



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Machbarkeitsstudie und Optimierung von SHSs in Bolivien

Bachelorarbeit

Ramin Mir-Montazeri
Geboren am 05.03.1985

Abgabedatum 31.07.2012

1. Gutachter: Prof. Dr. Timon Kampschulte
2. Gutachter: Dipl.-Phys. Reinhard Mayer Falk

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen.....	ii
1 Einleitung	1
1.1 Photovoltaik in Bolivien	1
1.2 Ziel und Fragestellung dieser Bachelorarbeit	1
2 Grundlagen- Akkumulatoren	3
2.1 Blei-Akku.....	5
2.1.1 Starterbatterie.....	7
2.1.2 Solarbatterie auf Flüssigsäurebasis	8
2.1.3 Gel-Batterie für die Solare Anwendung	9
2.2 Nickel-Cadmium- und Nickelmetallhydrid-Akku.....	11
2.3 Lithiumionen-Akku	11
3 Aufbau und Problematik der klassischen Systeme	12
4 Solare Einstrahlung in Bolivien.....	14
5 Pico-Systeme	14
5.1 Die <i>Pico-Lampe</i>	14
5.2 Ladekennlinie des 3-W Panels in Verbindung mit einer <i>Pico-Lampe</i>	16
5.3 Preiskalkulation für die Pico-Systeme.....	17
5.4 Dimensionierung des Verbrauchs	19
6 Simulation mit <i>Homer</i>	21
6.1 Simulierung mit einer <i>Pico-Lampe</i>	21
6.2 Simulation mit <i>Homer</i> bei einem höheren Energieverbrauch.....	25
6.2.1 <i>Pico-Lampe</i>	26
6.2.2 Simulation der Kosten für Systeme mit Blei-Akkumulatoren.....	28
6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse aus <i>Homer</i>	36
7 Fazit.....	36
Zusammenfassung	iv
Literaturverzeichnis	vi

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

a	Annuitätsfaktor
A	Ampere
AGM	Absorbent Glas Mate
Ah	Ampere Stunde
Akku	Akkumulator
As	Einsparungen
$C_{ann, tot}$	total annualized cost
CFL	Compact fluorescent lamp
cm^3	Kubikzentimeter
C_n	Benötigte Kapazität
E	täglicher Stromverbrauch
E prim, DC	DC primary Load served
f	Jährliche Inflationsrate
FF	Füllfaktor
g	Gramm
I	Stromstärke
i	real interest rate
i^e	Nominal interest rate
I_{sc}	Kurzschlussstrom
K_0	Kapital zum Zeitpunkt 0
K_a	Gesamtkosten pro Jahr
K_{ges}	Gesamtkosten
km^2	Quadratkilometer
$K_{Schräg}$	Korrekturfaktor für die Schräge des Moduls: 1,1 (Fakl,2012)
K_{Temp}	Korrekturfaktor für die Temperaturverluste
LED	lichtemittierende Diode
Levelized COE	Levelized Cost of Energy
LKW	Lastkraftwagen
lm	Lumen
MPP	Maximal Power Point
n	Projektlebensdauer
Na	Autonomietage
N_{Sonne}	Sonnen-Volllaststunden
p	Zinssatz
P	Leistung
P_{mpp}	Power maximal power point
SHS	Solar Home System

t	Zeit
tz	Entladetiefe
U_n	Nennspannung
U_{oc}	Leerlaufspannung
V	Volt
$V_{Anpassung}$	Anpassungsverluste
VRLA	valve-regulated lead-acid
$V_{Umwandlung}$	Umwandlungsverlustfaktor
W	Watt
W_p	Watt Peak
Z	Rückzahlungen per Anno
n_{vz}	Vollzyklen-Lebensdauer
n_v	Zyklenlebensdauer

1 Einleitung

1.1 Photovoltaik in Bolivien

Die Photovoltaik gewinnt für die Sicherstellung einer nachhaltigen Energieversorgung in den unterschiedlichsten Ländern weltweit mit 20 bis 40% Wachstum jährlich immer mehr an Bedeutung. (Quaschnig, 2011, S. 39). Zwar fallen rund 80% der installierten Photovoltaik-Leistung auf lediglich fünf Länder, jedoch „hat die Photovoltaik mit stetig fallenden Kosten und fortgesetzten hohen Wachstumsraten mittelfristig das Potenzial, eine der wichtigsten Säulen der weltweiten Energieversorgung zu werden“ (Quaschnig, 2011, S. 39). Weltweit leben über drei Milliarden Menschen ohne Zugang zum öffentlichen Stromnetz (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2011, S. 327) und oft lohnt es sich wirtschaftlich nicht, in entlegenen Orten das Stromnetz zu erweitern, da der Verbrauch nicht so groß ist und die Häuser weit verstreut liegen.

Autarke Systeme werden überwiegend dort installiert, wo es kein Stromnetz gibt oder eine Netzerweiterung zu kostenaufwendig wäre. Im Gegensatz zu Europa, gibt es in vielen Entwicklungsländern großflächige und abgelegene Orte ohne Stromnetz. Besonders in einigen dieser großflächigen Ländern werden abgelegene Orte in absehbarer Zukunft nicht mit dem öffentlichen Stromnetz verbunden. In einigen Fällen können Solar Home Systems (SHSs) den teuren Netzausbau ersetzen (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2011, S. 327).

In Bolivien sind bereits viele SHSs im Einsatz und die Benutzer sehen sie als eine Bereicherung. Damit die Systeme besser werden, müssen jedoch noch einige Schwachstellen behoben werden.

1.2 Ziel und Fragestellung dieser Bachelorarbeit

Bolivien ist ein Land in Südamerika mit einer Fläche von 1,1 Millionen km² und knapp 10 Millionen Einwohnern, die zu 60% in den Städten leben. Somit ist die Bevölkerungszahl pro km² zwar verglichen mit Deutschland relativ gering, doch in den Ballungsräumen wie z.B. in La Paz, dem Regierungssitz, leben knapp 900.000 Menschen. (Auswärtiges Amt, 2012)

Die Städte Boliviens verfügen über ein öffentliches Stromnetz, jedoch sind viele Haushalte auf dem Lande entweder nicht an das öffentliche Stromnetz angeschlossen oder der Strom fällt bei ihnen sehr oft aus.

In Bolivien gibt es seit Ende der 80er Jahren viele Projekte zur ländlichen Elektrifizierung, 1993 waren bereits 1000 SHSs installiert (Hegedus, 2010, p. 1096). Inzwischen wurden in Bolivien über 25.000 herkömmliche Photovoltaik-Systeme installiert (Hegedus, 2010, p. 1096).

Abb. 1 zeigt die jahresdurchschnittliche tägliche Sonneneinstrahlung an unterschiedlichen Orten Boliviens. Sie ist ungefähr doppelt so groß wie die Globalstrahlung in Deutschland und spiegelt die Bedeutung dieser Technologie wieder.

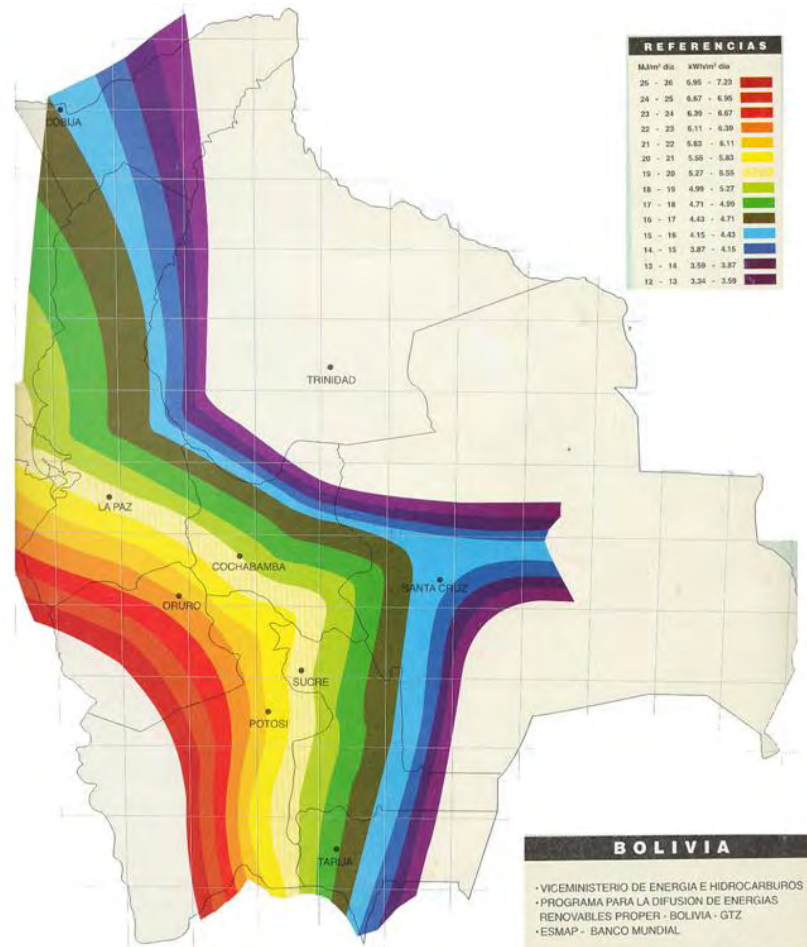


Abb. 1: Solare Einstrahlung in Bolivien (Falk, 2011)

Fast die Hälfte der in Bolivien installierten PV-Systeme, wird zurzeit nicht benutzt, und in den meisten Fällen liegt es an der Batterie. Gründe dafür sind vor allem mangelnde Wartung und eine falsche Behandlung.

