



hochschule aschaffenburg
university of applied sciences

Bachelorarbeit 2011

Weiterentwicklung und
Optimierung einer
Photovoltaik-Inselanlage

Alexander Höfling
Matrikelnummer: 3507040

Studiengang Mechatronik

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit allein und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Der Veröffentlichung der Bachelorarbeit in der Bibliothek der Hochschule Aschaffenburg wird zugestimmt.

Waldaschaff, den 14.08.2011

Weiterentwicklung und Optimierung einer Photovoltaik-Inselanlage

Studiengang Mechatronik

Bachelorarbeit von
Alexander Höfling

geboren am
29.06.1988

14. August 2011

Autor:
Alexander Höfling
Sonnenstraße 21
63857 Waldaschaff

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Frank Gromball



HOCHSCHULE ASCHAFFENBURG
FAKULTÄT INGENIEURWISSENSCHAFTEN
WÜRZBURGER STRASSE 45
D-63743 ASCHAFFENBURG

Danksagung

Zuerst möchte ich Herrn Prof. Dr. Frank Gromball danken, der durch seine Betreuung und besonders durch sein reges Interesse an meiner Arbeit diese in die richtige Richtung gelenkt hat.

Ich danke Herrn Dr. Michael Göde für die Möglichkeit, diese Bachelorarbeit im TEC-Insitut zu entwickeln. Zusätzlich möchte ich mich für die Erlaubnis zur Veröffentlichung bedanken.

Besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing.(FH) Eberhard Zentgraf der mir besonders gegen Ende der Arbeit immer den Rücken freigehalten hat um das reibungslose Niederschreiben der gewonnenen Erkenntnisse zu ermöglichen. Aufgrund seiner Erfahrung im Umgang mit Solaranlagen konnte ich bei Fragen immer mit einem offenen Ohr rechnen. Alle Unklarheiten wurden stets schnell und einfach gelöst.

Des Weiteren möchte ich Herrn Stefan Hock und Frau Maria Moore danken sowie allen anderen Mitarbeitern des TEC-Insituts. Das gute Betriebsklima und die Hilfsbereitschaft aller Beteiligten haben mir dabei geholfen den Spaß an der Arbeit zu behalten.

Zusätzlich möchte ich mich bei den Kollegen der Firma ANTARIS bedanken durch deren Hilfe die Praxisnähe meiner Bachelorarbeit gefördert wurde. Der Austausch mit ihnen hat mir dabei geholfen das Thema aus der Sicht des Verkäufers und des Käufer zu betrachten woraus das Bestreben gestärkt wurde, eine hohe Effizienz und Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Ein weiterer Dank gilt zudem den Mitarbeitern der technischen Beratung der Firma SMA. Durch ihr Fachwissen konnte ich tiefe Einblicke in den Aufbau und die Funktionsweise von allen relevanten SMA-Komponenten bekommen. Die freundlichen Mitarbeiter der Hotline für Inselwechselrichter waren immer bemüht die entstandenen Fehler zu lösen und waren auch bei anderen Fragen immer bereit diese ausführlich zu beantworten.

Zuletzt bedanke ich mich bei allen anderen Personen, die mir durch ihre Unterstützung und Anteilnahme dabei geholfen haben, diese Arbeit zu erstellen da ich diese sonst nicht in der vorliegenden Form hätte anfertigen können.

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	I
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	V
TABELLENVERZEICHNIS	VII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	VIII
1 EINLEITUNG	1
2 GRUNDLAGEN	3
2.1 Netzgebundenes Anlagenkonzept.....	3
2.2 Netzfernes Anlagenkonzept	4
2.3 Solarzellen.....	5
2.3.1 ASM 175	7
2.4 Wechselrichter.....	8
2.4.1 Sunny Boy 3000 TL	10
2.5 Energiespeicher	11
2.5.1 AGM Solar Bloc von Hoppecke.....	14
2.6 Laderegler.....	15
2.6.1 Sunny Island 5048	15
3 STAND DER TECHNIK	18
3.1 Inselanlagen von SMA	18
3.2 E3/DC Energy Storage S10.....	18
3.3 Steca Solarladeregler	19
3.4 Autarke Anlagen von Energiebau.....	19
4 OPTIMIERUNG EINER BESTEHENDEN INSELANLAGE ..	20
4.1 Ausgangszustand und Randbedingungen	20

4.1.1 Aufbau und Funktionsweise des Grundsystems	20
4.1.2 Randbedingungen	24
4.1.3 Jahreszeitliche Schwankungen in Energieverbrauch und Energieerzeugung	26
4.2 Neuauslegung des Solargenerators	28
4.2.1 Ermittlung der optimalen Anlagengröße	28
4.2.2 Autonomie und Überschuss.....	31
4.2.3 Energieflüsse	35
4.3 Lastanalyse und Lastmanagement.....	36
4.3.1 Ermittlung der zu erwartenden Lasten.....	36
4.3.2 Reduzierung des Energiebedarfs	39
4.4 Dimensionierung des Energiespeichers	41
4.4.1 Lebensdauer.....	41
4.4.2 Vergrößerung der Kapazität	44
4.4.3 Batteriepflege	45
4.5 Optimierter Anlagenzustand.....	47
5 SICHERHEIT	50
5.1 Sicherheitshinweise allgemein	50
5.2 Sicherheitshinweise im Umgang mit Solarmodulen	51
5.3 Sicherheitshinweise im Umgang mit Blei-Säure Akkumulatoren.....	52
5.4 Sicherheitshinweise von SMA	52
5.4.1 Spezielle Hinweise für den Sunny Boy	52
5.4.2 Spezielle Hinweise für Sunny Island 5048	53
5.4.3 Spezielle Hinweise für Smart Load	53
6 KOSTEN UND WIRTSCHAFTLICHKEIT	54
6.1 Kostenaufstellung für das netzgebundene Anlagenkonzept	54
6.2 Kostenaufstellung für das netzferne Anlagenkonzept.....	56
7 ALTERNATIVE METHODEN ZUR ERZEUGUNG VON ELEKTRISCHER ENERGIE IN INSELSYSTEMEN.....	61
7.1 Wärme-Kraft Maschinen.....	61
7.2 Windkraft.....	61

7.3 Wasserkraft	61
8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	63
9 LITERATURVERZEICHNIS	64
ANHANG A.....	66
ANHANG B.....	69

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Entwicklung des Anteils Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung [EEG11].
- Abbildung 2: Aufgaben in solaren Inselnssystemen.
- Abbildung 3: Öfen für monokristalline Module in dem chinesischen Werk.
- Abbildung 4: Auszug aus dem Messprotokoll des firmeneigenen Sonnensimulators (Flasher).
- Abbildung 5: Bedeutung der Bezeichnung Air Mass.
- Abbildung 6: Wirkungsgrad des Sunny Boy 3000 TL bei symmetrischer Stringbelastung in Abhängigkeit der Leistung. [Sun10]
- Abbildung 7: Geöffnete 9 V Blockbatterie.
- Abbildung 8: Vergleich zwischen Einspeisebetrieb und Inselbetrieb von 2x ASM 175 am 19.05.2011.
- Abbildung 9: Laderegulierung des Sunny Island. Übernommen aus [SIs11].
- Abbildung 10: Schema des Ausgangszustandes der Inselanlage.
- Abbildung 11: Prozessablaufplan des Ausgangszustandes der Testanlage mit Anbindung an den Gasgenerator.
- Abbildung 12: Stromverbrauch eines Vierpersonenhaushalts mit einem Gesamtverbrauch von 5000 kWh – Monatsverbräuche.
- Abbildung 13: Gegenüberstellung von Verbrauch eines Vierpersonenhaushalts mit dem Ertrag einer 3 kW_{peak}-Anlage.
- Abbildung 14: Verbrauch und Erzeugung bei voller Deckung durch Solar energie.
- Abbildung 15: Vergleich einer 3 kW_p-Anlage mit 4,5 kW_p und 6 kW_p.
- Abbildung 16: Vergleich einer 3 kW_p-Anlage mit 4,5 kW_p und 6 kW_p – Nettoenergie.
- Abbildung 17: Vergleich zwischen Energieüberschuss und externem Energiebedarf bei verschiedenen Anlagengrößen.
- Abbildung 18: Kosten und Nutzen der Smart Load.
- Abbildung 19: Energiefluss während den Sommermonaten.
- Abbildung 20: Energiefluss während der Wintermonate.
- Abbildung 21: Energiefluss im Frühling/Herbst.
- Abbildung 22: VDEW Lastprofil H0 – Haushalt.
- Abbildung 23: Lastprofil eines Vierpersonenhaushalts mit der Hauptlast während der Mittagszeit.
- Abbildung 24: Struktur des Stromverbrauchs im Haushalten 2007. [BDE07]
- Abbildung 25: Kostenvergleich zwischen Kühl/Gefrierkombination mit verschiedenen Energieeffizienzklassen.
- Abbildung 26: Haltbarkeit in Zyklen in Abhängigkeit von entnommener Kapazität.
- Abbildung 27: Ladezustand der Batterien bei 12 kWh Gesamtkapazität am 11.5-19.5.2011.

- Abbildung 28: Ladezustand der Batterien bei 24 kWh Gesamtkapazität am 1.8-10.8.2011.
- Abbildung 29: Schema des Endzustandes der Testanlage.
- Abbildung 30: Prozessablaufplan des Endzustandes der Testanlage.
- Abbildung 31: Symbol für Schutzerdung.
- Abbildung 32: Symbol für Schutzklasse 2.
- Abbildung 33: Symbol für Schutzklasse 3.
- Abbildung 34: Kostenvergleich von netzgebundenen Stromversorgungen mit und ohne Photovoltaik.
- Abbildung 35: Kostenvergleich von netzfernen Stromversorgungen mit und ohne Photovoltaik.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Eckdaten der beiden Kühl-/Gefriergeräte.
Tabelle 2:	Vergleich der Energiemengen, die bei den netzgebundenen Anlagen verbraucht und erzeugt werden.
Tabelle 3:	Kostenaufstellung für zwei identische Inselanlagen.
Tabelle 4:	Vergleich der Energiemengen die bei netzfernen Anlagen erzeugt und verbraucht werden.
Tabelle 5:	Kosten der Einzelkomponenten des Dieselsystems.
Tabelle 6:	Kosten der Einzelkomponenten der Inselanlage.
Tabelle 7:	Laufende jährliche Kosten im ersten Betriebsjahr.
Tabelle 8:	Zusammenfassung der wichtigsten Daten des Sunny Island 5048.
Tabelle 9:	Zusammenfassung der wichtigsten Daten des Sunny Boy 3000 TL.
Tabelle 10:	Zusammenfassung der wichtigsten Daten der Smart Load 6000.
Tabelle 11:	Zusammenfassung der wichtigsten Daten des AS M 175 AI.

Abkürzungsverzeichnis

EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
kWh	Kilowattstunden
kWp	Kilowattpeak – Spitzenleistung in Kilowatt
W	Watt
k	Kilo
V	Volt
A	Ampère
AC	Alternating Current
DC	Direct Current
Hz	Hertz
kg	Kilogramm
SOC	State of Charge
ENS	Einrichtung zur Netzüberwachung mit zugeordneten Schaltorganen
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STC	Standart Test Circumstances
AM	Air Mass
VDEW	Verband der Elektrizitätswirtschaft
SBo	Sunny Boy
SIs	Sunny Island
SLo	Smart Load
SELV	Safety extra-low voltage

1 Einleitung

Die regenerativen Energien sind auf dem Vormarsch, denn aufgrund der einzigartigen Förderung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz wurden in den letzten Jahren in Deutschland Anlagen die umweltschonend Strom produzieren stark gefördert. Der Grundgedanke hinter dem EEG ist die Verringerung der Treibhausgasemissionen durch verstärkte Energieproduktion aus erneuerbaren Energiequellen. Dadurch soll unser Klima nachhaltig geschützt werden. Das in Deutschland erarbeitete EEG war so erfolgreich, dass es in vielen anderen Ländern als Grundlage herangezogen wird um eigene Gesetze zur Förderung der erneuerbare Energien zu entwickeln.

Der Erfolg der deutschen Förderung lässt sich schnell an folgendem Diagramm ablesen:

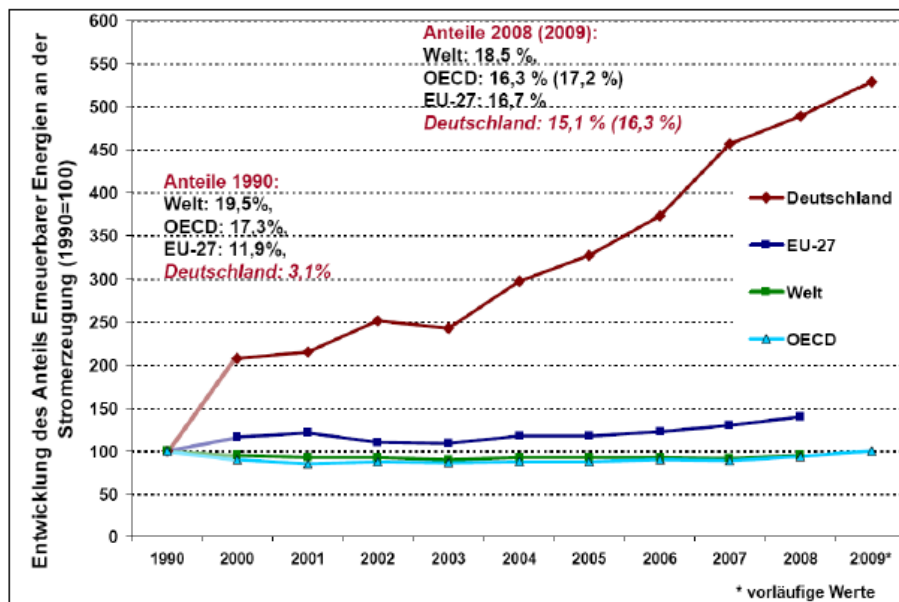


Abbildung 1: Entwicklung des Anteils Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung [EEG11].

Betrachtet man den Ausbau der Regenerativen Energiequellen weltweit stagniert dieser und hält sich seit 1990 auf etwa demselben Niveau. In Europa dagegen hat sich der Anteil an erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung um 50% erhöht. Ein Erfolg der jedoch genauer betrachtet größtenteils auf deutsche Bemühungen zurückzuführen ist. Der massive Ausbau in Deutschland hat uns zum Vorreiter bei der Förderung regenerativer Energien gemacht. Diese Förderung stützt sich auf das Erneuerbare Energien Gesetz welches wiederum drei Säulen besitzt:

- Der aus regenerativen Energien erzeugte Strom genießt im Vergleich zu herkömmlichem Strom Vorrang bei der Einspeisung sowie der Verteilung.
- Anlagenbetreiber erhalten eine festgelegte Vergütung für den von ihnen erzeugten Strom. Diese Vergütung ist in der Photovoltaik für einen Zeitraum von 20 Jahren plus des Restes des Jahres der Inbetriebnahme gesichert.
- Die Netzbetreiber werden durch das EEG verpflichtet den Anlagen die aus regenerativen Energien Strom erzeugen einen Netzanschluss zur Verfügung zu stellen und falls nötig das Netz auszubauen um eine reibungslose Abnahme und Verteilung zur Verfügung zu stellen.

Durch diese Förderung können Photovoltaikanlagen bereits nach etwa 10 Jahren schwarze Zahlen schreiben. Doch auch ohne die Förderung durch das EEG besitzt die Photovoltaik deutliche Vorteile gegenüber anderen Energieerzeugern. So versorgen sogenannte Inselanlagen schon heute ganze Dörfer autark.

Ab dem Jahr 2012 wird, je nach Stärke der Degression, zwischen der Vergütung einer Kilowattstunde eingespeisten Solarstromes und den durchschnittlichen Kosten für eine Kilowattstunde aus dem öffentlichen Netz kaum mehr eine Differenz bestehen. Damit wird in absehbarer Zeit der Status der Netzparität erreicht. Da der Strom vom Dach und der Strom aus der Steckdose natürlich nicht nach Belieben vertauscht werden können, kann also nicht im engeren Sinne von einer Gleichheit gesprochen werden. Das öffentliche Netz ist in Deutschland zu über 99% 24 Stunden am Tag, 7 Tage die Woche und 52 Wochen im Jahr verfügbar. Solarstrom dagegen ist von dem stark fluktuierenden Solarangebot abhängig. Doch es wird deutlich, dass die Solarenergie das Potential hat zumindest zu einem gewissen Teil das öffentliche Netz zu ersetzen. Wie weit dieses Potential mit den momentan am Markt befindlichen Produkten ausgeschöpft werden kann soll im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden. Die konkrete Aufgabe besteht darin einen Vierpersonenhaushalt mit den im Lastenheft (Anhang B) angegebenen Spezifikationen ganzjährig mit Solarenergie zu versorgen. Dazu wurde als Grundlage ein Photovoltaik-Inselsystem von SMA im TEC-Institut installiert. Dieses System gilt es nun hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit zu optimieren und an den im Lastenheft festgelegten Verbrauch anzupassen.

2 Grundlagen

Da es in solaren Inselnssystemen immer wieder die gleichen Aufgaben zu lösen gilt, bestehen diese grundsätzlich aus den gleichen Elementen. Diese Aufgaben lassen sich wie folgend darstellen:

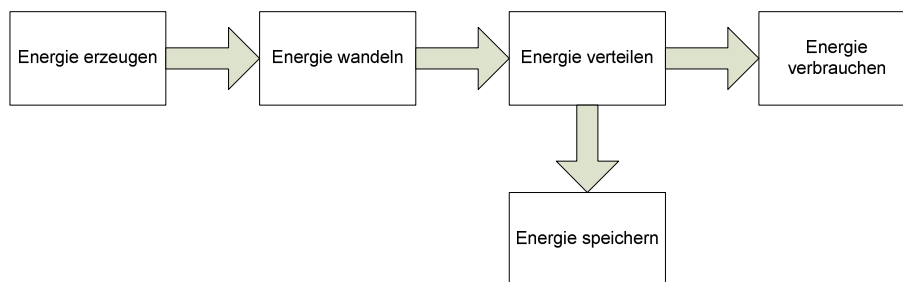


Abbildung 2: Aufgaben in solaren Inselnssystemen.

Diese Aufgaben werden stets von ähnlichen Komponenten gelöst. Somit übernimmt den ersten Teil immer ein, oder ein Zusammenschluss aus mehreren Solarmodulen. Für die Wandlung der Energie von zum Beispiel Gleich- in Wechselspannung sind in der Regel Wechselrichter zuständig. In einfacheren Systemen kann dies auch in den Aufgabenbereich des Ladereglers fallen. Doch eigentlich ist der Laderegler für das Energiemanagement zuständig. Er regelt den Energiefluss zwischen Erzeuger, Verbraucher und Speicher. Letzterer ist übrigens unabdingbar da sonst das Wetter vorgeben würde wann die produzierte Energie zur Verfügung steht. Als letztes sind die zu versorgenden Verbraucher zu nennen.

2.1 Netzgebundenes Anlagenkonzept

Im Idealfall besitzt die Anlage eine Anbindung an das öffentliche Netz. Dieses bietet im Vergleich zu anderen Energiequellen mehrere Vorteile. Zum einen ist es, zumindest in Deutschland, fast immer verfügbar und kann somit als zuverlässige sowie günstige Ersatzstromquelle betrachtet werden. Folglich kann die Kapazität des Energiespeichers kleiner dimensioniert werden was die Anlagenkosten weiter senkt. Zum anderen kann ein Überschuss, welcher ab einer Anlagengröße von etwa 3 kWp in unseren Breitengraden im Sommer zwangsweise entsteht sinnvoller genutzt werden als in netzfernen Anlagen. So stellt die Rückeinspeisung von eventuell anfallendem Überschuss eine weitere Einnahmequelle dar.

Folglich wird eine Überdimensionierung der Anlage nicht unwirtschaftlich wie bei netzfernen Anlagen wobei gleichzeitig eine hohe Versorgungssicherheit im Winter gewährleistet werden kann. Doch das eigentliche Ziel sollte hierbei nicht aus den Augen verloren werden. Es sollte hauptsächlich selbst produzierter Strom verbraucht werden und nur im Notfall oder bei geringer Sonneneinstrahlung auf das öffentliche Netz zugegriffen werden.

Da bei netzgebundenen Anlagenkonzepten immer wieder der Begriff „Eigenverbrauch“ fällt, wird dieser nun anhand der Gesetzeslage näher erläutert. Durch die 2009 eingeführte Eigenverbrauchsvergütung kann ein Anlagenbetreiber den Strom den er direkt selbst verbraucht geltend machen. Die Vorteile liegen auf der Hand:

- Eine größere Unabhängigkeit von den steigenden Preisen für Strom aus dem öffentlichen Netz.
- Der Eigenverbrauch wird zwar geringer vergütet als die Direkteinspeisung, jedoch kann sich dieses abhängig vom Strombezugspreis den man dabei einspart insgesamt gesehen rechnen.

Um den Eigenverbrauch zu steigern werden auch in netzgekoppelten Anlagen oft Energiespeicher eingesetzt um die Unterschiede in Zeit und Menge zwischen der Energieerzeugung und dem Energieverbrauch auszugleichen. Sobald Energiespeicher eingesetzt werden, kann von einer Inselanlage gesprochen werden, da die Anlage über eine gewisse Zeitspanne autark betrieben werden kann. Diese Zeitspanne ist abhängig von mehreren Faktoren. Der Verbrauch, die Energieerzeugung und die Kapazität des Energiespeichers sind nur einige der Faktoren die Einfluss darauf haben wie eine vom System hergestellte Autonomie aufrecht erhalten werden kann. Diese Autonomiezeit ist umso wichtiger, je teurer der Strombezug aus der externen Quelle ist. Da die Energiekosten bei Benutzung eines öffentlichen Netzes jedoch vergleichsweise gering sind ist eine Autonomiezeit von einigen Stunden oft schon ausreichend. Anders verhält es sich jedoch wenn das öffentliche Netz nicht vorhanden ist. Was beachtet werden muss und wie auch in abgelegenen Gegenden Strom bereitgestellt werden kann zeigt das folgende Konzept.

2.2 Netzfernes Anlagenkonzept

In den letzten Jahren hat sich die Photovoltaik auch im Bereich der ländlichen Elektrifizierung immer mehr bewährt. Netzferne Anlagenkonzepte, oder auch Inselanlage genannt, kommen dort zum Einsatz wo ein Strombedarf besteht, es jedoch aus Kostengründen oder aufgrund von lokalen Begebenheiten nicht wirtschaftlich oder nicht möglich ist eine Netzanbindung anzubringen. Demnach können Inselanlagen elektrische Verbraucher unabhängig von einem Stromnetz mit Energie versorgen. Doch wenn kein öffentliches Netz vorhanden ist, oder das vorhandene Netz nicht zuverlässig Strom liefern kann, werden besondere Anforderungen an das gesamte System ge-

stellt. Zum ersten wird eine zuverlässige Ersatzstromquelle benötigt. Da die Alternative zu einem solarbetriebenen System oft ein Dieselgenerator ist, liegt es nahe diesen als Notstromquelle zu betrachten. Dieses Konzept wurde von uns aus den in 4.1 beschriebenen Komponenten aufgebaut und ist seit 11.05.2011 fast ununterbrochen in Betrieb.

2.3 Solarzellen

Eine Solarzelle kann, vereinfacht dargestellt, als Halbleiter mit elektrischer Kontaktierung betrachtet werden. Die Solarzelle wandelt mit Hilfe des Photoeffekts Sonnenlicht in Elektrizität um, die als Spannung zwischen den Kontakten der Zelle anliegt. Solarzellen bestehen aus Halbleitermaterialien wie zum Beispiel Cadmium, Zinn, Tellur, Gallium und Arsen. Das häufigste Material, welches bei der Solarzellenherstellung Verwendung findet, ist Silizium, welches nahezu unbegrenzt verfügbar ist.

