Aufrufen von PVGIS

Unter dem Begriff „Technische Rahmenbedingungen“ kann man technische Größen bezüglich der Größe der Anlage, Moduldaten und Wechselrichterdaten eintragen.

Durch die Eingabe der Kennwerte für „Anlagenleistung“, „Fläche“, „Nennleistung“ und „Modulwirkungsgrad“, wird die Dimension der gewünschten Anlage berechnet. Die „Gesamtfläche“, „Gesamtwirkungsgrad“, „Systemnutzungsgrad“, die „Anzahl der Module“ und die „Performance Ratio“ der Anlage können so ermittelt werden. Eine Eingabe zum EU-Wirkungsgrad der Wechselrichter kann hier auch, sollte dies gewünscht sein, zusätzlich eingegeben werden.

Einstrahlungsdaten

Spezifischer Energieertrag pro Jahr: [kWh/kWp]

Einstrahlung nach Angabe der Ausrichtung: [kWh/m²] Suchen mit PVGIS

Erwarteter Jahresertrag: 4430 [kWh/a]

Ausrichtung: °
Die Eingabe erfolgt von Osten nach Westen von -90° bis +90°

Aufstellung: °
Die Eingabe erfolgt von 0° bis 90°

(Annahme: Die Anlage ist nicht verschattet)

Technische Rahmenbedingungen

Größe der Anlage:	Anlageleistung	<input style="border: 1px solid red;" type="text" value="5"/> [kWp]	
	Gesamtfläche	<input type="text" value="32,54"/> [m ²]	
	Gesamtwirkungsgrad	<input type="text" value="15,06"/> [%]	
	Systemnutzungsgrad	<input type="text" value="11,03"/> [%]	
	Anzahl der Module	<input type="text" value="20"/> [Module]	
	Performance Ratio (PR)	<input type="text" value="0,73"/>	
Moduldaten:	Fläche	<input type="text" value="1,63"/> [m ² /Modul]	
	Nennleistung	<input type="text" value="0,25"/> [kWp/Modul]	
	Modulwirkungsgrad (STC)	<input type="text" value="15,37"/> %	
Wechselrichterdaten:	EU Wirkungsgrad	<input type="text" value="98"/> %	

Abbildung 12: Benutzeroberfläche - Ermittlung der Jahresertrag

ii. Simulation:

Diese Arbeitsmappe stellt je nach Eingabe der Felder in „**Akkudaten**“ die grafische Veranschaulichung der Tagesbilanz der zu simulierenden PV-Anlage mit oder ohne Speicher dar.

Im Feld „**Grunddaten**“, kann man den aktuellen „**Einspeisevergütungstarif**“ den „**Netzstrombezugspreis**“ und das „**Jahr**“ der Inbetriebnahme eingeben. Diese Daten werden später, bei der Simulation einen ersten Überblick hinsichtlich der Einsparungen durch ein PV-System mit Akku gegenüber einem System ohne Akku geben. Unter dem Begriff Akkudaten kann man den „**Akkutyp**“ wie z.B. Blei oder Lithium eingeben. Bei den Eingaben zur „**Speichergröße (netto)**“, welche die nutzbare Akkukapazität repräsentiert, und der „**Entladetiefe, (DoD)**“, wird die Nennkapazität des zu berechnenden

Akkus als **„Speichergröße (brutto)“** ausgegeben. Die Eingabe **„Maximale Lade- bzw. Entladeleistung“** bestimmt ob Lastspitzen, die bei schnell taktenden und größeren technischen Geräten im Haushalt entstehen, von dem Speicher abgedeckt werden können oder nicht. Ferner kann, durch Eingabe der **„Zyklusfestigkeit“** und der Anzahl an **„Vollzyklen/Jahr“** die zu erwartete Lebensdauer des eingesetzten Akkus abgeschätzt werden.

Zusätzlich dazu, kann man sich in dieser Arbeitsmappe durch die Auswahl eines Datums auf den Kalender die Tagesbilanz des gewählten Tages und zwei konsekutiven Tagen in diesem Bereich anzeigen lassen **„Verlauf der 3 gewählten Tagen in einem Jahr“**. Dadurch kann abgeschätzt werden, ob die im Akku gespeicherte Energie von heute zur Deckung der Last am nächsten Tag auch reichen wird oder nicht.

Diese Darstellung fasst die **„Erzeugung“** (blau), den **„Verbrauch“** (hell orange), die **„Direkt verbrauchte PV-Energie“** (braun), die **„Netzeinspeisung“** (gelb), den **„Netzbezug“** (grün), den **„Akku aufladen“** (dunkel orange) und den **„Akku entladen“** (lila) in einem Leistung gegen Zeit – Diagramm zusammen. Unter dem Bereich **„Analyse der drei gewählten Tage“** lassen sich die Daten der Simulation auch numerisch analysieren. Hier werden dann die Energiedaten unter den Szenarien **„ohne Akku“** und **„mit Akku“** aufgelistet: Erzeugung der PV-Anlage, Stromverbrauch, direkter Eigenverbrauch, Eigenverbrauch mit Akku, gesamter Eigenverbrauch, Netzeinspeisung und Netzbezug. In der Zeile darunter werden die erworbene Einspeisevergütung und der zu zahlenden Betrag durch Netzstrombezug bilanziert. So kann man direkt sehen ob Gewinne oder Verluste durch den Betrieb der Anlage generiert werden. Abschließend werden für die gewählten Tage die Eigenverbrauchsquote und der Autarkiegrad berechnet. Rechts daneben, wird die gleiche Analyse als Jahresbilanz durchgeführt. In dem schwarz umrandeten Bereich, wird dann der Jahres- prozentuale **„Eigenverbrauchsanteil“** und **„Autarkiegrad“** mit und ohne Akku ermittelt.

Weiter Rechts in der Mappe, findet man Balkendiagramme zum EV und AG, die das vorgegebene Szenario mit und ohne Einsatz eines Akkuspeichersystems miteinander

verglichen. Einen genaueren Blick zur Erzeugung, Verbrauch, Einspeisung, Bezug, EV und AG über das gesamte Jahr, liefert die „**Monatsanalyse**“ unter den Balkendiagrammen.

Nachdem kann unter „**Analyse verschiedener Akkugrößen (netto)**“ durch Einsatz der **Was-wäre-wenn-Analyse** in Excel die Akkukapazität des Speichersystems an den Energieverbrauch und auch an die Größe der PV-Anlage angepasst werden. Hier lässt sich durch die Angabe einer bestimmten PV-Anlageleistung (z.B. unten in der Abbildung 13 bei einer Anlagenleistung von 5 kWp), der Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit verschiedener Akkugrößen ermitteln und in einem Diagramm veranschaulichen.

Die Differenz zwischen einer Akkugröße zu der nächst größeren, kann man im Eingabefeld „**Akkugröße Differenz**“ anpassen.

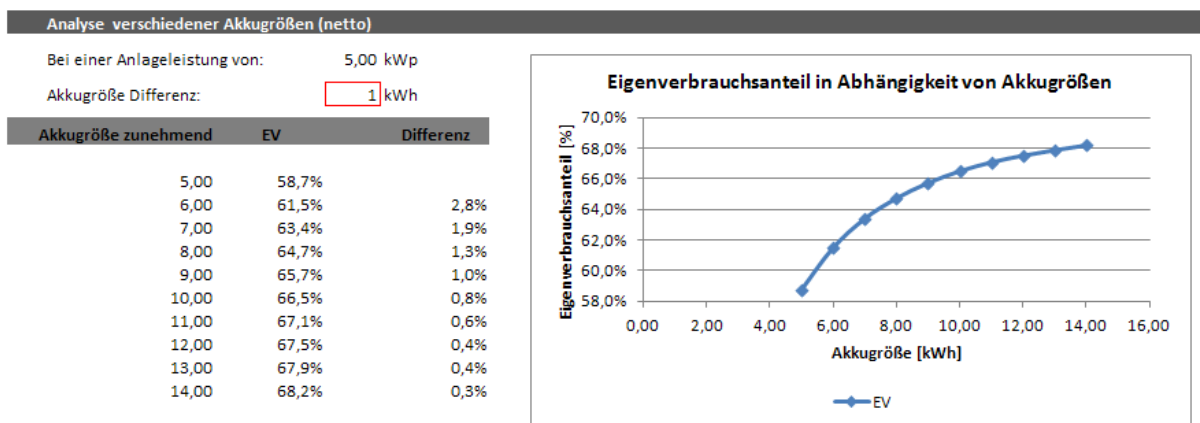


Abbildung 13: Analyse der EV bei verschiedener Akkugrößen

Simulation des Speichersystems



Grunddaten			Akkudaten			
Datenbasis	Referenzlastprofil_Zoehner		Akkutyp	Blei_RITAR_260Ah	Zyklusfestigkeit	1000 Zyklen
Zeitraum	06.06.2012	bis 08.06.12	Speichergröße (brutto)	12,48 kWh	Vollzyklen/Jahr	250 Zyklen/a
Speichersystem	Benutzerdefiniert		Entladetiefe (DoD)	50 %	Lebensdauer ca.	4 Jahre
Jahr	2012		Speichergröße (netto)	6,24 kWh		
Einspeisevergütung tarif	16,00 ct/kWh		Maximaler Ladeleistung	1300 W		
Preis Netzstrombezug	27,00 ct/kWh		Maximale Entladeleistung	1300 W		

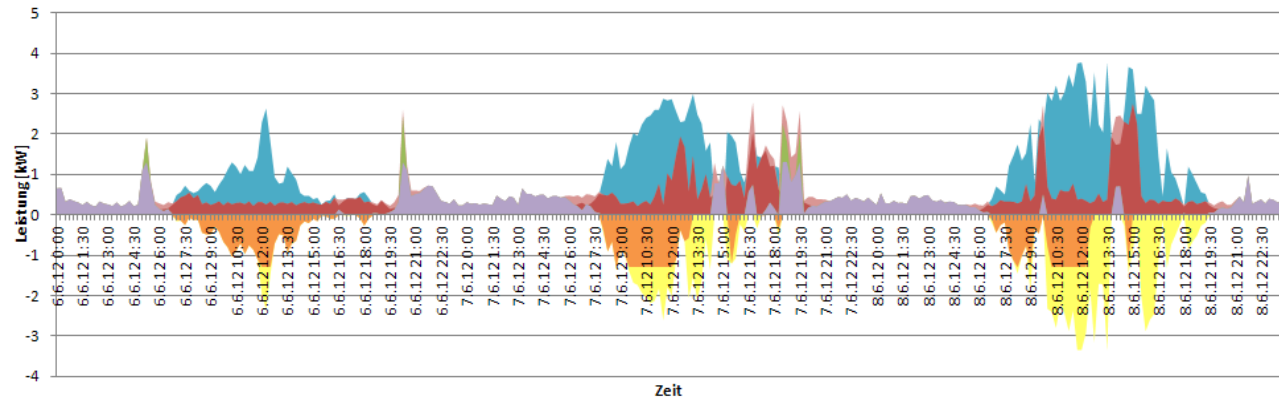
Analyse der drei gewählten Tage			Analyse des Jahresbilanz				
	ohne Batterie	mit Batterie	Differenz		ohne Batterie	mit Batterie	Differenz
Erzeugung	56,39 kWh	56,39 kWh	- kWh	Erzeugt	4430,00 kWh	4430,00 kWh	- kWh
Verbrauch	40,27 kWh	40,27 kWh	- kWh	Verbraucht	4500,00 kWh	4500,00 kWh	- kWh
Eigenverbrauch direkt	23,39 kWh	23,39 kWh	- kWh	Eigenverbrauch direkt	1342,67 kWh	1342,67 kWh	- kWh
Eigenverbrauch mit Akku	- kWh	16,56 kWh	+16,56 kWh	Eigenverbrauch mit Akku	- kWh	1346,20 kWh	+1346,20 kWh
Eigenverbrauch gesamt	23,39 kWh	39,96 kWh	+16,56 kWh	Eigenverbrauch gesamt	1342,67 kWh	2688,87 kWh	+1346,20 kWh
Netzeinspeisung EVU	33,00 kWh	16,44 kWh	-16,56 kWh	Netzeinspeisung EVU	3087,33 kWh	1741,13 kWh	-1346,20 kWh
Netzbezug EVU	16,88 kWh	0,32 kWh	-16,56 kWh	Netzbezug EVU	3157,33 kWh	1811,13 kWh	-1346,20 kWh
Einspeisevergütung	5,28 €	2,63 €	-2,65 €	Einspeisevergütung	493,97 €	278,58 €	-215,39 €
Strom bezahlen	4,56 €	0,09 €	-4,47 €	Strom bezahlen	852,48 €	489,01 €	-363,47 €
Bilanz	0,72 €	2,54 €	+1,82 €	Bilanz	-358,51 €	-210,42 €	+148,08 €

Eigenverbrauchsquote	30,3%	60,7%
Autarkiegrad	29,8%	60,2%

Verlauf der 3 gewählten Tagen in einem Jahr

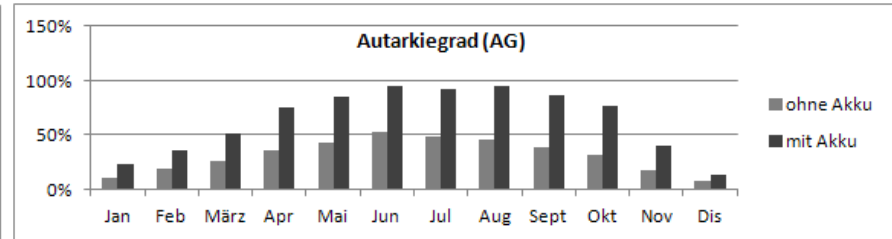
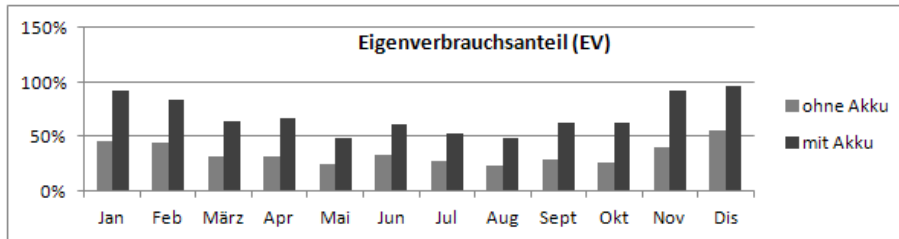
Tag auswählen:

Jun 2012							Jun	2012
Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So		
28	29	30	31	1	2	3		
4	5	6	7	8	9	10		
11	12	13	14	15	16	17		
18	19	20	21	22	23	24		
25	26	27	28	29	30	1		
2	3	4	5	6	7	8		



■ Erzeugung ■ Verbrauch ■ Direkt Verbrauch ■ Netzeinspeisung ■ Netzbezug ■ Akku aufladen ■ Akku entladen

Abbildung 14: Benutzeroberfläche der Simulation



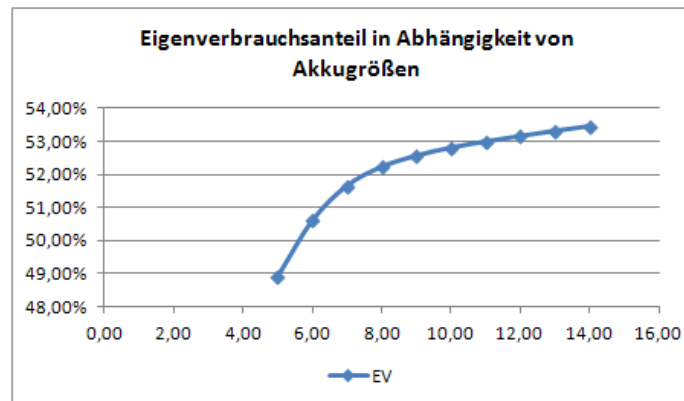
Monatsanalyse	ohne Akku		mit Akku		ohne Akku		mit Akku		ohne Akku		mit Akku	
	Erzeugung	Verbrauch	Einspeisung	Einspeisung	Bezug	Bezug	EV	EV	AG	AG		
Jan 2012	114,54 kWh	461,23 kWh	62,53 kWh	8,48 kWh	409,21 kWh	355,17 kWh	45,41%	92,60%	11,28%	22,81%		
Feb 2012	194,27 kWh	470,72 kWh	107,42 kWh	30,63 kWh	383,87 kWh	307,09 kWh	44,71%	84,23%	18,45%	35,35%		
Mar 2012	374,80 kWh	468,70 kWh	254,79 kWh	133,41 kWh	348,70 kWh	227,32 kWh	32,02%	64,40%	25,60%	51,09%		
Apr 2012	469,32 kWh	420,42 kWh	319,12 kWh	156,08 kWh	270,22 kWh	107,18 kWh	32,00%	66,74%	35,73%	75,27%		
Mai 2012	631,71 kWh	365,14 kWh	474,81 kWh	326,04 kWh	208,24 kWh	59,47 kWh	24,84%	48,39%	42,97%	84,72%		
Jun 2012	535,29 kWh	343,99 kWh	355,55 kWh	209,99 kWh	164,25 kWh	18,69 kWh	33,58%	60,77%	52,25%	95,42%		
Jul 2012	613,03 kWh	353,09 kWh	440,91 kWh	287,43 kWh	180,97 kWh	27,50 kWh	28,08%	53,11%	48,75%	92,78%		
Aug 2012	618,14 kWh	320,33 kWh	469,77 kWh	317,51 kWh	171,96 kWh	19,70 kWh	24,00%	48,64%	46,32%	94,75%		
Sep 2012	402,53 kWh	292,49 kWh	287,17 kWh	152,95 kWh	177,13 kWh	42,91 kWh	28,66%	62,00%	39,44%	86,41%		
Okt 2012	288,19 kWh	234,42 kWh	213,25 kWh	107,60 kWh	159,48 kWh	53,83 kWh	26,00%	62,66%	31,97%	76,34%		
Nov 2012	123,59 kWh	294,25 kWh	73,57 kWh	8,99 kWh	244,22 kWh	179,64 kWh	40,48%	92,73%	17,00%	40,73%		
Dez 2012	64,60 kWh	475,22 kWh	28,46 kWh	2,03 kWh	439,07 kWh	412,64 kWh	55,94%	96,86%	7,61%	13,26%		

Analyse verschiedener Akkugrößen (netto)

Bei einer Anlageleistung von: 5,00 kWp

Akkugröße Differenz: kWh

Akkugröße zunehmend	EV	Differenz
5,00	48,9%	
6,00	50,6%	1,7%
7,00	51,7%	1,0%
8,00	52,2%	0,6%
9,00	52,6%	0,3%
10,00	52,8%	0,2%
11,00	53,0%	0,2%
12,00	53,1%	0,2%
13,00	53,3%	0,2%
14,00	53,4%	0,1%



iii. Planungsübersicht:

In der Arbeitsmappe-Planungsübersicht werden die zwei Möglichkeiten zur elektrischen Anbindung des Speichersystems an eine PV-Anlage dargestellt (DC-/ AC-System). Man sieht im blau gestrichelten Bereich die Verschaltung der Speichersystemkomponenten. Darunter erscheint die Liste der notwendigen Systemkomponenten. Durch die Auswahl eines Anbieters wird der Preis des ausgewählten Hersteller-Speichersystem automatisch ausgegeben. Z.B. bei der Auswahl von „YANDALUX“ kann der Anwender die Speichersystemkosten eines Yandalux-Speichersystems zusammenstellen.