In dieser Bachelorarbeit werden zunächst die Eigenschaften der üblichen Akkumulatoren (Akkus) für Inselsysteme dargelegt. Des Weiteren wird der Aufbau der klassischen Systeme erläutert. Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, andere Möglichkeiten für die erneuerbare Stromversorgung vorzustellen, die die Anfälligkeit verringern. Die Software *Homer* dient der Berechnung und der Analyse der ökonomischen Machbarkeit der unterschiedlichen Lösungen unter Einbeziehung der Lebensdauerkosten.

2 Grundlagen- Akkumulatoren

Die Akkus stellen die Hauptschwachstelle der heutigen SHSs dar. In 25 Jahren, die Zeitspanne der Projektdimensionierung, macht der Akku 10-40% der Investitionskosten und 30 bis 60% der Betriebskosten aus (Häberlin, 2010, S. 223). Die Wahl des geeigneten Akkus hängt von vielen Faktoren ab und wird vom Systemmanagement und klimatischen Bedingungen beeinflusst. Die speziellen Anforderungen hängen unter anderem von jährlicher Benutzungsdauer, der Verbraucher und der wöchentlichen Zyklenzahl ab. Dennoch ist es schwer, allgemein davon auszugehen, dass ein Batterietyp für ein System am besten geeignet ist, da die grundlegenden Voraussetzungen wie z.B. Kosten, Wartungsaufwand und Zuverlässigkeitsanforderungen eine wichtige Rolle spielen (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2011, S. 307).

In PV-Inselsystemen kommen meist aufladbare Blei-Akkus zum Einsatz. Diese sind preiswert, sind in Speicherkapazitäten zwischen 0,1 und 100 kWh verfügbar und können mit hohen und niedrigen Strömen effizient geladen werden. Andere kommerziell erhältlichen Batterien sind NiCd-, NiMH- und Lithium-Ionen-Batterien und kommen in kleinen Geräten vor (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2011, S. 298).

Anforderungen an Batterien in PV-Inselsystemen sind:

- Gutes Preis-Leistungs-Verhältnis
- Wartungsarm oder wartungsfrei
- Hohe Lebensdauer
- Niedrige Selbstentladung und hohe Energieeffizienz
- Auch mit niedrigen Strömen aufladbar
- Gut transportierbar
- Recyclebar

Da kein Speicher alle Anforderungen erfüllt, muss abgewogen werden, welche Eigenschaften am wichtigsten sind (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2011, S. 308).

Im Folgenden sollen die wichtigsten Daten für einen Akku beschrieben werden:

Tiefentladung	Wird bei einem Akku die Entladeschlussspannung unterschritten, kommt es zu einer Tiefentladung. Sie variiert je nach Temperatur und Entladestrom
Überladung	Bei einer Überschreitung der Ladeschlussspannung kommt es zur Überladung.
Kapazität	Die Akkukapazität wird in Abhängigkeit der Temperatur und der Entladezeit angegeben, z.B. gibt der C_{10} -Wert die Kapazität bei zehnstündiger Entladung an. Die entnehmbare Kapazität nimmt bei sinkender Temperatur ab. Je nach verwendetem Batterietyp sollte der Laderegler eingestellt sein. Wird die Tiefentladespannung erreicht, verringert oder unterbricht der Laderegler den Stromfluss, damit diese Spannung nicht unterschritten wird. Der übliche Kapazitätsschätzwert für stationäre Anwendungen ist C_{10} , C_{20} für Starterbatterien und C_{100} für Solarbatterien (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2011, S. 303). Näherungsformel für die Nennkapazität C_{10} : $C_{10} \approx 0,85 \cdot C_{20} \approx 0,7 \cdot C_{100}$ (Häberlin, 2010, S. 226)
SOC (State of charge)	Gibt die prozentual vorhandene Kapazität einer Batterie an.
DOD (Depth of discharge)	DOD wird auch Entladungstiefe (t_z) genannt und ist die Inverse von SOC. ($DOD = 100\% - SOC$).
Zykluslebensdauer (n_z)	Gibt die Lebensdauer eines Akkus bei zyklischer Anwendung in Abhängigkeit von der Entladetiefe wider.
Vollzyklen-Lebensdauer(n_{vz})	Die Vollzyklen-Lebensdauer errechnet sich aus der Zykluslebensdauer multipliziert mit der Entladetiefe. $n_{vz} = n_z \cdot t_z$ (Häberlin, 2010, S. 231)
<i>Homer spezifische Begriffe</i>	
Flout lifetime	Lebensdauer eines Akkus, wenn er nicht zyklisch, sondern unter konstanten Ladebedingungen geladen wird.
Total Net Present Cost (NPC)	Total Net Present Cost (NPC) ist die Aufsummierung aller Kosten über die Lebensdauer einer PV-Anlage.
Derating factor	Durch Verlustminderungsfaktoren erreicht eine PV-Zelle bei realen Bedingungen nicht die angegebene Leistung.
Lifetime throughput	Energiemenge, die der Akku unabhängig von der Entladetiefe der einzelnen Zyklen abgibt, bis die Kapazität auf 80% der Nennkapazität gesunken ist.
Levelized Cost of Energy (COE)	Die Energiegestehungskosten pro kWh gespeicherte elektrische Energie

2.1 Blei-Akku

Der Akkutyp, der für Inselssysteme am meisten genutzt wird, ist der aufladbare Blei-Akku. Dieser ist am kosteneffizientesten und kann sowohl mit niedrigen als auch mit hohen Ladeströmen geladen werden.

Dieser Akku-Typ findet in verschiedenen Gebieten wie Starterbetrieb und als Solarbatterie in unterschiedlicher Form Einsatz. Der grundsätzliche Aufbau ist bei allen Blei-Akkus ähnlich. Eine Batteriezelle ist ein Gehäuse, gefüllt mit einem Elektrolyten aus verdünnter Schwefelsäure (H_2SO_4). In dieser Zelle sind zwei Elektroden mit unterschiedlicher Polarität eingetaucht und besitzen eine aktive und poröse Oberfläche, auf der die chemischen Reaktionen der Speicherung stattfinden. Jede dieser Zellen besitzt 2 V Nennspannung und durch die Reihenschaltung von 6 Zellen, wird 12 V Nennspannung erreicht. Der Kern beider Elektroden besteht aus Blei und kann gitter-, röhren- oder blockförmig aufgebaut sein. Im geladenen Zustand besteht die aktive Masse der negativen Elektrode aus Blei (Pb) und die der positiven Elektrode aus Bleidioxid (PbO_2) und die Säurekonzentration des Elektrolyten ist am Höchsten. Bei einer Entladung lagert sich unter Einbeziehung des Elektrolyten auf der Oberfläche der beiden Elektroden eine Schicht aus Bleisulfat (PbSO_4) an und die Säurekonzentration des Elektrolyten nimmt ab. An der positiven Elektrode werden Elektronen freigesetzt, diese geben die freiwerdende Energie an den Verbraucher ab, bevor sie an der negativen Elektrode aufgenommen werden. Wird die Batterie über das PV-Panel oder eine andere Energiequelle geladen, fließen die Elektronen in die entgegengesetzte Richtung, und die chemische Reaktion des Entladens läuft ebenfalls in die entgegengesetzte Richtung. Abb. 2 zeigt die chemisch stattfindenden Reaktionen beim Laden bzw. Entladen. Bei einer Tiefentladung entsteht auf den Elektroden Bleisulfat in kristalliner Form und bildet sich beim Aufladen nicht vollständig zurück (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2011, S. 299).