Bei der Herstellung von Solarzellen aus Silizium dient Quarzsand (SiO_2) als Ausgangsmaterial. Dieser wird bei hohen Temperaturen reduziert und in weiteren Prozessen stark gereinigt. Das gereinigte Silizium wird dann mittels verschiedener Verfahren in die endgültige Form gebracht. Bei polykristallinen Siliziumzellen wird das flüssige Silizium in quaderförmige Blöcke gegossen um anschließend in Scheiben gesägt zu werden. Bei diesem kostengünstigen Fertigungsverfahren entstehen bei der Erstarrung viele einzelne, voneinander getrennte Kristallkörner, welche der polykristallinen Solarzelle letztendlich die unverwechselbare Eisblumenstruktur verleiht. Die Grenzen zwischen diesen Kristallkörnern werden Korngrenzen genannt. Korngrenzen sind Störstellen, die den Wirkungsgrad der Solarzelle deutlich senken, was aber durch die günstigere und schnellere Produktion von den Herstellern in Kauf genommen wird.

Möchte man höhere Wirkungsgrade erzielen muss man auf monokristallines Silizium zurückgreifen. Die Produktion wird dazu lediglich um einen Produktionsschritt erweitert. Dies läuft beim Tiegelziehprozess oder auch Czochralski-Prozess wie folgt ab:

Nach erneutem Erhitzen des polykristallinen Materials auf ca. 1400 °C wird die so entstandene Siliziumschmelze mit einem Kristallkeim „geimpft“. Der Kristallkeim wird dabei in die Schmelze eingetaucht und unter langsamem Drehen wieder herausgezogen. Der so erzeugte Kegel erhöht stetig seinen Durchmesser bis dieser sein Maximum von bis zu 30 cm erreicht hat. Ist der Maximaldurchmesser erreicht, wird der Einkristall nur noch in die Länge gezogen und erhält so seine typische Form. Je nach Modulaufbau wird der Querschnitt des, noch kreisrunden, Einkristalls durch Fräsarbeiten an das Modul angepasst. Der gängigste Querschnitt ist das Quadrat da man mit diesem bei den meist rechteckig geformten Modulen die vorhandene Fläche am effizientesten nutzen kann. Da aber bei der Umformung zwischen Kreis und Quadrat am meisten Verschnitt entsteht werden von einigen Herstellern abhängig vom verwendeten Herstellungsprozess und vom Kundenwunsch auch Zwischenformen verwendet. Vom Viertelkreis über den Halbkreis hin zu Quadraten mit abgerundeten Ecken sind demnach fast alle Querschnitte denkbar, jedoch nicht immer wirtschaftlich sinnvoll.

Hat man sich für eine bestimmte Form entschieden werden die Einkristallstäbe mit Drahtsägen in die etwa 0,2 bis 0,3 mm dünnen Rohwafer geschnitten. Durch die Grenzen der Technik beim Sägen, das Abfräsen des Querschnitts auf quadratähnliche Querschnitte sowie die kegelförmigen Enden des Einkristalls entsteht auf dem Weg vom Einkristall zum Wafer sehr viel Verschnitt. Dieser muss unter hohem Energieaufwand wieder eingeschmolzen und erneut zu Einkristallen gezogen werden. (Aufgrund der stets hohen Temperaturen in mehreren Arbeitsschritten der Solarzellenherstellung ist der Energiebedarf enorm. Durch moderne Produktionsverfahren und vor allem durch die hohen Stückzahlen schafft es eine Zelle jedoch innerhalb von 3-5 Jahren diese Energie wieder zu erzeugen.)

Die Rohwafer werden anschließend durch Ätz- und Spülbäder von Sägerückständen befreit. In Diffusionsöfen wird durch Phosphorgas die Oberseite umdotiert und der pn-Übergang wird hergestellt ab diesem Zeitpunkt spricht man von einer Zelle. Anschließend wird eine Antireflexionsschicht aufgebracht, deren Aufgabe es ist das eingestrahlte Licht einzufangen und den Ertrag zu erhöhen. Die reine Solarzelle wäre ohne Antireflexionsschicht grau und würde einfallendes Licht gut reflektieren. Verwendet wird hierfür oft Titanoxid oder Siliziumnitrid, welches den Zellen die blaue bis schwarze Farbe verleiht. Je nach Schichtdicke und verwendeten Material können die Zellen auch in anderen Farben wie zum Beispiel Grün, Gold, Braun oder Violett gefertigt werden. Die erhöhte Möglichkeit zur optischen Integration in Bauwerken wird hier jedoch durch einen geringeren Wirkungsgrad erkauft.

Nun werden die Front- und Rückseitenkontakte aufgebracht. Auf der Rückseite geschieht dies in der Regel ganzflächig. Auf der Frontseite jedoch muss in aufwändigen Siebdruckverfahren die Antireflexionsschicht durchbrochen und möglichst dünne Kontaktfinger aufgebrannt werden. Dabei wird versucht die verschattete Fläche möglichst gering zu halten, wobei gleichzeitig ein gut leitender, verlustarmer elektrischer Kontakt angestrebt wird. Letztendlich werden die p- und n-Schicht durch Abätzen der Kanten voneinander getrennt. Die Solarzelle ist nun betriebsbereit und liefert eine von der Einstrahlungsstärke relativ unabhängige Spannung von um die 0,6 Volt. Der Kurzschlussstrom hingegen und linear dazu auch die erzeugte Leistung, liegt, je nach Zellgröße und Zellart, zwischen 3 und 16 Ampere.[Has10]

Da eine einzelne Zelle sehr empfindlich ist und nur eine geringe Leistung liefert werden mehrere Zellen zu Modulen zusammengefasst. In sogenannten Stringautomaten werden die Solarzellen in einer Reihenschaltung von meist 36 bis 72 Zellen zusammengelötet. Die so entstandenen Stränge können zudem noch weiter unterteilt und durch Bypassdioden überbrückt werden, um bei Teilausfällen, zum Beispiel durch Teilverschattungen, nicht die gesamte Modulleistung einzubüßen. Um die Zellstränge vor Schäden durch Witterung, mechanische Beanspruchungen und Verschmutzungen zu schützen werden diese in verschiedensten Verbundmaterialien eingekapselt. Als Abdeckung wird eisenarmes Weißglas verwendet, welches nur wenig Licht reflektiert. Die Rückseite kann ebenfalls aus Glas aber auch aus Metall oder Kunststoff bestehen. Zwischen diese beiden Schichten werden die Zellen mit Hilfe der EVA-Folie unter Temperaturen von bis zu 140°C einlaminiert. So entsteht eine formschlüssige Verbindung zwischen den Zellen und den Trägermaterialien. Zuletzt wird das Modul gerahmt und die Anschlussdose mit den Bypassdioden wird montiert. Nach der Vermessung der Leistungsabga-

be mittels eines Flashers wird das Modul nach seinen elektrischen Werten in eine Leistungskategorie eingeordnet, verpackt und ist nun bereit für Verkauf, Transport und Montage.

2.3.1 ASM 175

Das ASM 175 ist ein in China produziertes Modul das 2008 in Deutschland von der Firma ANTARIS vertrieben wurde. Zur Herstellung der ASM Reihe in China hier ein paar aktuelle Fakten die sich jedoch auf die neueste Generation, das ASM 195 beziehen:

Pro Schicht werden in dem chinesischen Werk bis zu 750 Module gefertigt. Bei einem Zweischichtbetrieb bedeutet das rund 1500 Module pro Tag. Die Fertigung beginnt mit der Anlieferung der Rohwafer sowie der anderen Materialien. Beliefert wird der Betrieb ausschließlich von Aide Solar und Eopply New Energy. Der Weg vom Wafer zum Modul läuft in mehreren Schritten ab die hier am Beispiel eines polykristallinen 60-Zellenmoduls, welches sich momentan in China in der Fertigung befindet, erklärt werden:

Schritt 1:

Einzellötung: Die Frontseiten der Rohwafer werden mit Lötbändern bestückt. (Dauer: 15 Minuten)

Schritt 2:

Serienlötung: Verbinden von 10 Zellen in Reihe und dann jeweils sechs Reihen in Serie womit insgesamt 60 Zellen verbaut werden. (Dauer: 15 Minuten)

Schritt 3:

Lay-up: Stapeln der Einzelkomponenten aufeinander in folgender Reihenfolge: Temperglas – EVA-Folie – Zellen – EVA-Folie – Backsheet
Anschließend folgt eine Sichtkontrolle der Module. (Dauer 6,5 Minuten).

Schritt 4:

EL-Test: Durch einen Elektro-Lumineszenz-Test werden defekte Zellen gefunden und anschließend ausgetauscht. (Dauer: 30 Sekunden)

Schritt 5:

Laminierung: Aufheizen und Verpressen des Stapels im Laminator bei 145°C. (Dauer: 20 Minuten)

Schritt 6:

Trimming: Abtrennen der über das Glas überstehenden Materialien. (Dauer: 25 Sekunden)

Schritt 7:

Rahmung: Verkleidung des Moduls mit einem Aluminiumrahmen für eine erhöhte mechanische Belastbarkeit. Verfugen der Anschlussstelle von Rahmen und Modul mit Silikon.(Dauer: 80 Sekunden)

Schritt 8:

Aushärtung: Bis das Silikon ausgehärtet ist vergehen weitere 8 Stunden:

Schritt 9:

Reinigung: Das Modul wird von eventuellen Rückständen aus der Fertigung befreit. (Dauer: 5 Minuten)

Bevor das Modul dann verpackt und anschließend verschickt werden kann wird es noch verschiedenen Tests im Rahmen der Qualitätssicherung unterzogen. Der reine Fertigungsprozess eines einzelnen Moduls dauert ungefähr eine Stunde dazu kommen acht Stunden für das Aushärten und weniger als eine halbe Stunde für Reinigung, Qualitätssicherung und Verpackung.



Abbildung 3: Öfen für monokristalline Module in dem chinesischen Werk.

2.4 Wechselrichter

Da es sich bei der von den Solarmodulen gelieferten Energie stets um Gleichspannung handelt, jedoch nahezu alle Verbraucher in einem herkömmlichen Haushalt Wechselspannung benötigen, muss die Gleichspannung zuerst wechselgerichtet werden.

Um dies zu bewerkstelligen bedarf es leistungselektronischer Halbleiterelemente die ausreichende Mengen an Strom/Spannung schalten können. Beispiele dazu wären unter anderem:

- MOSFETs
- Thyristoren
- Transistoren

Wie die einzelnen Elemente arbeiten und auf welche Art und Weise diese verschaltet werden, hängt von der Bauart des Wechselrichters ab. Je nach Form der Kommutierung spricht man dann zum Beispiel von einem Recht-

eckwechselrichter, einem Trapezwechselrichter, oder einem Sinuswechselrichter.

Doch aufgrund der Vielzahl an Wechselrichtertypen und der Möglichkeiten wie deren Halbleiterelemente verschaltet werden können, kann nicht im einzelnen auf alle Typen eingegangen werden. Dem interessierten Leser sei jedoch geraten sich einmal die Seiten 204 bis 212 in [Qua11] anzuschauen um einen tieferen Einblick in die Themen rund um Wechselrichter zu erhalten.

Einfacher ausgedrückt ist die Hauptaufgabe eines Wechselrichters die Umwandlung von Gleichspannung in eine sinusförmige Wechselspannung. Damit eine möglichst hohe Energieernte erzielt werden kann muss der Wechselrichter in allen Arbeitsbereichen mit hohem Wirkungsgrad arbeiten. Besonders im sogenannten Teillastbereich, welcher unterhalb 75% der Nennleistung liegt, sorgen hohe Wirkungsgrade dafür, dass auch bei niedriger Sonneneinstrahlung optimale Ertragsergebnisse erzielt werden. Diese Aufgabe erledigt meist ein MPP-Tracker. Dieser sucht den Punkt an dem das Produkt aus Modulspannung und dem Strom der dabei fließt die maximale Leistung ergibt, auch MPP genannt. Die Lage des MPP ändert sich abhängig von äußeren Einflüssen und muss demnach ständig nachgeprüft und angepasst werden.

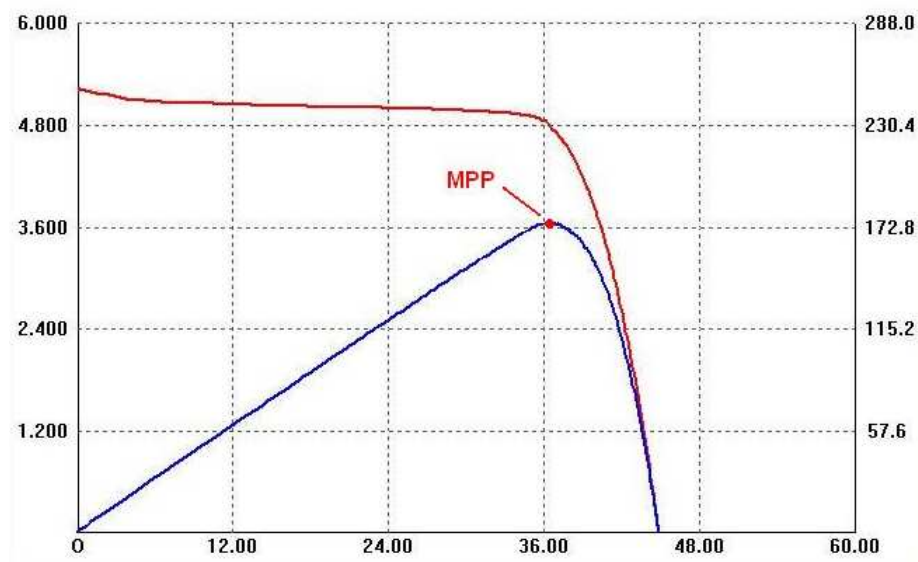


Abbildung 4: Auszug aus dem Messprotokoll des firmeneigenen Sonnensimulators (Flasher).

Der rote Graph beschreibt die UI-Kennlinie des unter Standardtestbedingungen getesteten ASM 175. Der blaue Graph entspricht der abgegebenen Leistung in Watt. Deutlich zu erkennen ist der nachträglich eingefügte MPP bei 173 Watt was bei einem 175 W-Modul noch innerhalb der Fertigungstoleranzen von $\pm 3\%$ liegt. Der dargestellte MPP gilt jedoch nur für STC, was einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m^2 bei senkrechter Einstrahlung, einem Strahlungsspektrum von AM 1,5 und einer Zelltemperatur von 25°C ent-

spricht. Die Angabe des Faktors AM 1,5 bedeutet wie viel größer der vom Sonnenlicht zurückgelegte Weg durch die Erdatmosphäre im Vergleich zu einer Erdatmosphäredicke ist. Dieser hängt vom Stand der Sonne oder einfacher gesagt vom Einstrahlungswinkel ab.

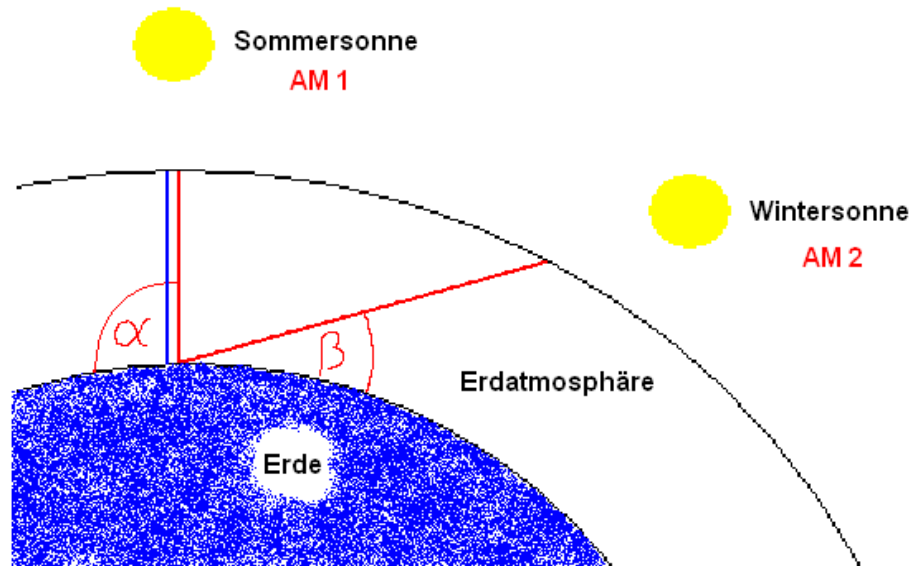


Abbildung 5: Bedeutung der Bezeichnung Air Mass.

Die blau eingezeichnete Linie entspricht der Dicke der Erdatmosphäre. Wenn die Sonne hoch steht und mit einem großen Einfallswinkel α auf die Erdatmosphäre trifft, muss das Sonnenlicht einen Weg von lediglich einer Erdatmosphärendicke durchdringen, um die Erdoberfläche zu erreichen. Bei niedrigem Sonnenstand dagegen steigt der Weg aufgrund des kleiner werdenden Einfallswinkels β und das Sonnenlicht muss bis zu vier Erdatmosphärendicken durchdringen. Dieser Wert ist besonders wichtig, da er direkten Einfluss auf die Einstrahlungsstärke hat. Je weiter der Weg durch die Erdatmosphäre ist, desto stärker ist die Absorption und die Streuung der Solarstrahlung. Da sich diese Distanz aufgrund von Erdrotation und Erdbewegung zwar kaum merkbar, jedoch stetig ändert, ändert sich auch die Einstrahlungsstärke. Zusätzlich beeinflussen Temperaturschwankungen und Lastschwankungen die Lage des MPP, weswegen MPP-Tracker in Wechselrichtern eingesetzt werden.

2.4.1 Sunny Boy 3000 TL

Der Sunny Boy 3000 TL ist ein trafoloser Sinuswechselrichter, der für Eingangsleistungen von bis zu 3200 Watt ausgelegt ist. Die gesamte Eingangsleistung kann dabei auf zwei symmetrische Strings aufgeteilt werden, wobei darauf geachtet werden muss, dass die Belastungsgrenzen der einzelnen

Strings eingehalten werden. Ein einziger MPP-Tracker ist dafür zuständig den optimalen Arbeitspunkt für die beiden Strings zu finden um maximale Erträge zu erzielen. Der sowohl im Teil- als auch im Spitzenlastbereich mehr als zufriedenstellende Wirkungsgrad bildet sich wie folgt ab:

Wirkungsgrad

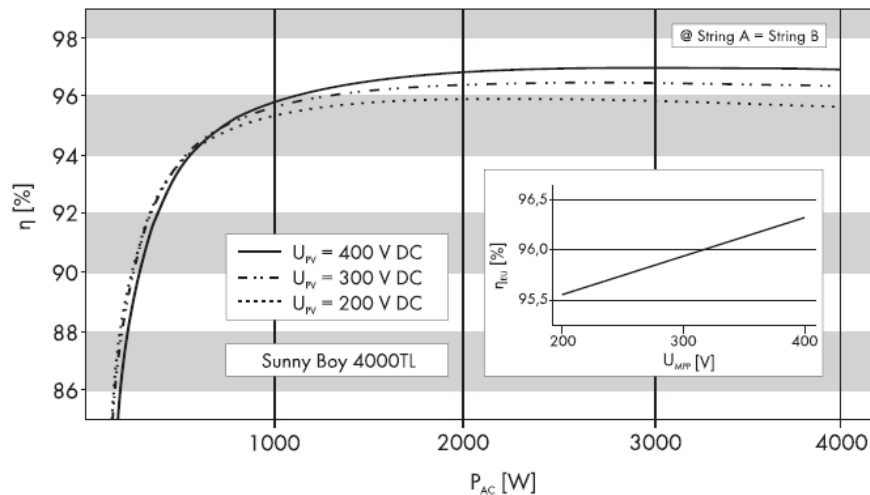


Abbildung 6: Wirkungsgrad des Sunny Boy 3000 TL bei symmetrischer Stringbelastung in Abhängigkeit der Leistung. [Sun10]

Zu beachten ist der starke Abfall des Wirkungsgrades bei Leistungen unter 500 W. Doch dieser Bereich ist besonders im Winter wichtig. Wenn nur wenig Sonneneinstrahlung vorhanden ist und jede Kilowattstunde zählt wird ein hoher Wert auf den Wirkungsgrad im Teillastbereich gelegt, weswegen Wechselrichter in unseren Breitengraden oft unterdimensioniert werden. Die Ertragskurven im Sommer werden dann zwar oberhalb der Maximalleistung gekappt, im Winter kann jedoch aufgrund eines geringfügig höheren Wirkungsgrades effektiver Energie erzeugt werden.

2.5 Energiespeicher

Das Kapitel der Energiespeicher ist im Photovoltaikbereich noch ein sehr junger Bereich mit viel Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Die Lebensdauer der anderen Systemkomponenten beträgt oft mehr als 20 Jahre. Verglichen mit der Lebensdauer der Energiespeicher, die laut Hersteller 3-8 Jahre beträgt, wird schnell klar wieso eine nachhaltige Akkupflege so wichtig ist. Dabei ist anzumerken, dass bei vielen Speichern eine Lebensdauer von lediglich 3-5 Jahren als weitaus realistischer erscheint.

Die Lebensdauer der Akkumulatoren ist stark abhängig von deren Benutzung. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass je stärker man einen Akku belastet, sei es in Form von Belastungen durch schnelle Ladung oder Entladung, oder man ihn extremen Umwelteinflüssen wie zum Beispiel zu hohen

oder zu niedrigen Temperaturen aussetzt, desto kürzer wird seine Lebensdauer. Doch wie sich dieses im Detail verhält werde ich in den folgenden Seiten genauer erläutern.

Aufgrund der starken Schwankungen der eingestrahlten Sonnenenergie und der daraus resultierenden Unterschiede zwischen Energieerzeugung und Energieverbrauch ist eine Energiespeicherung jedoch unabdingbar. Hinzu kommen, neben den Mengenunterschieden, auch noch die zeitlichen Unterschiede zwischen Bedarf und Erzeugung. Da die Sonne in unseren Breiten im Sommer circa zwischen 6:00 Uhr und 21:00 Uhr scheint, ein Haushalt aber auch außerhalb dieser Zeitspanne Strom verbrauchen muss, müssen entsprechend große Speicher in das System integriert werden.

Der benötigte Energiespeicher sollte also bedarfsgerecht ausgelegt werden. Folgende Punkte gilt es demnach zu beachten:

- Gesamter Verbrauch eines Tages
- Gesamter Verbrauch einer Woche
- Gesamter Verbrauch eines Monats
- Gesamter Verbrauch eines Jahres
- Jahreszeitliche Schwankungen der Energieerzeugung
- Wetterabhängige Schwankungen der Energieerzeugung
- Lebensdauer des Energiespeichers
- Kosten des Energiespeichers
- Wartungs- und Pflegebedarf des Energiespeichers
- Umweltfreundlichkeit und Recyclingfähigkeit

Der ideale Speicher wäre somit günstig, umweltfreundlich, wartungsfrei und würde eine hohe Kapazität auch über eine lange Lebensdauer halten können ohne auf aufwändige Lade- und Entladeverfahren zu bestehen.

Besonderes Augenmerk ist dabei auf die Lebensdauer und die Kosten zu werfen. Bei autonomen Photovoltaiksystemen haben oft die Energiespeicher die mit Abstand kürzeste Lebensdauer. Die niedrigen Kosten der Speicher bei der Erstinvestition können so schnell in die Höhe steigen, wenn der Speicher während der Lebensdauer einer gesamten Anlage zwei- oder sogar dreimal ausgetauscht werden muss.