Je nach Speicherlösung müssen spezifische Komponenten zusätzlich addiert werden. Durch setzen der Häkchen in den Kontrollkästchen, wird man aufgefordert die Kosten der zusätzlich benötigten Komponente einzugeben. So können z.B. bei der Planung zur Erweiterung einer schon bestehenden Anlage schon vorhandene Komponenten vernachlässigt werden. Nach Eingabe aller entsprechend den eigenen Vorstellungen benötigten Komponenten werden die Investitionskosten des zu analysierenden Speichersystems, die Investitionskosten der gesamten Anlage und die Kosten pro Watt-Peak berechnet.

Planungsübersicht

DC-System

Anlageleistung: 3 kWp

6,24 kWh (netto)

AC-System

Anlageleistung: 3 kWp

6,24 kWh (netto)

DC-Speichersysteme-Komponenten		Preis [€]
Anbieter wählen: YANDALUX 3071,68		
(bei Bedarf ausfüllen)		
<input type="checkbox"/> MPP-tracker		0,00
<input checked="" type="checkbox"/> PV-Wechselrichter		1000,00 bitte eingeben
<input checked="" type="checkbox"/> Batterie jk/Wh = 166		2071,68 bitte eingeben
<input type="checkbox"/> Batterieladeregler		
<input type="checkbox"/> Module jk/Wp = 650		3250,00 bitte eingeben
<input checked="" type="checkbox"/> Gestell		0,00 bitte eingeben
<input checked="" type="checkbox"/> Gehäuse		500,00 bitte eingeben
<input checked="" type="checkbox"/> Montage		0,00 bitte eingeben
<input type="checkbox"/> Fracht		0,00
Speichersystem Investitionskosten €		3.071,68 €
Speichersystem €/Wp		0,61
GESAMT Investitionskosten €		9.893,36 €
GESAMT €/Wp		1,38

AC-Speichersysteme-Komponenten		Preis [€]
Anbieter wählen: SUNXTENDER 13,5 19490		
(bei Bedarf ausfüllen)		
<input checked="" type="checkbox"/> MPP-tracker		bitte eingeben
<input checked="" type="checkbox"/> PV-Wechselrichter		bitte eingeben
<input checked="" type="checkbox"/> Batterie Wechselrichter		bitte eingeben
<input checked="" type="checkbox"/> Batterie jk/Wh = 234,38		2925,06 bitte eingeben
<input checked="" type="checkbox"/> Batterieladeregler		bitte eingeben
<input checked="" type="checkbox"/> Module jk/Wp = 650		3250,00 bitte eingeben
<input checked="" type="checkbox"/> Gestell		bitte eingeben
<input checked="" type="checkbox"/> Gehäuse		bitte eingeben
<input checked="" type="checkbox"/> Montage		bitte eingeben
<input checked="" type="checkbox"/> Fracht		bitte eingeben
Speichersystem Investitionskosten €		19.490,00 €
Speichersystem €/Wp		5,90
GESAMT Investitionskosten €		25.665,06 €
GESAMT €/Wp		5,13

Abbildung 15: Benutzeroberfläche - Planungsübersicht

iv. **Wirtschaftlichkeit:**

Die Erstellung der Arbeitsmappe-Wirtschaftlichkeit wurde teilweise mit Hilfe eines von Antaris Solar entwickelten Programms zur Wirtschaftlichkeitsberechnung [32] für Anlagen mit Speichersystemen nachempfunden.

In dieser Arbeitsmappe wird die Wirtschaftlichkeitsberechnung beim Einsatz eines Akkuspeichersystems unter Eingabe des „**Betrachtungszeitraums**“ durchgeführt. Dazu wurde ein KfW 275-Förderrechner programmiert, der nach Typ der Anschaffung unterscheidet

- entweder „**Anschaffung als Komplettsystem (PV-Anlage + Speicher)**“ für eine Neuanlage
- oder „**Nachrüstung eines Speichers in einer bestehende Anlage**“

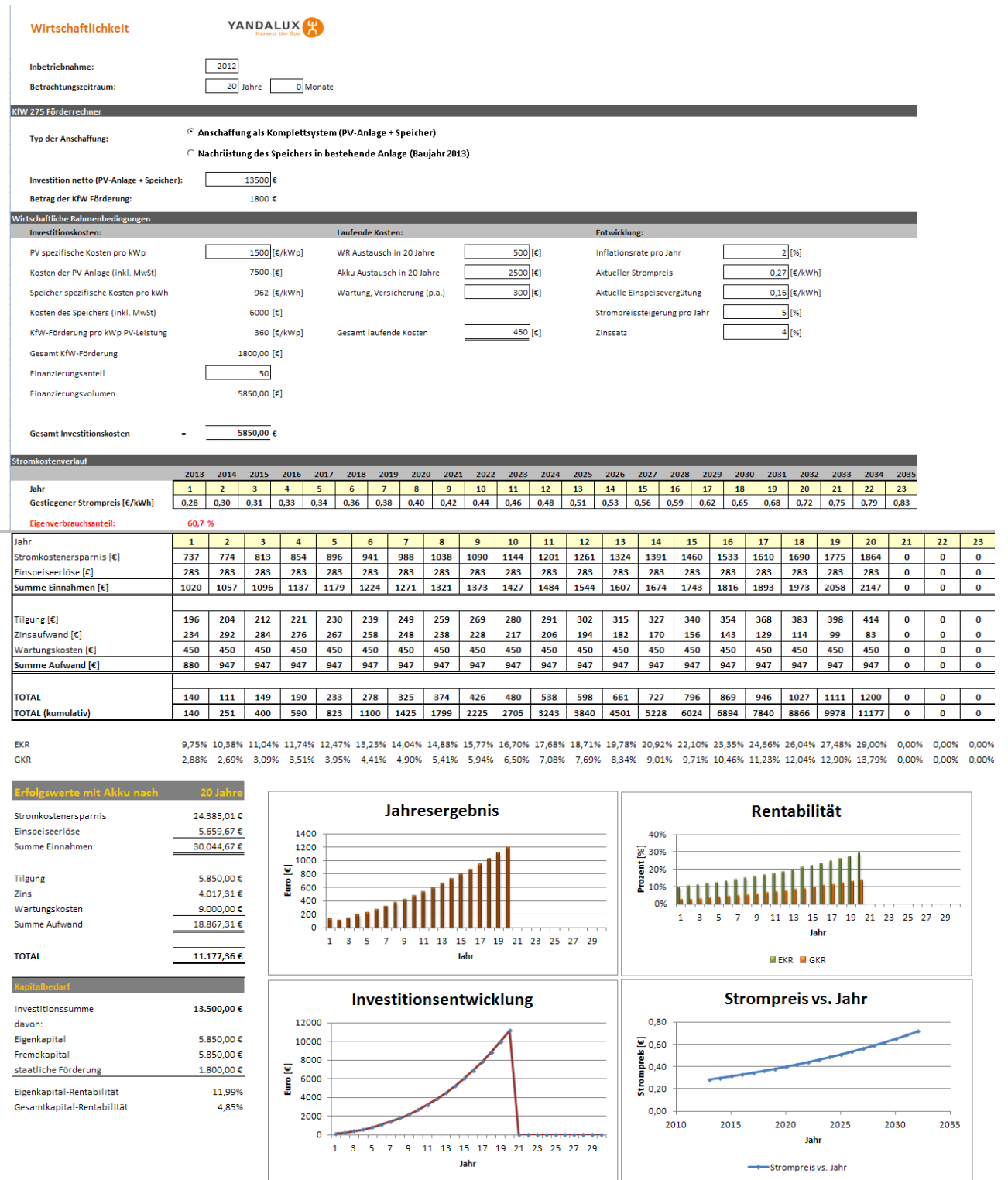
Je nachdem welcher Anschaffungstyp gewählt wurde, wird durch die Eingabe der Netto Investitionskosten der Betrag der KfW-Förderung für das Speichersystem berechnet. Bei der Auswahl von Nachrüstsystemen werden die Kosten für die PV-Anlage nicht mitberücksichtigt.

Unter dem Begriff „**Wirtschaftliche Rahmenbedingungen**“ kann man die „**spezifischen Kosten pro Kilowattpeak**“ der PV-Anlage eintragen und nach Bedarf auch Fremdkapital oder einen „**Finanzierungsanteil**“ eingeben.

Im Abschnitt „**Laufende Kosten**“ hat man die Möglichkeit, die laufenden Kosten, die während des Betriebs der Anlage anfallen, unter „**Wartung**“ und „**Austausch**“ der Akkus oder Wechselrichter einzutragen. Weiterhin kann man hier die „**Aktuellen Strompreise**“, prozentuale „Strompreissteigerungen pro Jahr“, „**Aktuelle Einspeisevergütung**“ und den „**Zinssatz**“ auf den jeweils geltenden Wert anpassen (siehe Abbildung 16).

Mit Hilfe dieser Eingaben und des ermittelten Jahreseigenverbrauchsanteils aus der Arbeitsmappe Simulation lassen sich die „**Stromkostensparnis**“ und „**Einspeiseerlöse**“ berechnen. Es stellt sich dabei heraus, wie viel man mit dem Einsatz eines Stromspeichers

tatsächlich sparen kann. Zum Schluss werden die „Eigenkapital-Rentabilität“ und „Gesamtkapital-Rentabilität“ ermittelt.



Unterhalb wird im Folgenden auch eine einfache Analyse über die Wirtschaftlichkeit eines Akkuspeichersystems bei verschiedenen Speichergößen durchgeführt. Gegenübergestellt werden die Stromkosten für die Szenarien:

- ohne den Einsatz einer PV-Anlage und ohne Speicher
- ohne den Einsatz eines Speichers.
- bei der Verwendung verschiedener Speichergößen

So lässt sich eine erste Einschätzung über die maximale Kosten für ein Speichersystem ohne Förderung ermitteln (siehe grün markierter Bereich in Abbildung 17 unten).

Analyse verschiedener Szenarien (Ohne PV, Ohne Speicher, verschiedene Akkugrößen)							
			Mit Speicher				
	Ohne PV	Ohne Speicher	Verschiedene Speichergöße (netto) [kWh]				
	0	0	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00
Betrachtungszeitraum [Jahre]	20	20	20	20	20	20	20
PV-Anlageleistung [kWp]	0	5	5	5	5	5	5
Spezifischer Jahresertrag [kWh/kWp]		928	928	928	928	928	928
Einspeisevergütung [€/kWh]		0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Jahresverbrauch [kWh/a]	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500
Eigenverbrauchsquote [%]	0,0	29,3	59,4	61,3	62,6	63,5	64,3
Strompreis aktuell [€/kWh]	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Strompreissteigerung [%]	5	5	5	5	5	5	5
Strompreis pro Jahr (Schnitt) [€/kWh]	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
Jahresertrag [kWh]		4640	4640	4640	4640	4640	4640
Netzbezug vermieden (Eigenverbrauch) [kWh]	0	1360,07	2757,91	2843,82	2903,85	2947,47	2982,51
Netzbezug vermieden (Eigenverbrauch) [€]	0,00	584,64	1185,51	1222,44	1248,24	1266,99	1282,05
Netzeinspeisung [kWh]	0	3279,93	1882,09	1796,18	1736,15	1692,53	1657,49
Netzeinspeisung [€]	0,00	491,99	282,31	269,43	260,42	253,88	248,62
Netzbezug [kWh]	4500	3139,93	1742,09	1656,18	1596,15	1552,53	1517,49
Netzbezug [€]	1934,36	1349,72	748,85	711,92	686,12	667,37	652,30
Durchschnittliches Jahresstromkosten [€]	1934,36	857,73	466,54	442,49	425,69	413,49	403,68
Stromkosten in 20 Jahre [€]	38687,17	17154,64	9330,76	8849,86	8513,89	8269,75	8073,61
Einsparung gegenüber ohne PV [€]		21532,53	29356,41	29837,30	30173,28	30417,42	30613,56
Einsparung gegenüber ohne Speicher [€]			7823,88	8304,78	8640,75	8884,89	9081,03
=Budget für Speicher ohne Förderung in 2013							
Spezifische Speicherkosten [€/kWh]			1303,98	1186,40	1080,09	987,21	908,10
Einsparungsdifferenz Akkugrößervergrößerung um 1kWh [€]				480,90	335,98	244,14	196,14

Abbildung 17: Analyse zur Wirtschaftlichkeit eines Akkuspeichersystems verschiedener Szenarien

v. Zusammenfassung

Hier werden alle wichtigen Informationen, die anhand des Berechnungstools zur Simulation einer beliebigen Anlage ermittelt wurden, kompakt dargestellt. Durch die Anwendung der Schaltfläche „Zusammenfassung als PDF speichern“ erhält man die Möglichkeit, diese Arbeitsmappe als Simulation-Zusammenfassung im PDF-Format mit dem aktuellen Datum abzuspeichern.



Abbildung 18: Zusammenfassung

vi. Referenzlastprofil:

Um zu bestimmen, welcher Anteil des erzeugten Solarstroms zeitgleich zur Deckung des Strombedarfs beitragen kann, sind Stromlast- und PV-Energieerzeugungsprofile erforderlich. Diese Arbeitsmappe beinhaltet das erstellte Erzeugungs- und Lastprofil des Referenzhaushalts aus dem vorherigen Unterpunkt. Anhand dieser Daten werden in dem parallel stehende Spalten die entscheidenden Hintergrund Berechnungen zur Simulation der Anlage mit Speichersystemen, wie „Überschuss von PV-Energie“, „Ungedeckter Verbrauch“, „Direkt verbrauchte PV-Energie“, „Batterie Aufladen“, „Batterie entladen“, „Einspeisung“, „Netzbezug“, „Eigenverbrauch“ und „Autarkiegrad“ berechnet. Man kann sagen, dass diese Arbeitsmappe das Herzstück des Berechnungstools ist und in Kombination mit einem Speichersystem die Grundlagen der Simulationsberechnungen für beliebig kombinierte PV-Systeme bildet.

	A	B	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1			ÜBERSCHUSS VON PV			UNGEDECKTER VERBRAUCH			DIREKT VERBRAUCHTE PV		
2	Datum	Ab-Zeit	Energie [kWh]	Leistung [kW]	Energie kumuliert [kWh]	Energie [kWh]	Leistung [kW]	Energie kumuliert [kWh]	Energie [kWh]	Leistung [kW]	Energie kumuliert [kWh]
11264	27.04.2012	06:45:00	0	0		0,052309571	0,209238285		0,033636114	0,134544458	
11265	27.04.2012	07:00:00	0	0		0,027317875	0,109271499		0,093801483	0,375205933	
11266	27.04.2012	07:15:00	0	0		0,645657434	2,582629735		0,094429893	0,377719571	
11267	27.04.2012	07:30:00	0	0		0,812181822	3,248727288		0,059621179	0,238484716	
11268	27.04.2012	07:45:00	0	0		0,640763999	2,563055998		0,169683573	0,67873429	
11269	27.04.2012	08:00:00	0	0		0,282366823	1,129467292		0,333821592	1,335286366	
11270	27.04.2012	08:15:00	0	0		0,628094248	2,512376992		0,20560658	0,82242632	
11271	27.04.2012	08:30:00	-0,122848524	-0,491394096			0		0,159242641	0,636970565	
11272	27.04.2012	08:45:00	-0,191876837	-0,767507348			0		0,076331009	0,305324036	
11273	27.04.2012	09:00:00	-0,150698574	-0,602794296			0		0,11877257	0,47509028	
11274	27.04.2012	09:15:00	-0,081554291	-0,326217163			0		0,122620552	0,490482206	
11275	27.04.2012	09:30:00	-0,05112493	-0,204499721			0		0,086658753	0,34663501	
11276	27.04.2012	09:45:00	-0,061464376	-0,245857505			0		0,078619157	0,314476626	
11277	27.04.2012	10:00:00	-0,101104141	-0,404416562			0		0,084833864	0,339335456	
11278	27.04.2012	10:15:00	-0,185717642	-0,742870568			0		0,073899779	0,295599115	
11279	27.04.2012	10:30:00	-0,211085685	-0,844342741			0		0,107718858	0,430875434	
11280	27.04.2012	10:45:00	-0,19018414	-0,760736558			0		0,137761498	0,55104599	
11281	27.04.2012	11:00:00	-0,274666231	-1,098664922			0		0,092765562	0,371062247	
11282	27.04.2012	11:15:00	-0,42552602	-1,70210408			0		0,073288746	0,293154984	
11283	27.04.2012	11:30:00	-0,727336856	-2,909347426			0		0,081394019	0,325576077	
11284	27.04.2012	11:45:00	-0,603754054	-2,415016217			0		0,073282882	0,293131528	
11285	27.04.2012	12:00:00	-0,612264038	-2,449056154			0		0,097482594	0,389930375	
11286	27.04.2012	12:15:00	-0,525867643	-2,103470571			0		0,122761288	0,491045154	
11287	27.04.2012	12:30:00	-0,65820643	-2,63282572			0		0,085720506	0,342882026	
11288	27.04.2012	12:45:00	-0,756794014	-3,027176055			0		0,066934475	0,267737898	
11289	27.04.2012	13:00:00	-0,435521876	-1,742087504			0		0,068857879	0,275431516	
11290	27.04.2012	13:15:00	-0,231817543	-0,927270171			0		0,084713065	0,338852259	
11291	27.04.2012	13:30:00	-0,299088039	-1,196352158			0		0,097470866	0,389883463	
11292	27.04.2012	13:45:00	-0,58419802	-2,336792081			0		0,11222244	0,448889758	
11293	27.04.2012	14:00:00	-0,217663638	-0,870654554			0		0,10622001	0,424880041	

Abbildung 19: Hintergrunddaten - Referenzlastprofil

vii. Akkusysteme:

Diese Arbeitsmappe enthält die verschiedenen Akkuspeichersystemlösungen verschiedener Hersteller. Diese Daten stammen aus einer Marktübersicht-Recherche für Speicherlösungen während der Anfangsphase dieser Arbeit. Verschiedene Hersteller mit verschiedenen Spezifikationen werden hier alphabetisch geordnet gemäß der Hauptaufteilung nach Art der Kopplung des Speichersystems (AC-System oder DC-System) und der verwendete Speichertechnologie (hauptsächlich Blei oder Lithium). Verschiedene Informationen wie Lieferbarkeit, verfügbare Komponenten, Anzahl der Phasen, Verfügbarkeit einer Notstrom-Option, theoretische und nutzbare Kapazität, Entladetiefe, Zyklenlebensdauer, Investitionskosten und Speicherkosten pro verfügbarer nutzbarer Kapazität der Akkus lassen sich aus dieser Liste herauslesen. Weiterhin basieren diese Daten auf den Angaben der Hersteller. Je nach Speichersystem können Daten fehlen oder nicht vollständig gelistet sein. Es bleibt dem Nutzer überlassen, diese Liste auf dem aktuellen Stand zu führen.