Aufgrund der Lade-/ Entladevorgänge verliert die Batterie an Kapazität. Die Batterie verliert umso mehr Kapazität, je öfter und länger der Akku tiefentladen wird. Werden Blei-Akkus in Anlagen mit einer geringen Entladekapazität eingesetzt, steigt die Lebenserwartung der Batterie. Eine Tiefentladung kann vermieden werden, „wenn eine Verbraucherabschaltung bei ca. 30% Restkapazität erfolgt. Dies entspricht einer Akku-Spannung von ca. 11,4 V“ (Quaschnig, 2011, S. 215)

Die maximale Zyklenzahl ist erreicht, sobald der Akku im aufgeladenen Zustand nur noch über 80% seiner Nennkapazität verfügt. Danach kann der Akku weiterhin genutzt werden, aber die verfügbare Kapazität geht kontinuierlich zurück, und das Risiko eines plötzlichen Stromausfalls, verursacht durch einen Kurzschluss der beiden Elektroden, steigt.

Bei Blei-Akkus nimmt die Selbstentladungsrate mit steigender Temperatur zu. Je nachdem, welche Ausführung verwendet wird, liegt die Selbstentladungsrate bei 25°C zwischen 5 bis 10% monatlich.

Der Entladestrom hat einen direkten Einfluss auf die verfügbare Kapazität. Je höher der Entladestrom, desto niedriger ist die entnehmbare Kapazität. Die Entladeschlussspannung ist der begrenzende Faktor, der bei höheren Strömen schneller überschritten wird. (Quaschnig, 2011, S. 215)

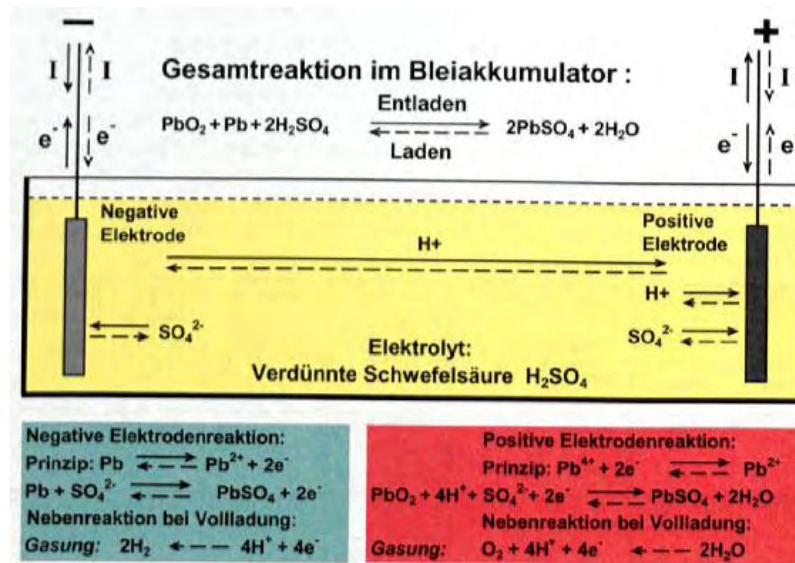


Abb. 2: Ladung und Entladungsreaktionen beim Blei-Akku (Häberlin, 2010, S. 224)

Ageing-Effekte bei Blei-Akkus:

Der Hauptnachteil von Bleisäure-Akkus ist ihre kurze Lebensdauer, die zwischen 100 und 800 Vollzyklen und 3 bis 8 Jahren Lebensdauer liegt (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2011, S. 307).

Der Grund dafür sind reversible und irreversible Alterungsprozesse, die sich auch gegenseitig beeinflussen: (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2011, S. 307).

Schichtenbildung (reversibel):

Die konzentrierte Säure lagert sich aufgrund der höheren Dichte unten in der Zelle an. Es resultiert eine Spannungsdifferenz, die zur Entladung in dem weniger konzentrierten oberen Bereich der Zelle führt. Bei jedem Wartungsintervall sollte kurz bis zur Gasungsspannung geladen werden, damit der Zelleninhalt gemischt und sich keine Schichten bilden.

Sulfatierung (irreversibel):

Wird der Akku nach einer Entladung nicht komplett aufgeladen, vergrößern sich Sulfatkristalle und können nicht wieder in Blei oder Bleioxid umgewandelt werden. Die aktive Fläche geht zurück und die entladbare Kapazität sinkt. Der untere Zellabschnitt ist mehr von Sulfatierung betroffen, da es dort weniger oft zu einer 100%igen Ladung kommt.

Korrosion (irreversibel):

Im Kern der positiven Platte kommt es zur Korrosion, ausgelöst durch die hohe positive Spannung. Dies führt zum erhöhten Widerstand im Gitter und passiert verstärkt bei einer Zellspannung von über 2,4 V oder unter 2 V. Eine Korrosion kann auch zum Kurzschluss führen, wenn große Teile der positiven Platte in den Elektrolyten fallen und sich absetzen.

Abschlammung (sludging, irreversibel):

Die Ströme bei der Beladung und der Entladung sind unterschiedlich hoch. Dies führt zur Abscheidung einiger Teile der aktiven Oberfläche des Elektrolyten. Nach einer Gasung setzen sie sich unten im Gehäuse ab und können einen Kurzschluss verursachen.

Austrocknung (irreversibel):

Die Batterie verliert aufgrund von Überladung an Wasser. Wird das Wasser nicht rechtzeitig nachgefüllt, ist ein weiterer Betrieb wegen Austrocknung nicht mehr möglich.

2.1.1 Starterbatterie

Blei-Akkus unterscheiden sich bezüglich der Platten- und Elektrolyten-Technologie und finden ihren Einsatz je nach Anforderungen. Vom Aufbau her gibt es grundsätzlich zwei Blei-Akkutypen: den Akku für den Puffer- bzw. Starterbetrieb und den Akku für den Zyklenbetrieb. Bei einer Starterbatterie bestehen beide Elektroden aus Gitterplatten, die dicht beieinander angeordnet sind. Es resultiert eine große Oberfläche und für kurze Zeit können große Ströme fließen. Bei Starterbatterien sind die Elektroden in einem flüssigen Elektrolyt mit einer Dichte von $1,28\text{g/cm}^3$ im geladenen Zustand und 25°C eingetaucht. Die bekannteste Anwendung kommt in der Automobilindustrie vor. Befinden sich Starterbatterien für eine längere Zeit in einem tiefentladenen Zustand, bilden sich Kristalle, die die Elektrode schädigen. Eine Starterbatterie sollte nach einer Entladung sofort wieder vollaufgeladen werden. "Bei einem in Inselanlagen typischen Zyklenbetrieb würde die Starterbatterie durch fortschreitende Sulfatierung und Korrosion bereits nach wenigen Wochen unbrauchbar sein." (Mertens, 2011, S. 202). Eine Starterbatterie würde bei zyklischer Nutzung bis 50% Entladung nach wenigen Tagen unbrauchbar sein. Deswegen sollten Starterbatterien in SHSs nur dann eingesetzt werden, wenn sie die einzig verfügbare Alternative sind. Werden Starterbatterien doch eingesetzt, sollte der tägliche Stromverbrauch niedrig sein. LKW-Batterien finden in kleinen Systemen Anwendung und haben eine Lebenserwartung von bis zu 2 Jahren (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2011, S. 301).

2.1.2 Solarbatterie auf Flüssigsäurebasis

Eine veränderte Form der Starterbatterie ist der Solar-Akku, bei dem der Elektrolyt ebenfalls nass vorliegt. Die Solarbatterie unterscheidet sich von der Starterbatterie im Aufbau ihrer Elektroden. Die Elektroden des Solar-Akkus sind verstärkt, und dieser Akku ist für zyklisches Laden und Entladen geeignet. Der Elektrolyt der Solarbatterie besitzt eine niedrigere Konzentration als bei Starterbatterien, damit weniger Korrosion stattfindet.

Bei Solar-Akkus werden bei 70% Entladungstiefe 200 Zyklen, bei 50% Entladungstiefe 400 Zyklen, bei 30% Entladungstiefe 700 Zyklen und bei einer 20%-tigen Entladung 1000 Zyklen erreicht. Solar-Akkus auf Flüssigsäurebasis sind vor allem für eine sporadische Nutzung wie z.B. für Boote oder Wochenendhäuser geeignet (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2011, S. 301)

Der Solar-Akku hat eine Vollzyklen-Lebensdauer von 150-250 Zyklen und die Brauchbarkeitsdauer bei 20°C reicht bis zu sechs Jahren. Dieser Akku ist mit einem Verschlussstopfen geschlossen und eine jährliche Wartung wird meist empfohlen. Bei der Wartung wird die Batterie für eine kurze Zeit mit der Gasungsspannung geladen. Haben sich im Laufe der Lade- und Entladevorgänge Schichten gebildet, bilden sie sich aufgrund der stattfindenden Vermischung wieder zurück.

Eine jährliche Wartung ist nicht nur gut für die Lebensdauer der Batterie, sie ist auch notwendig für die elektrische Sicherheit, Korrosionsvorbeugung und zum Vorbeugen der Entstehung von explosiven Gasen. Schwefelsäure ist ätzend und gefährlich für den Menschen und die Umwelt und kann bei Kontakt mit der Haut Verbrennungen verursachen.