Im Folgenden werden lediglich die elektrochemischen Speicher genauer erläutert da mechanische Speicher bei solch geringen Kapazitäten eher unüblich sind und elektronische Speicher zu geringe Kapazitäten beziehungsweise einen zu hohen Kühlaufwand aufweisen. Des Weiteren sind Speichermethoden die nicht auf einem elektrochemischen Prinzip beruhen momentan noch nicht weit genug entwickelt und somit fern von einer möglichen Markteinführung. Lediglich Prototypen oder für Privatpersonen viel zu kostenintensive Anlagen existieren hier, welche aber in einem Kapazitätsbereich von 0 – 100 kWh lediglich ein Nischendasein führen. [Bop10]

Die wohl am weitest verbreiteten Vertreter der elektrochemischen Energiespeicher sind die Sekundärbatterien. Eine Zelle (genauer: galvanische Zelle) ist hierbei die kleinste Einheit. Eine galvanische Zelle ist ein abgeschlossenes System das bei Energiezufuhr in Form von Elektrizität diese Energie in einem elektrisch/chemischen-Wandler in chemische Energie umwandelt und

anschließend speichert. Bei Bedarf wird dieser Prozess umgekehrt und die gespeicherte chemische Energie in einem chemisch/elektrischen-Wandler wieder in elektrische Energie umgewandelt und dem Verbraucher zur Verfügung gestellt. Als bekanntester Vertreter wäre die in fast jedem Haushalt verwendete Mignon-Zelle oder auch AA-Zelle zu nennen. Schaltet man mehrere galvanische Zellen zusammen erhält man eine Batterie. Ein gutes Beispiel hierfür ist die 9 Volt Blockbatterie.



Abbildung 7: Geöffnete 9 V Blockbatterie.

Betrachtet man eine geöffnete 9 Volt Blockbatterie sind deutlich die sechs 1,5 Volt-Zellen zu erkennen die in einer Reihenschaltung verbunden wurden. Nun gilt es nur noch die letzte Untergliederung zu verstehen: Zellen werden in Primärzellen und Sekundärzellen unterschieden. Primärzellen sind nicht wiederaufladbar, das heißt der chemische Prozess der während der Entladung stattfindet ist nicht beziehungsweise kaum umkehrbar. Anders verhält es sich jedoch bei Sekundärzellen. Hier ist die Redoxreaktion die bei dem Entladevorgang abläuft bis auf minimale Verluste wieder umkehrbar und die Sekundärzelle ist nach dem Ladevorgang wieder einsatzbereit weswegen man bei Sekundärzellen auch oft von Akkumulatoren spricht, um ihren wiederaufladbaren Charakter zu betonen.

Von nun an wird jedoch auf die Unterscheidungen zwischen Batterien, Primärzellen, Sekundärzellen und Akkumulatoren verzichtet da klar sein sollte, dass es sich bei Batterien in Inselsystemen nur um Sekundärbatterien handeln kann.

Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Akkumulatortypen die je nach verwendeten Materialien bestimmte Vor- und Nachteile besitzen. Um einen gro-

ben Überblick zu bekommen wurde hier eine Zusammenfassung der wichtigsten Merkmale aufgelistet auf die es bei der Wahl des richtigen Akkutyps zu achten gilt:

- Kapazität
- Nennspannung
- gravimetrische Energiedichte (Wh/kg)
- volumetrische Energiedichte (Wh/l)
- Ladewirkungsgrad

Daraus entsteht eine Vielzahl an Möglichkeiten doch die Auswahl wurde durch die Vorgaben des Sunny Island stark eingeschränkt. Bei der Auswahl des Akkumulatortyps hatte man sich für Bleiakumulatoren entschieden da deren Technologie schon in kleineren Inselsystemen im Rahmen anderer Projekte im TEC-Institut zur Anwendung kommt und damit bereits Erfahrung im Umgang mit Bleiakumulatoren vorhanden war. Ein weiterer Einflussfaktor war der Preis. Da es sich bei dem vorhandenen Aufbau um einen Prototypen handelt, wurde nicht viel Wert auf eine hohe Zyklenanzahl gelegt sondern ein gutes Preis-/Leistungsverhältnis sollte geboten werden. Damit fiel die Wahl auf den Solar Bloc von Hoppecke der uns aufgrund eines Forschungsrabattes zu einem günstigen Preis zur Verfügung gestellt wurde.

2.5.1 AGM Solar Bloc von Hoppecke

Bei dem Solar Block von Hoppecke handelt es sich um einen verschlossenen Blei-Säure-Akkumulator dessen innere Struktur in Form von Gitterplatten aufgebaut ist. Die Abkürzung AGM steht dabei für Absorbent Glass Mate Separator was bedeutet, dass das vorliegende Elektrolyt nicht wie bei handelsüblichen Starterbatterien flüssig vorliegt, sondern in einem hochporösen Vlies gebunden ist. Der Vorteil hierbei ist vor allem die Wartungsfreiheit der Akkulatoren. Das Auffüllen mit destilliertem Wasser entfällt somit und bei normalem Gebrauch kann kein Gas entweichen. Für den Notfall ist jedoch trotzdem ein Überdruckventil angebracht um bei unsachgemäßer Überladung den Druckabbau über das Ventil sicherzustellen. Bei unserer Anlage werden wir zunächst eine Reihenschaltung von acht Solar Blocks mit jeweils 6 Volt und 250 Ah verwenden um auf die geforderte Systemspannung von 48 Volt zu kommen. Dies entspricht zum einen der Mindestanzahl an Einzelakkumulatoren und zum anderen der Maximalkapazität die nur durch Reihenschaltung erreicht werden kann, da Hoppecke keine größeren Kapazitäten als 250 Ah bei den Solar Blocs anbietet. Vorläufig ergibt sich also eine Nennkapazität von 12 kWh was bei einer Entladetiefe von maximal 40% eine effektive Nutzkapazität von 7,2 kWh entspricht. Doch wie wir später sehen, ist eine Kapazitätserhöhung durch parallelschalten identischer Stränge problemlos realisierbar.

2.6 Laderegler

Eine der wichtigsten Aufgaben des Ladereglers ist das Lademanagement des Energiespeichers. Damit hat der Laderegler großen Einfluss auf die Lebensdauer der Akkumulatoren und es ist somit äußerst wichtig, sich über eine optimale Laderegelung Gedanken zu machen, da die Lebensdauer direkten Einfluss auf die Kosten des Gesamtsystems hat. Da ein Schutz vor Über- sowie Tiefentladung schon als Selbstverständlichkeit angesehen werden kann, sind die Anforderungen an den Laderegler sehr hoch. Aufgaben wie die genaue Bestimmung des Ladezustandes und eine zu jeder Zeit schonende Ladung der Akkumulatoren, unabhängig von Energieerzeugung und Energieverbrauch, gilt es zu bewältigen.

Ein Schutz vor Tiefentladung wird häufig über einen Lastabwurf realisiert. Der Laderegler erkennt einen fest definierten Ladezustand, oft 30% SOC, und wirft alle Verbraucher über den Lastabwurf ab um eine kritische Tiefentladung des Energiespeichers zu verhindern.

Um eine Überladung zu verhindern wird oft nur die Ladeschlussspannung überwacht und nach Erreichen dieser von Vollladung auf Erhaltungsladung umgestellt.

Für eine zuverlässige Ladung muss der aktuelle Ladezustand genau ermittelt und auf verschiedene Ladeverfahren zurückgegriffen werden.

Grundsätzlich gibt es folgende drei Ladeverfahren:

U-Ladung	=	Konstantspannungsladung
I-Ladung	=	Konstantstromladung
W-Ladung	=	Ladung über den Vorwiderstand

Damit eine möglichst schonende Ladung erfolgen kann, werden jedoch oft verschiedene Ladeverfahren während einer Vollladung kombiniert. [Bop10]

Im Bezug auf Inselssysteme entstehen zudem besondere Anforderungen.

Durch den vom System geforderten, sparsamen und effizienten Umgang mit Energie werden hohe Wirkungsgrade bei geringem Eigenverbrauch erwartet.

Um zudem eine hohe Versorgungssicherheit, auch in Zeiten mit geringer Sonneneinstrahlung, sicherzustellen, ist die Anbindung einer externen Ersatzstromquelle wünschenswert. Zuletzt ist eine große Flexibilität im Hinblick auf den Anschluss von verschiedenen Energiespeichertypen und ein weiterer Bereich, in dem sich Eingangsgrößen bewegen können, zu nennen.

2.6.1 Sunny Island 5048

Der Sunny Island 5048 von SMA ist der zweitgrößte Inselwechselrichter der SMA Reihe. Mit einer Dauerleistung von 5000 Watt ist der, rein für den Inselbetrieb konzipierte, Inselwechselrichter in der Lage große Verbraucher wie zum Beispiel Herd, Waschmaschine oder Trockner zu versorgen und kann somit die Stromversorgung eines Mehrpersonenhaushalts sicherstellen.

Der Tiefentladeschutz wird bei dem Sunny Island über einen extern anzubringenden Lastabwurf-Schütz sichergestellt. Bei normalem Betrieb wird der Schütz angezogen und der Kreis zwischen Inselwechselrichter und den

Verbrauchern ist geschlossen. Fällt der Ladezustand jedoch unter einen frei einstellbaren Wert, welcher im Auslieferungszustand 30% SOC beträgt, fällt der Schütz ab und die Verbraucher werden spannungsfrei geschaltet.

Um die Akkumulatoren vor Überladung zu schützen wurde folgende Logik entwickelt: Sollten die Akkumulatoren bereits vollständig geladen sein, und es wird immer noch Energie durch die Solaranlage erzeugt, wird diese zuerst an die Verbraucher weitergeleitet. Falls die von den Verbrauchern benötigte Energie geringer ist, als die erzeugte Energie, erhöht der Sunny Island die Frequenz im Inselnetz von 50 Hz auf 52 Hz. Diese Frequenzerhöhung registrieren alle im Inselnetz befindlichen Sunny Boys, worauf diese mit einer Änderung des Arbeitspunktes reagieren. Der Arbeitspunkt wird so geändert, dass nur noch eine geringe Leistung umgesetzt werden kann, welche als Erhaltungsladung der Akkumulatoren dient. Das bedeutet, dass die Solaranlage nicht immer die volle Leistung erzeugen kann, sondern diese Bedarfsgerecht zur Verfügung stellt.

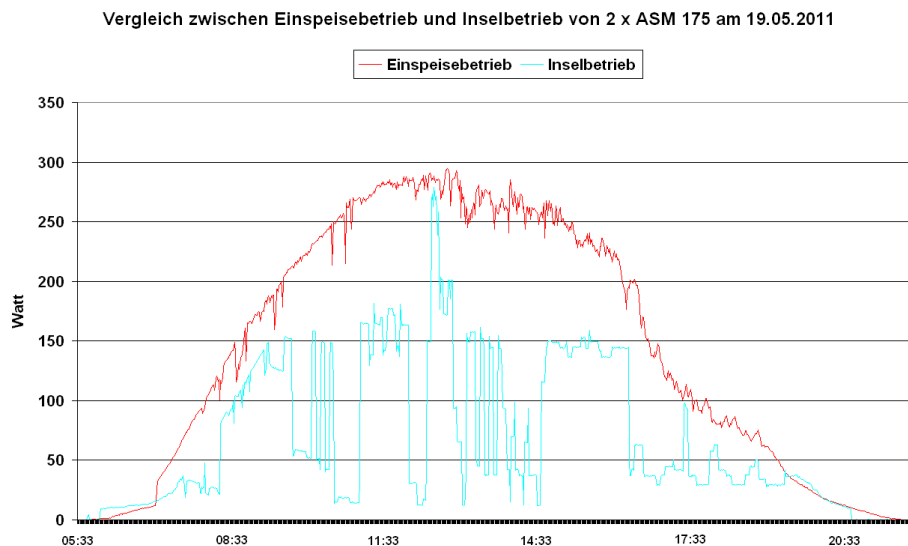


Abbildung 8: Vergleich zwischen Einspeisebetrieb und Inselbetrieb von 2 x ASM 175 am 19.05.2011.

Es zeigt sich deutlich wie die Module in der Inselanlage arbeiten. Als Referenz wurden zwei Module des gleichen Typs herangezogen die sich im Rahmen von Langzeittest unter Realbedingungen schon auf dem Dach befanden. Bis 10:00 Uhr arbeiten die ASM 175 bei voller Leistung und laden die während der Nacht teilweise entladenen Batterien. Ab 10:00 hat der SOC der Batterien sein Maximum erreicht und die Wechselrichter werden durch den Sunny Island heruntergeregelt. Die Ertragskurve gleicht deutlich dem vorgegebenen Lastprofil und sogar einzelne Verbraucher sind deutlich erkennbar.

Der Sunny Island besitzt eine dreistufige Laderegulation nach dem Verfahren IUoU. Bei dem Betrieb mit dem öffentlichen Netz gibt es optional eine vierte Stufe, die Ruhephase (Silent-Mode). [SIs11]

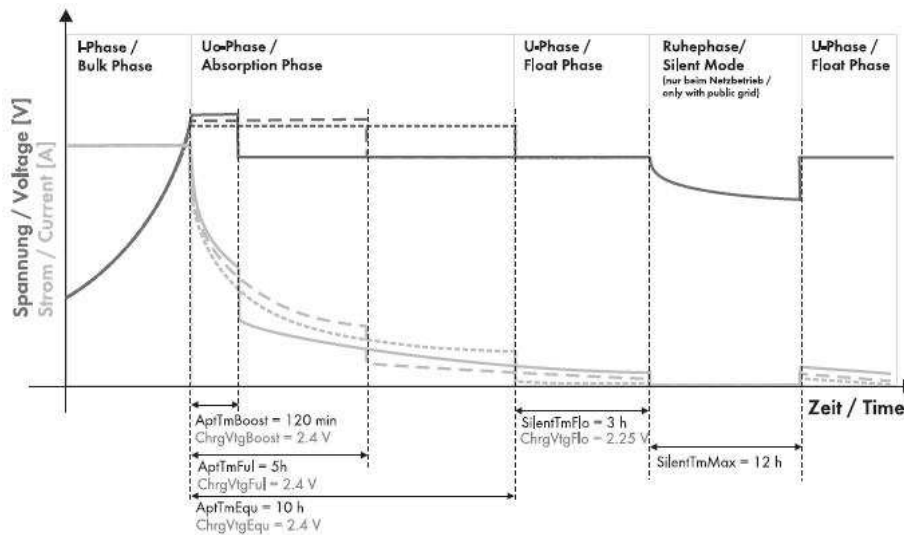


Abbildung 9: Laderegulation des Sunny Island. Übernommen aus [SIs11].

Der Sunny Island 5048 hat folgende Vorgaben an den Energiespeicher. Die Nennkapazität muss im Bereich von 100 Ah bis 10000 Ah liegen. Die Nennspannung des Speichers muss zwischen 42 V und 52 V liegen mit verschiedenen Schritten, je nach Batterietyp. Es können ausschließlich folgende Typen angeschlossen werden:

„Batterietypen

VRLA: Valve Regulated Lead Acid

Verschlossene Bleibatterien mit in Gel oder Vlies (AGM, Absorbent Glas Matte Separator) festgelegtem Elektrolyt in allen gängigen auf dem Markt befindlichen Ausführungen (Gitterplatten, Panzerplatten, klein, groß, Vlies, Gel, usw.)

FLA: Flooded Lead Acid

Geschlossene Bleibatterien mit flüssigem Elektrolyt in allen gängigen auf dem Markt befindlichen Ausführungen (Gitterplatten, Panzerplatten, klein, groß usw.)

NiCd: Nickel Cadmium

Verschlossene Nickel-Cadmium-Batterien in der Bauart Taschenplatten oder Faserstrukturplatten.“ [SIs10]

Es fällt auf, dass die Verwendung von den sehr leistungsstarken Lithium-Ionenakkumulatoren nicht vorgesehen ist. Aufgrund der Vorgaben und der geringen geforderten Lebensdauer sowie des günstigen Preises entschied man sich für AGM Solar Blocs von Hoppecke.

3 Stand der Technik

Netzgekoppelte oder netzferne Inselanlagen können eingesetzt werden um auch in entlegenen Gegenden, fernab von stabilen Netzen, zuverlässig elektrische Energie zu erzeugen. Eine Auswahl von verschiedenen auf dem Markt befindlichen Systemen wird nun vorgestellt.

3.1 Inselanlagen von SMA

Die Firma SMA versorgt schon seit geraumer Zeit ihre netzfernen Kunden mit grünem Strom. Durch die hohe Modularisierbarkeit von SMA Komponenten in Verbindung mit der Produktserie Sunny Island ist es möglich jedem Kunden eine bedarfsgerechte Lösung anzubieten. Von dem einfachen Wochenendhaus bis hin zur Versorgung eines ganzen Dorfes, nahezu jeder Verbrauch kann durch die Reihen- oder Parallelschaltung von mehreren Sunny Islands gedeckt werden. Nach eigenen Angaben kann somit ein Leistungsbereich von 2 kW bis zu 100 kW abgedeckt werden. Optional sind auch andere regenerative Energieformen wie Wind- oder Wasserkraft nutzbar. Die Produktpalette reicht von einfachen solarbetriebenen Inselsystemen bis hin zu komplexen Hybridsystemen in denen mehrere Energieformen gekoppelt werden und durch einen optional erhältlichen Generator eine noch höhere Betriebssicherheit gewährleisten. Der kleinste Sunny Island ist bereits ab etwa 1800,00 € im Handel erhältlich. Ein dafür passender Wechselrichter von SMA, ein sogenannter Sunny Boy, kostet 600,00 €. Die Solarmodule und der Batteriespeicher sind optional zu erwerben.

3.2 E3/DC Energy Storage S10

Der Energy Storage S10 von der Firma AS Solar ist ein Komplettpaket inklusive Solarmodulen und modulierbarem Energiespeicher. Einzigartig sind die speziell entwickelten Solarakkumulatoren auf Basis der Lithium-Ionen Technologie welche laut Hersteller eine Lebensdauer von bis zu 20 Jahren erreichen soll. Der Energy Storage S10 ist damit das erste marktreife System, welches ohne einen Austausch des Energiespeichers auskommt und ist ab 1.1.2012 im Handel erhältlich. Ausgelegt ist die Anlage für private Eigenheime sowie Kleinstbetriebe mit einem maximalen Jahresverbrauch von 6000 kWh. Für einen reibungslosen Betrieb ist ein Anschluss an das öffentliche Netz zwingend erforderlich. Je nach Wahl der Kapazität des Energiespeichers und der Größe des Solargenerators kostet das Komplettpaket in etwa 18000,00 € bis 22000,00 €.

3.3 Steca Solarladeregler

Die Firma Steca entwirft für ihre Kunden sogenannte Solar-Home-Systeme. Durch die Anbindung von Solarmodulen, Verbrauchern und Batterien an einen Steca Solarladeregler kann dieser den Energiefluss so steuern, dass die Batterie schnell und optimal geladen wird und schützt diese zusätzlich vor Tiefentladung. Bei Erreichen eines kritischen Ladezustandes werden die Verbraucher abgeschaltet um eine Beschädigung der Batterie zu vermeiden. Zusätzlich werden von Steca spezielle Energiesparlampen sowie Kühl-/Gefriergeräte mit niedrigem Energieverbrauch angeboten die speziell für den netzfernen Betrieb ausgelegt sind. Durch hohe Energieeffizienzklassen und den daraus resultierenden minimalen Verbräuchen der Geräte bieten diese eine gute Ergänzung zu Steca Solarladereglern. Durch die Erweiterung von einer Phase auf Drehstrom kann so ein Leistungsbereich von 60 W bis hin zu mehreren hundert Kilowatt abgedeckt werden. Eine Netzanbindung ist bei Stec Systemen nicht nötig, als Backup kann jedoch ein Generator angeschlossen werden. Die Preisspanne für Solarladeregler beginnt mit dem Steca PR 0505 schon bei 35,00 € womit ein Radio und ein paar Lampen versorgt werden können.

3.4 Autarke Anlagen von Energiebau

Die Firma Energiebau bietet eine Vielzahl an netzfernen und netzgebundenen Systemen an. Von kleinen 12 Volt-System bis hin zur Versorgung von großen Maschinen durch ein dreiphasiges System, die Produktpalette von Energiebau deckt einen großen Bereich an Anwendungsfällen ab. Vorab kann der Kunde seine Wunschanlage auf der Homepage planen um einen ungefähren Überblick über die Dimensionen seiner zukünftigen Inselanlage zu bekommen. Durch Angabe der gewünschten Stromart, also 12 Volt 24 Volt ein- oder dreiphasig, des Standortes und des Strombedarfs erstellt das Programm eine passende Anlage. Sowohl die Größe des Solargenerators als auch die Kapazität des Energiespeichers werden entsprechend den Angaben angepasst und als Komplettsystem angeboten. Netzanschluss oder Rückspeisung ist bei diesen Systemen nicht möglich, als Backup kann jedoch ein Generator an das System angeschlossen werden.

4 Optimierung einer bestehenden Inselanlage

4.1 Ausgangszustand und Randbedingungen

4.1.1 Aufbau und Funktionsweise des Grundsystems

Zu Beginn der Arbeit war das Grundsystem schon im Rahmen des Praxissemesters eines Kommilitonen vormontiert worden. Es bestand zu der Zeit aus folgenden Komponenten:

- 1x Sunny Island 5048
- 1x Sunny Boy 3000 TL
- 18 x ASM 175
- 1 x ENS
- 8 x Hoppecke Solar Bloc 6V 250 Ah
- 1 x Sicherungs- und Stromverteilerkasten
- 3 x Ferraris-Zähler
- 1 x Speicherprogrammierbare Steuerung Siemens LOGO! 12/24V
- Diverse elektrische Verbraucher
- Honda EX4000s Generator mit Gasumbau

Zusätzlich waren noch vier Multimeter von Voltcraft und zwei Stromzangen der Firma Fluke im Einsatz um die wichtigsten Ströme und Spannungen messen zu können. Gemessen wurden damals lediglich die Strom-/Spannungswerte des Energiespeichers und des fiktiven Anschlusses an die 230 V-Versorgung des Hauses, was in diesem System dem AC1-Anschluss des Sunny Island entspricht.

Für das Anlagenmanagement wird der Sunny Island 5048 TL von SMA verwendet. Der speziell für den netzfernen Betrieb entwickelte Inselwechselrichter sieht keine Einspeisung in das Netz vor, da er für Gebiete entwickelt wurde in denen kein oder lediglich ein instabiles Netz vorhanden ist. Der Sunny Island ermöglicht es eine externe Ersatzstromquelle, in unserem Fall den Gasgenerator Honda EX4000s, anzuschließen und zu steuern. Aus Kostengründen und vor allem um die Geräusch- und Geruchsbelästigung für die in der Nähe befindlichen Mitarbeiter in den umgebenden Büros gering zu halten wurde zu über 95% das öffentliche Netz als Backup benutzt. Da der Wechsel auf den Gasgenerator jedoch binnen weniger Minuten vollzogen werden konnte wurde das Gesamtsystem zu jeder Zeit als autark betrachtet.

Die Anbindung der externen Energiequelle erfolgt über eine ENS welche Spannung, Frequenz und Impedanz der Energiequelle überwacht. Zusätzlich stellt die ENS sicher, dass bei einem Netzausfall keine Rückeinspeisung vom Inselsystem stattfinden kann. Des Weiteren wird das Gesamtsystem von einem Sunny Boy 3000 TL und einem Solargenerator bestehend aus 18 Solarmodulen des Typs ASM 175 mit Energie versorgt. Um die Energie zu speichern stehen 8 Solar Blocks der Firma Hoppecke mit einer Gesamtkapazität von 12 kWh zur Verfügung.

Bei Sonnenschein wird die von den Solarmodulen erzeugte Energie, nach der Umformung durch den Wechselrichter direkt den Verbrauchern zur Verfügung gestellt. Daraus resultiert bei direktem Verbrauch ein extrem hoher Gesamtwirkungsgrad. Falls hiernach ein Energieüberschuss vorhanden ist wird dieser in den Batterien für eine spätere Nutzung gespeichert. Dazu muss die Energie jedoch mit Hilfe des Sunny Island wieder gleichgerichtet werden wodurch zusätzliche Energie verloren geht. Das Abspeichern ist aufgrund des Ladewirkungsgrades ebenfalls mit Verlusten behaftet. Wird die Energie dann zu einem späteren Zeitpunkt wieder vom System benötigt muss sie ein letztes mal wechselgerichtet werden. Hier wird deutlich, dass der Direktverbrauch anzustreben ist und die Anforderung von Energie aus dem Speicher auf ein Minimum begrenzt werden sollte. Dabei gilt es jedoch den Komfort für den Benutzer so wenig wie möglich einzuschränken. Falls große Energiemengen angefordert werden und infolge dessen der Ladezustand des Energiespeichers stark abnimmt wurden mehrere Grenzen gezogen um Beschädigungen am Inselsystem zu verhindern. Wenn der Energiespeicher voll ist und die Energie nicht anderweitig verwendet werden kann wird der Sunny Boy über eine vom Sunny Island vorgegebene Frequenzerhöhung ausgeregelt.