Diese Daten dienen zur Eingabe in der Arbeitsmappe Planungsübersicht. Damit kann der Preis des ausgewählten Systems direkt beim Auswählen der Anbieter abgeschätzt werden kann.

4.5 Simulation einer PV-Anlage mit und ohne Speichersystem am Beispiel eines Modellhaushalts

Das Simulationsmodell wird am Beispiel eines 4-Personen-Haushalts in einem Einfamilienhaus dargestellt. Dieser Modellhaushalt wird mit folgenden Daten charakterisiert:

- Standort: Hamburg
- Jahresstromverbrauch: 4500 kWh
- PV-Anlage:
 - Nennleistung: 5 kWp
 - Ausrichtung: Süd (0°)
 - Neigung: 30°

Bei dem Betrachtungsfall mit einem Speichersystem wird der Modellhaushalt zusätzlich mit bestimmten Akkudaten ausgestattet:

- Akkutechnologie: Lithium-Ion
- Nutzbare Akkukapazität: 5 kWh
- Entladetiefe (DoD): 80 %
- Maximale Lade-/Entladeleistung: 5 kW
- Zyklfestigkeit: 5000 Zyklen
- Vollzyklen/Jahr : 250 Zyklen/Jahr

Zur initialen Betrachtung der Bilanz von dem zu bezahlenden Netzstrombezug und des Gewinns durch Einspeisevergütung werden folgende Daten festgelegt:

- Einspeisevergütung: 0,15 €/kWh
- Netzstrombezugspreis: 0,26 €/kWh

Diese Annahmen werden dann in dem Berechnungstool eingesetzt und für die Simulation verwendet.

4.6 Ergebnisse

Die PVGIS ergibt einen durchschnittlichen spezifischen Energieertrag pro Jahr von ca. 928 kWh/kWp. Trägt man diesen Wertes in das Berechnungstool ein, ergibt sich ein zu erwarteter Jahresertrag von 4640 kWh/Jahr für die 5 kWp PV-Anlage.

Je nachdem wie groß die PV-Anlagenleistung und die Speichergröße sind, ergeben sich für einen gegebenen Haushaltslastgang unterschiedliche Werte für den Eigenverbrauchsanteil und den Autarkiegrad.

Für den Modellhaushalt werden der Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad für verschiedene nutzbare Kapazitäten eines eingesetzten Akkus mit bestimmten Parametern simuliert.

Akkudaten			
Akkutyp	Lithium-Ion	Zyklusfestigkeit	5000 Zyklen
Speichergröße (brutto)	6,25 kWh	Vollzyklen/Jahr	250 Zyklen/a
Entladetiefe (DoD)	80 %	Lebensdauer ca.	20 Jahre
Speichergröße (netto)	5,00 kWh		
Maximaler Ladeleistung	5000 W		
Maximale Entladeleistung	5000 W		

Analyse des Jahresbilanz			
	ohne Batterie	mit Batterie	Differenz
Erzeugt	4640,00 kWh	4640,00 kWh	- kWh
Verbraucht	4500,00 kWh	4500,00 kWh	- kWh
Eigenverbrauch direkt	1360,07 kWh	1360,07 kWh	- kWh
Eigenverbrauch mit Akku	- kWh	1275,65 kWh	+1275,65 kWh
Eigenverbrauch gesamt	1360,07 kWh	2635,72 kWh	+1275,65 kWh
Netzeinspeisung EVU	3279,93 kWh	2004,28 kWh	-1275,65 kWh
Netzbezug EVU	3139,93 kWh	1864,28 kWh	-1275,65 kWh
Einspeisevergütung	491,99 €	300,64 €	-191,35 €
Strom bezahlen	816,38 €	484,71 €	-331,67 €
Bilanz	-324,39 €	-184,07 €	+140,32 €
Eigenverbrauchsquote	29,3%	56,8%	
Autarkiegrad	30,2%	59,0%	

Abbildung 20: Ergebnis der Simulation

Durch die Simulation erkennt man, dass für den betrachteten Modellhaushalt mit PV-Anlage und Lithium-Ion-Akkuspeichersystem im Verlauf eines ganzen Jahres ohne Akku ein Eigenverbrauchsanteil von 29,3 % und ein Autarkiegrad von 30,2 % erreicht werden. Mit einer 5kWh nutzbaren Akkukapazität lässt sich der Eigenverbrauchsanteil auf 56,8 % und der Autarkiegrad auf 59,0 % erhöhen (siehe Ergebnis der Simulation in Abbildung 20).

In der Abbildung unten sind die Last- und Erzeugungsgänge für den simulierten Modellhaushalt für je drei Tage pro Jahreszeit dargestellt. An den ausgewählten drei Tagen in Januar können von der PV-Anlage ohne Speicher rund 32,1 % EV und 17,5 % AG erzielt werden. Der Einsatz eines Akkus erhöht den EV auf 86,5 % und den AG auf 43,9 %. Aufgrund der schwächeren solaren Einstrahlung in dieser Jahreszeit ist es allerdings nicht möglich, mit 5,0 kWh Speicherkapazität die Stromversorgung aus der PV-Anlage bis zum nächsten solaren Input zu gewährleisten.

Im April geht der EV der PV-Anlage ohne Akku aufgrund der höheren solaren Leistung auf 25,4 % zurück, wohingegen der AG aus demselben Grund auf 40,9 % steigt. Mit Akku werden ein EV von 54,7 % und ein AG von 85,2 % erzielt.

Im Juli liegt der EV bei 15,8 % ohne Akku und 31,7 % mit Akku zur Zeit der höchsten Sonneneinstrahlung sehr tief. Der AG jedoch ist mit 49,1 % ohne Akku und 95,9 % mit Akku am höchsten. Durch den Akku kann fast an allen drei Tagen auf den Netzbezug verzichtet werden.

Die dargestellten drei Tage in Oktober ergeben mit Akku ein EV von 59,7 % und ein AG von 83,3 % im Gegensatz zu dem Betrieb ohne Akku mit 20,5 % EV und 33,5 % AG.



Abbildung 21: 3-Tagesanalyse in Winter, ÜG1, Sommer und ÜG2 (von oben nach unten)

Im nächsten Abschnitt werden die Menge der erzeugten Energie, Verbrauch und Netzeinspeisung und –bezug, Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad mit und ohne Speicher über einen Monat näher aufgeschlüsselt. In der Tabelle unten erkennt man deutlich, dass in den kalten Monaten von November bis Februar aufgrund der geringeren erzeugten PV-Energie mit hohen Eigenverbrauchsanteilen zu rechnen ist. Wie erwartet verhalten sich die Werte der Autarkiegrade gegensätzlich zu den Eigenverbrauchszahlen, was auf die schwache solare Einstrahlung und den hohen Stromverbrauch zurückzuführen ist. In den Monaten Juni bis August wird mit dem Einsatz eines 5,0 kWh Lithium-Ionen-Akku nur sehr wenig Netzstrombezug nötig.

Tabelle 3: Monatsanalyse der Erzeugung, Verbrauch, Einspeisung, Netzbezug, EV und AG mit und ohne Akku

Monatsanalyse	ohne Akku		mit Akku		ohne Akku		mit Akku		ohne Akku		mit Akku	
	Erzeugung	Verbrauch	Einspeisung	Einspeisung	Bezug	Bezug	EV	EV	AG	AG		
Jan 2012	119,97 kWh	461,23 kWh	66,76 kWh	14,25 kWh	408,02 kWh	355,51 kWh	44,35%	88,12%	11,54%	22,95%		
Feb 2012	203,48 kWh	470,72 kWh	114,96 kWh	40,65 kWh	382,20 kWh	307,89 kWh	43,50%	80,02%	18,80%	34,95%		
Mar 2012	392,56 kWh	468,70 kWh	270,72 kWh	161,15 kWh	346,86 kWh	237,29 kWh	31,04%	58,95%	25,99%	49,29%		
Apr 2012	491,57 kWh	420,42 kWh	339,20 kWh	196,03 kWh	268,05 kWh	124,89 kWh	31,00%	60,12%	36,24%	71,11%		
Mai 2012	661,66 kWh	365,14 kWh	503,15 kWh	361,01 kWh	206,63 kWh	64,49 kWh	23,96%	45,44%	43,41%	83,04%		
Jun 2012	560,66 kWh	343,99 kWh	378,89 kWh	240,20 kWh	162,22 kWh	23,53 kWh	32,42%	57,16%	52,84%	94,40%		
Jul 2012	642,09 kWh	353,09 kWh	468,08 kWh	321,31 kWh	179,08 kWh	32,31 kWh	27,10%	49,96%	49,28%	91,13%		
Aug 2012	647,44 kWh	320,33 kWh	497,86 kWh	354,28 kWh	170,75 kWh	27,17 kWh	23,10%	45,28%	46,70%	91,90%		
Sep 2012	421,61 kWh	292,49 kWh	305,04 kWh	178,15 kWh	175,92 kWh	49,03 kWh	27,65%	57,75%	39,85%	84,65%		
Okt 2012	301,85 kWh	234,42 kWh	226,03 kWh	125,03 kWh	158,61 kWh	57,61 kWh	25,12%	58,58%	32,34%	74,54%		
Nov 2012	129,45 kWh	294,25 kWh	78,63 kWh	11,01 kWh	243,43 kWh	175,80 kWh	39,26%	91,50%	17,27%	41,59%		
Dez 2012	67,66 kWh	475,22 kWh	30,60 kWh	1,22 kWh	438,15 kWh	408,77 kWh	54,78%	98,19%	7,80%	14,07%		

Die Monatsanalyse von oben lässt sich bezüglich der Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad in Abbildungen 22 und 23 graphisch darstellen. Deutlich zu erkennen ist, dass der Einsatz eines Speichersystems in jedem Monat zu einer starken Steigerung des EV und AG führt.

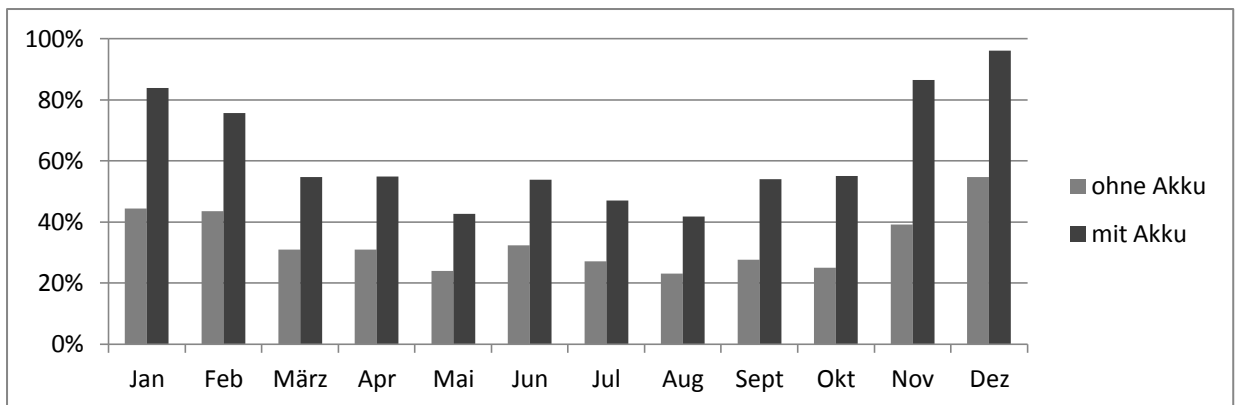


Abbildung 22: Eigenverbrauchsanteil für den Modellhaushalt

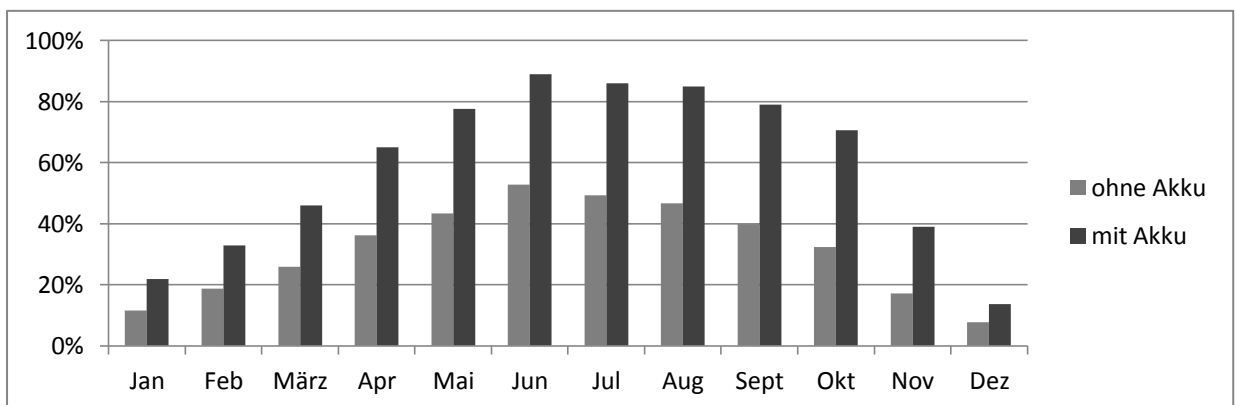


Abbildung 23: Autarkiegrad für den Modellhaushalt

Auf die mit dem Berechnungstool simulierte Wirtschaftlichkeitsanalyse für den Modellhaushalt wird in dem nächsten Kapitel näher eingegangen.

4.7 Dimensionierung des Speichersystems

In Abbildung 24 weiter unten, wird die Energiebilanz zwischen Erzeugung und Verbrauch des Modellhaushalts während eines Monats über das Jahr verglichen. Hierbei wird die an einem Tag erzeugte „**Erzeugung**“ (blau) und verbrauchte „**Verbrauch**“ (rot) Energie in

verschiedenen Monaten verglichen. Weiterhin ist die Differenz zwischen erzeugter und verbrauchter Energie „**Differenz Verbrauch-Erzeugung**“ (grün) pro Tag dargestellt. Eine positive grüne Säule entspricht dem ungedeckten Verbrauch bei Unterdeckung oder Überschuss der produzierten Sonnenenergie bei negativer grüner Säule.

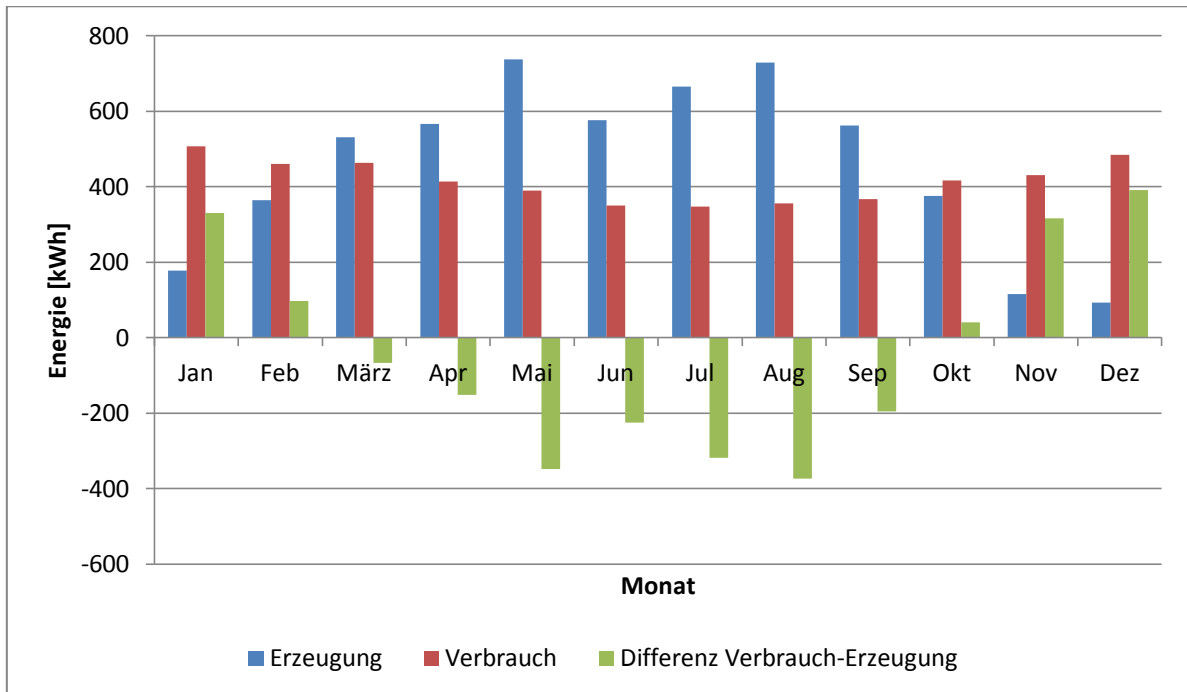


Abbildung 24: Monatsenergiebilanz des betrachtenden Modellhaushaltes für das Jahr 2012

Generell können die Monatsverläufe der Energiebilanz in einem Haushalt in vier Kategorien unterteilt werden:

- **Wintermonate (Dezember bis Februar)**

Der Energieverbrauch ist normalerweise deutlich höher als die von der PV-Anlage erzeugte Energie. Der Tagesbedarf wird aus diesem Grund nur selten gedeckt.

- **Übergangsmonate 1 (März bis Mai) und Übergangsmonate 2 (September bis November)**

Die PV-Anlage kann durchaus nennenswert Erzeugungenergie erreichen. Teilweise kann der Monatsbedarf eines Haushaltes dadurch aber nicht gedeckt werden.

- **Sommermonate (Juni bis August)**

Es wird deutlich mehr Energie durch die PV-Anlage erzeugt als der Haushalt verbraucht. Der Tagesbedarf des Haushaltes ist praktisch immer gedeckt. An Tagen mit sehr hoher PV-Erzeugung kann ein Überschuss von über 20 kWh erzeugt werden.

Wenn man die Jahreszeit-Energiebilanz der Erzeugung und des Verbrauchs des Modellhaushalts zusammenfassend betrachtet, so lässt sich diese in folgendermaßen unterteilt.