Bei der Installation von Akkus mit flüssigem Elektrolyt bestehen spezielle Anforderungen in Bezug auf den Ort der Installation. Rauch und offene Flammen können gefährlich sein, deswegen sollte der Raum durchlüftet sein. (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2011, S. 309)

Die Abb. 3 zeigt die Zyklenzahlen der verschiedenen Akkutypen in Abhängigkeit von der Entladetiefe. Für eine Lebensdauer von 15-20 Jahren eignen sich Panzerplatten-Akkus und Block-Akkus am Besten. Allerdings kosten sie nicht nur das Zwei- bis Dreifache einfacher Solar-Akkus, sie sind zudem sehr schwer und werden genutzt, wenn große Kapazitäten benötigt werden.

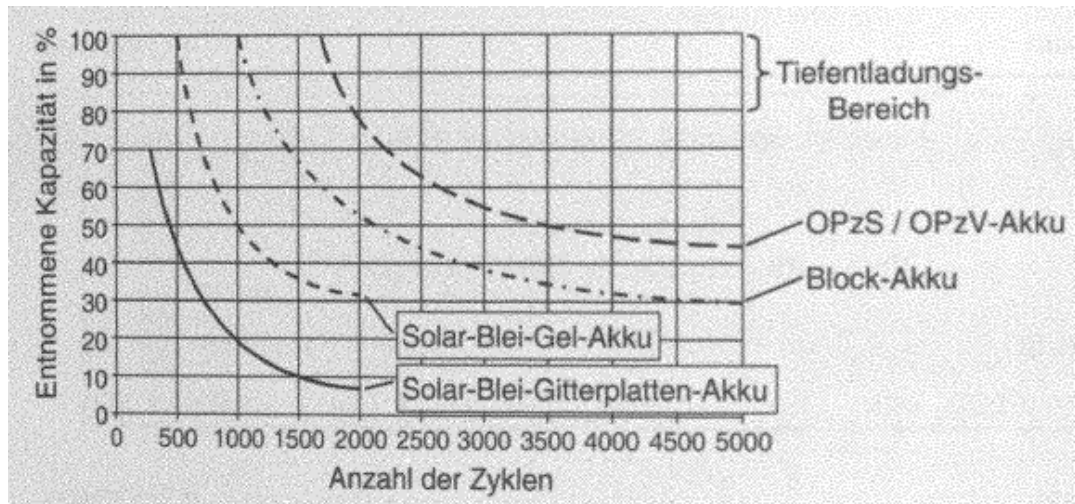


Abb. 3: Zyklenzahlen in Abhängigkeit von der Entladungstiefe (Mertens, 2011, S. 202)

2.1.3 Gel-Batterie für die Solare Anwendung

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen geschlossenen Blei-Akkus, gibt es verschlossene Akkus, die statt eines Verschlussstopfens über ein Druckventil verfügen. Bei einer Überladung, bildet sich an der positiven Elektrode Sauerstoff, während an der negativen Elektrode zur Wasserstoff freigesetzt wird. Wird die Ladeschlussspannung überschritten, entweichen diese Gase über das Sicherheitsventil. Bei VRLA (valve-regulated lead-acid)-Batterien ist streng auf eine angemessene Ladung zu achten, denn sonst verliert die Batterie Wasser. Da sie wartungsfrei ist, kann kein Wasser nachgefüllt werden. VRLA-Batterien unterscheiden sich in zwei Ausführungsformen. AGM (Absorbent Glas Mate)-Batterie sind eine Untergruppe der VRLA-Batterien. Bei diesem trockenen Akkutyp ist der Elektrolyt im Vlies integriert. Besteht der Elektrolyt aus einem Gel, spricht man von VRLA-Gel-Batterien. (battcenter, S. 1)

Da es sich bei AGM-Akkus um eine Starterbatterie handelt und dieser Akku in Bolivien nicht hergestellt wird, wird auf diesen Akkumulator nicht weiter eingegangen.

Der trockene Akku aus Gel ist zyklensfest. Im festgelegten Elektrolyten können Teilchen durch Gaskanäle wandern. Wird der Akku geladen, wandern die an der positiven Elektrode durch Wasserspaltung entstehenden Sauerstoffmoleküle über die Gaskanäle zur negativen Elektrode, um dort mit Wasserstoff zu Wasser zu rekombinieren. Ist der Laderegler defekt und die Ladeschlussspannung wird überschritten, bildet sich an der positiven Elektrode ein Überschuss an Sauerstoff und an der negativen ein Überschuss an Wasserstoff. Die Rekombinationsrate ist begrenzt, bei Überschreitung des Sicherheitsdrucks entweichen diese Gase durch das Überdruckventil. Ein Austrocknen des Akkus wäre bei Überladung möglich. Gel-Akkus sind im Gegensatz zu AGM- und Nassbatterien gegen Säureschichtung sicher und können bei Temperaturen zwischen -20 und +40 °C und vorgeschriebener

Ladespannung betrieben werden, und das Sicherheitsventil öffnet sich nicht. Hingegen benötigen Gel- Akkus benötigen einen speziellen Laderegler, da sie

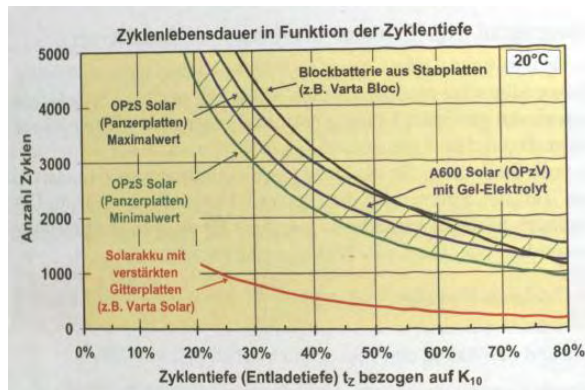


Abb. 4: Zyklenzahlen verschiedener Akkutypen. (Häberlin, 2010, S. 230)

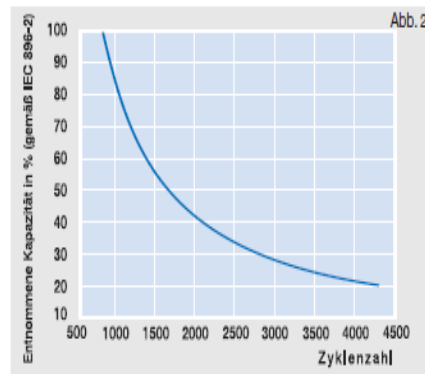


Abb. 5: Zyklenzahlen von Sonnenschein Gel-Akkus

sehr empfindlich auf Überladung reagieren und die Gefahr der Austrocknung besteht. Um den Ladezustand zu bestimmen, muss die Batteriespannung gemessen werden. Die Zyklenzahl liegt bei 50% Entladung bei 1000 Zyklen und damit doppelt so hoch wie bei Solar-Akkus mit Flüssigsäure (Mertens, 2011, S. 203). Dennoch unterscheiden sich die Zyklenzahlen je nach Literatur. Abb. 4 und Abb. 5 zeigt Grafiken zu Zyklenzahlen aus unterschiedlicher Literatur bzw. Herstellerangaben. Gibt der Hersteller dazu keine Information, ist Skepsis angebracht. Trotz der vielen Vorteile sind Gel-Batterien sowie Nassbatterien wegen der niedrigen Lebenserwartung nicht für die Ganzjahresnutzung geeignet und müssen alle paar Jahre ausgetauscht werden (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2011, S. 308). In der Tabelle 1 sind die Eigenschaften der verschiedenen Blei-Akkus hinterlegt. Da auch die Zyklenzahlen von Panzerbatterien aufgeführt sind, variieren sie sehr stark. Diese Batterien sind jedoch für autarke Inselsysteme nicht geeignet.

Eigenschaft/Elektrolyt	Gel	flüssig
Nennspannung/V	2	2
Gasungsspannung/V	2,35	2,4
Energiedicht/[Wh/kg] K20	15...35	15...45
Energiedichte/[Wh/l] K20	25...90	30...90
Betriebstemperatur/°C	-20...45 opt. 10-20	-5...55 opt. 10-20
Zykluslebensdauer (Zyklientiefe:60%)	400...1600	250...2000
Energiewirkungsgrad/%	70...85	70...85
Relativkosten zu Flüssigelektrolyt	1...2	1

Tabelle 1: Eigenschaften von Gel- und Nassbatterien (Häberlin, 2010, S. 223)

2.2 Nickel-Cadmium- und Nickelmetallhydrid-Akku

Akkus aus Nickel-Cadmium (NiCd) und Nickel-Metall-Hydrid (NiMH) haben aufgrund ihrer relativ höheren Energiedichte im Gegensatz zu Blei-Batterien einen klaren Vorteil, sie sind verschlossen und wartungsfrei, kosten aber auch mehr. Die Zyklenzahl, bei 60% Entladetiefe, liegt bei NiCd-Akkus zwischen 1500 bis 3000 Zyklen.