Zur Verdeutlichung der Vorgänge dient folgender Prozessablaufplan:

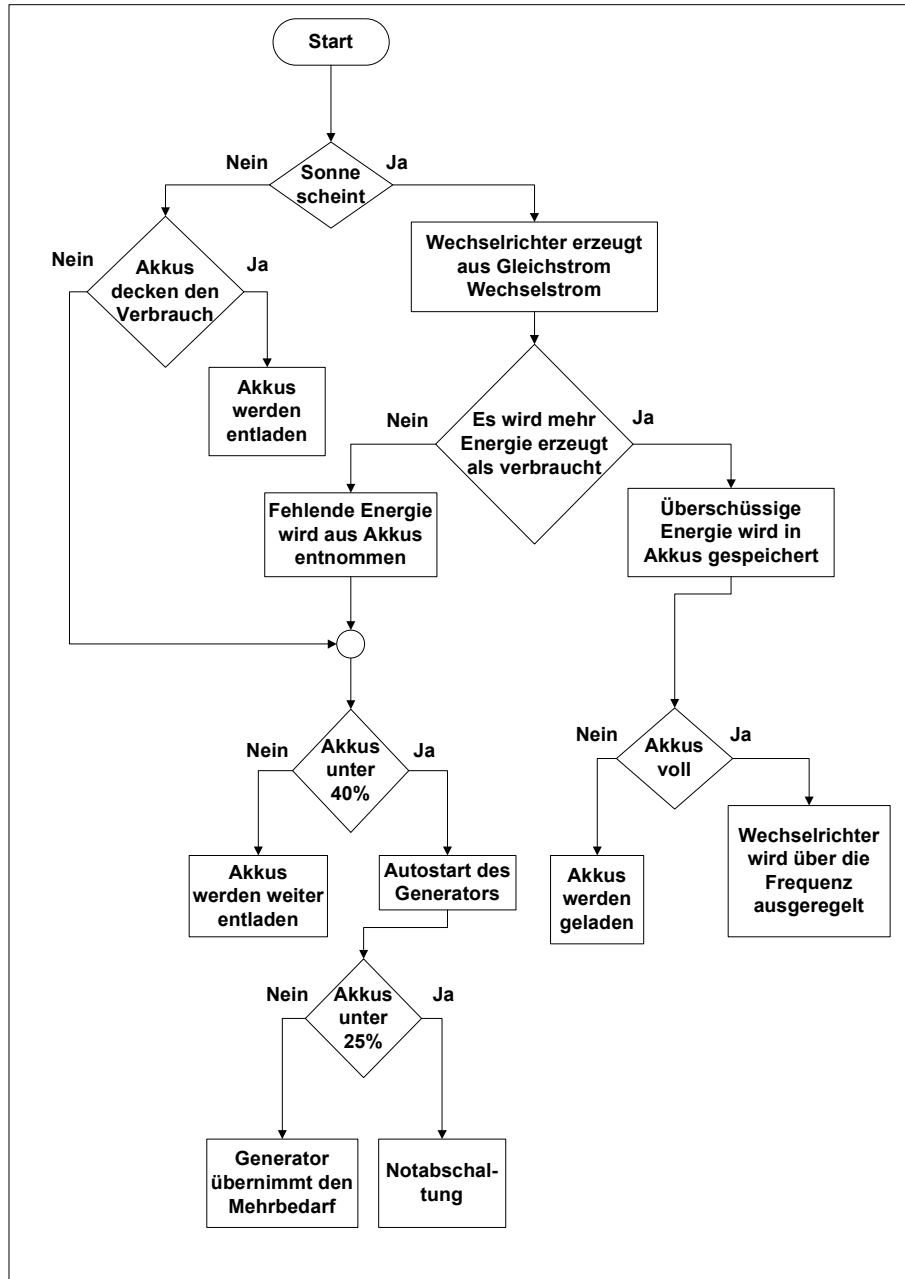


Abbildung 11: Prozessablaufplan des Ausgangszustandes der Testanlage mit Anbindung an den Gasgenerator.

4.1.2 Randbedingungen

Als erstes wurde die Inselanlage um mehrere Multimeter und Stromzangen erweitert. Danach wurden diese in ein auf Visual Basic basierendes Programm eingepflegt welches ermöglicht die im Minutentakt gemessenen Werte aufzunehmen und sofort in einer txt-Datei abzuspeichern. Damit konnten erste Messwerte aufgenommen und Prognosen über die Energieerzeugung und den Energieverbrauch erstellt werden. Am Ende befanden sich 10 Multimeter des Typs VC-820 von Voltcraft und 6 Stromzangen-Adaptern im Einsatz um folgende Messwerte aufzuzeichnen:

- Gleichspannung der Batterien
- Wechselspannung der AC1-Schiene im Sunny Island (entspricht dem Anschluss am Inselnetz)
- Wechselspannung der AC2-Schiene im Sunny Island (entspricht dem Anschluss der externen Energiequelle)
- Wechselstrom des Verbraucherkreises
- Gleichstrom der Batterie
- Wechselstrom der AC1-Schiene
- Wechselstrom der AC2-Schiene
- Wechselstrom Sunny Boy 1 (am Ausgang Richtung AC1-Schiene gemessen)
- Wechselstrom Sunny Boy 2 (am Ausgang Richtung AC1-Schiene gemessen)
- Wechselstrom der in den Smart Load fließt

Bei den Stromzangen-Adaptern handelt es sich um Chauvin Arounx MINI 05 für die Messung der beiden Sunny Boys. Die drei anderen Wechselströme wurden mit VOLTCRAFT VC-510 gemessen. Aufgrund der geringen Zuverlässigkeit der Multimeter bei Messungen unter 50mV im Gleichspannungsbereich wurde für die Messung des Gleichstromes der Batterie der hochwertigere Stromzangen-Adapter FLUKE i410 benutzt. Zusätzlich konnten auf 4 Ferraris-Zählern die Wirkarbeit folgender Größen abgelesen werden:

- Wirkarbeit der externen Quelle
- Wirkarbeit des Verbraucherkreises
- Wirkarbeit Sunny Boy 1
- Wirkarbeit Sunny Boy 2

Bei allen Berechnungen wurde die Annahme getroffen, dass die berechnete Scheinleistung der Wirkleistung entspricht und praktisch keine Blindleistung umgesetzt wird. Deswegen wurde darauf geachtet, dass in keiner der verbauten Komponenten Transformatoren verwendet werden. Zudem sind alle Geräte mit denen der Haushalt nachgestellt wurde ohmsche Verbraucher. Es handelt sich hierbei um:

- 6 Glühlampen mit einer Leistungsaufnahme von 60 – 200 W
- 3 Heizstrahlern mit einer Maximalleistung von 1850 W

- 1 Kühlschrank (Inhalt 70l)
- 2 Baustellenstrahler mit einer Leistung von je 500 W

Diese Verbraucher wurden mit Hilfe einer SPS und mehreren Zeitschaltuhren anhand verschiedener Lastprofile gesteuert. Permanent angeschlossen waren:

- Kühlschrank (150 W)
- Sunny Island (25 W)
- 4 Zeitschaltuhren (<10 W)
- angezogener Lastabwurfschütz
- 100 W Glühbirne

Die restlichen Verbraucher wurden mit Hilfe der SPS sowie der Zeitschaltuhren im 5-Minutentakt gesteuert. Der Verbrauch wurde anhand von verschiedenen Lastprofilen vorgegeben.

Der gesamte Energieverbrauch eines Vierpersonenhaushalts während eines Jahres ist individuell verschieden und richtet sich nach einer Vielzahl an Einflussfaktoren. Die Lebensgewohnheiten, das Alter, die Art und Dauer der Beschäftigungen der Bewohner nehmen genauso Einfluss auf den Energiebedarf wie das Klima. Deswegen ist es schwer Verbräuche zu prognostizieren und da es aus Zeit- und Kostengründen nicht möglich war einen realen Haushalt über den Zeitraum eines Jahres zu vermessen wurden in diesem Bereich Annahmen getroffen und positive sowie negative Extrema für Lastprofile erstellt. Die erste Annahme bezieht sich auf den gesamten Jahresverbrauch in einem fiktiven Vierpersonenhaushalt mit folgenden Randbedingungen:

- Alle Elektrogeräte entsprechen dem Stand der Technik und haben mindestens Effizienzklasse A.
- Die Energie die für Raumwärme und Heißwasser benötigt wird kommt von fossilen Energieträgern. Hierzu ist im Haus eine Ölheizung installiert.
- Die Ausstattung des Haushaltes bietet alle gebräuchlichen Elektrogeräte. Sonderverbraucher wie Klimaanlage, Sauna oder Sonnenbank werden nicht mit in die Rechnung einbezogen und können den Energiebedarf, je nach Nutzung, stark erhöhen.
- Im Haus wohnen zwei Erwachsene und zwei Kinder.
- Ab wann die Bewohner das Haus verlassen und wann sie zurückkehren kann je nach Szenario variieren.
- Der Standort des Hauses ist in Waldaschaff, direkt an der A3, 45 km östlich von Frankfurt.
- Das Verbrauchsverhalten soll dem Inselsystem angepasst werden. Das bedeutet, dass große Lasten über einen längeren Zeitraum verteilt werden.
- Weitere Informationen können dem Lastenheft (Anhang B) entnommen werden.

Aufgrund dieser Bedingungen wird ein gesamter Jahresverbrauch von maximal 5000 kWh erwartet. Dieser verteilt sich über das Jahr gesehen wie folgt.

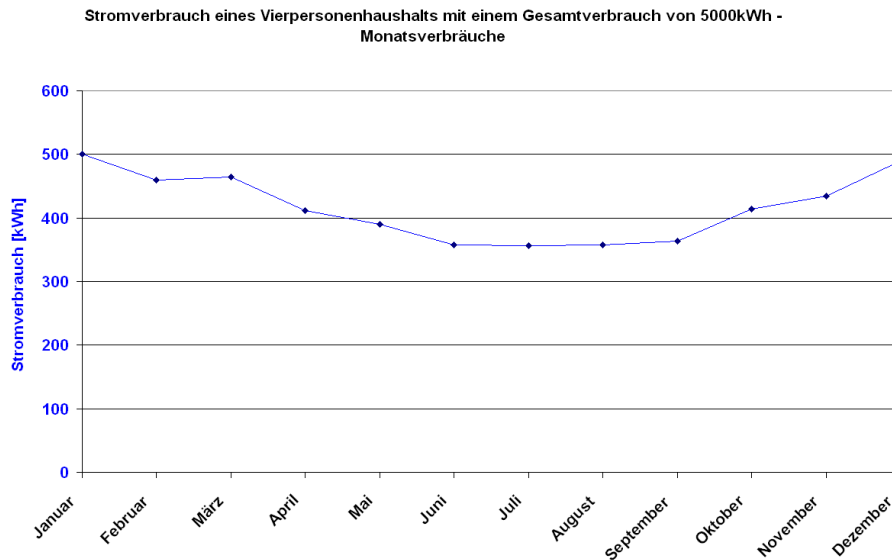


Abbildung 12: Stromverbrauch eines Vierpersonenhaushalts mit einem Gesamtverbrauch von 5000 kWh – Monatsverbräuche.

4.1.3 Jahreszeitliche Schwankungen in Energieverbrauch und Energieerzeugung

Der gesamte Verbrauch wurde anhand von real gemessenen Tageswerten eines Halbjahres von Winter bis Sommer errechnet. Der Unterschied zwischen Sommer- und Winterverbrauch von 30% wurde ebenfalls in diesem Haushalt gemessen und ist einfach zu erklären:

Zum einen ist ein Wintertag im Schnitt etwa neuneinhalb Stunden lang. Der Sommertag dagegen hat im Schnitt 15 Stunden. Daraus resultiert aufgrund der fünfeinhalb Stunden kürzeren Tage ein gesteigener Beleuchtungsbedarf. Doch in Zeiten in denen Energiesparlampen und LEDs auf dem Vormarsch sind schlägt dieser Faktor nur zu einem geringen Teil zu Buche. Werden für den Zeitraum von fünf Stunden mehrere Energiesparlampen mit einer gesamten Leistungsaufnahme von 100 W betrieben steigt somit der Energieverbrauch lediglich um 0,5 kWh pro Tag. Bei Glühlampen kann sich dieser Wert jedoch um den Faktor 3-6 erhöhen.

Viel wichtiger ist der Mehrbedarf, der durch die niedrigen Temperaturen entsteht. Obwohl festgelegt wurde, dass mit fossilen Energieträgern geheizt

wird, entstehen zusätzliche Kosten durch die Heizung. Da eine Gasheizung zwar hauptsächlich, aber nicht ausschließlich mit Gas betrieben wird, steigen auch hier die Stromkosten. Das für die Verbrennung benötigte Gebläse einer Gasheizung verbraucht in etwa 100 W. Bei Ölheizungen kommt zusätzlich noch ein Zerstäuber hinzu welcher den Stromverbrauch auf bis zu 350 W steigern kann. Da im süddeutschen Raum während der Sommerzeit sehr milde Temperaturen herrschen und kaum bis gar nicht geheizt werden muss, läuft eine Heizung lediglich eine Stunde pro Tag um Heißwasser bereitzustellen. Im Winter dagegen schaltet die Heizung bis zu einmal pro Stunde ein, was bei einer Einschaltdauer von etwa 15 Minuten pro Heizzyklus einem Betrieb von acht Stunden pro Tag entspricht. Multipliziert mit der Leistungsaufnahme ergibt sich so ein Mehrverbrauch von 0,7 kWh bei einer Gasheizung und bis zu 2,45 kWh bei einer Ölheizung pro Tag.

Ein weiterer Grund für den Mehrbedarf ist der Wäschetrockner. Im Sommer kann aufgrund der hohen Temperaturen die Wäsche im Freien getrocknet werden, doch im Winter ist man auf den Wäschetrockner angewiesen. Dieser verbraucht pro Trockengang und je nach Programm 2-3 kWh Strom was bei einem Trockengang alle zwei Tage immerhin noch 1-1,5 kWh Strom pro Tag sind.

Betrachtet man alle Werte zusammen wird klar, wieso der Tagesverbrauch im Sommer von rund 12 kWh im Winter schnell auf 15 kWh ansteigen kann. Es ist wichtig diese jahreszeitlichen Schwankungen zu kennen um angemessen darauf reagieren zu können da sich folgende Problemstellung ergibt:

Wenn im Winter der Ertrag durch die Solaranlage am geringsten ist wird gleichzeitig am meisten Energie benötigt.

Diese Problemstellung ist besonders im Hinblick auf die Lebensdauer des Energiespeichers als äußerst kritisch anzusehen. Um eine hohe Versorgungssicherheit und eine lange Systemlebensdauer bei maximalem Komfort für den Benutzer zu gewährleisten, muss mehr Energie zur Verfügung gestellt werden. Wie diese im Detail bereitgestellt werden kann wird nun näher erläutert.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse werden nun der Verbrauch des Haushalts und der Ertrag der auf dem Dach installierten 3 kW_{peak}-Anlage gegenübergestellt. Dabei ist zu beachten das es sich bei allen, in dieser Arbeit prognostizierten Erträgen, zunächst um reine Einspeisewerte handelt die nur zu einem sehr geringen Teil durch Wirkungsgradverluste gemindert wurden. Der Grund dafür ist die Basis der Prognosen.

Auf der Internetseite www.pv-ertraege.de werden schon seit Jahren Ertragsdaten von Solaranlagen in ganz Deutschland gesammelt. Diese werden dann miteinander verrechnet, normiert und anschließend im Sinne der regionalen Vergleichbarkeit der Öffentlichkeit kostenlos zur Verfügung gestellt. Diese Daten waren die Basis für alle Ertragsprognosen in dieser Arbeit. Dazu wurden die Daten aus allen registrierten Anlagen im Postleitzahlenbereich 63000-63999 von den Jahren 2005 bis einschließlich 2010 miteinander verrechnet um so ein langjähriges Mittel der letzten 6 Jahre zu erhalten. Das Ergebnis war der Ertrag einer Anlage mit der Größe von 1 kW_{peak}, woraus

durch einfache Multiplikation der Ertrag jeder beliebig großen Photovoltaikanlage ausreichend genau prognostiziert werden kann.

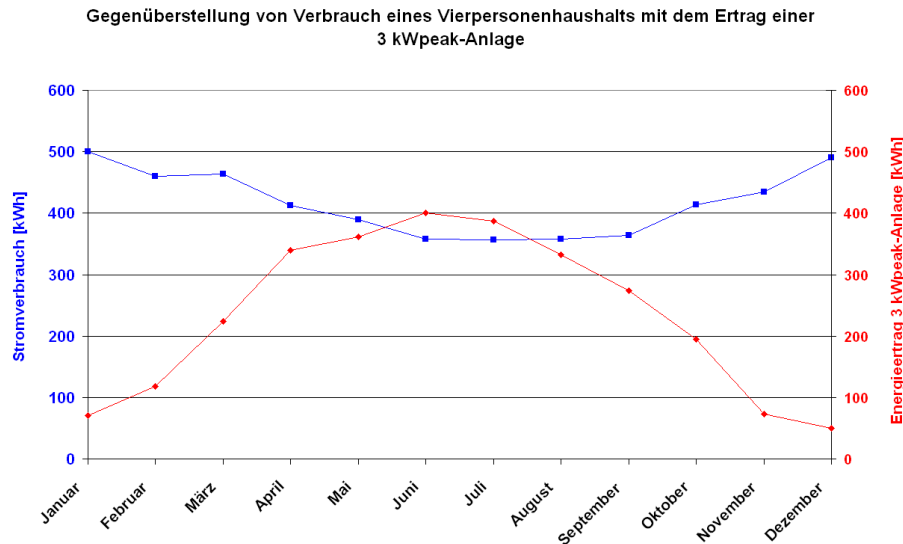


Abbildung 13: Gegenüberstellung von Verbrauch eines Vierpersonenhaushalts mit dem Ertrag einer 3 kWpeak-Anlage.

Deutlich zu erkennen ist, dass es lediglich im Juni und Juli zu einer vollkommenen Deckung des Eigenbedarfs kommen würde. Dabei ist zu beachten, dass den real gemessenen Verbrauchswerten die prognostizierten Ertragswerte bei reiner Einspeisung gegenübergestellt werden. Die Energie, die jedoch in einer Inselanlage zur Verfügung stehen würde, wäre sicherlich geringer da der Wirkungsgrad der gesamten Anlage aufgrund des Ladewirkungsgrades des Energiespeichers verschlechtert wird. Kalkuliert man eine gewisse Sicherheit ein um diese sehr wahrscheinlich auftretenden Verluste von vorne herein zu kompensieren würde der rote Graph den blauen Graphen höchstens tangieren. Dadurch ist klar, dass die bestehende Anlage vergrößert werden muss. In welchem Maße eine Vergrößerung jedoch sinnvoll ist, sowohl aus technischen als auch aus wirtschaftlichen Gründen, wird nun genauer untersucht.

4.2 Neuauslegung des Solargenerators

4.2.1 Ermittlung der optimalen Anlagengröße

Um sich das ganze Jahr über nur mit Solarstrom versorgen zu können wäre für diesen Haushalt mit einem Verbrauch von 5000 kWh pro Jahr und der in

Abschnitt 4.1 angenommenen Verteilung eine Solaranlage von über 25 kW_{peak} von Nöten. Diese würde eine Dachfläche von mindestens 200 m² einnehmen ohne Verschattungen oder Flächen für Dachfenster mit einzubeziehen. Zu groß um dies von einem Dach unter dem nur vier Personen leben erwarten zu können. Um zu verdeutlichen in welchem Maße die Anlage überdimensioniert werden müsste hier eine Gegenüberstellung der erzeugten und tatsächlich verbrauchten Energiemenge.

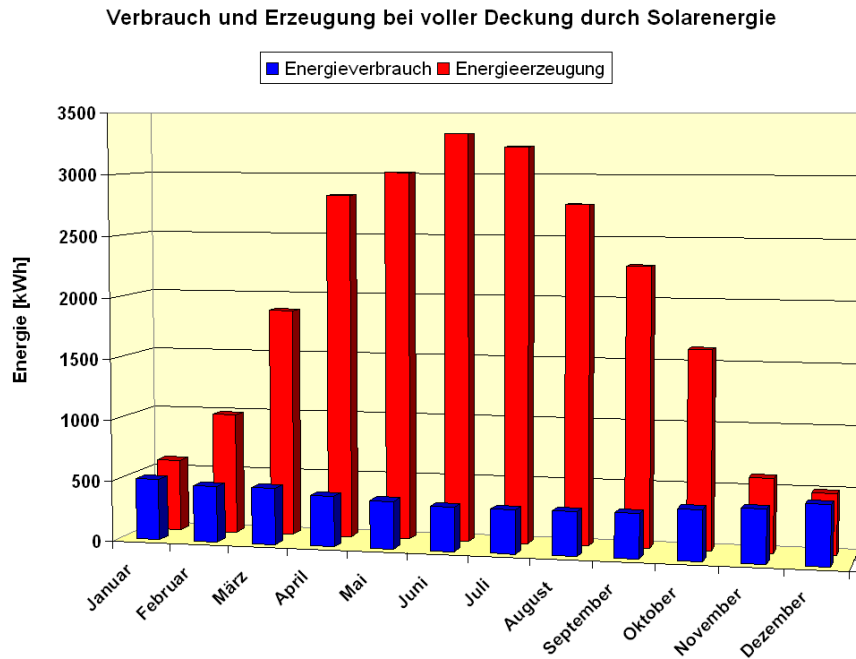


Abbildung 14: Verbrauch und Erzeugung bei voller Deckung durch Solarenergie.

Besonderes beachten sollte man hier den Monat Dezember. Das Ausmaß der Überdimensionierung beruht ausschließlich auf dem geringen Ertrag, der im Dezember erzielt werden kann. Durch die in Deutschland herrschenden starken jahreszeitlichen Schwankungen der Sonneneinstrahlung folgt aus einer Deckung des Bedarfs im Winter ein starker Energieüberschuss im Sommer. Insgesamt wird knapp die fünffache Energie produziert die während eines Jahres benötigt wird. Doch dieser Überschuss kann nur selten sinnvoll genutzt werden. Im Regelfall ist keine Einspeisung in das öffentliche Netz möglich und um diese Energiemenge in Form von potentieller, thermischer oder elektrischer Energie zu speichern wäre ein großer und vor allem teurer Energiespeicher von Nöten. Daraus kann für Inselanlagen die ganzjährig betrieben werden sollen folgendes geschlussfolgert werden:

Wenn das Energieangebot starken jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt muss ein Kompromiss gefunden und deshalb das ganze System als Hybridsystem aufgebaut werden.