Tabelle 4: Bilanz der Erzeugung und Verbrauch nach Jahreszeiten

Jahreszeit	Erzeugung [kWh]	Verbrauch [kWh]	Erzeugung-Verbrauch [kWh]
Winter	391,11	1407,17	-1016,06
ÜG1	1545,79	1254,26	291,53
Sommer	1850,19	1017,41	832,78
ÜG2	852,91	821,16	31,75

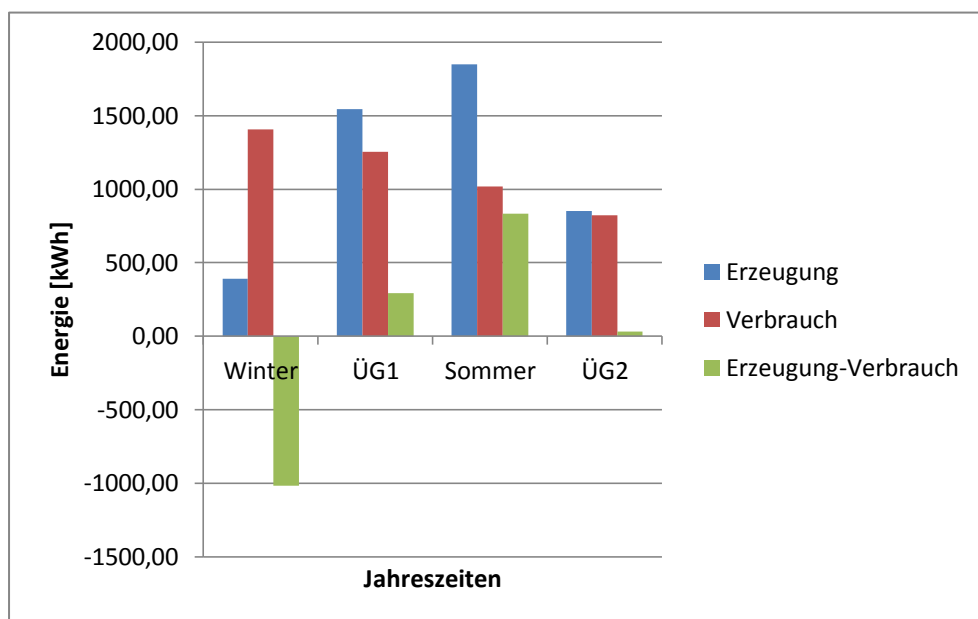


Abbildung 25: Graphische Darstellung des Bilanz nach Jahreszeiten

In Abbildung 25 oben sind die Energiewerte in verschiedenen Jahreszeiten dargestellt. Der Verbrauch im Haushalt ist im Winter am höchsten. Das liegt voraussichtlich an dem häufigeren Einschalten der Heizung und früheren Einschalten des Lichts. Dagegen sinkt der Verbrauch im Sommer.

Aufgrund des höheren Verbrauchs im Winter und der nur geringen Sonneneinstrahlung reicht die niedrige Erzeugung nicht aus, um den Tagesbedarf zu decken. Die Erzeugung im Winter ist dabei so gering, dass eine Dimensionierung des Speichers für diese Zeit nicht sinnvoll ist.

Im Sommer, wird so viel PV-Energie erzeugt, dass diese sogar an den meisten Tagen den Tagesbedarf deckt und Überschüsse erzeugt, die ins Netz eingespeist werden oder zur Deckung des Nachtverbrauchs im Speichersystem gespeichert werden können.

Im Grunde genommen liegen die Energieerzeugung durch die PV-Anlage und der Energieverbrauch des Haushalts über das Jahr betrachtet nahezu im Gleichgewicht, allerdings sind PV-Erzeugung aber auch der Verbrauch ungleichmäßig über das Jahr verteilt. Die zeitliche Korrelation von PV-Erzeugung und Verbrauch ist eher gering.

Theoretisch kann bei einer 5 kW-Anlage wie im Modellhaushalt der kumulierte Energieüberschuss im Sommer und an manchen Tagen in den Übergangsmontaten gespeichert werden, um die Unterdeckung im Winter und den Übergangsmontaten auszugleichen und damit den Haushalt fast 100% Energie autark machen. Im Jahr 2012 wurde bei der PV-Anlage im Beispiel eine Unterdeckung von 1016,06 kWh ermittelt und ein Überschuss von 1156,06 kWh erzeugt. Ein Akkuspeicher dieser Größenordnung (ca. 1000 kWh) ist für ein Haushalt technisch möglich, aber aus wirtschaftlichen Gründen und andere Faktoren wie Selbstentladung des Akkus im Haushaltsbereich nicht realisierbar und ungünstig.

Eine Langzeitspeicherung mit einem Speicher über mehrere Monate erscheint nicht sinnvoll, da selbst ein Akku mit einer Kapazität von ca. 20 kWh in den Sommermonaten praktisch immer vollgeladen und im Winter immer leer wäre. Entsprechend sollte ein Speicher so dimensioniert werden, dass der Tagesbedarf gedeckt werden kann. Dazu werden mit Hilfe des Berechnungstools die Tagesverläufe für jeden einzelnen Tag in einem Jahr analysiert und damit die entsprechende optimale Akkuspeicherkapazität bestimmt werden.

4.7.1 Ermittlung der optimalen Speichergröße

Je nach gewählter Dimension der Akkus ergeben sich für einen gegebenen Last- und Erzeugungsgang eines Haushaltes eine unterschiedliche Eigenverbrauchsquote und auch Autarkiegrad. Für den betrachteten Modellhaushalt mit 5 kWp Anlageleistung wurde ein Speichersystem mit Lithium-Ionen Akku mit einer nutzbaren Kapazität von 5 kWh eingesetzt. Wie bereits in Abschnitt 4.6 (Ergebnisse) dargelegt wurde, kann mit dem

Speicher eine Eigenverbrauchsquote von 29,3% auf 56,8 % und ein Autarkiegrad von 30,2 % auf 59,0 % gesteigert werden. Die notwendige Speichergröße könnte aber mit der Analyse in der Simulation des Berechnungstools je nach Wunsch und finanziellen Möglichkeiten der Anlagebesitzer optimiert werden. Für diesen Zweck wird das „Was-Wäre-Wenn“ Analysetool von Excel verwendet, um den Eigenverbrauchsanteil beim Einsatz verschiedener Akkugrößen zu simulieren. Abbildung 26 unten, zeigt die Ergebnisse der Eigenverbrauchsanteile in Abhängigkeit von verschiedenen Akkugrößen. Man sieht sehr gut, dass bei zunehmend nutzbarer Akkukapazität von 1 kWh bis 10 kWh, der Eigenverbrauchsanteil von 37,0 % bis 64,3 % stetig zunimmt. Eine wesentliche Differenz zeigt die Steigerung von 1 kWh auf 2 kWh mit 6,1 %. Nach Akkugrößen von größer 8 kWh hat die Akkugröße nur noch wenig Einfluß.

Analyse verschiedener Akkugrößen (netto)				
Bei einer Anlageleistung von:		5,00 kWp		
Akkugröße Differenz:		1 kWh		
Akkugröße zunehmend [kWh]	EV [%]	AG [%]	Differenz EV [%]	Differenz AG [%]
1,00	37,0%	38,5%		
2,00	43,1%	44,8%	6,1%	6,3%
3,00	48,5%	50,4%	5,4%	5,6%
4,00	53,2%	55,2%	4,6%	4,8%
5,00	56,8%	59,0%	3,6%	3,8%
6,00	59,4%	61,8%	2,6%	2,7%
7,00	61,3%	63,7%	1,9%	1,9%
8,00	62,6%	65,0%	1,3%	1,3%
9,00	63,5%	66,0%	0,9%	1,0%
10,00	64,3%	66,8%	0,8%	0,8%

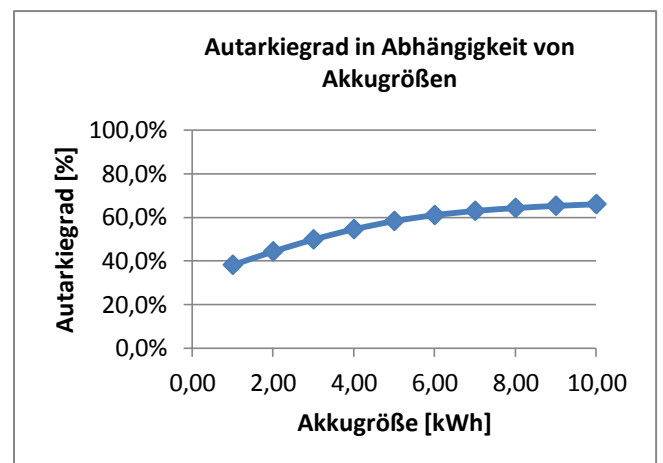
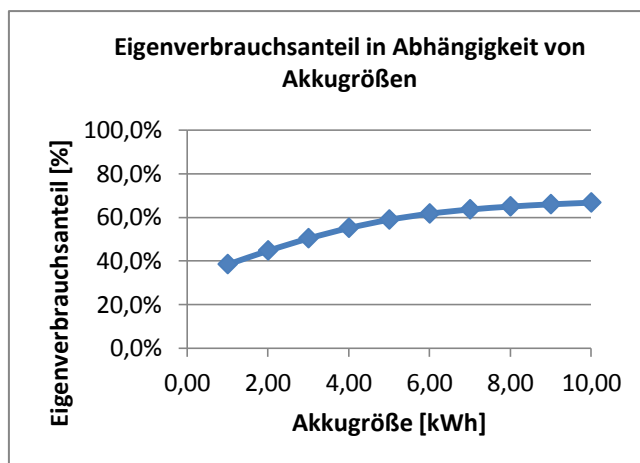


Abbildung 26: Analyse der EV und AG bei verschiedenen Akkugrößen (1 kWh bis 10 kWh)

Wie in Abbildung 27 gezeigt, nehmen die Eigenverbrauchsanteile mit weiter zunehmender Akkugröße von 11 kWh bis zu 20 kWh zwischen 0,4 % bis 0,2 % nur noch sehr wenig zu, so dass der Aufwand für einen größeren Akku für einen noch höheren EV nicht mehr wirtschaftlich ist.

Analyse verschiedener Akkugrößen (netto)				
Bei einer Anlageleistung von:		5,00 kWp		
Akkugröße Differenz:		1 kWh		
Akkugröße zunehmend [kWh]	EV [%]	AG [%]	Differenz EV [%]	Differenz AG [%]
11,00	64,8%	67,4%		
12,00	65,3%	67,8%	0,4%	0,4%
13,00	65,6%	68,2%	0,3%	0,4%
14,00	65,9%	68,5%	0,3%	0,3%
15,00	66,2%	68,8%	0,3%	0,3%
16,00	66,5%	69,1%	0,3%	0,3%
17,00	66,8%	69,4%	0,3%	0,3%
18,00	67,0%	69,7%	0,2%	0,3%
19,00	67,2%	69,8%	0,2%	0,2%
20,00	67,4%	70,0%	0,2%	0,2%

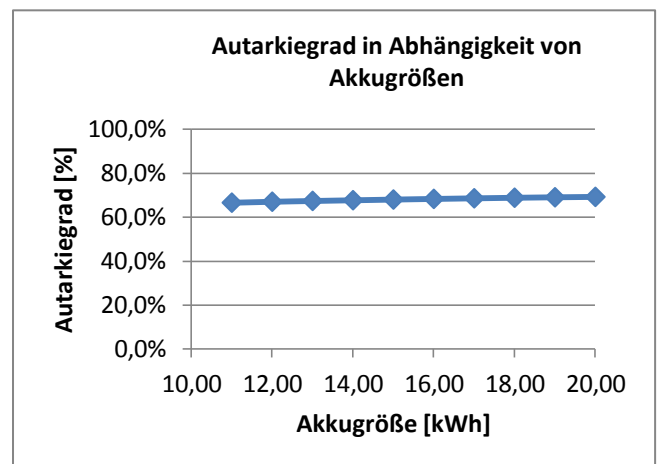
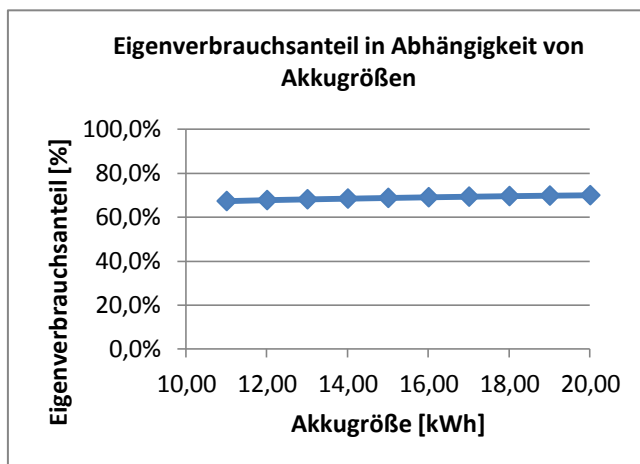


Abbildung 27: Analyse der EV und AG bei verschiedenen Akkugrößen (11 kWh bis 20 kWh)

Zusammenfassung der Dimensionierung:

Um die gesamte Anlage nicht überzudimensionieren, ist bei einer 5 kWp-Anlage ein Speicher mit nutzbarer Kapazität von 6-8 kWh optimal. Eine solche PV-Anlage kostet mit Lithium-Akku ca. 16000 € und hält 20 Jahre. Mit Blei-Akku kostet sie ca. 12000 bis 14000 € mit dem Nachteil der nur geringen Akkulebensdauer von ca. 5 Jahren [33] [35]. Hier ist also ein Kompromiss zu finden, der stark vom Bedarf und den Kosten abhängt.

4.7.2 Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit von PV-Anlagenleistung und nutzbarer Akkukapazität

Die PV-Anlagenleistung ist durch die maximal nutzbare Dachfläche des Haushalts begrenzt. Für andere Haushalte mit anderer Dachfläche und gleichem Energieverbrauch wie der des Modellhaushalts können andere PV-Anlagenleistungen installiert werden.

Mit den Parametern des Modellhaushalts wurden deshalb der EV und AG bei PV-Anlagenleistungen von 1-10 kWp mit verschiedenen Akkugrößen von 1-10 kWh simuliert.

Die Ergebnisse bezüglich des Eigenverbrauchsanteils und Autarkiegrades sind in Tabelle 5 und 6 dargestellt. Die Abbildungen 28 und 29 zeigen die jahresmittleren Eigenverbrauchsanteile und Autarkiegrade in Abhängigkeit von den PV-Anlagenleistungen und der nutzbaren Akkukapazitäten.

Durch die Simulation erkennt man, dass der Eigenverbrauchsanteil umso höher wird, je kleiner die PV-Anlagenleistung dimensioniert ist. Bei einer sehr kleinen PV-Anlage von 1 bis 2 kWp könnte ein Eigenverbrauchsanteil von fast 100% erreicht werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Erzeugung die Last praktisch nie übersteigt. Bei großen PV-Anlagenleistungen von 7 kWp bis 10 kWp steigt der EV bei der steigender Akkukapazität zunächst nicht mehr so stark wie bei PV-Anlagenleistungen von 1 kWp bis 6 kWp.

Bei Vergrößerung der nutzbaren Akkukapazität erhöht sich der Eigenverbrauchsanteil wie erwartet für jede PV-Anlagegröße, da mehr PV-Überschuss im Akku zwischengespeichert und zur Deckung des Verbrauchs verwendet werden kann. D.h., dass ein hoher EV in erster Linie durch kleine PV-Anlagen erreicht und zusätzlich durch den Einsatz von Akkus gesteigert werden kann.

Analog zum EV steigt auch der AG bei Vergrößerung der nutzbaren Akkukapazität. Das liegt daran, dass größere Akkus einen größeren Anteil an PV-Energieüberschuss zwischenspeichern können, der bei Bedarf an Energie wieder abgeben werden kann. Im Gegensatz zum EV erhöht sich der AG bei steigender PV-Anlagengröße.

Tabelle 5: Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit der PV-Anlagenleistung und der nutzbaren Akkukapazität

EV [%]		PV-Anlagenleistung										
		0 kWp	1 kWp	2 kWp	3 kWp	4 kWp	5 kWp	6 kWp	7 kWp	8 kWp	9 kWp	10 kWp
Akkukapazität [kWh]	0,00	0,0%	77,2%	53,8%	41,8%	34,4%	29,3%	25,6%	22,8%	20,6%	18,8%	17,3%
	1,00	0,0%	93,8%	68,8%	53,2%	43,6%	37,0%	32,2%	28,5%	25,6%	23,2%	21,3%
	2,00	0,0%	98,3%	78,8%	61,5%	50,7%	43,1%	37,5%	33,2%	29,8%	27,1%	24,8%
	3,00	0,0%	99,2%	86,3%	68,8%	56,8%	48,5%	42,4%	37,5%	33,7%	30,6%	28,0%
	4,00	0,0%	99,2%	91,4%	75,0%	62,1%	53,2%	46,5%	41,3%	37,1%	33,7%	30,8%
	5,00	0,0%	99,2%	94,3%	79,8%	66,4%	56,8%	49,7%	44,1%	39,6%	36,0%	33,0%
	6,00	0,0%	99,2%	96,0%	83,2%	69,5%	59,4%	51,9%	46,0%	41,4%	37,6%	34,4%
	7,00	0,0%	99,2%	96,9%	85,4%	71,9%	61,3%	53,4%	47,3%	42,6%	38,7%	35,5%
	8,00	0,0%	99,2%	97,4%	87,1%	73,5%	62,6%	54,5%	48,3%	43,4%	39,5%	36,2%
	9,00	0,0%	99,2%	97,7%	88,3%	74,6%	63,5%	55,3%	49,0%	44,0%	40,1%	36,7%
	10,00	0,0%	99,2%	98,0%	89,1%	75,6%	64,3%	56,0%	49,6%	44,6%	40,5%	37,2%

Tabelle 6: Autarkiegrad in Abhängigkeit der PV-Anlagenleistung und der nutzbaren Akkukapazität