NiCd-Batterien reagieren bei Tiefentladung weniger empfindlich als Blei-Akkus und sind sogar für klimatisch raue Bedingungen mit Temperaturen zwischen -40 und +50°C geeignet. Die optimale Temperatur liegt zwischen 0 und 30°C. NiCd-Akkus sind aber auch 3 bis 5-mal teurer als Blei-Solar-Akkus (Häberlin, 2010, S. 223). Sie weisen mit 20 bis 30% monatlich eine hohe Selbstentladungsrate auf, und die Batterieeffizienz liegt zwischen 60 und 70%. NiCd-Akkus sollten vor dem Beladen immer vollständig entladen werden. Sonst geht die Kapazität aufgrund des Memory-Effekts zurück. Dieser Effekt bildet sich zwar nach mehrmaligem Beladen und Entladen wieder zurück, ist aber für zyklische Anwendungen weniger geeignet, und deshalb finden NiCd-Akkus in solaren Anwendungen kaum noch Einsatz. Darüber hinaus gelangt Cadmium in die Umwelt, wo es sich in der Nahrungskette anreichert. Beim Menschen kann Cadmium Organschäden verursachen. (Quaschnig, 2011, S. 211,216,217)

NiMH-Akkus arbeiten wie NiCd-Batterien mit 1,2 V Spannung, eignen sich für den Gebrauch bei Temperaturen zwischen -20 und 45°C, die Selbstentladungsrate schwankt zwischen 20 und 50% , und die Zyklenzahl bei 60% Entladetiefe liegt bei 1000 Zyklen. Diese Batterie weist im Gegensatz zu NiCd-Akkus keinen Memory-Effekt auf und eignet sich im Vergleich zu NiCd-Akkus besser für solare Anwendungen. Die NiMH-Batterie reagiert auf Tiefentladung weniger empfindlich als Blei-Akkumulatoren. Obwohl die Selbstentladungsrate von Batterien für solare Systeme 3% nicht übersteigen sollte (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2011, S. 306) "Wo es aus Gewichtsgründen auf höhere Energiedichten ankommt, werden meist... Nickel-Metall-Hydrid(NiMH) verwendet" (Quaschnig, 2011, S. 211). Tabelle 2 zeigt die einzelnen Eigenschaften der beiden Batterien.

2.3 Lithium-Ionen-Akku

Lithium-Ionen-Akkus kommen in mobilen Anwendungen wie Handys, Digitalkameras oder Laptops zum Einsatz. Die Technologie ist relativ teuer, weist aber keinen Memory-Effekt auf, der Akku ist schnell ladefähig, zeichnet sich durch seine große Energiedichte und Zyklenzahl aus, die zwischen 500 und 10000 liegt. Die erste Generation war aufgrund von Explosionen gefährlich, aber die neuen Zellen verfügen über Zellsicherungen. Li-Ionen-Akkumulatoren haben sich in der

Solartechnik noch nicht durchgesetzt, da die Technologie noch zu teuer ist. Tabelle 2 zeigt die Eigenschaften von Lithium-Ionen-Akkumulatoren.

	NiCd-	NiMH-	Li-Ionen-Akku
Positive Elektrode	NiOOH	NiOOH	Graphit
Negative Elektrode	Cd	Metall	LiMn ₂ O ₄
Elektrolyt	KOH+H ₂ O	KOH+H ₂ O	Polymer o. Salze
Energiedichte in/[Wh/l]	80...200	100...350	250...500
Energiedichte/[Wh/kg]	30...70	50...120	95...200
Zellspannung/V	1,2	1,2	3,6
Lade-/Entladezyklen/°C	1500...3000	1000	500...10000
Betriebstemperatur/°C	-40...55	-20...45	-20...55
Selbstentladungsrate/ [%/Monat]	20...30	20...50	<5
Wh-Wirkungsgrad/%	60...70	60...85	70...90

Tabelle 2Eigenschaften von NiCd-, NiMH und Lithium-Ionen-Akkus (Quaschnig, 2011, S. 211)

3 Aufbau und Problematik der klassischen Systeme

Inzwischen wurden in Bolivien über 25000 (Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and engineering second Edition, 2010, p. 1096) herkömmliche Photovoltaik-Systeme installiert. Jonathan Krink hat in seiner Bachelorarbeit vom 28.07.2011 „Evaluation von PV-Anlagen in Bolivien“ 61 SHSs in drei verschiedenen Gemeinden Boliviens durch Befragung der Nutzer, durch Spannungsmessungen am Panel, dem Laderegler und der Batterie auf ihren Zustand untersucht. Zusammenfassend haben Solarmodul, Laderegler und Batterie gut abgeschnitten.

Fast die Hälfte der in Bolivien installierten PV-Systeme wird zurzeit nicht benutzt, und in den meisten Fällen liegt es an der Batterie. Gründe dafür sind vor allem mangelnde Wartung und eine falsche Behandlung. Die Systeme sind zwar stark subventioniert, aber es wird keine Wartung durchgeführt.

Zum Einen fehlt es an ausgebildetem Personal, zum Anderen ist der Austausch der schweren Autobatterien oft mit logistischen Problemen verbunden. Jonathan Krink führt seine Messungen in Gebieten mit guter Wartung durch und kommt zu abweichenden Ergebnissen.

Bei den klassischen Systemen lädt sich der Akku über einen externen Laderegler, der die Batterie mit dem PV-Modul verbindet. Das PV-Modul ist aus Silizium mit einer mono- bzw. polykristallinen Struktur und besitzt eine Nennleistung von 22, 50, 55

oder 75 W_p. Bei den von Jonathan Krink untersuchten Systemen in den Regionen Anzaldo und Pampa Aullagas bestehen die Systeme zu 80% aus 50 W_p PV-Panels, die mit 100 Ah (C₅₀) Batterien ausgestattet sind.

Über einen externen Laderegler der Marke *Phocos* CML05 bzw. CML08, die für Ströme bis 5 A bzw. 8 A ausgelegt sind, wird der in Bolivien für solare Anwendungen hergestellte Nass-Akku *Toyo* des Herstellers *Batebol* geladen. Der *Toyo*-Akku ist nicht wartungsfrei und besitzt eine Lebenserwartung von 3-4 Jahren. Diese Batterie liefert bei 10 stündiger Entladung 70 Ah (C₁₀=70Ah).

Der Laderegler ist sowohl für Nass-Akkus als auch für Gel-Akkus geeignet und besitzt eine Umschaltfunktion, damit der Gel-Akku mit einer niedrigeren Spannung geladen wird und auf keinen Fall die Gasungsspannung erreicht. Das Gehäuse des Akkus hat ein Volumen von 17,3 Litern und wiegt samt Säure ca. 30 kg.

Alle SHSs wurden mit mehreren CFL-Lampen (Compact Fluorescent Lamps) ausgestattet, und in jedem Haushalt sind jeweils 2 bis 3 Lampen fest installiert. Die installierten Lampen sind *Phocos*-Lampen, mit 7 und 11 Watt Leistung. Die 7 W-Lampen besitzen eine Lichtintensität von 350 lm, und die 11 W-Lampen strahlen mit 670 lm Lichtintensität. In anderen Gebieten sind 15 bis 20 W-Fluoreszenz-Lampen installiert.

Der Neueinkauf der Lampen fällt den Nutzern nicht immer leicht, da diese Lampen nur in größeren Städten verkauft werden. Die Lebenserwartung jeder Lampe beträgt laut *Phocos* 8000 Stunden und müsste in 25 Jahren mindestens 3-mal ausgetauscht werden. Die Lampen erreichen in den Untersuchungen nicht diese Lebenserwartung. Handys werden über eine Zigarettenanzünderbuchse aufgeladen. Die meisten SHSs benutzen den erzeugten Strom für Beleuchtung, Radio und Handy. In 2% der untersuchten Systeme werden auch Fernseher benutzt (Krink, 2011). Abb. 6 zeigt die Verschaltung und die einzelnen Komponenten eines üblichen SHSs.