In einem Hybridsystem werden zwei verschiedenen Technologien miteinander kombiniert. Jede dieser Technologien kann eine gestellte Aufgabe zwar selbstständig lösen, jedoch können aufgrund des Zusammenschlusses weitere Vorteile entstehen. Konkrete Vorteile der Erweiterung einer Inselanlage mit einer weiteren Energiequelle wären unter anderem eine erhöhte Versorgungssicherheit, eine verlängerte Lebensdauer der einzelnen Systemkomponenten sowie die Vermeidung einer Überdimensionierung. Grundsätzlich können die optionalen Energiequellen in zwei Gruppen aufgeteilt werden: das öffentliche Netz und andere Energiequellen. Je nach Energiequelle wird dann ein spezifisches Anlagenkonzept entwickelt. Nun muss nur noch ermittelt werden welche der beiden Energiequellen wie viel der gesamt benötigten Energie liefern soll. Laut dem Lastenheft ist eine jährliche Selbstversorgung mit Solarenergie von 70% angestrebt. Die dazu erforderliche Energiemenge beträgt vereinfacht gerechnet:

$$0,7 * 5000 \text{ kWh} = 3500 \text{ kWh}$$

Die erforderliche Anlagengröße errechnet sich aus dem ermittelten Jahresertrag von 940 kWh pro 1 kWpeak installierter Photovoltaikleistung, durch welchen die gewünschte Energiemenge dividiert wird. Die so ermittelte Anlagengröße wäre mit 3,72 kWp kaum größer als die bisherige 3 kWp-Anlage. Jedoch handelt es sich bei den 3500 kWh nicht um die Energie die von der Solaranlage produziert werden muss, sondern um die Energie die letztendlich im Haushalt ankommen soll. Aufgrund von Wirkungsgradverlusten und um die Versorgungssicherheit zu erhöhen werden deswegen noch 20% aufgeschlagen. Die Energiemenge die von der Solaranlage erzeugt werden muss beträgt somit:

$$3500 \text{ kWh} + 3500 \text{ kWh} * 0,2 = 4200 \text{ kWh}$$

Noch einmal dividiert durch den zu erwartenden Jahresertrag von 940 kWh/kWp ergibt dies eine Anlagengröße von fast 4,5 kWp. Als Faustregel gilt ein Flächenbedarf von 8 m² pro kWp, was bei 4,5 kWp einem Nutzflächenbedarf von 36 m² entspricht. Eine Fläche die im Regelfall auf dem Dach eines Vierpersonenhaushalts zu finden ist. Die Anlagengröße ist also durchaus realistisch. Doch je mehr Energie zur Verfügung steht desto besser. Deswegen wurde, im Rahmen dieser Arbeit, auch der Einfluss einer 6,3 kWpeak-Anlage auf das Inselsystem getestet. Was das tatsächlich für den jährlichen Ertrag bedeutet, verdeutlicht folgendes Diagramm:

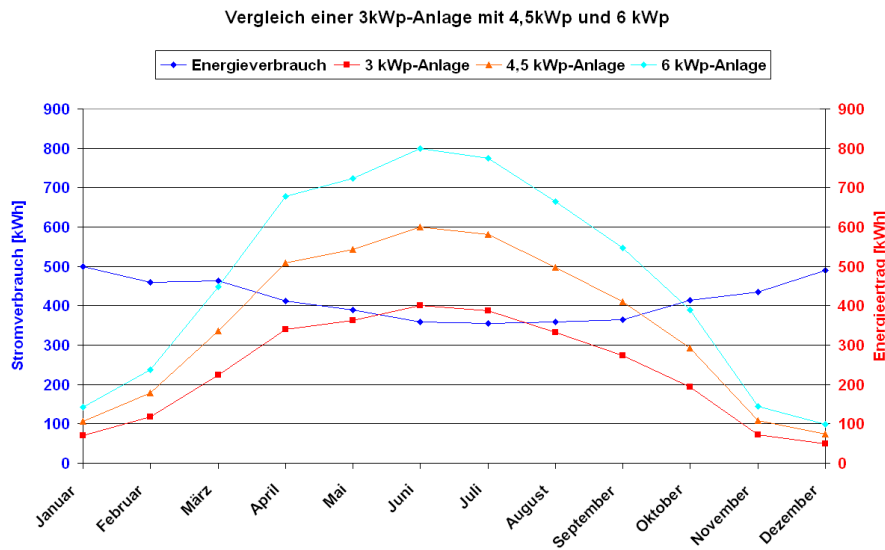


Abbildung 15: Vergleich einer 3 kWp-Anlage mit 4,5 kWp und 6 kWp.

Es zeigt sich, dass zum einen zwar die Zeitspanne verlängert wird in der der Ertrag über dem Bedarf liegt, zum anderen jedoch auch der Überschuss. Die Anlagenkosten steigen zwar nicht linear, da die Grundausstattung nicht verändert wird, jedoch fallen mehr Kosten für einen größeren Solargenerator an. Ob eine Größe von über 4,5 kWp sinnvoll ist bleibt vorerst unklar und hängt vor allem von lokalen Faktoren ab.

4.2.2 Autonomie und Überschuss

Die Autonomiezeit und der Energieüberschuss sind Größen, die beide direkt mit der Anlagengröße verknüpft sind. Bei einer Vergrößerung der Anlage kann bei geringerer Sonneneinstrahlung mehr Energie produziert werden, was die Zeitspanne in der die Inselanlage nur mit Solarenergie betrieben werden kann verlängert. Doch gleichzeitig führt eine größere Anlage zu mehr Überschuss in den ertragreichen Sommermonaten. Ein Überschuss der, abhängig von der spezifischen Anlage, wenig bis gar nicht verwertet werden kann. Wie dieser Zusammenhang genau aussieht ist an folgendem Diagramm abzulesen:

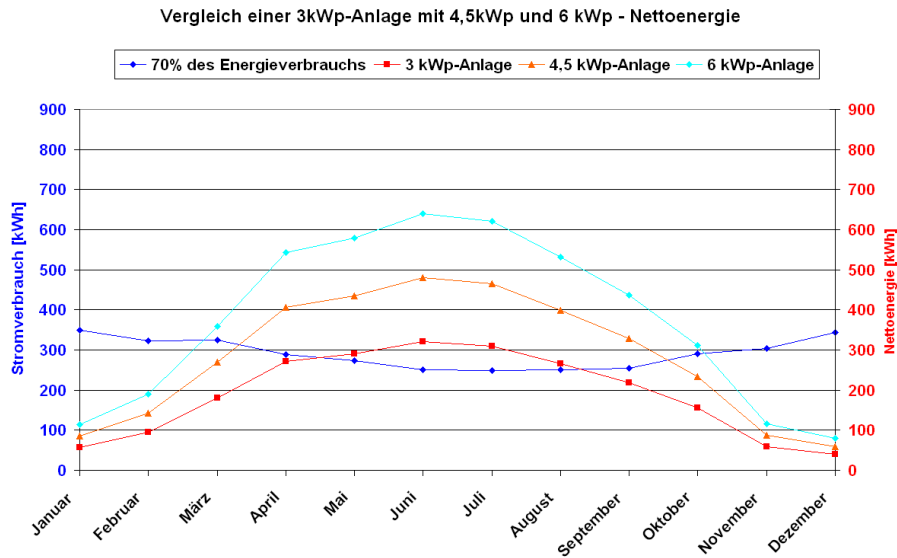


Abbildung 16: Vergleich einer 3 kWp-Anlage mit 4,5 kWp und 6 kWp – Nettoenergie.

Zu beachten sind in diesem Diagramm die Unterschiede zu Abbildung 4. Der Energieverbrauch wurde um 30% gemindert, da laut Lastenheft eine Deckung von lediglich 70% angestrebt wird. Gleichzeitig wurde auch die Energie vermindert die von den Solaranlagen zu Verfügung gestellt wird. Dabei handelt es sich um die bereits angesprochenen 20% um Wirkungsgradverluste zu kompensieren und die Versorgungssicherheit zu erhöhen. Es handelt sich also um die Energie die tatsächlich im Haushalt ankommt und zum direkten oder indirekten Verbrauch zur Verfügung steht. Mit indirekten Verbrauch ist die Energie gemeint die nicht sofort genutzt werden kann, sondern für eine spätere Nutzung zwischengespeichert werden muss. Bezieht man die bisher gewonnen Erkenntnisse mit ein wird klar, dass selbst eine ganzjährige Deckung von lediglich 70% des Energiebedarfs eines Vierpersonenhaushalts mit reiner Solarenergie technisch noch nicht realisierbar ist. Jedoch sollte die Größe der Anlage so gewählt werden, dass zumindest in der Jahresbilanz 70% der verbrauchten Energie in Form von Solarenergie erzeugt wird. Diese Energie wird, wie ja bereits gezeigt, ab einer Anlagengröße von etwa 4,5 kWp erreicht, doch es gibt noch mehr Optimierungspotential. Im Weiteren sollten sich der externe Energiebedarf und der generierte Überschuss gegenseitig aufheben. Wie sich diese Energiemengen zur Anlagengröße verhalten zeigt folgendes Diagramm.

Vergleich zwischen Energieüberschuss und externem Energiebedarf bei verschiedenen Anlagengrößen

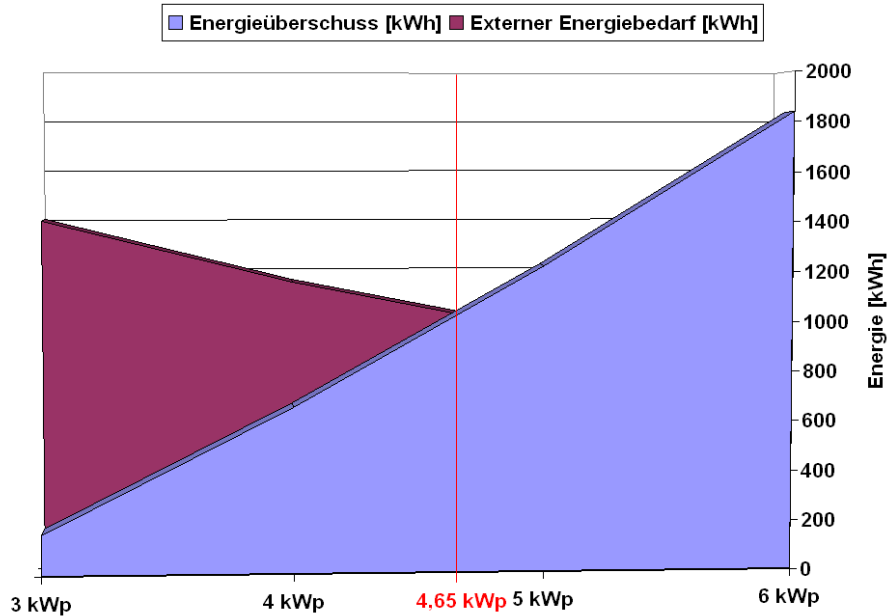


Abbildung 17: Vergleich zwischen Energieüberschuss und externem Energiebedarf bei verschiedenen Anlagengrößen.

Das Diagramm zeigt, dass der Zusammenhang zwischen Anlagengröße und Energieüberschuss fast direkt proportional ist. Im Gegenzug dazu verhält sich der externe Energiebedarf indirekt proportional zur Größe der Photovoltaikanlage. Der Schnittpunkt beider Graphen bildet das Optimum bei 4,65 kWp. Hier ist die Energiemenge die im Sommer als Überschuss produziert wird genauso groß wie die im Winter aus externen Quellen benötigte Energie. Aufgrund dieser Analysen wurde eine Anlagenkonfiguration von 3 Strings zu je 9 Modulen gewählt. Bei einer Spitzenleistung von 175 W pro Modul ergibt das eine Anlagengröße von 4725 W was sehr nah am rechnerisch ermittelten Optimum liegt. Angeschlossen wurden die Module an 2 Sunny Boy 3000 TL. Dabei fällt auf, dass die ungerade Anzahl an Strings nur schwer an eine gerade Anzahl an Wechselrichtern angeschlossen werden kann, doch dies hat einen Hintergrund. Um die Anlage zu einem späteren Zeitpunkt erweitern zu können wurde der Anschluss eines Strings absichtlich offen gelassen. Damit wurden später 9 weitere Module angeschlossen was die Anlagenleistung auf 6,3 kW angehoben hat, womit weitere Daten im Hinblick auf Energieüberschüsse und deren sinnvolle Verwertung gesammelt werden konnten. Die Verwertung der überschüssigen Energie wurde von einem Smart Load 6000 übernommen. Das Gerät hat die Aufgabe einen bestehenden Energieüberschuss innerhalb eines Inselnetzes zu erkennen und über externe Lastwiderstände abzuführen. Der Smart Load 6000 arbeitet wie die Sunny Boys frequenzgesteuert. Er registriert die vom Sunny Island erzeugte Frequenzer-

höhung die im Falle eines Energieüberschusses auftritt und leitet die Energie ein- oder dreiphasig über externe Lastwiderstände ab wo diese in Form von Wärme abgeführt wird. Bei der hier vorliegenden Anlage wird die Wärme mit Hilfe einer Heizpatrone genutzt um Wasser zu erhitzen. So kann während des Sommers fast das gesamte Brauchwasser mit dem Überschuss aus der Photovoltaik-Anlage erhitzt werden. So können zusätzlich etwa 105l Heizöl jährlich eingespart werden. Diese Angabe wurde ohne den Bezug zu Wirkungsgraden gemacht indem die zur Verfügung stehende Energiemenge anhand des Heizwertes von Heizöl mit diesem ersetzt wurde. (10 kWh/l)

Kosten und Nutzen der Smart Load

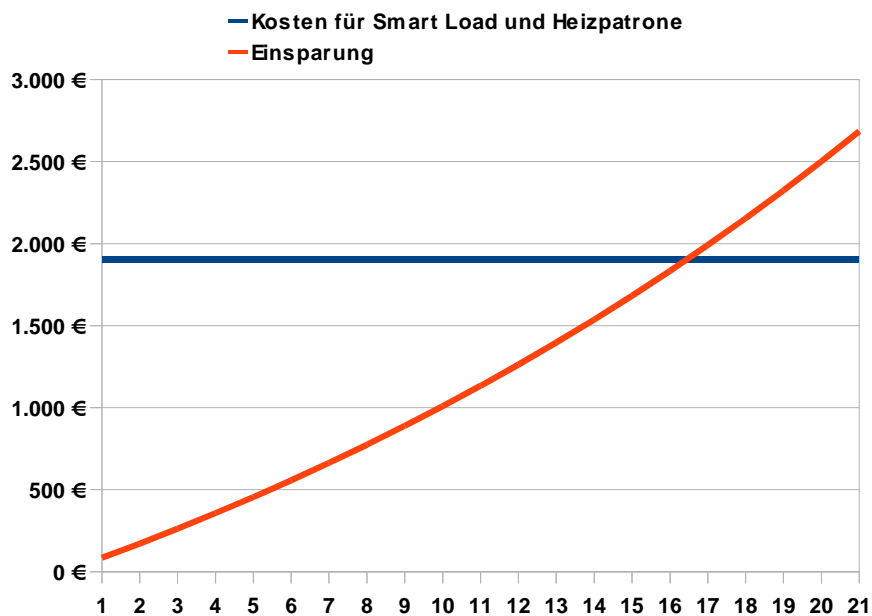


Abbildung 18: Kosten und Nutzen der Smart Load.

Der Smart Load 6000 hat sich bei einer Ölpreiserhöhung von nur 4% nach 16 Jahren selbst finanziert. Dabei kostet der Smart Load selbst 1700.- € und eine passende Heizpatrone 200.- €. Nach 21 Jahren ist ein Kostenvorteil von immerhin knapp 800.- € zustande gekommen.

4.2.3 Energieflüsse

Der Energiefluss lässt sich in Anlehnung an die vier Jahreszeiten in folgenden Vereinfachungen darstellen.

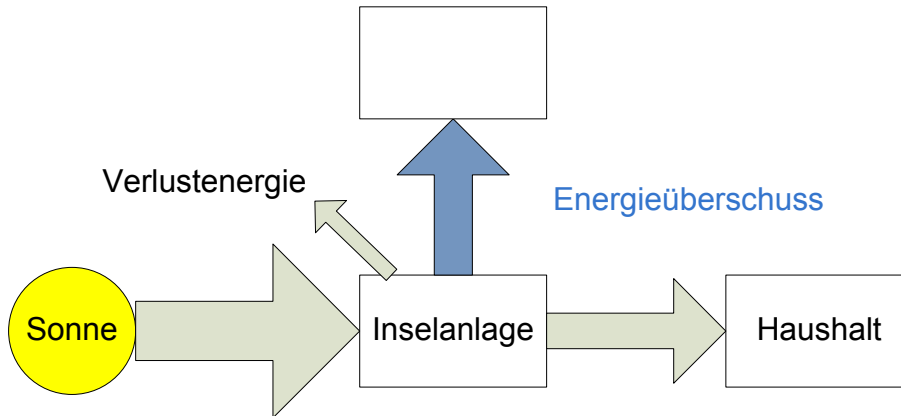


Abbildung 19: Energiefluss während den Sommermonaten.

In den Sommermonaten wird der Großteil des Energieüberschusses erzeugt. Die dabei anfallende Verlustenergie ist am größten da sie direkt proportional zum solaren Angebot ist. Wohin dieser Überschuss fließt hängt jedoch von der spezifischen Anlage ab.

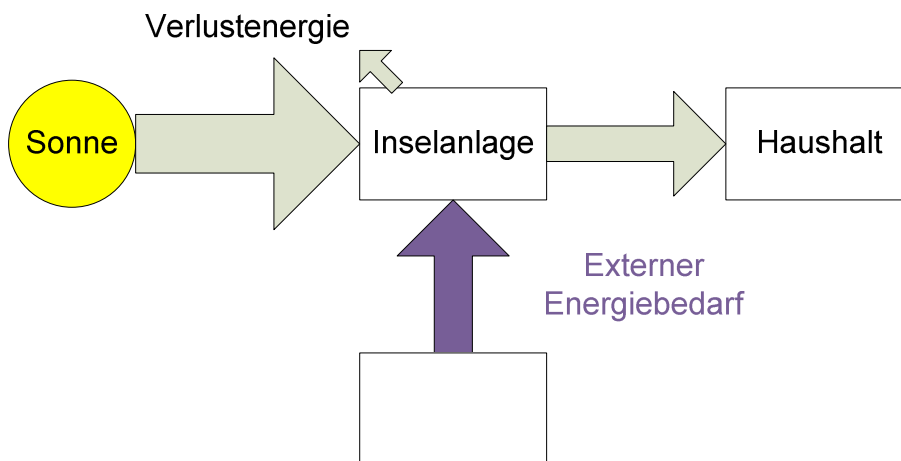


Abbildung 20: Energiefluss während der Wintermonate.

In den Wintermonaten wird aufgrund des schwachen solaren Angebotes viel externe Energie benötigt. Gleichzeitig ist jedoch der Gesamtwirkungsgrad am höchsten da die erzeugte Energie im Regelfall sofort verbraucht werden

kann. Woher die extern erzeugte Energie kommt hängt, wie schon zuvor, von dem Anlagenkonzept ab.

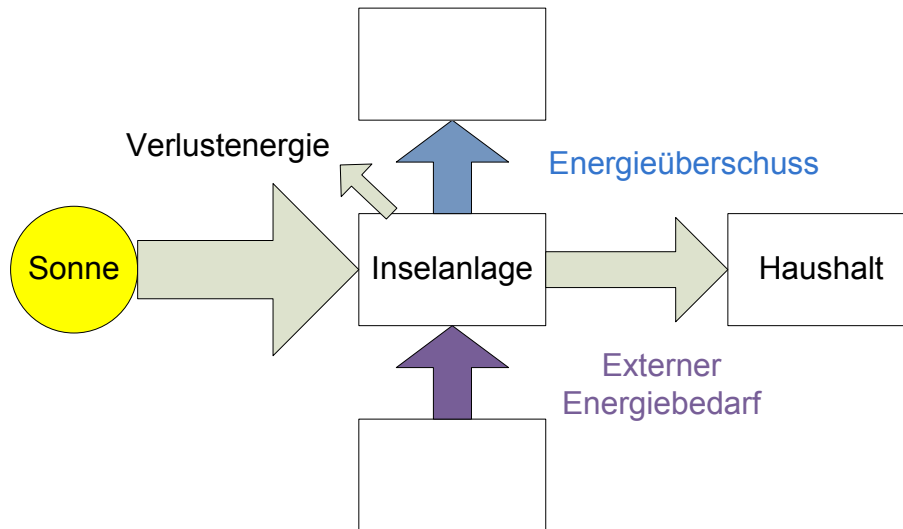


Abbildung 21: Energiefluss im Frühling/Herbst.

Im Frühling beziehungsweise im Herbst sind die klimatischen Veränderungen die innerhalb weniger Tage auftreten können am höchsten. Der Anlagenzustand in diesen Übergangsmoaten kann sich also im Rahmen der beiden Extrema bewegen. Die Verlustenergie über die gesamte Dauer betrachtet sollte ebenfalls zwischen dem Maximum im Sommer und dem Minimum im Winter liegen. Der erzeugte Überschuss sollte in etwa gleich dem externen Energiebedarf sein.

4.3 Lastanalyse und Lastmanagement

4.3.1 Ermittlung der zu erwartenden Lasten

Für Inselsysteme ist eine sorgfältige Ermittlung der Lasten essentiell. Bei einer Überdimensionierung steigen die Anlagenkosten unnötig an und bei einer Unterdimensionierung wird die kostenintensive Ersatzstromquelle öfters benötigt sowie die Lebensdauer des Energiespeichers stärker verkürzt als bei Anlagen die genau auf die kommenden Lasten zugeschnitten sind. Doch wie viel Energie in einem Vierpersonenhaushalt verbraucht wird und vor allem zu welchem Zeitpunkt dies stattfindet ist individuell verschieden. Diese Feststellung wurde bereits in Kapitel 4.1 gemacht und die benötigten Energiemengen wurden daraufhin im Abstand von einem Monat graphisch dargestellt. Obwohl diese Auflösung vorerst genau genug war um Aussagen über die Jahresbilanz machen zu können, muss für weitere Prognosen eine

genauere Betrachtungsweise herangezogen werden. Der Lastgang eines Tages muss ermittelt werden und dazu wurde im Rahmen der Recherchen folgende Betrachtungsweise der Energieversorger gefunden:

Um eine sichere Energieversorgung und dabei hohe Effizienz von Mittel- und Spitzenlastkraftwerken zu gewährleisten müssen die Lastgänge aller zu versorgenden Verbraucher bekannt sein damit der Energiebedarf zuverlässig gedeckt werden kann. Bei Verbrauchern die mehr als 100.000 kWh pro Jahr verbrauchen werden dafür spezielle Lastgangzähler angebracht. Dieser Aufwand wäre jedoch für einen einzelnen Privathaushalt mit lediglich 5000 kWh Jahresverbrauch zu hoch und zu kostspielig. Deswegen werden kleineren Verbrauchern sogenannte Standardlastprofile zugeordnet.

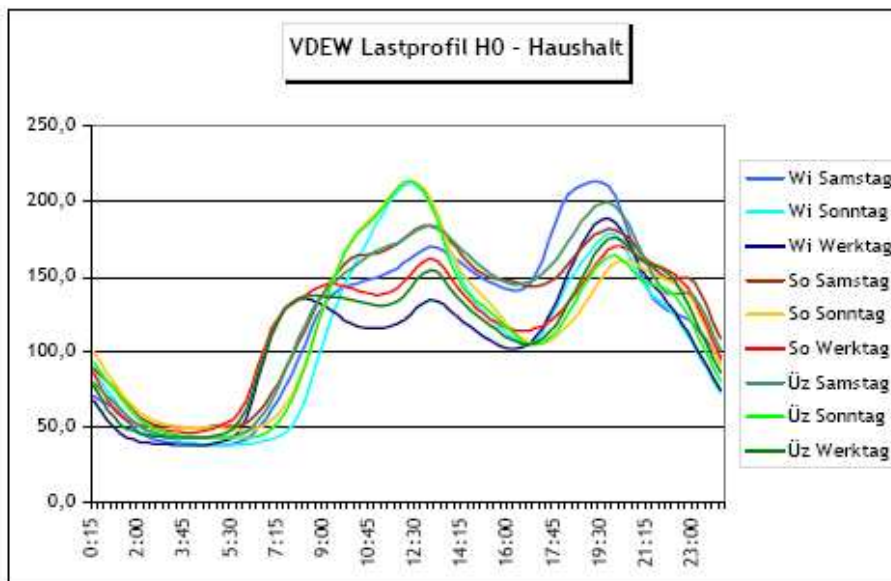


Abbildung 22: VDEW Lastprofil H0 – Haushalt.