AG [%]		PV-Anlagenleistung										
		0 kWp	1 kWp	2 kWp	3 kWp	4 kWp	5 kWp	6 kWp	7 kWp	8 kWp	9 kWp	10 kWp
Akkukapazität [kWh]	0,00	0,0%	15,9%	22,2%	25,8%	28,3%	30,2%	31,7%	33,0%	34,0%	34,9%	35,6%
	1,00	0,0%	19,5%	28,7%	33,2%	36,3%	38,5%	40,2%	41,5%	42,6%	43,5%	44,3%
	2,00	0,0%	20,4%	32,8%	38,4%	42,2%	44,8%	46,8%	48,3%	49,6%	50,6%	51,5%
	3,00	0,0%	20,6%	35,9%	42,9%	47,2%	50,4%	52,8%	54,6%	56,0%	57,2%	58,3%
	4,00	0,0%	20,6%	38,0%	46,8%	51,6%	55,2%	58,0%	60,0%	61,6%	62,9%	64,0%
	5,00	0,0%	20,6%	39,2%	49,7%	55,2%	59,0%	61,9%	64,1%	65,8%	67,2%	68,4%
	6,00	0,0%	20,6%	39,9%	51,9%	57,8%	61,8%	64,7%	66,9%	68,7%	70,3%	71,5%
	7,00	0,0%	20,6%	40,3%	53,3%	59,7%	63,7%	66,6%	68,8%	70,7%	72,3%	73,6%
	8,00	0,0%	20,6%	40,5%	54,3%	61,1%	65,0%	67,9%	70,2%	72,1%	73,7%	75,2%
	9,00	0,0%	20,6%	40,6%	55,0%	62,1%	66,0%	69,0%	71,2%	73,2%	74,9%	76,3%
	10,00	0,0%	20,6%	40,7%	55,6%	62,8%	66,8%	69,8%	72,0%	74,1%	75,8%	77,2%

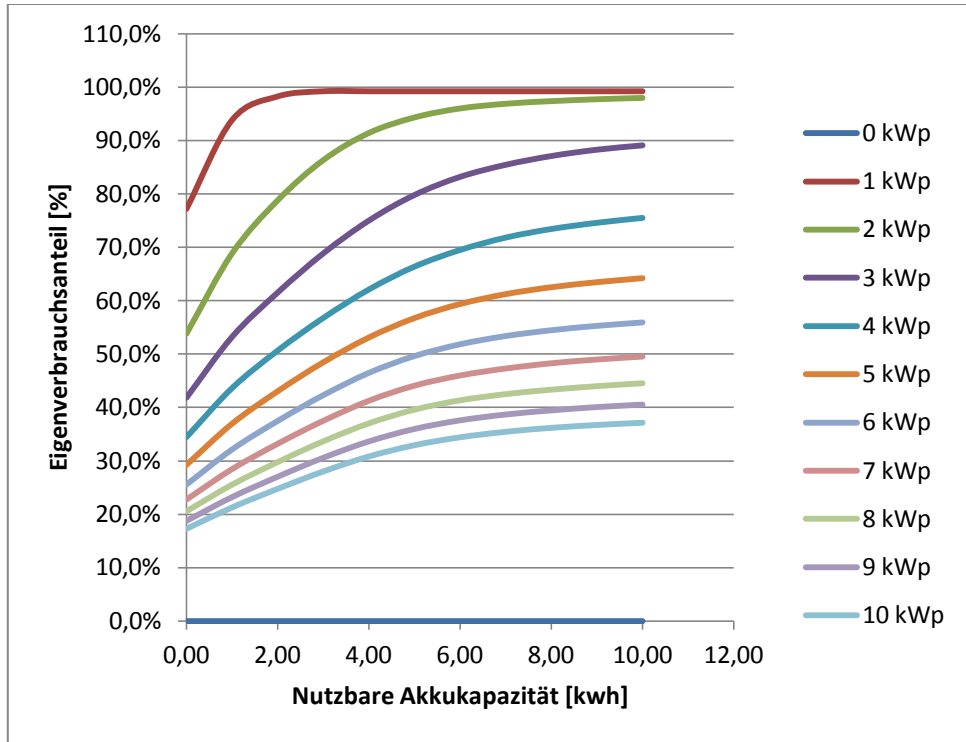


Abbildung 28: Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit der PV-Anlagenleistung und der nutzbaren Akkukapazität

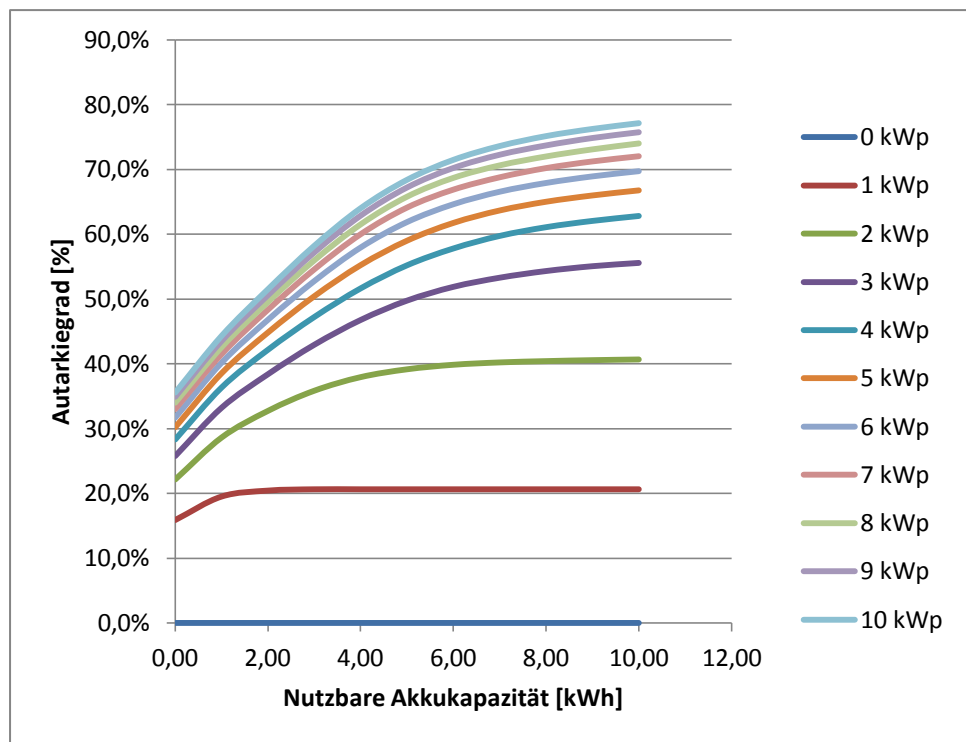


Abbildung 29: Autarkiegrad in Abhängigkeit der PV-Anlagenleistung und der nutzbaren Akkukapazität

5. WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE UND MARKTÜBERSICHT

5.1 Analyse der Wirtschaftlichkeit

Für den Betreiber der PV-Anlagen stellt sich die Frage, inwieweit sich zusätzliche Investitionen in einen Speicher durch die Erhöhung des Eigenverbrauchs und dadurch vermiedenen Strombezugskosten finanziell auszahlen. Ist eine positive Rendite möglich oder nicht. Der Einsatz eines marktreifen Stromspeichers für ein Einfamilienhaus steigert die PV-Systemkosten zusätzlich, sehr kostenintensiv um 6000 € bis 15000 €, ungefähr so viel, wie die Kosten für eine PV-Anlage zwischen 5 und 10 kWp [33]. Mit Hilfe des KfW-Förderprogramms 275 werden sich die Anschaffungskosten für einen Solarstromspeicher jedoch um einige tausend Euro senken lassen.

Ob sich eine Eigenverbrauchserhöhung durch ein Akkuspeichersystem mehr lohnt als die Einspeisung ins Netz, hängt derzeit von vielen Faktoren ab. Hier müssen Investitionskosten, laufende Betriebskosten, Netzstrompreise und ihren Steigerung sowie der Einspeisevergütungstarif berücksichtigt werden. Individuelle Berechnungen sind erforderlich. Das liegt daran, dass sich die Höhe der Stromersparnis und Vergütung durch die Einspeisung ins Netz mit der Höhe des Eigenverbrauchsanteils eines Haushalts spezifisch zu betrachten ist.

Auf Grundlage der Ergebnisse aus Kapitel 4 lassen sich weitergehende Wirtschaftlichkeitsberechnungen durchführen. Für die Auswertung und Beurteilung der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Systeme wurde der Kapitalwert berechnet und die Eigen- und Gesamtkapitalrendite bestimmt.

5.1.1 Annahmen und Prognosen

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurden die Ergebnisse für den Eigenverbrauchsanteil aus Kapitel 4 als Eingangsgrößen verwendet (siehe Seite 47: Ergebnis der Simulation). Für den Zweck der ökonomischen Bewertung einer Anlage mit Speichersystemen wird zusätzlich zu den Annahmen und Rahmenbedingungen aus Kapitel

4 der Modellhaushalt noch mit weiteren Annahmen charakterisiert (siehe Seite 46). Für die Berücksichtigung des Speichersystems wurden Annahmen bezüglich Preis und Lebensdauer getroffen. Dazu wurde auf Herstellerangaben und Literaturdaten zurückgegriffen. Laut pv-magazine kostet eine fertig installierte PV-Anlage gegenwärtig durchschnittlich rund 1800 €/kWp (brutto) [34]. Mit einem Lithium-Akkuspeichersystem sind Kosten von 3000 €/kWh nutzbare Kapazität (brutto) zu erwarten [34]. Für den Modellhaushalt wurde angenommen, dass die Anlage als neue komplette PV-Anlage mit Speichersystem angeschafft wird und dass die Anschaffungskosten durch KfW-Förderung unterstützt werden.

- Betrachtungszeitraum: 20 Jahre
- Art der Förderung KfW 275: Anschaffung als Komplettsystem (PV-Anlage und Speicher)
- Spezifische Anlagenkosten (brutto): 1800 €/kWp [34]
- Spezifische Speichersystemkosten: 3000 €/kWh (Lithium-Ion-Akku) [34]
- Gesamtinvestitionskosten PV-Anlage und Speicher: 24000 €
- Finanzierungsanteil: 50%
- Zinssatz: 4%
- Strompreissteigerungsrate: 5%
- Aktueller Strompreis: 0,26 €/kWh
- Aktuelle Einspeisevergütung: 0,15 €/kWh
- Wartungskosten: 1,5 % p.a.
- Akkuaustausch: kein Austausch innerhalb von 20 Jahre (Lithium-Akku mit erwarteter Lebensdauer von 20 Jahre)
- Wechselrichteraustausch: einmal innerhalb von 20 Jahre (1000 €)

5.1.2 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Im Modellhaushalt aus Kapitel 4 wird mittels des Berechnungstools eine Simulation der Wirtschaftlichkeit durchgeführt, um die Rentabilität des Einsatzes eines Stromspeichers zu untersuchen.

Für die folgende Wirtschaftlichkeitsanalyse wird ein Eigenverbrauchsanteil von 56,8 %, aus der vorherigen Simulation in Kapitel 4 Seite 47 verwendet. Im „Stromkostenverlauf“ (Tabelle 7) sieht man, dass mit der Annahme einer Strompreissteigerung von 5% pro Jahr, mit einem Strompreis in der Höhe von 0,66 €/kWh im letzten Jahr des Betrachtungszeitraums von 20 Jahre zu erwarten ist.

Nach Ablauf des Betrachtungszeitraums kann man mit einer Einnahme der Stromkostensparnis (durch Eigenverbrauch vermiedenen Netzstrombezug) und Einspeiserlöse (durch Netzeinspeisung) von rund 25749 € rechnen. Diese Summe minus der Summe aus dem Aufwand durch die gesamten laufenden Kosten der Anlage, wie z.B. Tilgung und Zins innerhalb der 20 Jahre, ergibt eine positive Bilanz von 2058 € (siehe Abbildung 30). In der Tabelle rechts wird der Kapitalbedarf aufgelistet, der aus den folgenden Summanden zusammengesetzt ist. Investitionssumme von 24000 €, Eigenkapital von 10500 €, Fremdkapital von 10500 € und KfW-Förderungsanteil von 3000 €. Durch gegenrechnen mit dem totalen Gewinn der Stromkostensparnis und Einspeiserlöse, ergibt sich dadurch mit einem Zinssatz von 4 %, eine positive Eigenkapitalrendite von 6,22 % und Gesamtkapitalrendite von 1,99 % (siehe Abbildung 30).

D.h. ein wirtschaftlicher Betrieb ist mit dem simulierten Akkuspeichersystem im betrachteten Modellhaushalt gewährleistet. Die Abbildung 30 zeigen auch die jährlichen Ergebnis, Investitionsentwicklung, Eigenkapital- und Gesamtkapitalrentabilität und Strompreissteigerung über 20 Jahre betrachtet.

Durch die Integration von Speichersystemen lässt sich der Eigenverbrauch von PV-Strom erhöhen. Allerdings ist die Wirtschaftlichkeit hierbei der zentrale Faktor. Da die Akkukosten der teuerste Teil einer PV-Anlage mit einem Speichersystem ist, wird die Wirtschaftlichkeit der Anlage stark von der Lebensdauer sowie der Zyklenfestigkeit des Akkus bestimmt. Um einen rentablen Betrieb zu erreichen, muss daher eine dauerhafte, kostengünstige Speichertechnologie eingesetzt werden.

Tabelle 7: Analyse der Stromkostenverlauf und Wirtschaftlichkeit

Stromkostenverlauf																				
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Jahr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Strompreis [€/kWh]	0,26	0,27	0,29	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37	0,38	0,40	0,42	0,44	0,47	0,49	0,51	0,54	0,57	0,60	0,63	0,66
Eigenverbrauchsanteil:	56,8 %																			
Wirtschaftlichkeitsanalyse																				
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Jahr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Stromkostensparnis [€]	665	698	733	769	808	848	891	935	982	1031	1083	1137	1194	1253	1316	1382	1451	1523	1599	1679
Einspeiseerlöse [€]	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292	292
Summe Einnahmen [€]	956	989	1024	1061	1099	1140	1182	1227	1274	1323	1374	1428	1485	1545	1607	1673	1742	1815	1891	1971
Tilgung [€]	353	367	381	397	413	429	446	464	483	502	522	543	565	587	611	635	660	687	714	743
Zinsaufwand [€]	420	516	502	486	470	454	437	419	400	381	361	340	318	296	272	248	223	196	169	140
Wartungskosten [€]	410	410	410	410	410	410	410	410	410	410	410	410	410	410	410	410	410	410	410	410
Summe Aufwand [€]	1293	1293	1293	1293	1293	1293	1293	1293	1293	1293	1293	1293	1293	1293	1293	1293	1293	1293	1293	1293
TOTAL	-337	-304	-269	-232	-194	-153	-111	-66	-19	30	81	135	192	252	314	380	449	522	598	678
TOTAL (kumulativ)	-337	-640	-909	-1141	-1335	-1488	-1599	-1665	-1684	-1655	-1574	-1438	-1246	-994	-680	-300	150	672	1270	1948



Erfolgswerte mit Akku nach 20 Jahre

Stromkostensparnis	21.975,97 €
Einspeiseerlöse	5.831,42 €
Summe Einnahmen	27.807,39 €
Tilgung	10.500,00 €
Zins	7.049,25 €
Laufende Kosten	8.200,00 €
Summe Aufwand	25.749,25 €
TOTAL	2.058,14 €

Kapitalbedarf

Investitionssumme	24.000,00 €
davon:	
Eigenkapital	10.500,00 €
Fremdkapital	10.500,00 €
staatliche Förderung	3.000,00 €
Eigenkapital-Rentabilität	6,22%
Gesamtkapital-Rentabilität	1,99%

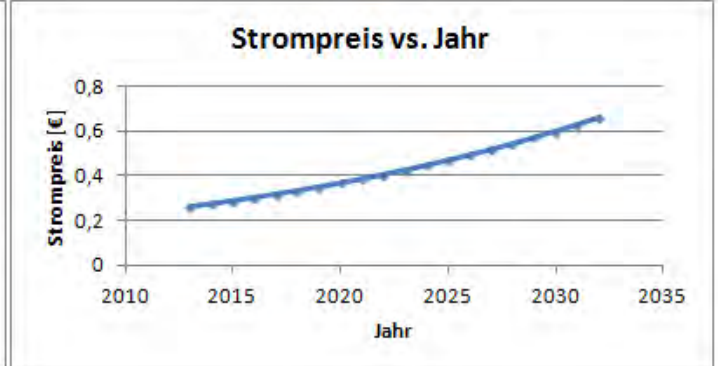
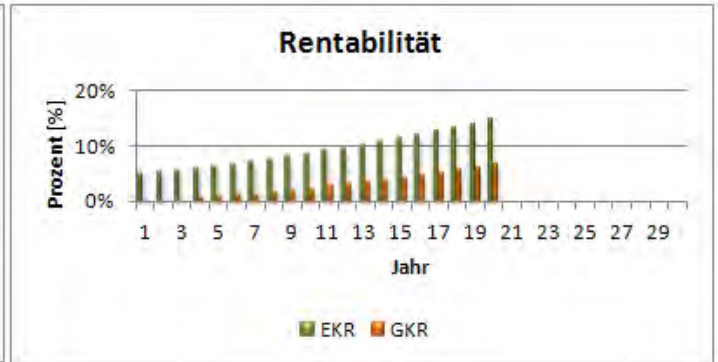
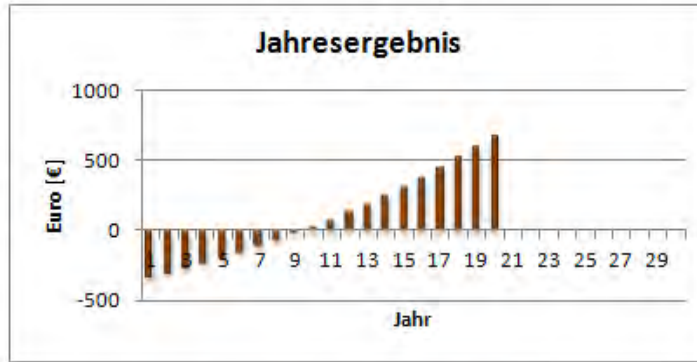


Abbildung 30: Wirtschaftlichkeitsanalyse

5.1.3 Analyse verschiedener Szenarien

Zusätzlich zur Wirtschaftlichkeitsanalyse ist eine Analyse verschiedener Szenarien durchgeführt worden. Hierbei werden die durchschnittlichen Jahresstromkosten des gleichen Haushalts unter verschiedenen Bedingungen untersucht:

- ohne PV-Anlage
- mit PV-Anlage aber ohne Speicher
- mit PV-Anlage und mit Speicher verschiedener Kapazitätsgröße

Unter Berücksichtigung der heutigen Kostensituation lassen sich die Ergebnisse in Tabelle 8 auf Seite 69 darstellen. Die mittleren Stromkosten von 43 ct/kWh, die für die Analyse verwendet werden (siehe Tabelle 8: „**Strompreis pro Jahr (Schnitt)**“) ergeben sich im Mittel über 20 Jahre ausgehend von einem aktuellen Strompreis von 26 ct/kWh und einer jährlichen Strompreissteigerung von 5 % pro Jahr. Für die Einspeisevergütung wird der aktuelle Tarif von 15 ct/kWh angenommen.