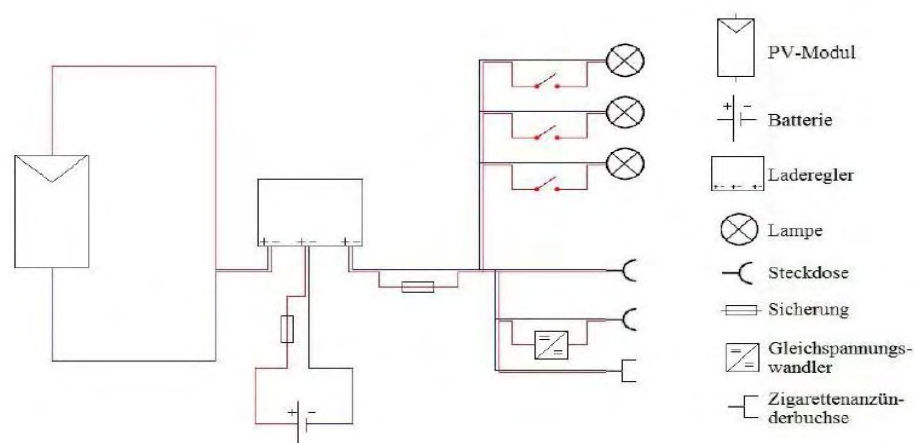


Abb. 6: Verschaltung der klassischen SHSs (Krink, 2011, S. 18)

4 Solare Einstrahlung in Bolivien

Abb. 7 zeigt die monatliche Globalstrahlung für La Paz, Bolivien. Die Werte für La Paz dienen als ein Mittelwert für Bolivien. Abb. 1 zeigt, wie die solare Einstrahlung vom Osten nach Westen zunimmt. Ein Beispielwert von La Paz, Bolivien wurde mit *Homer* ermittelt:

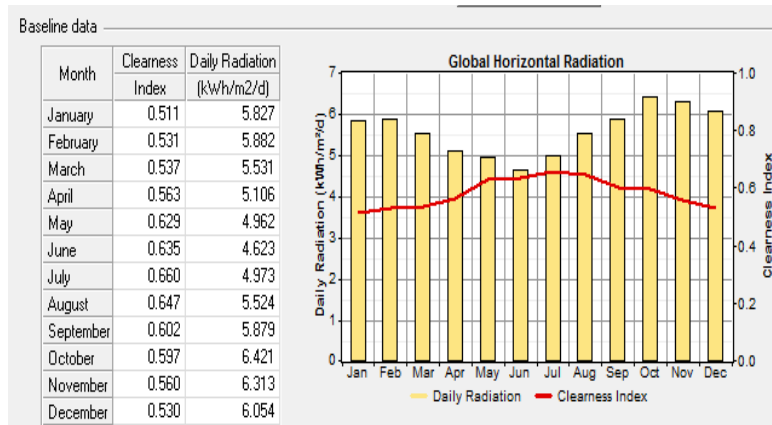


Abb. 7: Ausschnitt aus Homer zur solaren Einstrahlung in La Paz, Bolivien

Homer gibt aus den Eingaben zu Breiten- und Längengrad mit Hilfe der NASA-Daten die stündlichen Solardaten einer Region bezogen auf ein Jahr wieder. „Clearness Index“ ist die durchschnittlich monatliche Reinheit der Atmosphäre und ist definiert als das Verhältnis der Globalstrahlung zur Solarkonstanten. Speziell in La Paz fällt auf, obwohl die Bewölkung und die Niederschläge in den Sommermonaten (Oktober-März) größer sind als in den Wintermonaten (April-September), überwiegt die solare Einstrahlung in den Sommermonaten.

5 Pico-Systeme

5.1 Die *Pico-Lampe*

Pico-Systeme können eine gute und bequeme Alternative sein, Häuser in entlegenen Gebieten mit Energie zu versorgen. Die



Abb. 8: Werbeflyer *Pico-Lampe*

einfachste Form besteht aus einem 3-Watt PV-Modul in Verbindung mit einer mobilen *Pico-Lampe*. Die Abb. 8 zeigt die Lampe mit ihren wichtigsten Eigenschaften. Dieses System kann auch für andere Zwecke wie für das Aufladen von Handys und die Radionutzung verwendet werden. Die mobile Solarlampe wird

direkt mit dem PV-Panel verbunden. Die Lampe ist mit einem integrierten Laderegler ausgestattet. Somit bilden die Batterie, der Laderegler und die Lampe eine Einheit. Das PV-Modul lädt über den integrierten Laderegler 4 NiMH-Akkus und schützt sie vor Tiefentladung und Überladung. Die Batterien lassen sich leicht austauschen. Radio, Handy und andere Verbraucher können an die *Pico-Lampe* angeschlossen, und aufgeladen werden. Das System lässt sich erweitern, falls mehr Energie benötigt wird.

Phocos bietet folgende Variationen:

- Eine *Pico-Lampe* mit einem 3-W Modul
- Ein 5-W Solarpanel lädt bis zu 2 mobile *Phocos*-Lampen.
- Zwei in Reihe geschaltete 5W-Module laden 3-4 *Pocos*-Lampen.
- Ein 20 W-Panel versorgt 6 *Phocos*-Lampen mit Strom.



Abb. 9: LED-Lichtstärke bei Nacht



Abb. 10: Handy zum Aufladen angeschlossen

Die *Phocos*-Lampe, wie in der Abb. 8 zu sehen, arbeitet mit vier 2,1 Ah-NiMH-Akkus, die in Serie in der Lampe integriert sind. Man kann die Lampe mit einer 12 V-Autobatterie oder mit einem 3-W Modul oder einem beliebig größeren Modul verbinden. Die Lampe kann je nach Bedarf in 3 unterschiedlichen Beleuchtungsstärken bedient werden. Mit der höchsten Lichtintensität, 120 lm, leuchtet die LED-Lampe 5,5 Stunden lang. In der mittleren Stufe leuchtet die Lampe mit 60 lm bis zu 16,5 Stunden und in der niedrigsten Beleuchtungsstärke ist für 55 Stunden mit 20 lm Licht gesorgt. Eine Lampe mit 80 lm besitzt die 3 fache Lichtintensität einer Petroleumlampe (Hegedus, 2003, p. 759). Somit hat die *Pico-Lampe* in der höchsten Stufe die 4,5-Fache Lichtintensität einer Petroleumlampe. Außerdem ergeben Tests, durchgeführt von Reinhard Mayer Falk, dass die Lichtstärke: 120 lm sich bestens zum Lesen und Schreiben eignet. Die Abb. 9 zeigt die Lichtstärke bei Nacht. Über zusätzliche Aufsätze lassen sich Radios und Handys

anschließen. Abb. 10 zeigt ein Handy, angeschlossen an die *Pico-Lampe* während des Aufladevorgangs.

Eine LED-Lampe hat eine Lebenserwartung von 50.000 Stunden. Diese Lebenserwartung könnte für 25 Jahre, die Projektdimensionierung einer PV-Anlage, ohne einen Austausch ausreichen. Laut *Phocos* beträgt die Nennspannung 6 V. Da jedoch jeder NiMH-Akku nur über 1,2 V verfügt, ergibt es insgesamt 4,8 V Spannung, die eine Lampe liefern kann. *Phocos* rechnet mit über 500 Vollzyklen.

Im Folgenden wird die Lampe mit den Einstrahlungsdaten für La Paz, Bolivien mit der Software *Homer* getestet. Tagsüber wird das Radio benutzt, oder das Handy lädt sich auf, und abends dient der Strom der Beleuchtung. Die *Pico-Lampe* kann nicht gleichzeitig laden und für die Beleuchtung eingesetzt werden.

5.2 Ladekennlinie des 3-W Panels in Verbindung mit einer *Pico-Lampe*

Abb. 11 und Abb. 12 zeigen das 3-W Panel für die *Pico-Lampe* mit der Kennlinie. Die Solarzellen dieses 3-W Panel haben eine monokristalline Silizium-Struktur, und die Zelleffizienz liegt bei 15,6%. *Pico* gibt an, die Akkus in der Lampe würden unter MPP-Bedingungen geladen. Diese Aussage sollte in einem Test überprüft werden. An einem Teststand wurden die Spannungs- und Stromdaten aufgenommen.

Ergebnisse aus dem Test:

Bei wolkenlosem Himmel wird die Lampe mit einer Spannung zwischen 14-16 V geladen, und die Stromstärke liegt zwischen 0,19 und 0,23 A. Die Spannungs- und Stromwerte schwanken zwischen den genannten Zahlen. In der Tabelle 3 sind die Daten aus dem Datenblatt des 3-W Panels und die gemessenen Werte eingetragen.