Standardisiertes Lastprofil des VDEW für einen Haushalt mit dem normierten Jahresverbrauch von 1000 kWh. Das Jahr wird dabei in Winter (1.11 – 20.3), Sommer (15.5 – 14.9) und Übergangszeit (21.3 – 14.5 / 15.9 – 31.10) aufgeteilt. Zusätzlich wird zwischen Werktagen, Samstagen und Sonntagen unterschieden womit insgesamt 9 spezifische Lastgänge benötigt werden. [Kal06] Es gilt nun zu beurteilen in wie weit diese Darstellung hilfreich ist um den Verbrauch eines Vierpersonenhaushalts davon ableiten zu können. Es handelt sich um ein Profil, das für alle Haushalte gelten soll, unabhängig von deren Größe oder Personenanzahl. Diese Universalität bringt jedoch unerwünschte Nebeneffekte mit sich. Durch die zeitlichen Unterschiede der Spitzenlastzeiten in den einzelnen Haushalten gehen diese in Folge der Normierung in der Menge unter. Dieses Phänomen kann an der ersten Spitze einfach erklärt werden:

Das erste Maximum steht für die Sonntage im ganzen Jahr. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Energiebedarf um 12:00 Uhr mittags stark ansteigt da viele Menschen zu dieser Zeit das Essen zubereiten. Der Leistungsbedarf beträgt, normiert auf einen Jahresverbrauch von 1000 kWh, lediglich 220 W. Dies würde bedeuten, dass in einem Vierpersonenhaushalt mit einem Jahresverbrauch von 5000 kWh lediglich 1100 W zur Verfügung stehen um am Sonntagmittag zu kochen. Durch die Standardisierung wurde die tatsächlich benötigt Energie um den Faktor 4-6 verringert. Hier wird deutlich, dass das Lastprofil H0 für die Betrachtung eines einzigen Haushalts zu weit standardisiert wurde und keine Aussagen über Momentanverbräuche getroffen werden können. Es könnten lediglich Tendenzen abgeleitet werden wie sich der Energiebedarf anhand von Jahreszeiten und Wochentagen ändert.

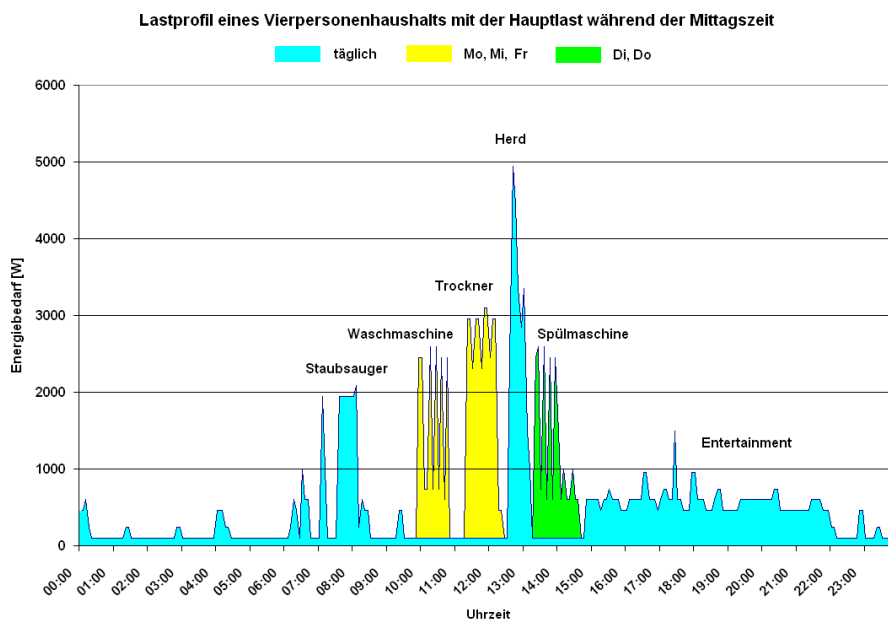


Abbildung 23: Lastprofil eines Vierpersonenhaushalts mit der Hauptlast während der Mittagszeit.

Wäsche waschen mit anschließendem Trockenvorgang passiert alle zwei Tage. Im Versatz von einem Tag wird die Spülmaschine benutzt. Es handelt sich hierbei nur um die Betrachtung der fünf Werkstage. Einer der beiden Erwachsenen ist ganztätig zu Hause um die Lasten zu verteilen. Dieses fiktive Lastprofil ist sehr nah am Optimum. Eine gleichmäßige Lastverteilung über einem Zeitraum in dem erwartungsgemäß viel Solarenergie zur Verfügung stehen wird stellt sicher, dass die meiste Energie direkt verbraucht werden kann. Da sich die größten Lasten nicht überlappen werden Spitzenlasten reduziert und der Einsatz von externen Energiequellen auf ein Minimum beschränkt.

4.3.2 Reduzierung des Energiebedarfs

Je weniger Energie benötigt wird desto geringer ist der Aufwand der betrieben werden muss um diese so verlustarm wie möglich bereitzustellen. Die Reduzierung des Energiebedarfs ist somit die günstigste und wichtigste Methode um die Anschaffungskosten einer Inselanlage gering zu halten. Der Energiebedarf eines Haushaltes kann ohne jegliche Komforteinschränkung gesenkt werden. Besonders bei der Neuanschaffung elektrischer Verbraucher sollten nicht nur die Preise verglichen werden, sondern auch die Stromverbräuche. Bei welchen Geräten besonders großes Sparpotential vorhanden ist zeigt folgende Grafik.

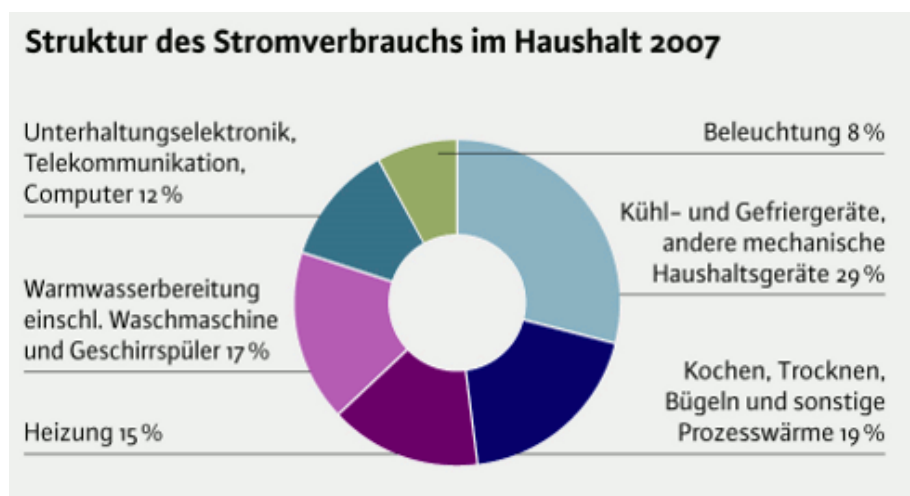


Abbildung 24: Struktur des Stromverbrauchs im Haushalten 2007. [BDE07]

Die Grafik zeigt, dass Kühl- und Gefriergeräte zusammen mit Waschmaschine und Geschirrspüler bereits knapp die Hälfte des Energiebedarfs benötigen. Deshalb sollte bei Geräten die älter sind als 5 Jahre in Erfahrung gebracht werden welche Energieeffizienzklassen diese besitzen und ein Austausch in Erwägung gezogen werden. Bei Geräten die älter sind als 10 Jahre rechnet sich eine Neuanschaffung schon innerhalb weniger Jahre. Werden schließlich neue Geräte gekauft ist der günstigste Preis nicht immer der beste. Wie sich eine Mehrinvestition in ein teureres aber energiesparenderes Gerät rechnen kann soll hier verdeutlicht werden:

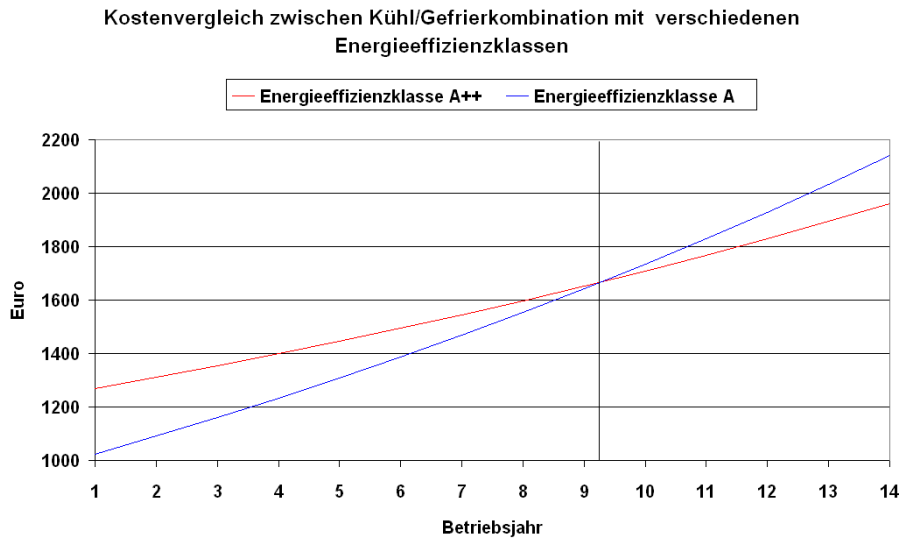


Abbildung 25: Kostenvergleich zwischen Kühl/Gefrierkombination mit verschiedenen Energieeffizienzklassen.

Die Strombezugskosten waren im ersten Jahr 25cent/kWh mit einer jährlichen Erhöhung von 4%. Der Volumenunterschied wurde herausgerechnet indem der Verbrauch des größeren Gerätes um die prozentuale Volumendifferenz gesenkt wurde. Beide Geräte sind vom selben Hersteller.

	Santo K 91245-5i	Santo K 71240-4I
Anschaffungspreis	1.229 €	959 €
Energieeffizienzklasse	A++	A
Jahresverbrauch	160 kWh	263 kWh
Inhalt (Kühl-/Gefrierteil)	189/27	193/17

Tabelle 1: Eckdaten der beiden Kühl-/Gefriergeräte.

Es zeigt sich, dass durch die Einsparung von Energie der um 270 € höhere Anschaffungspreis innerhalb von 9 Jahren aufgeholt werden kann. Ab da spart man pro Jahr Strom im Wert von etwa 35 €.

Durch den Austausch von Glühlampen gegen Energiesparlampen oder LEDs können leicht über die Hälfte der Kosten für Beleuchtung eingespart werden. Bei einem Jahresverbrauch von 5000 kWh entspricht eine Einsparung von 50% der für die Beleuchtung benötigten Energie einer Energiemenge von 200 kWh. Bei einem Strompreis von 25cent/kWh sind das immerhin 50 Euro pro Jahr. Ein positiver Nebenaspekt ist zudem die Verringerung des Energiemehrbedarfs im Winter. Um den Energieunterschied zwischen Sommer und Winter weiter zu senken können Wasch- und Spülmaschine an den Warmwasserkreislauf des Hauses angeschlossen werden. Somit müssen die

Geräte das Warmwasser nicht mehr intern durch Strom erhitzen, sondern bekommen es extern aus dem Warmwasserkessel. Weiteres Sparpotential liegt bei Geräten die nicht völlig ausgeschaltet sind sondern im Standbybetrieb weiterlaufen. Messungen haben gezeigt, dass ein 40 Zoll Flachbildschirm mit dazugehörigem Satelliten-Receiver und einem DVD-Player im Standbybetrieb 8 W verbrauchen. Bei einer geschätzten Dauer von 5000 h/J sind das 40 kWh die durch einfaches Steckerziehen eingespart werden können. Es zeigt sich also, dass in jedem Haushalt genügend Sparpotential steckt um mehrere 100 kWh jährlich einzusparen. Die eingesparte Energie lohnt sich bei der Anschaffung einer Photovoltaik-Inselanlage sogar doppelt da eine Verkleinerung des Solargenerators oder der Kapazität des Energiespeichers schnell mehrere hundert Euro Unterschied ausmachen kann.

4.4 Dimensionierung des Energiespeichers

Der Energiespeicher ist die teuerste und zugleich kurzlebigste Komponente und nimmt damit einen starken Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems. Ein Viertel der Erstinvestitionskosten werden bei der untersuchten Inselanlage für die Anschaffung der Batterien benötigt. Doch aufgrund des hohen Anteils der Batteriekosten an den Instandhaltungskosten betragen diese über einen Zeitraum von 20 Jahren 45% der Gesamtkosten.

4.4.1 Lebensdauer

Die Lebensdauer von Batterien ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Eine Verkürzung der Lebensdauer kann unter anderem folgende Gründe haben:

- Tiefentladung
- Überladung
- Betriebstemperaturen über 50°C
- Betriebstemperaturen unterhalb des Gefrierpunkts
- Säureschichtung
- Korrosion des Gitters
- Sulfatierung
- Mechanische Belastungen

Aufgrund der Vielzahl an Faktoren die bei der Bestimmung der Lebensdauer eine Rolle spielen ist es schwer diese genau vorherzusagen. Deswegen werden von Batterieherstellern auch Zeiträume von 2-20 Jahren angegeben, wobei sich Speicher auf Bleibasis im Allgemeinen in der unteren Hälfte bewegen. Die Angabe der Lebensdauer in Jahren ist demnach nur ein grober Richtwert, da die Belastungen je nach Betriebsverhalten sehr unterschiedlich sein können. Weitaus zuverlässiger ist die Angabe der zu erwartenden Zyklenanzahl in Abhängigkeit der Entladetiefe.

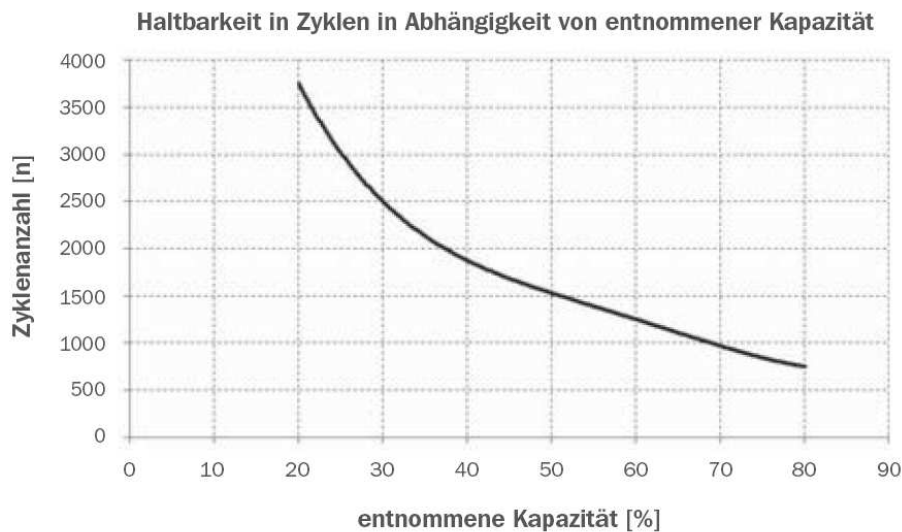


Abbildung 26: Haltbarkeit in Zyklen in Abhängigkeit von entnommener Kapazität. Entnommen aus dem Datenblatt des solar.bloc von Hoppecke. [Sol10]

Die Entladetiefe, oder auch Depth of Discharge (DOD), hat den größten Einfluss auf die maximal erreichbare Zyklenanzahl. Voraussetzung dafür sind natürlich ein gutes Batteriemangement und eine optimale Pflege. Als untere Grenze wurde der Defaultwert des Sunny Islands benutzt. Bei 40% SOC wird die externe Energiequelle eingeschaltet um ein weiteres Absinken des Ladezustands zu verhindern. Falls die externe Quelle nicht zugeschaltet werden kann schaltet der Lastabwurfschütz alle Verbraucher aus. Dieser unwahrscheinliche Fall ist jedoch während der dreimonatigen Betriebsdauer noch nicht aufgetreten. Das bedeutet, dass mindestens 1250 Vollzyklen erreicht werden sollten bis die Nutzkapazität auf 80% der Anfangskapazität geschrumpft ist. Um die Lebensdauer zu überschlagen kann mit der benötigten Energie über die Kapazität ein Rückschluss auf die Zyklenanzahl gemacht werden. Laut den Berechnungen in Kapitel 6 werden pro Jahr 3368 kWh von der Inselanlage bereitgestellt. Doch wenn der Großteil der Energie direkt genutzt wird, fließt diese am Energiespeicher vorbei. Um eine Aussage über die Lebensdauer treffen zu können muss also bekannt sein wie oft die Solarenergie zu gering ist um den Momentanbedarf zu decken. Der SOC wird täglich von Sunny Island aufgezeichnet.

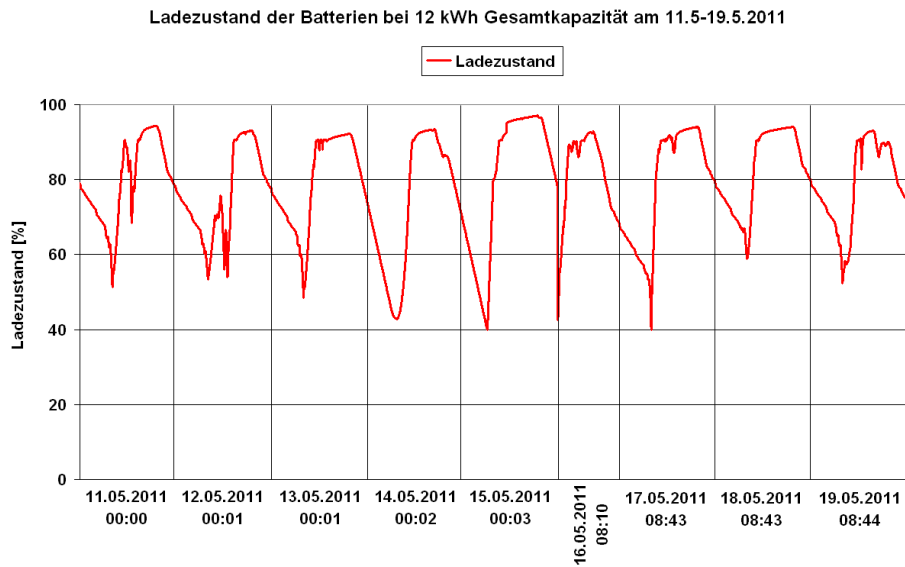


Abbildung 27: Ladezustand der Batterien bei 12 kWh Gesamtkapazität am 11.5-19.5.2011.

Durchschnittlich wurden 14 kWh pro Tag verbraucht. Am 14 und 15.5.2011 war Wochenende und der Verbrauch wurde aus Sicherheitsgründen auf ein Minimum von unter 3 kWh reduziert da die Anlage unbeaufsichtigt betrieben wurde.

Der Sunny Island zeichnet täglich eine Vielzahl an Graphen auf und speichert diese in einer eigenen Datei. Am Morgen des 16.05.2011 kam es zu einem Teilsystemausfall und infolgedessen zu einem Datenverlust von ca. 8,5 Stunden. Aufgrund einer Schlechtwetterperiode musste am 15,16,17.05.2011 die externe Stromquelle zugeschaltet werden. Deutlich erkennbar ist dies an den abrupten Stopps des SOC bei 40%. In dieser Zeit wurde jedoch nur eine Energiemenge von knapp 12 kWh benötigt. Das bedeutet es wurde lediglich ein Viertel des Energiebedarfs durch die externe Quelle gedeckt und drei Viertel konnte immer noch durch Solarenergie bereitgestellt werden. Wenn nun die durchschnittliche Zyklentiefe als Referenz für ein Jahr genommen wird, kann die Lebensdauer grob ermittelt werden. Ein Zyklus ist definiert als der Ablauf eines Entladevorgangs mit anschließendem Ladevorgang. Je mehr Kapazität während eines Zyklus entnommen wird, desto stärker ist die Belastung für die Batterien und infolgedessen sinkt die Lebensdauer. Anhand des Graphen lässt sich ermitteln, dass während eines Zeitraums von 9 Tagen 14 Zyklen mit einer Tiefe von 5-57% SOC durchlaufen wurden. Der Durchschnitt für diesen Betrachtungszeitraum beträgt eine Zyklentiefe von 33% was anhand von Abbildung 6 einer zu erwartenden Zyklenzahl von 2400 Zyklen entspricht. Würde man diesen Zeitraum als Referenz für das ganze Jahr ansehen ergibt sich bei 1,55 Teilzyklen pro Tag eine Lebensdauer von 1543 Tagen. Dies entspricht einer Dauer von gut 4 Jahren was während einer Systemlebensdauer von 20 Jahren bedeutet,

dass der Energiespeicher mindestens viermal ausgetauscht werden müsste. Hinzu kommt, dass die Betrachtung dieser 9 Tage als Referenz für ein ganzes Jahr eine sehr hohe Unsicherheit mit sich bringt. Da die Belastung der Batterien abhängig von der Solarstrahlung ist und diese in dem gewählten Betrachtungszeitraum deutlich über dem Jahresmittel liegt ist zu erwarten, dass die tatsächliche Lebensdauer kürzer als 4 Jahre ist. Somit ist klar, dass die momentane Kapazität zu klein ist und im Hinblick auf das Erreichen einer vertretbaren Lebensdauer vergrößert werden muss.

4.4.2 Vergrößerung der Kapazität

Um einen Bezug zum System herzustellen kann die Größe des Energiespeichers auch anhand der Autonomiezeit gemessen werden. Diese Dauer beschreibt, wie lange das Gesamtsystem den alltäglichen Betrieb weiterführen kann, wenn keine Energie mehr von der Photovoltaikanlage kommt. Diese berechnet sich anhand der vorhandenen Nutzkapazität, dividiert durch den durchschnittlichen Tagesverbrauch:

$$12 \text{ kWh} * 0,6 / 14 \text{ kWh/d} = 0,51 \text{ d}$$

Es kann also nur die Energie, die während eines halben Tages verbraucht wird, zwischengespeichert werden. Das bedeutet, dass bei wechselndem Wetter bereits nach einem halben Tag die externe Energiequelle aushelfen muss und der Überschuss, der bei viel Sonneneinstrahlung entsteht, nur geringfügig in diese Perioden transportiert werden kann. Deswegen wurde eine Vergrößerung der Kapazität veranlasst, um mindestens einen Tag Autonomiezeit zu erreichen. Dabei sollte beachtet werden, dass die Kosten für eine Kapazitätsvergrößerung mehrmals während der gesamten Systemlebensdauer anfallen können. Im Gegenzug verringert diese jedoch auch die Zyklentiefe und verlängert damit die Lebensdauer. In welchem Maße eine Verdoppelung der Kapazität die Tiefe der Zyklen reduziert ist jedoch noch unklar.

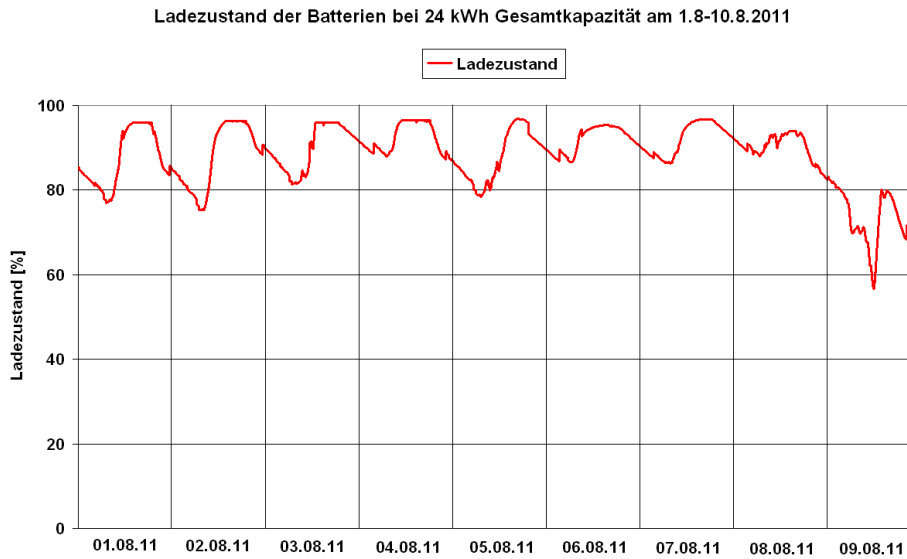


Abbildung 28: Ladezustand der Batterien bei 24 kWh Gesamtkapazität am 1.8-10.8.2011.