Ein durchschnittlicher Vier-Personen-Haushalt zahlt bei einem Verbrauch von 4500 kWh mit den mittleren Stromkosten über 20 Jahre betrachtet durchschnittlich ca. 1934 € für Strom aus dem Netz wie in Tabelle 8 unten bei „**Durchschnittliches Jahresstromkosten**“ zeigt. Die vorgestellten Analysen belegen, dass der Betrieb eines Speichersystems für den Anlagenbetreiber des Modellhaushaltes mit einer 5 kWp PV-Anlage wirtschaftlich sein kann. In den vorgestellten Szenarien hat das Speichersystem die jährliche Stromrechnung des Haushalts von rund 858 € (ohne Speicher) auf rund 501 € um bis zu 40 % reduziert (siehe Tabelle 8, Seite 67). Wird bei der gleichen PV-Anlagegröße ein Stromspeicher mit nutzbarer Akkukapazität von 6 kWh eingesetzt, sinken die Jahresstromkosten bei Berücksichtigung der Einspeisevergütung und der Einsparung durch selbst erzeugten Strom auf rund 467 €.

Eine weitere Vergrößerung der Akkukapazität führt zu einer höheren Einsparung. Betrachtet man diese Kosten über 20 Jahre, lässt sich mit einer 5 kWp PV-Anlage rund 21533 € gegenüber demselben Szenario mit PV-Anlage ohne Speicher einsparen. Mit einem 5 kWh Speicher könnte sogar eine Stromkostensparnis bis zu 28673 € erreicht werden (siehe Tabelle 8: „**Einsparung gegenüber ohne PV**“).

In der nächsten Zeile in der Tabelle kann man die Einsparung zwischen PV-Anlagen mit Speichersystem gegenüber PV-Anlagen ohne Speichersystem einsehen. Hier sieht man, dass ein 5kWp PV-Anlage mit 5 kWh Speichersystem im Gegensatz zu einer PV-Anlage ohne Speicher ca. 7140 € mehr Einsparung einbringt. Damit kann man grob sagen, dass bei einer positiven Renditenerwartung das Stromspeichersystem nur so viel maximal kosten darf. Bei der Erwartung einer höheren Rendite und wirtschaftlichem Betrieb, muss der Akku also weniger kosten.

Je größer die Akkukapazität ist, desto mehr Energie kann zwischengespeichert werden und dadurch den EV erhöhen um Netzstrombezug zu vermeiden. Allerdings muss man bei dem Wunsch eines noch höheren Eigenverbrauchs zur Netzunabhängigkeit und der damit verbundenen Stromkostensparnis genau auf die mögliche Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils und Akkukosten achten. Beispielsweise bringt eine Steigerung der Akkukapazität von 4 kWh auf 5 kWh über 20 Jahre betrachtet, eine Differenz in der Einsparung von rund 946 €. Währenddessen bedeutet Steigerung von 5 kWh auf 6 kWh nur noch eine Differenz von rund 684 € erbringt. Dieser Wert reflektiert die maximalen Kosten pro kWh verfügbare nutzbare Speicherkapazität zur Vergrößerung der Akkukapazität.

Tabelle 8: Analyse zur Wirtschaftlichkeit eines Akkuspeichersystems verschiedener Szenarien

Analyse verschiedener Szenarien (Ohne PV, Ohne Speicher, verschiedene Akkugrößen)

			Mit Speicher				
	Ohne PV	Ohne Speicher	Verschiedene Speichergröße (netto) [kWh]				
	0	0	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00
Betrachtungszeitraum [Jahre]	20	20	20	20	20	20	20
PV-Anlageleistung [kWp]	0	5	5	5	5	5	5
Spezifischer Jahresertrag [kWh/kWp]		928	928	928	928	928	928
Einspeisevergütung [€/kWh]		0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Jahresverbrauch [kWh/a]	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500
Eigenverbrauchsquote [%]	0,0	29,3	53,2	56,8	59,4	61,3	62,6
Strompreis aktuell [€/kWh]	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Strompreiserhöhung [%]	5	5	5	5	5	5	5
Strompreis pro Jahr (Schnitt) [€/kWh]	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
Jahresertrag [kWh]		4640	4640	4640	4640	4640	4640
Netzbezug vermieden (Eigenverbrauch) [kWh]	0	1360,07	2466,70	2635,72	2757,91	2843,82	2903,85
Netzbezug vermieden (Eigenverbrauch) [€]	0,00	584,64	1060,33	1132,98	1185,51	1222,44	1248,24
Netzeinspeisung [kWh]	0	3279,93	2173,30	2004,28	1882,09	1796,18	1736,15
Netzeinspeisung [€]	0,00	491,99	326,00	300,64	282,31	269,43	260,42
Netzbezug [kWh]	4500	3139,93	2033,30	1864,28	1742,09	1656,18	1596,15
Netzbezug [€]	1934,36	1349,72	874,03	801,38	748,85	711,92	686,12
Durchschnittliches Jahresstromkosten [€]	1934,36	857,73	548,03	500,73	466,54	442,49	425,69
Stromkosten in 20 Jahre [€]	38687,17	17154,64	10960,70	10014,66	9330,76	8849,86	8513,89
Einsparung gegenüber ohne PV [€]		21532,53	27726,47	28672,51	29356,41	29837,30	30173,28
Einsparung gegenüber ohne Speicher [€]			6193,94	7139,98	7823,88	8304,78	8640,75
=Budget für Speicher ohne Förderung in 2013							
Spezifische Speicherkosten [€/kWh]			1548,48	1428,00	1303,98	1186,40	1080,09
Einsparungsdifferenz Akkugrößervergrößerung um 1kWh [€]				946,04	683,90	480,90	335,98

Mit zunehmender Größe des Akkuspeichersystems erhöhen sich jedoch auch die Kapital- und Wartungskosten innerhalb des Betrachtungszeitraums. Solche Speicher sind ökonomisch, wenn die erzielten Gewinne durch die Einsparungen die Kosten für die Investition übersteigen. Ein wichtiger Einflussfaktor auf der Kostenseite sind die Kosten je vollständigem Entladezyklus. Diese ergeben sich aus dem Quotienten der Kosten pro nutzbarer Speicherkapazität (€/kWh) und der erwarteten Zyklenzahl über die Lebensdauer des Speichers. Darauf wird im nächsten Kapitel näher eingegangen werden.

5.2 Marktübersicht der Akkuspeichersysteme verschiedener Hersteller

Der Markt für Akkustromspeicher wächst rapide. Insbesondere im Jahr 2013 sind eine ganze Reihe neuer Akkuspeicherlösungen auf den Markt gekommen. Zurzeit haben sich am Markt hauptsächlich zwei Speichertechnologien etabliert: Blei-Akkus und Lithium-Akkus. Die Speichertechnologien werden weiterhin in Kopplungsarten wie schon in Kapitel 3 erwähnt in DC- oder AC-gekoppelte Systeme unterteilt. Zusammenfassend lässt sich der gegenwärtige Stand an Herstellerspeicherlösungen auf dem Markt, wie in Abbildung 32 veranschaulichen. Der Preis unterscheidet sich dabei von einem System zum anderen. Durch die zahlreiche Angebote ist es äußerst schwierig hier den Überblick zu behalten. Das betrifft zum einen die unterschiedlichsten Speichersystemlösungen, zum anderen auch die stark variierenden Systemkomponentenpreise.

Für Lösungen zur Nachrüstung einer bestehenden Anlage sind zu meist nur der Akkuspeicher selbst, ein Akku-Wechselrichter mit Laderegler sowie das Energiemanagementsystem im Angebot enthalten. Angebote für eine komplett neue Anlage enthalten dann in der Regel auch neben dem PV-Wechselrichter, die Laderegler, die Akkus sowie das Energiemanagementsystem, die zusammen eine Einheit bilden, Modulen.

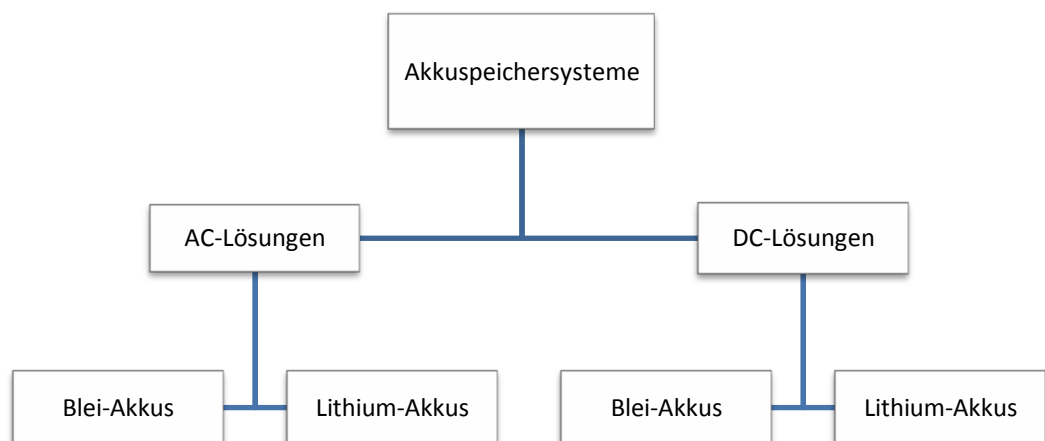


Abbildung 31: Akkuspeichersysteme auf dem Markt

5.2.1 Vergleich von Speichersystemen verschiedener Hersteller

DC-Systeme

Bei denen von Herstellern angebotenen DC-Lösungen im Markt kann das Speichersystem normalerweise nicht nachgerüstet werden, da der Wechselrichter exakt und individuell auf das eingesetzte Akkusystem zugeschnitten wurde. Diese Art der Lösung ist am besten geeignet zur Integration in einer neuen PV-Anlage. Dieser Nachteil lässt sich aber durch die geringeren Speicherverluste eines DC-Systems gegenüber den AC-Systemen kompensieren.

- **DC-System mit Blei-Akkus**

Die Blei-Akkus werden am Gleichstromkreis der PV-Anlage angeschlossen. Bei den marktgängigen Speichersystemen wird zwischen Bleisäure-Akkus und Blei-Gel-Akkus unterschieden. Bisher werden jedoch für DC-Lösungen ausschließlich Systeme mit Blei-Gel Akkus angeboten. Die Preise variieren zwischen 1000 € und 5000 € pro nutzbarer kWh an Speicherkapazität [35]. Im Gegensatz zu DC-Lithium-Lösungen zeichnet sich das System durch eine einfache Konstruktion aus, da keine Schutzelektronik für jede einzelne Zelle wie bei den Lithium-Akkus benötigt wird.

Die Abbildungen unten zeigen DC-Lösungen mit Blei-Gel-Akkus von der Firma Abakus Solar AG (links) [36] und von der Firma Azur Solar (rechts) [37].



Abbildung 32: Beispiele - DC-Lösungen mit Blei-Akkus [36] [37]

- **DC-System mit Lithium-Akkus**

Im Vergleich zu Blei-Akkus können Lithium-Akkus mehr Lade- und Entladezyklen mitmachen. Außerdem, können sie tiefer entladen werden. Durch die hohe Zyklenfestigkeit und Entladetiefe halten Lithium-Akkus auch meist 20 Jahre oder mehr, ohne dass man die Akkus austauschen muss. Preislich gesehen, sind DC-Lithium-Varianten durch die kostenintensive Lithium-Akkus am teuersten, da meistens der Wechselrichter integriert ist. Die Kosten für diese Speichersysteme variieren zwischen 2000 € und 6000 € pro nutzbarer kWh an Speicherkapazität [35].

Die meisten Herstellerlösungen dieser Varianten stellen eine kompakte optische Einheit mit einem schicken Designanspruch dar. Entsprechend zur Erwartung dass diese Lösungsvariante die besten Ergebnisse liefern. Beispiele dazu sind in Abbildung 33 unten zu sehen. Das Voltwerk VS 5 Hybrid von Bosch (links) [38] und das von Apple inspirierte Produktdesignprinzip der Firma E3/DC (rechts) [39].



Abbildung 33: Beispiele - DC-Lösungen mit Lithium-Akkus [38] [39]

AC-Systeme

Im Vergleich zu den DC-Lösungen, kann bei den meisten AC-Lösungen das Speichersystem problemlos nachgerüstet werden da der Wechselrichter nicht ausgetauscht werden muss. Es kann daher ein vollkommen unabhängiges Speichersystem gewählt werden. Der Wechselrichter und Laderegler sowie das Akkusystem sind voneinander getrennt und bilden keine Einheit. Daher sind diese Lösungen im Allgemeinen für bestehende Anlagen kostengünstiger als DC-Lösungen.

- **AC-System mit Blei-Akkus**

Bei den AC-gekoppelten Systemen mit Blei-Akkus werden die Akkus am Wechselstromkreis des Haushalts angeschlossen. Ähnlich wie bei den DC-Systemen werden hier auch Blei-Säure Akkus und Blei-Gel Akkus von den Herstellern vertrieben. Obwohl vorwiegend wartungsfreie Blei-Gel-Akkus angeboten werden, gibt es von manchen Herstellern auch Blei-Säure-Lösungen wie z.B. das SENECHOME Speichersystem von der Firma Deutsche Energieversorgung GmbH. Systeme mit Blei-Säure-Akkus sind mit Abstand am günstigsten, auf dem Markt erhältlichen Lösungen. Für Speicherlösungen mit Blei-Gel Akkus muss man im Durchschnitt fast das Doppelte bezahlen. Nachteilig ist aber, dass man bei Blei-Säure-Akkus von einer intensiveren Wartung ausgehen muss.

In Abbildung 34 unten sind beispielhaft die Speichersysteme SENECHOME von der Firma Deutsche Energieversorgung GmbH [40] (links) und STOREit von Wagner&Co [41] (rechts) zu sehen.



Abbildung 34: Beispiele - AC-Lösungen mit Blei-Akkus [40] [41]

- **AC-System mit Lithium-Akkus**

Wie bei den DC-Lösungen schon erwähnt, haben Lithium-Akkus eine höhere Zyklenfestigkeit und dadurch eine höhere Lebenserwartung im Vergleich zu Blei-Akkus. Sie können auch tiefer entladen werden ohne den Akkus zu schaden. Einzelne Herstellerangaben erreichen eine Entladetiefe von bis zu 100% wie z.B. das Speichersystem Black Diamond von der Firma Dispatch Energy [42].

Bei der Verwendung von Lithium-Akkus müssen aber umfangreichere Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden, um einem Brand oder sogar einer Explosion vorzubeugen. Preislich variieren AC-Systemlösungen mit Lithium-Akkus zwischen 1600 € und 4000 € pro nutzbarer kWh an Speicherkapazität [35]. Das System eignet sich zum größten Teil zur Nachrüstung einer bestehenden Anlage, da der bestehende Wechselrichter nicht ausgetauscht werden muss.

In Abbildung 35 unten sind die Speichersystemen ENGION Family von Varta Storage [43] (links) und Sonnenbatterie von PROSOL Invest Deutschland GmbH [44] (rechts) zu sehen.



Abbildung 35: Beispiele - Hersteller AC-Lösungen mit Lithium-Akkus

5.2.2 Speicherkosten verschiedener Akkutechnologien

Um die Kosten von Akkuspeichersysteme zu vergleichen und beurteilen, sollte man nicht nur den reinen Gerätepreis betrachten. Es muss dabei insbesondere auf die Kosten für eine gespeicherte Kilowattstunde an elektrische Energie, die der jeweilige Akkuspeicher im Laufe seiner Lebensdauer umsetzen kann, geachtet werden (die sogenannte „Speicherkosten pro verfügbare nutzbare Kapazität über die Akkulebensdauer,“). Diese Kosten stehen mit dem reinen Gerätepreis in direktem Bezug. Obwohl diese Angabe theoretisch am aussagekräftigsten für die Beurteilung verschiedener Speichersystems untereinander ist, wird sie nicht in Datenblättern der Hersteller angegeben, da der Kunde dann sofort die günstigste Variante identifizieren könnte. Beispielberechnungen bezüglich dieser Kosten sind unten zu sehen. Bei den Kosten eines Speichersystems mit integriertem Wechselrichter und/ oder Modulen wiederum müssen die Kosten des Speichersystems explizit heraus gerechnet werden, um die Kosten vergleichbar zu machen.

Für die Berechnung werden die unten genannten Angaben der Hersteller-Speicherlösungen berücksichtigt:

Beispiel 1: Bosch Voltwerk VS 5 Hybrid

- Akkutechnologie: Lithium (von der Firma Saft)
- Kosten des Speichersystems : 20000 € [35]
- Anzahl der möglichen Vollzyklen des Speichermediums : 7000 Zyklen
- Speicherkapazität des Akkusystems in kWh (brutto) : 8,80 kWh
- Entladetiefe des Akkusystems in Prozent : 60 %
- Speicherkapazität des Akkusystems in kWh (netto) : 5,28 kWh
- Systemwirkungsgrad in Prozent : 90 % [38]

Speicherkosten pro verfügbare nutzbare Kapazität über die Akkulebensdauer

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Kosten des Speichersystems}}{\text{Vollzyklen} * \text{Speicherkapazität (brutto)} * \text{Entladetiefe} * \text{Speicherwirkungsgrad}} \\ &= \frac{20000 \text{ €}}{7000 \text{ Zyklen} * 8,80 \text{ kWh} * 0,60 * 0,90} \\ &= 0,60 \text{ €/kWh} \end{aligned}$$

Beispiel 2: Donauer Nedap PowerRouter 5000SB

- Akkutechnologie: Blei-Gel (von der Firma Hoppecke)
- Kosten des Speichersystems : 15600 € [35]
- Anzahl der möglichen Vollzyklen des Speichermediums : 2800 Zyklen
- Speicherkapazität des Akkusystems in kWh (brutto) : 12,00 kWh
- Entladetiefe des Akkusystems in Prozent : 50 %
- Speicherkapazität des Akkusystems in kWh (netto) : 6,00 kWh
- Systemwirkungsgrad in Prozent : 85 % [45]

Speicherkosten pro verfügbare nutzbare Kapazität über die Akkulebensdauer

$$\begin{aligned} & \text{Kosten des Speichersystems} \\ = & \frac{\text{Vollzyklen} * \text{Speicherkapazität (brutto)} * \text{Entladetiefe} * \text{Speicherwirkungsgrad}}{15600 \text{ €}} \\ = & \frac{2800 \text{ Zyklen} * 12,00 \text{ kWh} * 0,50 * 0,85}{15600 \text{ €}} \\ = & 1,09 \text{ €/kWh} \end{aligned}$$

Die Beispielrechnungen zeigen die Kosten für eine gespeicherte und dann wieder entnommene kWh über die Akkulebensdauer. Anhand dessen sieht man, dass obwohl Lithium-Speicher heute noch deutlich teurer als Blei-Speicher sind, es nicht heißen muss, dass die Lithium-Speicherkosten pro verfügbare nutzbare Kapazität über der gesamten Lebensdauer der Akkus auch höher sind.