	Theorie	Gemessen 3W
Leerlaufspannung	21,82 V	19 V
Kurzschlussstrom	0,26 A	0,3 A
Spannung im Pmpp	18,11 V	15 V
Strom im Pmpp	0,17 V	0,2 A
Leistungstoleranz	+/-5%	-
Leistung im Pmpp	3,07 W	3 W

Die gemessene Leistung fällt um 2,5% niedriger aus als theoretisch angegeben. Die Leistungstoleranz liegt bei +/- 5% und damit liegt die Abweichung im Toleranzbereich. Der Füllfaktor ist definiert durch:

$$FF = \frac{P_{mpp}}{U_{oc} \cdot I_{sc}}$$

$$FF(\text{Datenblatt}) = \frac{3,07 \text{ W}}{21,82 \text{ V} \cdot 0,26 \text{ A}} = 0,54$$

$$FF(\text{gemessen}) = \frac{3 \text{ W}}{19 \text{ V} \cdot 0,3 \text{ A}} = 0,52$$

$$\frac{FF(\text{gemessen})}{FF(\text{Datenblatt})} = 97 \%$$

Der gemessene Füllfaktor zum Füllfaktor im Datenblatt hat eine Abweichung von weniger als 3%. Die Tests wurden nicht unter Standard-Test-Konditionen durchgeführt. Somit sind Abweichungen durchaus möglich. Der integrierte Laderegler lädt tendenziell im Maximal-Power-Point, wie es der Hersteller garantiert.



Abb. 11: 3-W-Modul

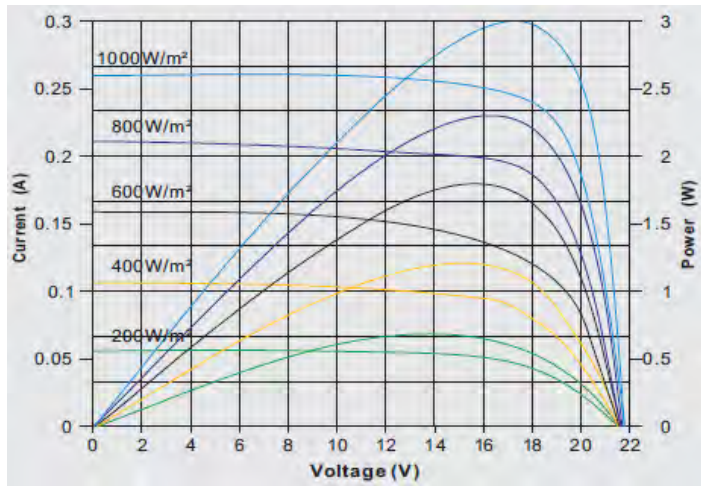


Abb. 12: Kennlinie des 3-W-Moduls (renova-energia)

5.3 Preiskalkulation für die *Pico*-Systeme

3-W Panel mit einer Lampe

Abb. 13 zeigt die einfachste und preiswerteste von *Phocos* angebotene Variante. Tabelle 3 zeigt die Investitionskosten und die Kosten für die Photovoltaik-Anlage und den Batterieersatz.

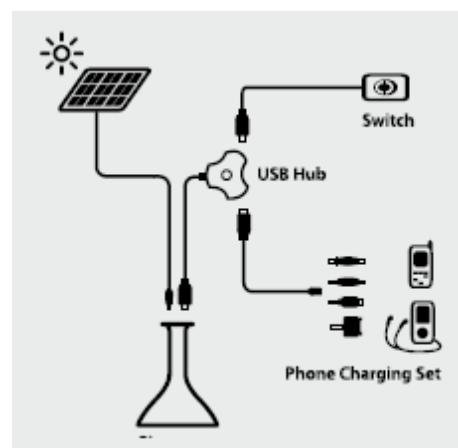


Abb. 13: Verschaltung bei einer Lampe und ein 3-W-Panel (pico)

Komponente	Preis/\$
<i>Pico-Lampe</i>	65
Ausrüstung zum Laden von Handys, 10 Meter Kabel, USB-Verteiler, Ständer, Radio, Schalter	85
Investitionskosten (System fixed Capital Cost)	150
Jeweils Batterieersatz	12
Photovoltaikmodul/Wp	8

Tabelle 3 Investitionskosten im ersten Jahr für die Eingabe in Homer

Pico-System mit 2 *Pico-Lampen*

- 2 *Pico* Lampen
- *Pico* 3-Wp PV-Panel
- Statt des Power Boxes Einbau eines Umlenkhebels
- 2 *Pico* Power Verlängerungen (Distribution Cable)
- *Pico* USB Basis
- 2 *Pico* Schalter
- Set zum Laden von Handys

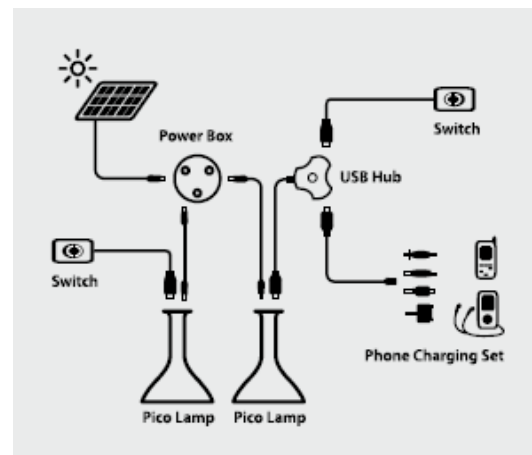


Abb. 14: Pico-Schaltung mit 2 Lampen

Die Abb. 14 zeigt die Zusammensetzung, wenn 2 Lampen installiert werden. Bei diesem System wird eine Lampe geladen, und die andere ist sowohl tagsüber als auch abends mobil verfügbar. Dieses System mit einer zusätzlichen zweiten Lampe ist 65 Dollar teurer.

Zwei 5-W-Panels mit 3 *Pico-Lampen*

Bei diesem System werden zwei 5 W-Module mit 3 *Pico-Lampen* verbunden. Dies ist ein größeres System und bedeutet mehr Komfort. Abb. 15 zeigt mehr Einzelheiten.

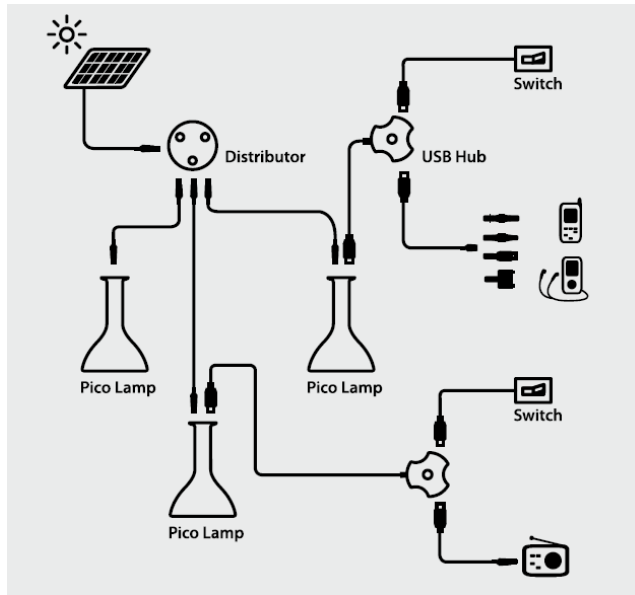


Abb. 15: Verschaltung mit 3 Pico-Lampen (pico)

5.4 Dimensionierung des Verbrauchs

Energieverbrauch der *Pico*-LED-Lampe ohne Berücksichtigung des Tiefentladeschutzes und ohne Abnahme der Kapazität bei steigendem Entladestrom.

Gespeicherte Energie in einer *Pico*-Lampe:

$$E = P \cdot t = U \cdot I \cdot t = 4,8 \text{ V} \cdot 2,1 \text{ Ah} = 10,08 \text{ Wh}$$

Beleuchtungsstufe	Minimale Leistung der LED Lampe	Energieausbeute
Höchste Stufe (120 lm)	$10,08 \text{ Wh} / 5,5 \text{ h} = 1,8 \text{ W}$	$0,015 \text{ W} / \text{lm}$
Mittlere Stufe (50 lm)	$10,08 \text{ Wh} / 16,5 \text{ h} = 0,6 \text{ W}$	$0,012 \text{ W} / \text{lm}$
Niedrigste Stufe (20 lm)	$10,08 \text{ Wh} / 55 \text{ h} = 0,2 \text{ W}$	$0,01 \text{ W} / \text{lm}$

Zur Berechnung der benötigten Photovoltaik-Leistung wird die folgende Formel angewandt:

$$P = \frac{E}{K_{Temp} \cdot V_{Anpassung} \cdot N_{sonne} \cdot K_{Schräg} \cdot V_{Leitung} \cdot V_{Umwandlung}} \quad (\text{Mertens, 2011, S. 211})$$

Der dimensionierte Stromverbrauch ist im Vergleich zu den klassischen Systemen viel niedriger. Tabelle 4 zeigt ein Beispiel für den Stromverbrauch an einem Tag, bei

der Installation einer *Pico-Lampe*. Bei dieser Dimensionierung strahlt die LED in höchster Beleuchtungsstufe. Wird nicht die volle Lichtintensität benötigt, bleibt an anderer Stelle Strom für andere Verbraucher erhalten.