Durchschnittlich wurden 14 kWh pro Tag verbraucht. Am 6 und 7.8.2011 war Wochenende und der Verbrauch wurde aus Sicherheitsgründen auf ein Minimum von unter 3 kWh reduziert da die Anlage unbeaufsichtigt betrieben wurde. Es wurde das gleiche Lastprofil wie bei Abbildung 35 verwendet. Im Vergleich zur vorherigen Abbildung ist durch die Kapazitätsvergrößerung ein deutlicher Gewinn zu verzeichnen. Ein Teil dieses Gewinns ist sicherlich auf das günstigere Wetter zurückzuführen. Betrachtet man jedoch die Ladezustände die Nachts aufgezeichnet wurden, wo das Wetter keinen Einfluss mehr hat, so wird deutlich, dass die Halbierung der Zyklientiefe fast ausschließlich durch die Vergrößerung der Kapazität begründet werden kann.

4.4.3 Batteriepflege

Der Sunny Island 5048 besitzt verschiedene Funktionen zur Pflege des Energiespeichers.

Vollladung

Der Sunny Island lädt die Batterien spätestens alle 14 Tage, oder nach acht Nennladungsdurchsätzen, auf mindestens 95% der Nennkapazität. Dadurch werden Mangelerscheinungen wie Entmischung oder Sulfatierung entgegengewirkt und eine längere Lebensdauer erzeugt.

Ausgleichsladung

Da der Energiespeicher aus einem Verband von mehreren zusammengeschalteten Zellen besteht, können diese auseinanderdriften. Das Driften der Zellen beschreibt den Vorgang bei dem die Ladezustände von Einzelzellen mit der Zeit auseinanderlaufen. Es kann also vorkommen, dass obwohl der Ladezustand des gesamten Energiespeichers konstant bleibt, die Ladezustände der einzelnen Zellen sich nach oben und unten bewegen. Hebt sich diese Ladezustandsänderung im Mittel auf kann diese bei Nichtbeachten zur permanenten Überladung beziehungsweise nicht abgeschlossener Vollladung einzelner Zellen kommen. Durch die Voreinstellung wird nach spätestens 180 Tagen oder 30 Nennladungsdurchsätzen eine Ausgleichsladung durchgeführt.

Batterieschonbetrieb

Der 3-stufige Batterieschonbetrieb ermöglicht den Schutz vor Tiefentladung. Hierzu sind verschiedene Grenzen des SOC gesetzt um den Sunny Island auf Standbybetrieb umzuschalten. Die dritten Stufe sorgt dafür, dass sich bei unterschreiten eines Minimalwertes der Sunny Island selbst abschaltet.

Betrieb zu Zeiten geringer Einstrahlung

Wenn im Winter nur sehr wenig Energie durch die Photovoltaik-Anlage erzeugt wird, würden die Batterien mit dem im Sommer angewandtem Batteriemangement permanent auf 40% entladen. Falls das öffentlich Netz als alternative Energiequelle zur Verfügung steht sollte zumindest im Winter auf die Nutzung der Batterien verzichtet werden. Da Bleibatterien innerhalb von 4 Monaten einen Großteil der gespeicherten Energie verlieren sollte im Rahmen der Batteriepflege zu diesem Zeitraum mehrere Ausgleichsladungen sowie Vollladungen vollzogen werden.

Sollte ein Generator als externe Quelle dienen können die Batterien als Puffer benutzt werden um die Mengenunterschiede der benötigten und der produzierten Energie zwischenspeichern. Dazu können die Schwellwerte vom Benutzer folgendermaßen geändert werden:

- Zugriff auf externe Quelle ab 60% SOC
- Ladung des Speichers bis 95% SOC

Zusätzlich bietet der Sunny Island 5048 eine Funktion bei der die externe Quelle lastabhängig angefordert wird. Diese Funktion kann benutzt werden um Spitzenlasten wie Trockner, Herd, Spülmaschine oder Waschmaschine direkt über den Generator abzufangen.

4.5 Optimierter Anlagenzustand

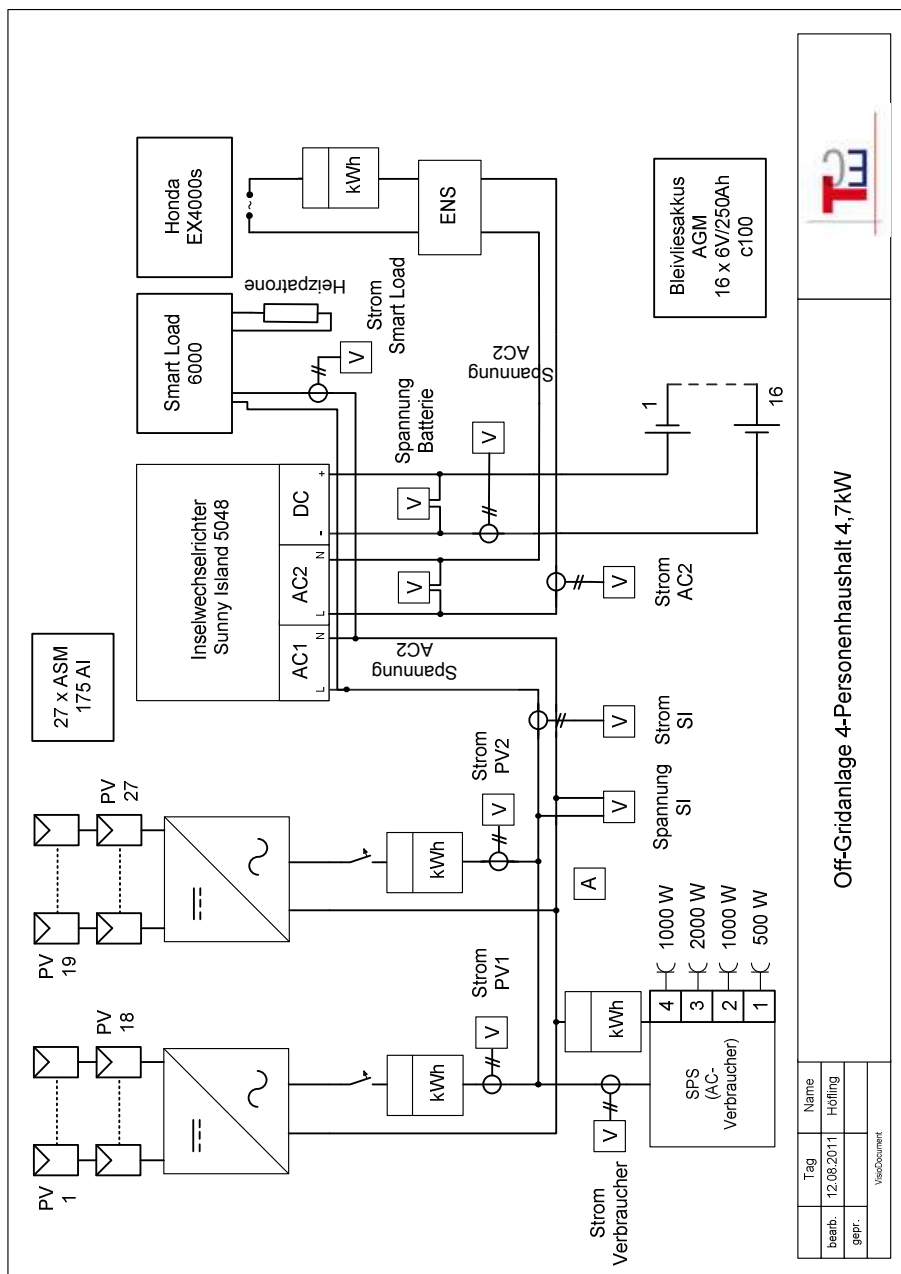


Abbildung 29: Schema des Endzustandes der Testanlage.

Es zeigt sich im Vergleich mit Abbildung 9 wie stark die Anlage gewachsen ist. Durch den Anschluss der Messtechnik können zusammen mit den Mes-

sungen vom Sunny Island alle relevanten Größen erfasst und gespeichert werden. Durch die Vergrößerung des Solargenerators um 1,7 kWp wird in einem Jahr bis zu 70% der benötigten Energie erzeugt. Davon können gut 60% selbst verbraucht werden, der Rest wird mit Hilfe des Smart Load 6000 dazu verwendet im Sommer das Brauchwasser zu erhitzen. Die letzte Optimierung galt der Vergrößerung der Kapazität des Energiespeichers wodurch die Zyklentiefe erfolgreich verringert und die zu erwartende Lebensdauer deutlich verlängert wurde. Die ablaufenden Prozesse werden wie schon zuvor in folgendem Prozessablaufplan verdeutlicht.

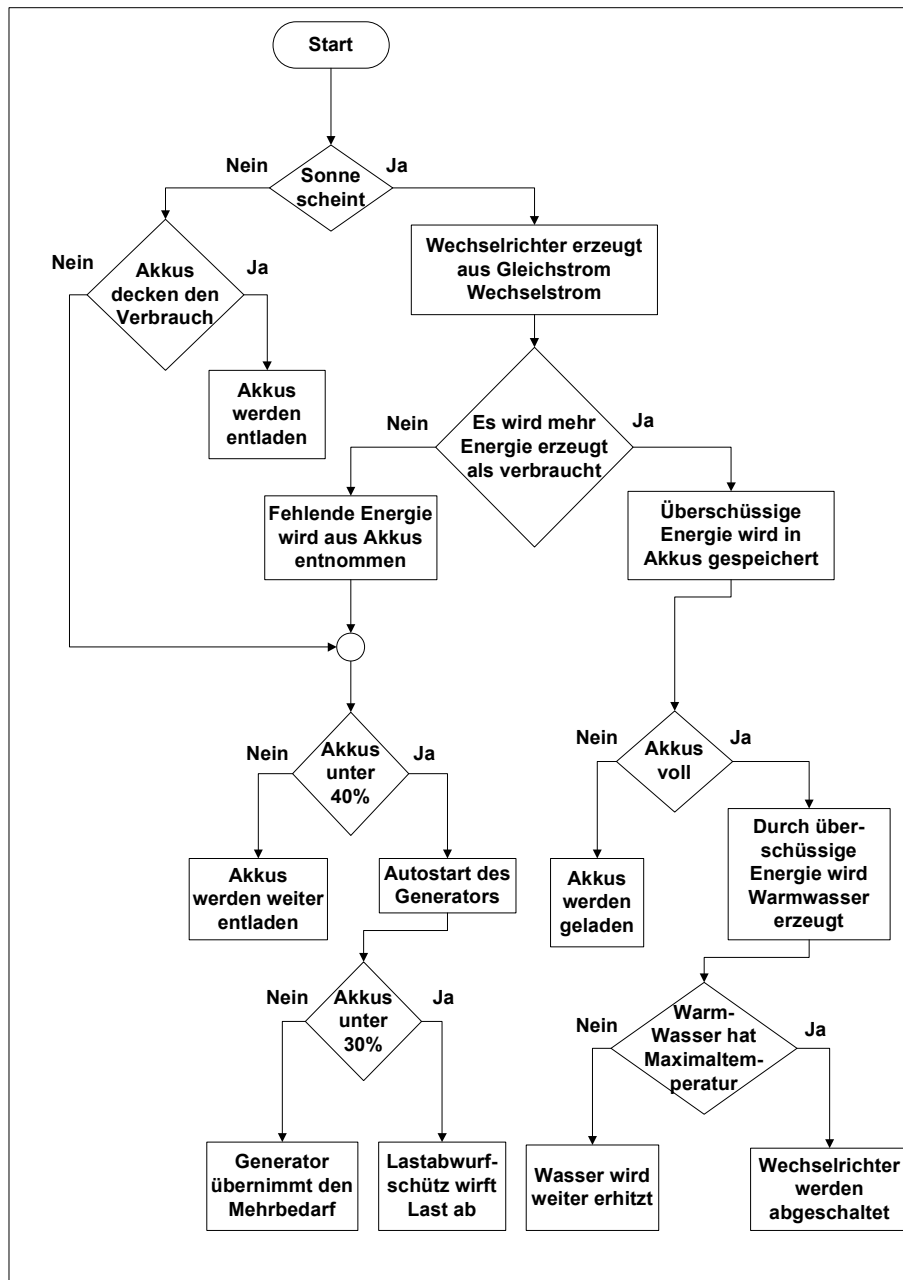


Abbildung 30: Prozessablaufplan des Endzustandes der Testanlage.

5 Sicherheit

Zum Thema Sicherheit sind in erster Linie die von den Herstellern aufgestellten Sicherheitshinweise zu beachten. Die wichtigsten werden nun gerätespezifisch erläutert. Bei Nichtbeachtung kann eine erhebliche Gefährdung von Personen und Geräten entstehen. Durch die hohen, partiell auftretenden Spannungen kann es nicht nur zur Beschädigung von Geräten sondern auch zu Personenschäden kommen. Der Verfasser empfiehlt demnach bei Benutzung ähnlicher Anlagen den Sicherheitshinweisen der Hersteller strengstens Folge zu leisten und die Handbücher gut zugänglich aufzubewahren.

5.1 Sicherheitshinweise allgemein

Da in den Sicherheitshinweisen einiger Geräte diese anhand der Schutzklassen spezifiziert werden folgt nun ein kurzer Überblick:

Schutzklasse 0

Bei Schutzklasse 0 besteht neben der Isolierung kein besonderer Schutz gegen das Berühren von elektrisch leitenden Komponenten. Ein Anschluss an den Schutzleiter ist nicht möglich. Die Schutzklasse 0 hat kein Symbol und ist zudem in Deutschland nicht zugelassen.

Schutzklasse 1

Bei Schutzklasse 1 müssen alle elektrisch leitfähigen Teile eines Gerätes die vom Benutzer bei bestimmungsgemäßem Gebrauch berührt werden können geerdet werden. Das heißt, dass diese über einen Schutzleiteranschluss an den Schutzleiter der vorhandenen Installation angeschlossen werden. Dies erfolgt beispielsweise über den oft verwendeten Schutzkontaktstecker. Bei einem Störfall wird dann der Leitungsschutzschalter beziehungsweise der Fehlerstrom-Schutzschalter (FI) ausgelöst und der betroffene Stromkreis wird spannungsfrei geschaltet. Für die Schutzklasse 1 selbst gibt es kein Symbol, allerdings wird im Zusammenhang mit dieser oft das Symbol für Schutzerdung angegeben:



Abbildung 31: Symbol für Schutzerdung.

Schutzklasse 2

Bei Geräten mit Schutzklasse 2 ist eine verstärkte oder doppelte Isolierung vorhanden. Diese werden nicht an den Schutzleiter angeschlossen da elektrisch leitende Gehäuseteile durch die doppelte Isolierung von spannungsführenden Teilen getrennt sind. Verwendet werden hier oft Konturenstecker, die Schutzkontaktstecker zwar ähnlich sehen, aber keinen Schutzkontakt besitzen, oder Eurostecker. Die Schutzklasse 2 wird mit diesem Symbol gekennzeichnet:



Abbildung 32: Symbol für Schutzklasse 2.

Schutzklasse 3

Geräte der Schutzklasse 3 verwenden die Schutzkleinspannung, welche kleiner oder gleich 50 V Wechselspannung beziehungsweise 120 V Gleichspannung ist. Zudem muss direktes Berühren durch eine Basisisolierung verhindert werden. Die Schutzklasse 3 wird oft mit SELV (Safety extra-low voltage) abgekürzt und besitzt folgendes Zeichen:



Abbildung 33: Symbol für Schutzklasse 3.

5.2 Sicherheitshinweise im Umgang mit Solarmodulen

Für den Bau einer Solaranlage, ob netzfern oder netzgebunden, ist die Norm für die Errichtung von Niederspannungsanlagen (Elektroanlagen bis 1000 Volt Wechselspannung) zu beachten. Besser bekannt als VDE 0100 oder auch ICE 60364 beschreibt diese Norm eine Vielzahl an sicherheitsrelevanten Themen rund um Schutz für Mensch und Material. Für Photovoltaikanlagen, die auf und an Gebäuden montiert sind gilt die DIN VDE 0100-712: 2006-06. Obwohl sich diese Norm ausschließlich mit netzgekoppelten Anlagen befasst kann der Großteil der Bestimmungen auf alle Photovoltaikanlagen angewendet werden. Die Rahmen der Solarmodule sowie deren Gestell sollte durchgängig leitend verbunden und geerdet sein. Zusätzlich müssen die örtlich geltenden Vorschriften für Erdung beachtet werden.

5.3 Sicherheitshinweise im Umgang mit Blei-Säure Akkumulatoren

Das größte Gefahrenpotential stellen in solaren Inselsystemen die Akkumulatoren da. Durch unsachgemäßen Gebrauch können folgende drei Gefahrenquellen entstehen:

- Austreten und Kontakt mit ätzender Schwefelsäure
- Bildung von explosiven Gas-/Luftgemischen
- Elektrischer Schlag und thermische Belastung durch Kurzschlüsse

Räume in denen Akkumulatoren betrieben werden müssen von außen deutlich als solche gekennzeichnet werden. Das Rauchen muss durch ein Verbotsschild untersagt werden. Selbiges gilt für die Arbeit mit offener Flamme.

5.4 Sicherheitshinweise von SMA

- Alle Arbeiten an SMA Komponenten dürfen ausschließlich von ausgebildeten Elektrofachkräften getätigt werden.
- Arbeiten an SMA Komponenten dürfen nur wie in den Betriebsanleitungen beschrieben durchgeführt werden.
- Die vor Ort geltenden Normen und Richtlinien für Installation und Erdung sollen berücksichtigt werden.
- Es gilt alle aufgeführten Sicherheitshinweise zu beachten.
- Vor dem Berühren von Bauteilen sollte man sich erden, um Schäden durch elektrostatische Aufladung vorzubeugen.
- Der Montageort sollte die von SMA geforderten Sicherheitsabstände zu anderen Geräten erfüllen damit eine optimale Abführung der Prozesswärme gewährleistet werden kann.
- Während des Betriebs können die oberen Gehäusedeckel aller SMA-Geräte mit passiver Kühlung heiß werden.

5.4.1 Spezielle Hinweise für den Sunny Boy

Sicherheitshinweise für den Betrieb

- Aufgrund von möglichen Gesundheitsschäden durch Einwirkung von Strahlung sollte man sich nicht dauerhaft in einem Abstand von weniger als 20 cm vom Wechselrichter aufhalten. [SBo11]

Sicherheitshinweise für die Montage

- Bei der Montage ist es wichtig das Gewicht des Sunny Boy von 25 kg zu beachten.
- Der Wechselrichter darf weder auf brennbaren Baustoffen noch in Bereichen mit leicht entflammaren Stoffen montiert werden. [SBo11]

5.4.2 Spezielle Hinweise für Sunny Island 5048

Sicherheitshinweise für den Betrieb

- In einem System dürfen nur Sunny Islands vom selben Typ verwendet werden.
- Es dürfen niemals unterschiedliche Spannungstypen parallel betrieben werden.
- Der Sunny Island ist nur für Höhen unter 3000m über Normal Null ausgelegt. Bei Einsatz über 3000m Normal Null sollte man vorher SMA kontaktieren.
- Bei Betrieb von über 2000m über Normal Null ist mit einer LeistungseinbuÙe von 0,5% pro 100m zu rechnen.
- Der Sunny Island hat ohne SD-Karte Schutzart IP30 und mit SD-Karte Schutzart IP40 und darf somit nur in geschlossenen Räumen verwendet werden.
- Der Sunny Island darf weder Regen, Feuchtigkeit noch direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt werden. [SIs11]

Sicherheitshinweise für die Montage

- Bei der Montage ist es wichtig das Gewicht des Sunny Island von 63 kg zu beachten.
- Die Montage muss senkrecht oder um maximal 45° nach hinten geneigt erfolgen.
- Die Montage darf weder liegend noch nach vorne geneigt erfolgen.
- Die Umgebungstemperatur sollte Zwischen -25°C und +50°C liegen. [SIs11]

5.4.3 Spezielle Hinweise für Smart Load

Sicherheitshinweise für den Betrieb

- Die angeschlossenen Widerstände müssen einen Widerstandswert von 19 – 26 Ohm aufweisen.
- Falls der Widerstand oberhalb des erlaubten Bereiches liegt kann nicht die volle Leistung umgesetzt werden.
- Die Unterschreitung des genannten Bereiches kann nur Zerstörung der Smart Load führen. [SLo11]

Sicherheitshinweise für die Montage

- Der Smart Load darf weder auf brennbaren Baustoffen noch in Bereichen mit leicht entflammaren Stoffen montiert werden.
- Bei dem Anschluss des Smart Load muss das Inselnetz-System freigeschaltet werden und die Spannungsfreiheit sichergestellt sein. [SLo11]

6 Kosten und Wirtschaftlichkeit

Bei Solaranlagen die Leistungen im Kilowattbereich erzeugen sollen werden auch dementsprechend hohe Kapitalinvestitionen benötigt. Bei Inselanlagen kommt zusätzlich noch der Kostenfaktor des Energiespeichers hinzu. Ob Inselanlagen aus wirtschaftlicher Sicht mit konventionellen Systemen mithalten können soll nun genauer untersucht werden. Es sollen nun zwei Lösungen zu den zwei vorgestellten Anlagenkonzepten verglichen werden. Bei dem netzgebundenen Anlagenkonzept soll eine herkömmliche Versorgung ausschließlich über das öffentliche Netz mit einer Versorgung, die durch Solarenergie unterstützt, wird verglichen werden. Falls dieser Bedarf teilweise mit Solarenergie gedeckt wird gelten die aktuellen Vergütungstarife für das Jahr 2011.

6.1 Kostenaufstellung für das netzgebundene Anlagenkonzept

	Öffentliches Netz	Inselanlage
Eigenerzeugung	0 kWh	4418 kWh
Strombedarf	5000 kWh	1632 kWh
Einspeisung	0 kWh	1050 kWh
Eigenverbrauch	0 kWh	3368 kWh

Tabelle 2: Vergleich der Energiemengen, die bei den netzgebundenen Anlagen verbraucht und erzeugt werden.

Um die Ertragsdefizite im Winter auszugleichen entsteht bei der Inselanlage ein Stromverbrauch von 1632 kWh der durch das öffentliche Netz gedeckt wird. Im Gegenzug können jedoch 1050 kWh, die im Sommer als Überschuss entstehen, in das Netz eingespeist werden. Es wird hier von dem Idealfall ausgegangen, dass nur sehr wenig Verlustenergie entsteht. Falls der Verbraucher jedoch die Hauptlast früh morgens oder am Nachmittag benötigt steigt die Nutzung des Energiespeichers und dadurch auch die Höhe der Verlustenergie. In diesem Fall müssten die angenommenen Werte dahingehend korrigiert werden, dass weniger Energie selbst verbraucht werden kann und der externe Strombedarf deswegen steigt.

	Inselanlage 1	Inselanlage 2
Erstinvestition	21.000 €	20.200 €
Batteriewechsel 1	5.000 €	4.300 €
Wechselrichterausfall	2.300 €	2.000 €
Batteriewechsel 2	4.800 €	4.000 €

Tabelle 3: Kostenaufstellung für zwei identische Inselanlagen.

Die Kosten für Inselanlage 1 sind höher da die Komponenten einem geringeren Preisverfall (5% bei Inselanlage 1 und knapp 10% bei Inselanlage 2) unterliegen und mit Preisen aus dem Mittelfeld gerechnet wurde. Die Batteriewechsel erfolgen bei beiden Anlagen nach 8 und 16 Jahren. Obwohl das Lebensdauerende der AGM Solar Blocks nach etwa 6-7 Jahren erreicht ist können diese noch weiterverwendet werden. Der Begriff Lebensdauer beschreibt hier nicht den Zeitraum bis zum Ausfall sondern gibt an nach wie viel Jahren nur noch 80% der Anfangskapazität vorhanden ist. Zusätzlich ist bei Anlage 1 nach 10 Jahren einer der beiden Wechselrichter ausgefallen. Bei Anlage 2 vergehen 12 Jahre bis zum Ausfall. Für beide Anlagen wurde eine Pauschale von 50 Euro pro Jahr für Wartung und Instandhaltung veranschlagt.