Im Vergleich der durchgeführten Marktübersicht-Recherche von Akkuspeichersystemen der unterschiedlichen Hersteller bewegen sich die Speicherkosten bei den meisten Geräten zwischen 0,20 €/kWh und 1,00 €/kWh. Die günstigsten Speichersysteme liegen bei umgerechnet rund 0,20 bis 0,30 €/kWh. Das lässt sich aber nur mit flüssigem Blei-Säure-Akkus erreichen. Allerdings ist dieser Akku nicht wartungsfrei und muss durch die geringere Zyklfestigkeit innerhalb von 20 Jahren 3- bis 4-mal ausgetauscht werden.

Mit den heutigen Solarstromerzeugungskosten von 0,15 €/kWh [34] und Kombination der günstigsten Speichersystem mit 0,20 €/kWh summieren sich die Stromerzeugungskosten der PV-Anlage mit Speichersystem dadurch auf 0,35 €/kWh, d. h. sie liegen heute noch

über dem Netzstrompreis von 0,26 €/kWh. Wirtschaftlich wird der Speicher erst dann, wenn die Summe der Erzeugungskosten unter dem Strompreis liegt. Vergleicht man aber das erhaltene Ergebnis mit dem gemittelten Netzstrompreis in 20 Jahren, bei einer Strompreissteigerung von 5% pro Jahr, von 0,43 €/kWh, könnte ein PV-Anlage mit Solarstromspeicher heute bereits als wirtschaftlich angesehen werden. Allerdings ist diese Rechnung stark vereinfacht da andere Kosten wie die laufenden Wartungskosten und Verzinsungskosten der Anlage nicht in die Rechnung einbezogen sind.

In der Tabelle 9 wird einen Preisüberblick zum Vergleich der verschiedenen Hersteller-Speicherlösungen, die auf dem Markt erhältlich sind gegeben. Der Speicherwirkungsgrad wurde hierfür mit 85 % angenommen.

Tabelle 9: Überblick - Vergleich Speicherlösungen verschiedener Hersteller

Kopplungsart	Speichertechnologie	Anbieter	Nutzbare Kapazität [kWh]	Zyklusfestigkeit	Netto Preise [€]	Speicherkosten [€/kWh]
DC	Blei-Gel	Abakus Solar AG	3,70	2700	6250	0,74
	Blei-Gel	Azur Solar	6,00	2500	14000	1,10
	Lithium-ionen	E3/DC	6,75	5000	15000	0,52
	Lithium-ionen	Bosch	5,28	7000	20000	0,64
AC	Blei-Säure	Deutsche Energieversorgung	10	3200	6400	0,24
	Blei-Gel	Wagner&Co	7,40	2750	8200	0,47
	Lithium-ionen	Varta Storage	7,47	6000	25200	0,66
	Lithium-ionen	PROSOL Invest Deutschland	5,60	5000	13900	0,58

Leider sind diese Speicherkosten nicht absolut vergleichbar, da je nach den Voraussetzungen unterschiedliche Dienstleistungen im Preis enthalten sein können. Ebenfalls muss unter Umständen auch Gewerbe und Privathaushalt differenziert werden, da für den Privatanwender die Preise zuzüglich Mehrwertsteuer gelten.

5.3 Auslegung einer PV-Anlage mit und ohne Speichersystem

Für die Auslegung des Speichersystems wird beispielhaft die Anschaffung einer neuen PV-Anlage mit integriertem DC-gekoppelten Speichersystem betrachtet. Die Lösung verfügt über einen intelligenten Wechselrichter, der durch seine spezielle Technologie entscheidet, selbst erzeugten Strom umwandeln und/ oder, diesen direkt zu verbrauchen, zu speichern oder ins öffentliche Netz einzuspeisen.

Kostengegenüberstellung AC-/ DC-System bei Neuanlagen:

- Als Beispiel für die DC-Lösung wird dafür einen Wechselrichter von der Firma Nedap: PowerRouter mit Batteriemanager (Abbildung links) eingesetzt.
- Als Beispiel für die AC-Lösung wird ein System von der Firma SMA (Abbildung rechts) hier beispielweise verwendet.

Dies lässt sich durch die Vergleichstabellen weiter aufschlüsseln.



Abbildung 36: DC-Lösung von Nedap (links) und AC-Lösung von SMA (rechts) [46]

Tabelle 10: Vergleich der Systemkomponenten, Gewicht, Preis und Installationsaufwand [46]

DC-Lösung		AC-Lösung	
Systemkomponenten	PowerRouter PR50SB	Systemkomponenten	SMA Sunny Island 5048 SMA Sunny Boy 2500 HF-30 SMA Webbox
Gewicht	20 kg	Gewicht	> 100 kg
Preis	4200 €	Preis	5000 €
Installation	2 Tage	Installation	4 Tage

Auslegungsbeispiel Nedap PowerRouter mit Batteriemanager:

Nedap integriert die Wechselrichter für Akku und Solaranlage in ein Gehäuse und steuert damit als integrierter Wechselrichter sowohl die Solarmodule als auch die Akkuladung an. Er besitzt zwei Eingänge mit jeweils eigenen MPP-Tracker und integrierten Transformatoren. Alle angeschlossenen Komponenten sind galvanisch voneinander isoliert. Durch einen integrierten Internetzugang ist eine Überwachung auch über ein Webportal möglich. Detaillierte Systeminformationen wie z.B. Leistung, Energienutzung und Energieertrag können über das Webportal abgerufen werden. Da alles in einem Gerät integriert ist, arbeitet die dargestellte DC-Lösung auch mit hoher Effizienz. Konzeptionell bedingt bietet sie damit ein sehr gutes Preis/Leistungs-Verhältnis.

Abbildung 37 unten zeigt die Integration dieses Wechselrichters mit einem Schaltkasten und Akkus als DC-gekoppeltes Speichersystem bei einer netzgekoppelten PV-Anlage. Der mit der blau gestrichelten Linie umrandete Bereich entspricht dabei dem Speichersystem.

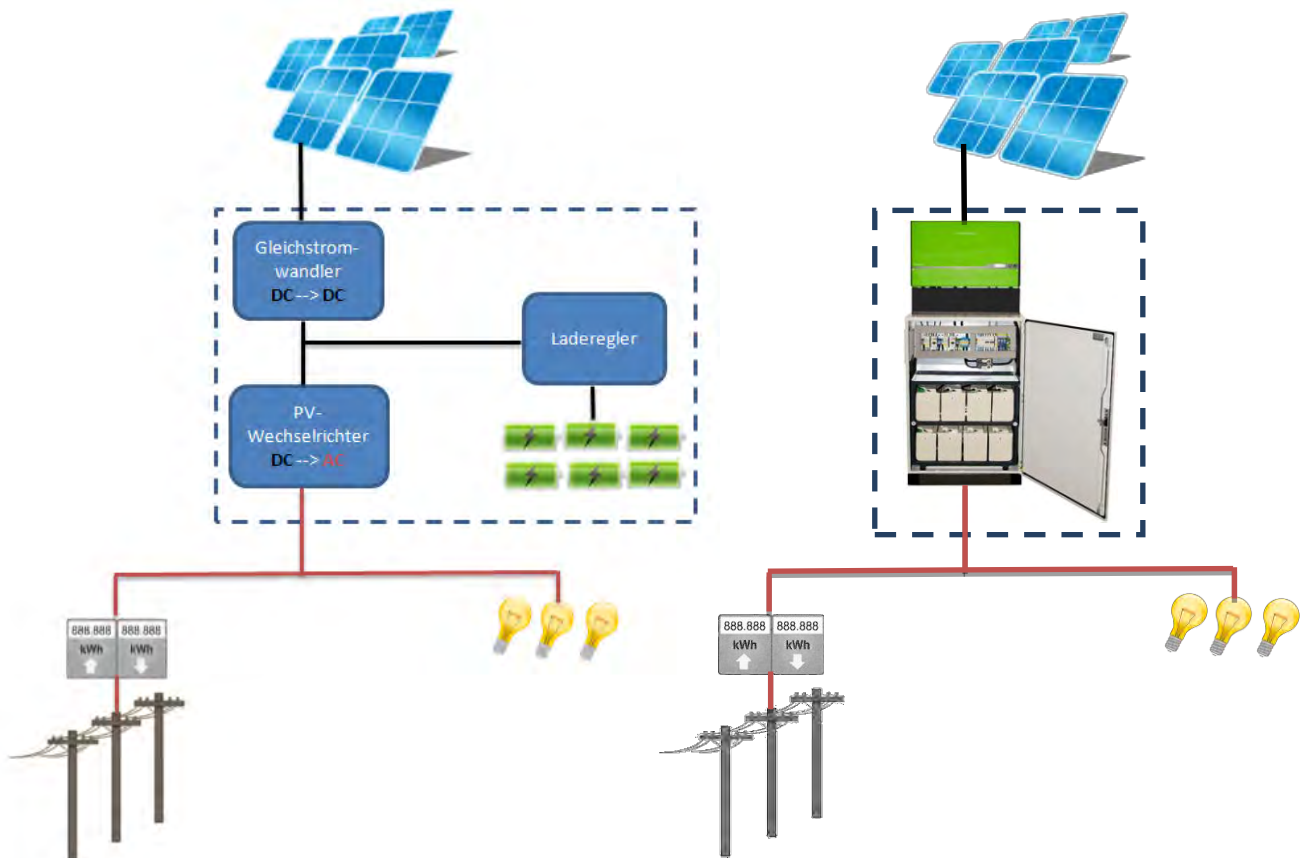


Abbildung 37: Stromlaufplan und Aufbau des DC-gekoppelten Speichersystems mit Blei-Gel-Akkus

Unter bestimmten Annahmen und Rahmenbedingungen wird die beispielhafte Lösung von Abbildung 38 mit dem Speicherberechnungstool simuliert und die Ergebnisse der Simulation und Wirtschaftlichkeitsanalyse in den Tabellen unten erläutert.

Annahmen und Rahmenbedingungen:

Grunddaten	
Haushalt	4-Personen-Haushalt
Jahresstromverbrauch	4500 kWh/Jahr
PV-Anlagenleistung	5 kWp
Dachneigung und Dachausrichtung	30 °, Süd
Spezifischer Jahresertrag	928 kWh/kWp
Vollzyklen der Akku/Jahr	250 Zyklen/Jahr
Betrachtungszeitraum	20 Jahre
Systemspezifikationen	
Akkutechnologie	Blei-Gel von HOPPECKE
Akkutypbezeichnung	8 x solar.bloc (6V) 250 Ah
Betriebsspannung	24 V
Speichergröße (Nennkapazität)	12 kWh
Entladetiefe (DoD)	50 %
Speichergröße (nutzbare Kapazität)	6 kWh
Zyklen bei 50% DoD	1400 Zyklen
Wechselrichter	Nedap PR50SB-BS/S24 Power Router mit Batteriemanager
Daten zur Wirtschaftlichkeitsanalyse	
Aktueller Netzstrompreis	0,26 €/kWh
Aktueller Einspeisevergütung	0,15 €/kWh
Strompreissteigerung/Jahr	5 %
KfW-Förderprogramm 275	Anschaffung als Komplettsystem
Gesamt Investitionskosten (PV-Anlage + Speicher)	17000 €

Spezifische PV-Kosten	1800 €/kWp
Finanzierungsanteil	70 %
Zinssatz	3,5 %
Wartung, Versicherung	1,5 % p.a.
WR-Austauschkosten in 20 Jahre	1500 € (ohne Akku), 2500 € (mit Akku)
Akku Austauschkosten in 20 Jahre	0 € (ohne Akku), 3000 € (mit Akku)

Ergebnisse:

Simulationsergebnisse	Ohne Akku	Mit Akku
PV-Energieerzeugung	4640 kWh/Jahr	4640 kWh/Jahr
Energieverbrauch	4500 kWh/Jahr	4500 kWh/Jahr
Gesamt	1360 kWh/Jahr	2758 kWh/Jahr
Eigenverbrauch:	1360 kWh/Jahr	1360 kWh/Jahr
Gedeckt durch PV	0 kWh/Jahr	1398 kWh/Jahr
Gedeckt durch Akku		
Netzeinspeisung	3280 kWh/Jahr	1882 kWh/Jahr
Netzbezug	3140 kWh/Jahr	1742 kWh/Jahr
Eigenverbrauchsanteil	29,3 %	59,4 %
Autarkiegrad	30,2 %	61,8 %

Wirtschaftlichkeitsanalyse	Ohne Akku	Mit Akku
Gesamt Investitionskosten	9000 €	17000 €
Kosten der PV-Anlage	9000 €	9000 €
Kosten des Speichersystems	0 €	8000 €
Betrag der KfW-Förderung	0 €	2400 €
Fremdkapital	6300 €	10220 €
Eigenkapital	2700 €	4380 €
Gesamt laufende Kosten/Jahr	210 €/Jahr	380 €/Jahr
davon: Wartung, Versicherung/Jahr	135 €/Jahr	255 €/Jahr
WR Austauschkosten/Jahr	75 €/Jahr	125 €/Jahr
Akku Austauschkosten/Jahr	0 €/Jahr	150 €/Jahr

Summe Einnahmen in 20 Jahre	20883 €	28471 €
davon: Stromkostensparnis	11340 €	22995 €
Einspeiseerlöse	9543 €	5476 €
Summe Aufwand in 20 Jahre	13066 €	24228 €
davon: Tilgung	6300 €	10220 €
Zins	2566 €	6408 €
Laufende Kosten	4200 €	7600 €
Eigenkapitalrentabilität	20,60 %	15,88 %
Gesamtkapitalrentabilität	5,23 %	3,30 %

6. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSBEMERKUNG

6.1.1 Ergebniszusammenfassung

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde der Einsatz von Akkuspeichersystemen für netzgekoppelte Photovoltaikanlagen im privaten Haushalt untersucht. Die optimale Akkukapazität und deren Wirtschaftlichkeit wurden mittels eines Berechnungstools, das im Zuge dieser Arbeit entwickelt wurde, ermittelt und analysiert.

Die Verwendung eines Akkuspeichersystem für netzgekoppelte PV-Anlagen unter den beschriebenen Bedingungen eröffnet nennenswerte Kostenreduktionspotentiale und bietet gleichzeitig Nutzungspotential zur Optimierung für PV-Energie, die zu einer effektiven Integration erneuerbarer Energien genutzt werden kann. Grundvoraussetzung ist die Reduktion der Speicherkosten. Aufgrund der noch hohen Akkukosten ist eine Steigerung der Eigenverbrauchsquote durch ein Speichersystem nur bedingt rentabel (bis zu 3%-Rendite). Es ist zurzeit wirtschaftlicher, die PV-Anlage größer zu dimensionieren und diese dann mit einer optimalen Akkugröße zu kombinieren.

Allerdings werden die Speicherkosten, dank der intensiven Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet im Zusammenhang mit der Entwicklung von Elektrofahrzeugen und des zu erwarteten zukünftigen Wettbewerbs der Anbieter sinken.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein Speichersystem auf der Basis von Akkumulatoren eine sinnvolle Ergänzung zu einer PV-Anlage für die Optimierung des Eigenverbrauchs und Autarkiegrades durch selbst produzierte Solarenergie darstellt.

6.1.2 Schlussbemerkung

Wenn man im Rahmen dieser Arbeit spricht, kann diese keinesfalls als vollständig angesehen werden. Im Weiteren sollte vor allem die künftige Rolle und Herausforderungen für die Energiespeicherung weiterentwickelt werden.

- Z. B. könnten in weiterer Zukunft auch gebrauchte Speicher aus Elektromobilen, die nicht mehr den Anforderungen der Elektrofahrzeuge genügen, zu erheblich verminderten Kosten für stationäre Anwendungen eingesetzt werden.
- Weiterhin, gibt es Möglichkeiten zur Energiespeicherung und Eigenverbrauchserhöhung z.B. mit zusätzlicher thermischer Nutzung der Überschüsse. Laut Volker Quaschnig, erschließt sich mit Erreichen der Oil Parity ab Mitte des Jahrzehnts auch der Wärmebereich für eine direkte Nutzung der Photovoltaik. „Wird ein PV-System mit einem Akku mit einer nutzbaren Speicherkapazität von 5 kWh mit einem 800 Liter-Trinkwasser-Pufferspeicher kombiniert, lassen sich bei einer installierten PV-leistung von 4 bis 5 kWp Eigenverbrauchsanteile zwischen 90 und 100% erreichen. Rund 30% der Solarenergie würden in diesem Fall thermisch genutzt.“ [4]

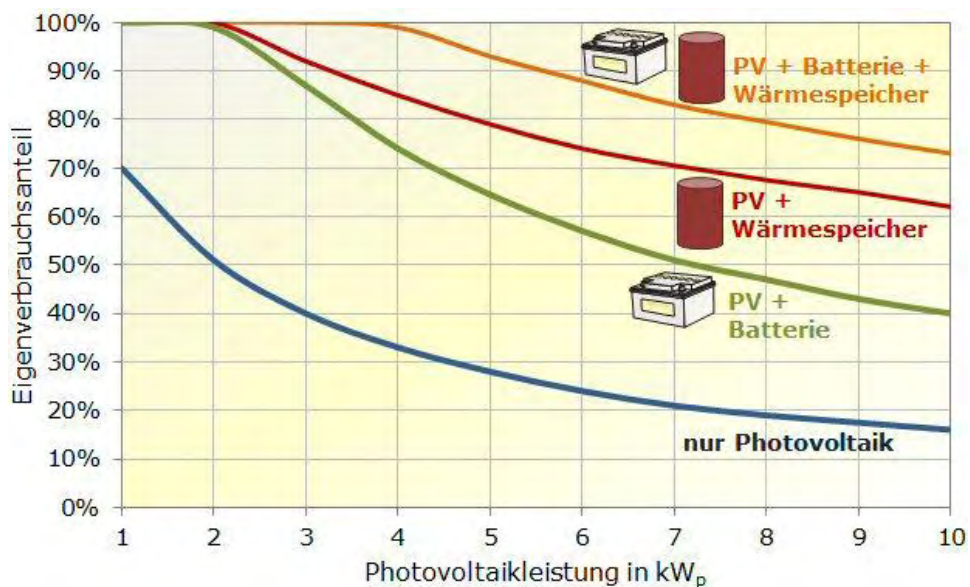


Abbildung 38: Weitere Optionen zur Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils. „Mögliche Eigenverbrauchsanteile bei Einfamilienhäusern in Deutschland in Abhängigkeit der PV-Anlagengröße. (Annahmen: Jahresstromverbrauch 4700 kWh, 5-kWh-Batterie, 800-Liter-Wärmespeicher).“ [4]