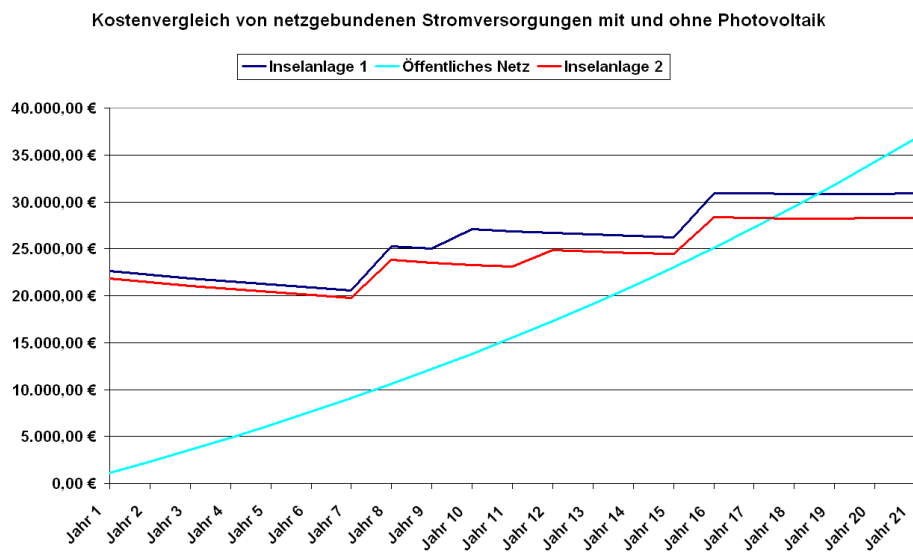


Abbildung 34: Kostenvergleich von netzgebundenen Stromversorgungen mit und ohne Photovoltaik.

Die Strompreiserhöhung beträgt 4% pro Jahr was aus den Statistiken der Europäischen Kommission eurostat entnommen wurde. Der gewählte Be-

trachtungszeitraum von 21 Jahren wurde gewählt da eine Vergütung von erneuerbaren Energien über 20 Jahre plus des Rests des Jahres der Inbetriebnahme erfolgt. Die errechneten Jahreskosten beziehen sich auf die Abrechnung über den Zeitraum des vergangenen Jahres. Es zeigt sich, dass den extrem hohen Anschaffungskosten die Einnahmen aus Eigenverbrauch und Einspeisung entgegenwirken. Jedoch kommt es durch den Austausch von Batterien und Wechselrichter erst nach 17-18 Jahren zu einem Kostenvorteil gegenüber dem öffentlichen Netz. Nach 21 Jahren beträgt der Kostenvorteil von Anlage 1 knapp 6000.- Euro und knapp 8500.- Euro für Anlage 2. Doch abgesehen von den finanziellen Ersparnissen gibt es noch mehr was für die Anschaffung einer Photovoltaik-Inselanlage spricht. Es entsteht eine gewisse Unabhängigkeit vom öffentlichen Netz und eventuelle Netzausfälle können je nach Jahreszeit einige Stunden bis zu mehreren Tagen von der Inselanlage überbrückt werden. Ein weiteres Argument für die Photovoltaik ist der Umweltschutz. Durch eine hohe Wiederverwertbarkeit aller Komponenten und den emissionslosen Betrieb zählen Photovoltaik-Inselanlagen zu den saubersten Energieerzeugern die es gibt. Zusätzlich wird durch die Deckung des Zeitraumes der Energieerzeugung mit dem Betriebszeitpunkt von Spitzenlastkraftwerken die Spitzenlast gesenkt und die Laufzeiten der emissionsstärksten Kraftwerke verkürzt.

6.2 Kostenaufstellung für das netzferne Anlagenkonzept

Im Rahmen des netzfernen Anlagenkonzeptes soll eine Hybridanlage bestehend aus einer Photovoltaik-Inselanlage und einem Generator mit einer Versorgung, die ausschließlich mit einem Generator realisiert wurde verglichen werden.

Für einen aussagekräftigen Vergleich wurde ein Dieselsystem bei der Firma Wenzl Hruby KB angefordert um die vorliegende Aufgabe zu lösen. Das angeforderte System besteht aus dem Dieselgenerator Kubota 7000 DA silence, einem Ladegerät mit integrierter Sinus Wandler sowie einer Batteriebank bestehend aus 24 hochwertigen Bleibatterien der Firma Hoppecke mit einer Gesamtkapazität von 28,8 kWh. Die Batterien werden benötigt um auch kleine Verbraucher effizient versorgen zu können. Der Generator müsste sonst 24 Stunden am Tag laufen um auch nachts die Grundlast bereitzustellen. Da Generatoren im Teillastbereich extrem geringe Wirkungsgrade besitzen und diese Art der Betriebsführung zu noch höheren Wartungs- und Treibstoffkosten führen würde, wurde zu einer Zwischenspeicherung mit Hilfe von Akkumulatoren geraten. Damit wird die Laufzeit auf 3-4 Stunden täglich verkürzt wodurch die Lebensdauer des Dieselgenerators steigt und die Systemeffizienz erhöht wird. Zusätzlich wird ein externer Tank sowie ein Schaltschrank mit Kabelsatz benötigt.

	Dieselsystem	Inselanlage
Generatorenergie	5500 kWh	1958 kWh
Solarenergie	0 kWh	4418 kWh
Eigenverbrauch	0 kWh	3368 kWh
Überschuss	0 kWh	1050 kWh

Tabelle 4: Vergleich der Energiemengen die bei netzfernen Anlagen erzeugt und verbraucht werden.

Bei der Nutzung eines Generators wird aufgrund der hohen Leistung im Regelfall nicht die ganze Energie sofort verbraucht. Da die Speicherung bei beiden Systemen mit Bleiakkumulatoren erfolgt und diese mit einem angenommenen Ladewirkungsgrad von 0,8 sofort 20% der Energie vernichten, wird im Dieselsystem bei Generatornutzung 10% mehr Energie benötigt und im Inselsystem 20%. Das liegt daran, dass der Dieseldgenerator zum Abfangen der Spitzenlasten benutzt wird. Dieser schaltet ab einem Energiebedarf von 3000 W mit einer Dauerleistung von 4500 W ein wodurch zwei Drittel der Energie sofort verbraucht wird und nur ein Drittel Verluste erzeugen kann. Bei der Inselanlage dagegen wurde beobachtet, dass der Einschaltzeitpunkt stets zwischen 2:00 und 9:00 lag. Zu dieser Zeit gibt es in einem Haushalt im Regelfall nur einen Bedarf von mehreren 100 W weswegen von den 3500 W Dauerleistung des Gasgenerators noch über 3000 W übrig bleiben um die Batterien zu laden. Die erzeugten Verluste sind bei Generatornutzung im Inselsystem zwar prozentual höher, aufgrund der permanenten Nutzung des Generators im Dieselsystem ist die verlorene Energiemenge hier jedoch am größten.

Dieselsystem	Kosten
Kubota 7000 DE silence	6.895,00 €
Ladegerät mit integriertem Sinus Wandler	4.967,00 €
24 x OpzV	7.930,00 €
Schaltschrank mit Kabelsatz	863,00 €
1000 l externer Tank	500,00 €
Montage	800,00 €
Gesamtkosten	21.955,00 €

Tabelle 5: Kosten der Einzelkomponenten des Dieselsystems.

Inselanlage	Kosten
PV-Module inkl. Wechselrichter und Montage	11.500,00 €
Smart Load	1.700,00 €
Heizpatrone	200,00 €
Sunny Island	3.200,00 €
16 x Solar Bloc	4.640,00 €
Honda EX4000s Mit Gasumbau	5.150,00 €
ENS	300,00 €
Montage	800,00 €
Sicherungsschrank	400,00 €
Gesamtkosten	27.890,00 €

Tabelle 6: Kosten der Einzelkomponenten der Inselanlage.

	Dieselsystem	Inselanlage
Wartungskosten	120,00 €	80,00 €
Kraftstoffbedarf	2811 l	924 l
Kraftstoffkosten	3.766,00 €	573,00 €
Gesamtkosten	3.886,00 €	653,00 €

Tabelle 7: Laufende jährliche Kosten im ersten Betriebsjahr.

Bei einer Dauerleistung von 4500 W braucht der Dieselgenerator 1222 Stunden jährlich um die geforderte Energiemenge von 5500 kWh bereitzustellen. Bei einem Verbrauch von 2,3 l/h entspricht das 2811 l Diesel jährlich. Der Preis von 134 €/100l wurde am 15.08.2011 auf der Homepage www.heizoel24.de angefragt und entspricht einer Abnahmemenge von 1000 l, Lieferung nach Waldaschaff sowie Mehrwertsteuer inklusive.

Der auf Gas umgebaute Honda EX4000s benötigt bei einer Dauerleistung von 3500 W einen Zeitraum von 560 Stunden um die geforderte Energie von 1958 kWh zu erzeugen. Bei dem angenommenen Verbrauch von 1,65 l/h benötigt dieser 924 l Flüssiggas jährlich. Dieses kann zu einem Literpreis von 0,62 €/l von der Firma Linde Gas nach Waldaschaff geliefert werden. Geliefert werden 79 l-Flaschen zu einem Preis von 49 € inklusive Transport und Mehrwertsteuer.

Die Wartungskosten bestehen aus den Kosten für Ölwechsel, Filterreinigung beziehungsweise Filteraustausch und bei dem Gasgenerator zusätzlich der

Zündkerzenwechsel. Aufgrund der doppelten Laufzeit fallen für den Dieselgenerator geringfügig höhere Wartungskosten an.

Kostenvergleich von netzfernen Stromversorgungen mit und ohne Photovoltaik

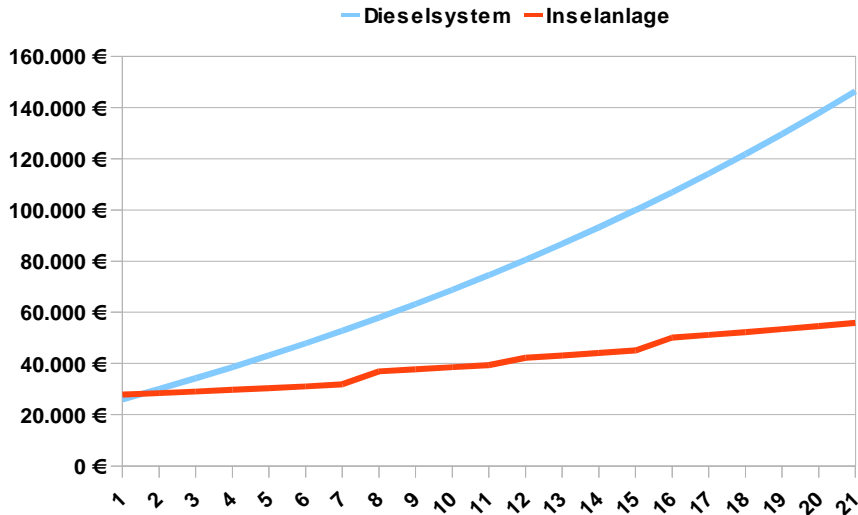


Abbildung 35: Kostenvergleich von netzfernen Stromversorgungen mit und ohne Photovoltaik.

Für die Erhöhung der Kraftstoffkosten wurde wie vorher bei Strom ein jährlicher Preisanstieg von 4% angenommen. Obwohl für diese Erhöhung keine konkreten Referenzen gefunden werden konnten erscheint eine Steigerung von nur 4% als sehr optimistisch. Trotzdem liegt zwischen den Betriebskosten der beiden Anlagen der Faktor 6. Der Austausch der Batterien sowie der Ausfall eines Wechselrichters bei der Inselanlage erfolgt analog zur netzgebundenen Variante. Beide Generatoren nähern sich nach dem Betrachtungszeitraum von 21 Jahren ihrem Lebensdauerende. Zu Gunsten des Dieselsystems wird angenommen, dass keine der Komponenten ausgetauscht werden muss.

Obwohl die getroffenen Annahmen das Dieselsystem weitaus stärker begünstigen als die Inselanlage werden die um 5000 € höheren Anschaffungskosten der Solaranlage schnell von den Gesamtkosten des Dieselsystems überholt. Aufgrund der weitaus größeren laufenden Kosten des Dieselsystems ergibt sich nach dem Betrachtungszeitraum von 21 Jahren ein Kostenvorteil von gut 90.000.- €.

Es hat sich gezeigt, dass die Photovoltaik, auch ohne staatliche Förderung, mit anderen Energieerzeugern konkurrieren kann. Besonders im Bereich der netzfernen Energieversorgung bietet sie aufgrund der geringen Betriebskosten ein hohes Maß an Wirtschaftlichkeit. Auch in Ländern in denen aufgrund

der niedrigen Kraftstoffpreise noch immer reine Generatorsysteme betrieben werden können Photovoltaik-Inselanlagen durch staatliche Förderung eine saubere und kostengünstige Alternative darstellen.

7 Alternative Methoden zur Erzeugung von elektrischer Energie in Inselfsystemen

7.1 Wärme-Kraft Maschinen

Die wohl am häufigsten angewendete Methode zur Erzeugung elektrischer Energie fernab einer Netzanbindung ist der Generator. Egal ob mit Diesel, Heizöl oder Gas, die Energiegewinnung erfolgt immer gleich. Durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern wird chemische Energie in mechanische Energie umgewandelt. Die mechanische Energie wird dann mit dem elektrischen Generator in elektrische Energie umgewandelt und dem Verbraucher in der für ihn passenden Form zur Verfügung gestellt. Diese ausgereifte Technologie bietet günstige und robuste Lösungen innerhalb eines Leistungsbereiches von 1kW bis hin zu weit über 100 kW. Je nach Bauart und Zusatzkomponenten sind die einfachsten Dieselgeneratoren schon ab 400 € pro kW zu erwerben. Doch hohe Wartungs- und Kraftstoffkosten treiben die Gesamtkosten schnell in die Höhe. Die Lebensdauer von solchen Generatoren liegt bei schlechter Wartung zwischen 2-4 Jahren.

7.2 Windkraft

Das vorliegende Inselfsystem kann sehr einfach mit einer Windkraftanlage erweitert werden. Die Anbindung erfolgt über einen Windy Boy von SMA. So können Windkraftanlagen verschiedenster Hersteller und Leistungen an das System gekoppelt werden wodurch eine noch höhere Deckungsrate durch die erneuerbaren Energien erreicht werden kann. Sonne und Wind ergänzen sich sehr gut, da die ertragsreichsten Monate der Windkraftanlage die Wintermonate sind in denen der Ertrag der Photovoltaikanlage am geringsten ist. Windkraftanlagen wandeln mit Hilfe eines Rotors die Strömungsenergie der bewegten Luft in mechanische Energie um. Diese wird anschließend mit einem Generator in elektrische Energie in Form von Gleichstrom gewandelt. Je nach Orientierung der Achse wird zwischen Horizontal- und Vertikalachsen unterschieden. Die sehr günstigen Stromgestehungskosten von 0,15 Euro pro kWh sowie der Zeitraum Winter als ertragsreichste Zeit machen Windkraftanlagen zu einer idealen Ergänzung für Solaranlagen. [Lew10]

7.3 Wasserkraft

Das Funktionsprinzip einer Wasserkraftanlage ist dem der Windkraft gleichzusetzen, es wird lediglich das strömende Medium Wind durch Wasser ausgetauscht. Moderne Turbinen haben aufgrund hoher Wirkungsgrade von über 90% die altbekannten Wasserräder abgelöst. Dem hohen Wirkungsgrad und der hohen Anzahl an Volllaststunden wirken die ebenso hohen Kosten entgegen. Bei einer Neuinstallation kann grob mit 10000€/kW gerechnet werden. Hinzu kommt, dass schon bei einfachen Wasserrädern Leistungen von 10-40 kW zustande kommen. Deswegen sind Wasserkraftanlagen als

Unterstützung für eine Photovoltaik-Anlage nur im Kleinstbereich und in Ausnahmefällen als sinnvoll anzusehen. [Lew10]

8 Zusammenfassung und Ausblick

Schon viele Jahre lang werden Photovoltaik-Insulanlagen weltweit in verschiedensten Energieversorgungskonzepten eingesetzt. Messeinrichtungen für die Wetter- und Umweltbeobachtung, Telekommunikationseinrichtungen, Parkausweisautomaten sowie die Versorgung von Ferienhäusern, Berghütten und abgelegenen Gastronomiebetrieben sind nur ein paar Beispiele für den großen Einsatzbereich der Photovoltaik in netzfernen Anwendungen. Doch auch im Bereich der netzgebundenen Energieversorgung zeigt sie Chancen und Alternativen auf um zukünftige Probleme zu lösen. Im Hinblick auf die Abschaltung der Atomkraftwerke in Deutschland bis zum Jahr 2020 entsteht ein noch nie dagewesener Energiebedarf. Dieser sollte jedoch nicht durch den Bau von weiteren Braunkohlekraftwerken gedeckt werden sondern durch einen Mix aus regenerativen Energien. Da der Zubau von Photovoltaikanlagen die in das öffentliche Netz einspeisen jedoch schon heute zu Problemen bei der Verteilung und Verwendung der großen Energiemengen besonders zu Mittagszeit führt sind Insulanlagen in Privathaushalten eine guter Lösungsansatz. Durch die dezentralisierte Energieerzeugung werden die öffentlichen Netze entlastet und die Betriebszeiten von Spitzenlastkraftwerken reduziert. Die Berechnungen haben gezeigt, dass schon heute eine Deckung von über 60% des eigenen Energiebedarfes möglich ist. Zwar lohnt sich die Anschaffung einer Photovoltaik-Insulanlage erst nach 17-18 Jahren doch sinkt die Amortisationsdauer mit steigenden Energiepreisen und sinkenden Kosten für Speichersysteme enorm. Dabei gilt es zu beachten, dass die Vergütung des Eigenverbrauchs vorerst nur für Anlagen gilt die vor dem 1.1.2012 an das Netz gehen, was hoffentlich bald wieder abgeändert wird. Die Energiewende in Deutschland ist da und kann im Hinblick auf eine nachhaltige und umweltschonende Energiepolitik nur mit Hilfe der regenerativen Energien vollzogen werden. Welche Rolle dabei die Photovoltaik spielen wird bleibt jedoch abzuwarten.

9 Literaturverzeichnis

- [BDE07] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft BDEW : Struktur des Stromverbrauchs im Haushalt 2007. Stand 2007.
<http://www.kwh-preis.de/strom/stromverbrauch>
(abgerufen am 4.August 2011)[Qua06] Quaschnig, Volker : *Regenerative Energiesysteme*. Berlin : Hanser, 2006
- [Bop10] Bopp, Georg; Kaiser, Rudi : *Batterien in netzfernen Stromversorgungsanlagen*. In : Netzferne Stromversorgung mit Photovoltaik 06./07.Oktober 2010. OTTI (2010), S. 33-89[Had07] Hadamovsky, Hans-Friedrich; Jonas, Dieter : *Solarstrom Solarthermie*. Kleinmachnow, Teltow : Vogel, 2007
- [EEG11] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit : *Erfahrungsbericht zum Erneuerbare-Energien-Gesetz*. Stand 2011.
<http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/47476/> (abgerufen am 29.Juni 2011).
- [Has10] Haselhuhn, Ralf : *Photovoltaische Anlagen*. Berlin : DGS, 2010
- [Häb10] Häberlin, Heinrich : *Photovoltaik – Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen*. Fehrltorf : Electrosuisse Verlag, 2010
- [Kal06] Kalab, Otto : *Standardisierte Lastprofile*. Stand 2006.
http://portal.wko.at/wk/format_detail.wk?AngID=1&StID=292071&DstID=0 (abgerufen am 3.August 2011).
- [Lew10] Lewald, Norbert : *Dezentrale Stromversorgung Generatoren mit rotierenden Maschinen Brennstoffzellen*. In : Netzferne Stromversorgung mit Photovoltaik 06./07.Oktober 2010. OTTI (2010), S. 371-416
- [SBo11] *Sunny Boy 3000 TL – Installationsanleitung*. Dokumentennummer SB30TL_40TL_50TL-IDE103630, Versionsnummer: 3.0, Stand 2011.
http://files.sma.de/dl/5692/SB30TL_40TL_50TL-IDE103630.pdf (abgerufen am 12.August 2011).

- [SIs11] *Sunny Island 5048 – Technische Beschreibung*. Dokumentennummer: SI5048-TB-TDE110340, Versionsnummer: 4.0, Stand 2011. <http://files.sma.de/dl/5612/SI5048-TB-TDE110340.pdf> (abgerufen am 19.Juli 2011).
- [SLo11] *Smart Load 6000 – Technische Beschreibung*. Dokumentennummer: SL6000-TDE081820, Versionsnummer: 2.0, Stand 2011. <http://files.sma.de/dl/4439/SL6000-TDE081820.pdf> (abgerufen am 12.August 2011).
- [Sol11] *solar.bloc Verschlossenen Bleibatterie für zyklische Anwendungen. - Datenblatt*. Stand 2011. <http://www.hoppecke.com/content/view/full/1213> (abgerufen am 8.August 2011)

Anhang A

Sunny Island 5048	
Ausgangsgrößen	230 V (202...253 V)
AC-Nennspannung	45...65 Hz
Nennfrequenz	5000 W
AC-Dauerleistung bei 25 °C	4000 W
AC-Dauerleistung bei 45 °C	6500 W
AC-Dauerleistung bei 25 °C(30 Minuten)	8400 W
AC-Dauerleistung bei 25 °C(1 Minuten)	12000 W
AC-Dauerleistung bei 25 °C(3 Sekunden)	
Eingangsgrößen	
Eingangsspannung	230 V (172,5...264,5 V)
Frequenz	50 Hz (40...70 Hz)
Maximaler AC-Strom	56 A (0...56 A)
Maximale Eingangsleistung	12800 W
Batteriedaten	
Batteriespannung	48 V (41...63V)
Maximaler Ladestrom	120 A
Dauerladestrom	100 A
Batteriekapazität	100...10000 Ah
Batterityp	VRLA/FLA/NiCd

Tabelle 8: Zusammenfassung der wichtigsten Daten des Sunny Island 5048.

Sunny Boy 3000 TL	
DC-Eingang	
Maximale DC-Leistung	3200 W
Maximale DC-Spannung	550 V
MPP-Bereich	188 V...440 V
Maximaler Eingangsstrom	17 A
Anzahl MPP-Tracker	1
Strings pro MPP-Tracker	2
AC-Ausgang	
AC-Nennleistung	3000 W
Maximaler AC-Strom	16 A
AC-Spannungsbereich	180 V...280 V
AC-Frequenz	50 Hz / 60 Hz
Allgemein	
Eigenverbrauch Nachtbetrieb	< 0,5 W
Gewicht	22 kg
Schutzart Elektronik	IP65
Umgebungstemperatur	- 25....+ 60 °C

Tabelle 9: Zusammenfassung der wichtigsten Daten des Sunny Boy 3000 TL.

Smart Load 6000	
AC-Eingang	
Eingangsspannung	230 V / 3 x 230 V
Frequenz	45...55 Hz / 55...65 Hz
Eingangsspannungsbereich	3 x 180...270 V
DC-Ausgang	
Ausgangsspannung	3 x 0...230 V
Ausgangsleistung	3 x 0...2 kW
Allgemein	
Gewicht	14 kG
Schutzklasse	IP65
Umgebungstemperatur	- 25....+ 50 °C

Tabelle 10: Zusammenfassung der wichtigsten Daten der Smart Load 6000.

AS M 175 AI	
Nennleistung +/- 3%	175 Wp
Leerlaufspannung	43,8 V
Nennspannung	35,8 V
Nennstrom	4,91 A
Allgemein	
Zellenanzahl	72
Gewicht	15 kg
Bypass-Dioden	3
Leistungsgarantie	90% (10 Jahre)
Leistungsgarantie	80% (30 Jahre)

Tabelle 11: Zusammenfassung der wichtigsten Daten des AS M 175 AI.

Anhang B