Diese Arbeit ist ein Anfang und öffnet damit die Tür zu alternativen Speichersysteme und vielseitiger anderer Anwendungen der Solaranlagen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Rentzing, S.: „Neue Hoffnung in der PV-Branche“. In: ep-photovoltaik, 2.Ausgabe, 2013, S. 8-10
- [2] o.Verf.: EEG Photovoltaik 2013 - Die Sätze der Einspeisevergütung. Zugriff am: 20.08.2013. Verfügbar unter:
<http://www.solaranlagen-portal.de/photovoltaik-foerderung/eeg-photovoltaik.html>
- [3] Sieg, Mirco: „Vergütungssenkung ab August wahrscheinlich bei 1,8 Prozent“. In: online Nachrichten pv-magazine, 10. Juli 2013. Zugriff am 16.07.2013. Verfügbar unter:
<http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/verguetungssenkung-ab-august-wahrscheinlich-bei-1-8-prozent-100011647/>
- [4] Quaschnig, Volker: „52 GW Photovoltaik - und dann?“. In: Sonne Wind & Wärme, 14. Ausgabe, 2012, S.22-26
- [5] Rabe, S.: „Stromspeicherung für Photovoltaikanlagen“. In: ep-photovoltaik, 2.Ausgabe, 2013, S. 34-36
- [6] Weniger, Johannes; Tjaden, Tjarko; Quaschnig, Volker: „Solare Unabhängigkeitserklärung“. In: photovoltaik, 10. Ausgabe, 2012, S.50-54. Zugriff am 23.03.2013. Verfügbar unter:
<http://www.volker-quaschnig.de/artikel/2012-10-solare-unabhaengigkeit/index.php>
- [7] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW): Strompreisanalyse Mai 2013, S. 6. Zugriff am 17.06.2013. Verfügbar unter:
[http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/\\$file/13%2005%2027%20BDEW_Strompreisanalyse_Mai%202013.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/$file/13%2005%2027%20BDEW_Strompreisanalyse_Mai%202013.pdf)
- [8] Wirth, Harry: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fassung vom 8.8.2013, S.9. Zugriff am 20.08.2013. Verfügbar unter:
<http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>
- [9] o.Verf.: „Eigenverbrauch einfach steigern“. In: Aleo Energiespeicherlösungen – Solarstrom rund um die Uhr, 2012, S. 3
- [10] o.Verf.: Autarkie PV - Berechnung Autarkiegrad. In: photovoltaik-web, Informationen zur Planung und Installation von Photovoltaikanlagen. Zugriff am 15.04.2013. Verfügbar unter:
<http://www.photovoltaik-web.de/batteriesysteme-akkusysteme-pv/autarkie-pv-berechnung-autarkiegrad.html>
- [11] o.Verf.: Berechnung Eigenverbrauchsanteil. In: photovoltaik-web, Informationen zur Planung und Installation von Photovoltaikanlagen. Zugriff am 15.04.2013. Verfügbar unter:
<http://www.photovoltaik-web.de/eigenverbrauch-pv/berechnung-eigenverbrauchsanteil.html>

- [12] KfW Bankengruppe: KfW-Programm Erneuerbare Energien „Speicher“. In: Merkblatt Erneuerbare Energien. Stand Mai 2013, S. 4
- [13] Röpcke, Ina: Energiemanagement und Speicher „Aufbruch in neue Energiewelt“. In: Sonne Wind & Wärme, 8. Ausgabe, 2013, S.92-95
- [14] Eva Mahnke, Jörg Mühlenhoff: Strom speichern-Hintergrundinformationen der Agentur für Erneuerbare Energien. In: Renew's Spezial. 29. Ausgabe, April 2010, S. 6-18.
- [15] Eulenberg, Thomas: Elektroenergie speichern. Zugriff am 30.06.2013. Verfügbar unter: http://www.die-faehre.de/Elektrik/Strom_Speichern.pdf
- [16] Häberlin, Heinrich: Photovoltaik-Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen. 2. wesentlich erweiterte und aktualisierte Auflage. Fehraltorf: Electrosuisse-Verlag, 2010.
- [17] Bleiakкумулятор. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Stand: 13.05.2013. Zugriff am 30.05.2013. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bleiakkumulator>
- [18] Lithium-Ionen-Akkumulator. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Zugriff am 26.06.2013. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator>
- [19] Lithium-Ionen-Akku. In: ITWissen, Das große Online-Lexikon für Informationstechnologie. Stand: 19.04.2013. Zugriff am 26.04.2013. Verfügbar unter: <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Lithiumionen-Akku-LiIon-lithium-ion.html>
- [20] Nickel-Cadmium-Akkumulator. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Stand: 19.04.2013. Zugriff am 28.04.2013. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Nickel-Cadmium-Akkumulator>
- [21] Nickel-Metallhydrid-Akkumulator. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Stand: 31.03.2013. Zugriff am 26.04.2013. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Nickel-Metallhydrid-Akkumulator>
- [22] Riegel, Bernhard: Elektrochemische Energiespeicher als Schlüsseltechnologie zur Erreichung der Klimaschutzziele. In: Solarzeitalter, 1. Ausgabe, 2011, S 10-16. Zugriff am 20.04.2013. Verfügbar unter: http://www.eurosolar.de/de/images/stories/pdf/SZA_1_2011_Riegel.pdf
- [23] Sauer, Dirk Uwe: Optionen zur Speicherung elektrischer Energie in Energieversorgungssystemen mit regenerativer Stromerzeugung. Zugriff am 29.05.2013. Verfügbar unter: http://www.eurosolar.de/de/images/stories/pdf/Sauer_Optionen_Speicher_regenerativ_okt06.pdf

- [24] Hirn, Gerhard: Multifunktionale Wechselrichter und Speicher für Solarstrom. S.2. Zugriff am 13.04.2013. Verfügbar unter: http://www.bine.info/fileadmin/content/Presse/Projektinfos_2010/Projektinfo_1010/projekt_1010_internetx.pdf
- [25] Quaschnig, Volker: Regenerative Energiesysteme : Technologie, Berechnung, Simulation. 8. Auflage. München, Wien: Hanser Verlag, 2013.
- [26] Aufbau Batteriespeichersystem PV. Zugriff am 15.07.2013. Verfügbar unter: <http://www.photovoltaik-web.de/batteriesysteme-akkusysteme-pv/aufbau-batteriespeichersystem-pv.html>
- [27] Fuhs, Michael: Batteriespeicher: Speicher satt. In: pv-magazine: Themenschwerpunkt Speicher, 1.Ausgabe, Juni 2013, S. 53-69
- [28] Märkel, Christian: Kennzahlen einer Solarbatterie: technische & praktische Bezugsgrößen-Speicherkapazität. Zugriff am 20.07.2013. Verfügbar unter: <http://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/stromspeicher/kennzahlen>
- [29] Staudacher, Thomas; Eller, Sebastian : Dezentrale Stromversorgung eines Familienhauses. In: der BWK, 6. Ausgabe, Juni 2012.
- [30] Nähr, Catrin; Rothert, Martin: Speicher & Netze: Nicht messen, schätzen. In: photovoltaik. 10.Ausgabe, 2012, S.55-57
- [31] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Zugriff am: 20.08.2013. Verfügbar unter: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [32] Antaris Solar: Solar-Rechner für Photovoltaikanlagen mit Stromspeicher. Zugriff am: 19.07.2013. Verfügbar unter: <http://www.antaris-solar.de/photovoltaik-solar-stromspeicher-rechner.html>
- [33] Redaktion von Solaranlagen-Portal.com: Leitfaden Solarstromspeicher. 1. Auflage, Februar 2013. Zugriff am: 01.07.2013. Verfügbar unter: <http://www.solaranlagen-portal.com/blog/wp-content/uploads/2013/02/Leitfaden-Solarstromspeicher.pdf>
- [34] Weniger, Johannes; Tjaden, Tjarko; Quaschnig, Volker: Batteriespeicher-Optimale Dimensionierung von PV-Speichersystemen. In: pv-magazine: Themenschwerpunkt Speicher, 1. Ausgabe, Juni 2013, S. 70-75
- [35] o.Verf.: Kostenvergleich Akkusysteme. In: photovoltaik-web, Informationen zur Planung und Installation von Photovoltaikanlagen. Zugriff am 16.04.2013. Verfügbar unter: <http://www.photovoltaik-web.de/batteriesysteme-akkusysteme-pv/kostenvergleich-akkusystem.html>
- [36] Abakus Solar AG: abakus power rack. Zugriff am: 14.08.2013. Verfügbar unter: <http://www.abakus-solar.com/download/unsere-produkte/speicherloesung.html>

- [37] Azur Independa GmbH: EcoStar INDEPENDA. Zugriff am: 14.08.2013. Verfügbar unter: <http://www.azur-independa.de/eigenstromsystem/azur-independa/ecostarindependa/>
- [38] Voltwerk-Bosch Gruppe: Voltwerk VS 5 Hybrid. Zugriff am: 19.08.2013. Verfügbar unter: <http://www.voltwerk.com/de/solarstrom-tag-nacht/speicherloesungen/vs-5-hybrid/>
- [39] E3/DC GmbH: E3/DC Energie Storage. Zugriff am: 19.08.2013. Verfügbar unter: <http://www.e3dc.com/>
- [40] Deutsche Energieversorgung GmbH: SENEC.Home. Zugriff am: 07.08.2013. Verfügbar unter: http://www.senec-ies.com/de/produkt/senec.home_g2/produktdetails/
- [41] Wagner & Co Solartechnik GmbH: STOREit. Zugriff am: 07.08.2013. Verfügbar unter: <http://www.wagner-solar.com/strom/produkte/solarstromspeicher-store-it/solarstromspeicher-store-it-si.html>
- [42] Dispatch Energy: Black Diamond Series. Zugriff am: 07.08.2013. Verfügbar unter: <http://www.dispatchenergy.de/technologie/batteriesysteme.html>
- [43] VARTA Storage GmbH: Varta Storage. Zugriff am: 07.08.2013. Verfügbar unter: <http://www.varta-storage.com/de/produkte/engion-family.html>
- [44] PROSOL Invest Deutschland GmbH: Sonnenbatterie. Zugriff am: 12.08.2013. Verfügbar unter: <http://www.sonnenbatterie.de/strom-energie-speicher/home/>
- [45] Donauer PowerRouter. Zugriff am: 12.08.2013. Verfügbar unter: <http://www.donauer.eu/de/geschaeftsbereiche/grosshandel-produkte/eigenverbrauch/donauer-powerrouter/power-router/>
- [46] Phoenix Solar: Nedap PowerRouter Vertriebspräsentation. S. 11. Zugriff am: 22.08.2013. Verfügbar unter: http://ftp.phoenixsolar.com/products/inverter/Nedap/01_Nedap/01_Archiv/Nedap-Intersolar%202012.pdf

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: „Vergleich der Kostenentwicklung der Haushaltsstrompreise mit der EEG-Vergütung für PV-Anlagen mit einer installierten Leistung von weniger als zehn Kilowattpeak. Die Kurven zeigen, dass sich die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu einer Anlage, die nur einspeist, weiter verbessern wird.“ [6].....	9
Abbildung 2: Entladen und Laden eines Bleiakкумуляtors [22]	14
Abbildung 3: Zwischenspeicherung von PV-Energie [24].....	20
Abbildung 4: AC-gekoppeltes Speichersystem [25]	21
Abbildung 5: DC-gekoppeltes Speichersystem [25]	22
Abbildung 6: Einbindung des Speichersystems: DC (rechts) / AC (links) [27].....	23
Abbildung 7: Vorgehen bei der Modellierung des Eigenverbrauchs mit und ohne Akku [29].....	25
Abbildung 8: Berechnungsoptionen	30
Abbildung 9: Darstellung der Arbeitsmappe „Allgemein“	31
Abbildung 10: Schätzung der Solarenergieproduktion von PVGIS [31]	32
Abbildung 11: Benutzeroberfläche - Aufrufen von PVGIS	33
Abbildung 12: Benutzeroberfläche - Ermittlung der Jahresertrag.....	34
Abbildung 13: Analyse der EV bei verschiedener Akkugrößen	36
Abbildung 14: Benutzeroberfläche der Simulation	37
Abbildung 15: Benutzeroberfläche - Planungsübersicht	39
Abbildung 16: Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	41
Abbildung 17: Analyse zur Wirtschaftlichkeit eines Akkuspeichersystems verschiedener Szenarien	42
Abbildung 18: Zusammenfassung	43
Abbildung 19: Hintergrunddaten - Referenzlastprofil.....	44
Abbildung 20: Ergebnis der Simulation	47
Abbildung 21: 3-Tagesanalyse in Winter, ÜG1, Sommer und ÜG2 (von oben nach unten)	49
Abbildung 22: Eigenverbrauchsanteil für den Modellhaushalt.....	51
Abbildung 23: Autarkiegrad für den Modellhaushalt.....	51
Abbildung 24: Monatsenergiebilanz des betrachtenden Modellhaushaltes für das Jahr 2012	52
Abbildung 25: Graphische Darstellung des Bilanz nach Jahreszeiten	53
Abbildung 26: Analyse der EV und AG bei verschiedenen Akkugrößen (1 kWh bis 10 kWh)	55
Abbildung 27: Analyse der EV und AG bei verschiedenen Akkugrößen (11 kWh bis 20 kWh)	56
Abbildung 28: Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit der PV-Anlagenleistung und der nutzbaren Akkukapazität	59
Abbildung 29: Autarkiegrad in Abhängigkeit der PV-Anlagenleistung und der nutzbaren Akkukapazität	59
Abbildung 30: Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	64
Abbildung 31: Akkuspeichersysteme auf dem Markt	68
Abbildung 32: Beispiele - DC-Lösungen mit Blei-Akkus [36] [37]	69
Abbildung 33: Beispiele - DC-Lösungen mit Lithium-Akkus [38] [39].....	70
Abbildung 34: Beispiele - AC-Lösungen mit Blei-Akkus [40] [41]	71
Abbildung 35: Beispiele - Hersteller AC-Lösungen mit Lithium-Akkus	72

Abbildung 36: DC-Lösung von Nedap (links) und AC-Lösung von SMA (rechts) [46]....	76
Abbildung 37: Stromlaufplan und Aufbau des DC-gekoppelten Speichersystems mit Blei-Gel-Akkus.....	77
Abbildung 38: Weitere Optionen zur Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils. „Mögliche Eigenverbrauchsanteile bei Einfamilienhäusern in Deutschland in Abhängigkeit der PV-Anlagengröße. (Annahmen: Jahresstromverbrauch 4700 kWh, 5-kWh-Batterie, 800-Liter-Wärmespeicher).“ [4]	82

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Vergleich der Akkutechnologien [14] [22] [23].....	19
Tabelle 2: Ermittlung des Stromverbrauchs von Zählerdaten	26
Tabelle 3: Monatsanalyse der Erzeugung, Verbrauch, Einspeisung, Netzbezug, EV und AG mit und ohne Akku	50
Tabelle 4: Bilanz der Erzeugung und Verbrauch nach Jahreszeiten	53
Tabelle 5: Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit der PV-Anlagenleistung und der nutzbaren Akkukapazität	58
Tabelle 6: Autarkiegrad in Abhängigkeit der PV-Anlagenleistung und der nutzbaren Akkukapazität	58
Tabelle 7: Analyse der Stromkostenverlauf und Wirtschaftlichkeit	63
Tabelle 8: Analyse zur Wirtschaftlichkeit eines Akkuspeichersystems verschiedener Szenarien	67
Tabelle 9: Überblick - Vergleich Speicherlösungen verschiedener Hersteller.....	75
Tabelle 10: Vergleich der Systemkomponenten, Gewicht, Preis und Installationsaufwand [46].....	76

ANHANG

Berechnung des Systemspreis für YANDALUX



ZUSAMMENFASSUNG: Kosten PV-Anlage + Speichersystem			
	Händler (netto)	Endkunden (netto)	Endkunden (brutto)
GESAMT (PV-Anlage + Speicher)	10558,00 €	14781,20 €	17589,63 €
Spezifisch GESAMT (PV-Anlage + Speicher) pro Wp	2,11 €/Wp	2,96 €/Wp	3,52 €/Wp

Eingabe:		Akkudaten:	
PV-Anlagenleistung	5 kWp	Bezeichnung	Blei-Gel HOPPECKE solar.bloc
Marge - Händler	40 %	Nennkapazität	250 Ah
Mehrwertsteuer	19 %	Spannung	6 V
		Benötigte nutzbare Akkuener	6 kWh
		Entladetiefe (DoD9)	50 %
		Benötigte Akkustückmenge	8 Stücke
		Akku 1 stück (netto) - Händle	213,50 €/Stück
		Akkukosten (netto) - Händler	1708 €

Kosten PV-Anlage						
Komponenten	Bezeichnungen	Händler spezifisch pro kWp (netto)	Händler (netto)	Endkunden spezifisch pro kWp (netto)	Endkunden (netto)	Endkunden (brutto)
Module		550,00 €/kWp	2.750,00 €	770,00 €/kWp	3850,00 €	4581,50 €
Gestell		100,00 €/kWp	500,00 €	140,00 €/kWp	700,00 €	833,00 €
Wechselrichter	Nedap PR50S/S24 Power Router	300,00 €/kWp	1.500,00 €	420,00 €/kWp	2100,00 €	2499,00 €
Zubehör (Kabel, Stecker, usw.)		50,00 €/kWp	250,00 €	70,00 €/kWp	350,00 €	416,50 €
Installation		0,00 €/kWp	0,00 €	0,00 €/kWp	0,00 €	0,00 €
GESAMT Kosten PV-Anlage		1.000,00 €/kWp	5.000,00 €	1.400,00 €/kWp	7000,00 €	8330,00 €
Spezifische GESAMT Kosten PV-Anlage pro Wp		1,00 €/Wp		1,40 €/Wp		

Kosten Speichersystem						
Komponenten	Bezeichnungen	Händler spezifisch pro kWp (netto)	Händler (netto)	Endkunden spezifisch pro kWp (netto)	Endkunden (netto)	Endkunden (brutto)
Batteriemanager	Nedap Battery Manager	300,00 €/kWp	1500,00 €	420,00 €/kWp	2100,00 €	2499,00 €
Akkumulatoren	Blei-Gel HOPPECKE solar.bloc (6V) 250 Ah - 8 Stücke	341,60 €/kWp	1708,00 €	478,24 €/kWp	2391,20 €	2845,53 €
Gehäuse/Schaltkasten	Energy Storage Rack von enwi etec GmbH	320,00 €/kWp	1600,00 €	448,00 €/kWp	2240,00 €	2665,60 €
Installation		150,00 €/kWp	750,00 €	210,00 €/kWp	1050,00 €	1249,50 €
GESAMT Kosten Speichersystem		1.111,60 €/kWp	5.558,00 €	1556,24 €/kWp	7781,20 €	9259,63 €
Spezifische GESAMT Kosten Speichersystem pro Wp		1,11 €/Wp		1,56 €/Wp		