Gerät	Anzahl	Leistung/W	Stunden/h	Tageszeit	Energieverbrauch /Wh
Lampe	1	2	2	Abend	4
Radio	1	4	0,5	Mittags	2
Handy	1	5	0,5	Mittags	2,5
Gesamt					8,5

Tabelle 4 Täglicher Stromverbrauch mit einer *Pico-Lampe*

Benötigte PV-Leitung bei einem Energieverbrauch wie in Tabelle 4:

$$P = \frac{E}{K_{Temp} \cdot V_{Anpassung} \cdot N_{sonne} \cdot K_{Schräg} \cdot V_{Leitung} \cdot V_{Umwandlung}}$$

$$= \frac{8,5 \text{ Wh}}{(0,9 \cdot 0,9 \cdot 5,2 \text{ h} \cdot 1,1 \cdot 0,94 \cdot 0,7)} = 2,7 \text{ W}$$

Auslegung der Batteriegröße:

$$C_n = \frac{E \cdot N_a}{t_z \cdot U_n} \quad \text{Kapazität einer Batterie (Mertens, 2011, S. 213)}$$

$$C_n = \frac{E \cdot N_a}{t_z \cdot U_n} = \frac{8,5 \text{ Wh} \cdot 1 \text{ tage}}{100\% \cdot 4,8 \text{ V}} = 1,8 \text{ Ah}$$

Bei der Dimensionierung werden keine Autonomietage und kein Tiefentladeschutz berücksichtigt. Ein *Pico-Lampe* liefert 2,1 Ah, so berechnet sich die Anzahl der benötigten Lampen wie folgt:

$$1,8 \text{ Ah} / 2,1 \text{ Ah} = 0,85$$

Entspricht der tägliche Verbrauch den Werten in der Tabelle 4, so reicht eine *Pico-Lampe* als Energiespeicher für eine minimale Beleuchtung und Stromversorgung aus.

6 Simulation mit *Homer*

6.1 Simulierung mit einer *Pico-Lampe*

Im Folgenden werden die entstehenden Kosten, die benötigte PV-Kapazität und der Ladezustand der Batterie bei der Installation einer *Pico-Lampe* mit den Strahlungsdaten eines Jahres für die gesamte Projektdauer simuliert.

Eingaben in *Homer*:

The screenshot shows the 'Costs' and 'Properties' sections of the Homer software interface. The 'Costs' section contains a table with three columns: 'Size (kW)', 'Capital (\$)', and 'Replacement (\$)'. The 'Size (kW)' field is set to 0.001, 'Capital (\$)' is 8, and 'Replacement (\$)' is 8. Below the table are two empty parentheses fields. The 'Properties' section has radio buttons for 'Output current' with 'AC' unselected and 'DC' selected. Below are input fields for 'Lifetime (years)' (25), 'Derating factor (%)' (76), 'Slope (degrees)' (30), 'Azimuth (degrees W of S)' (180), and 'Ground reflectance (%)' (20). Each input field has a corresponding empty parentheses field to its right.

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)
0.001	8	8

Output current: AC DC

Lifetime (years): ()

Derating factor (%): ()

Slope (degrees): ()

Azimuth (degrees W of S): ()

Ground reflectance (%): ()

Abb. 16: Eingaben zum PV-Modul in Homer

In *Homer* werden zum PV-Panel, Akku und Stromverbrauch die relevanten Daten eingegeben, und *Homer* berechnet aus den Solardaten des jeweiligen Ortes die benötigten Kapazitäten. Abb. 16 zeigt die Eingaben zum PV-Modul mit 8 \$ pro Wp, 25 Jahre Projektlaufzeit und 30° Neigungswinkel. Bolivien ist auf der Südhalbkugel, deswegen liegt der optimale Azimut-Winkel nicht bei 0°, sondern bei 180°. Es wird zusätzlich der „Derating Factor“, übersetzt der Leistungsminderungsfaktor, eingegeben. Im Abschnitt 5.4 „Dimensionierung Verbrauchs“ werden die Verlustkoeffizienten erwähnt. Deren Multiplikation ergibt den Leistungsminderungsfaktor.

Die *Pico-Lampe* verfügt zwar über einen integrierten Laderegler mit MPP-Tracker, aber bei allen Systemen wird der gleiche Verlust angenommen. Die Umwandlungsverluste des Akkus werden separat bei den Akkueinstellungen angegeben und sind bei der Berechnung des Derating factors beim PV-Modul nicht relevant. Beim Derating factor kann zusätzlich auf den Korrekturfaktor für die Schräge des Moduls verzichtet werden, da der Neigungswinkel des PV-Moduls diesen Faktor beinhaltet. Somit lässt sich der Derating factor wie folgt berechnen:

$$\text{Derating factor} = K_{\text{Temp}} \cdot V_{\text{Anpassung}} \cdot V_{\text{Leitung}}$$

$$\text{Derating factor} = 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,94 = 76\%$$

Abb. 17 zeigt die Einstellung vom Akku. Ein 4er Set NiMH-Akkus steht für eine 4,8 V Batterieeinheit. Die Anzahl des 4-er Packs an Batterien gleicht der Anzahl der installierten Lampen. Der Schätzwert für den Preis eines 4-er Batteriesets beim Neukauf bzw. für den Austausch beträgt 12 \$.

Costs

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1	12	12	0.00

{ } { } { }

Advanced

Batteries per string (4.8 V bus)

Minimum battery life (yr) { }

Abb. 17: Einstellungen des Akkus in Homer

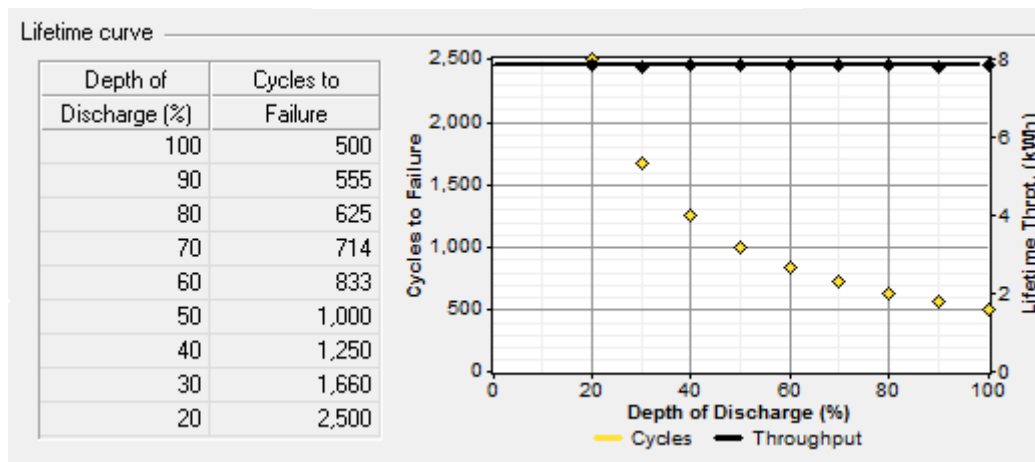


Abb. 18: Zyklen eines NiMH-Akkus ins Abhängigkeit von der Entladetiefe

Laut *Phocos* erreichen NiMH-Akkus eine Vollzyklen-Lebensdauer von über 500 Zyklen. Die Zyklenzahlen für restliche Entladetiefen lassen sich gemäß Formel 3 berechnet. Abb. 18 zeigt einen Ausschnitt aus *Homer* für die Zyklenzahlen in Abhängigkeit von der Entladetiefe für einen NiMH-Akku. Die Lade-/Entladezyklen von NiMH-Akkus liegen bei ca. 1000 Zyklen (Quaschnig, 2011, S. 211). Bei einem täglichen Gebrauch wäre die maximale Lebensdauer 2,5 Jahren. Die Gebrauchsdauer (Floatlife) wird deshalb mit 2,5 Jahren geschätzt. Abb. 18 und Abb. 19 zeigen weitere Angaben zum NiMH-Akku.

Tabelle 4 zeigt den täglichen Stromverbrauch für die Simulation mit *Homer*. Tagsüber werden Handy und Radio aufgeladen und abends leuchtet die *Pico-Lampe*. Die Eingaben zum Stromverbrauch in *Homer* beziehen sich auf die Tabelle 4.

Nominal capacity:	2.1 Ah
Nominal voltage:	4.8 V
Round trip efficiency:	70 %
Min. state of charge:	2 %
Float life:	2.5 yrs
Max. charge rate:	0.71 A/Ah
Max. charge current:	1.5 A
Lifetime throughput:	7.82 kWh
Suggested value:	7.82 kWh

Abb. 19: Eingaben in Homer zum NiMH-Akku

Die Kosten sollen bei Aufnahme eines Kredits verzinst werden. In *Homer* wird der reale Zinssatz, somit der jährliche Kreditzins abzüglich der Inflationsrate, angegeben. Bei 14% Zinsen bei Aufnahme eines Kredits und bei einer 4,5%-tigen Inflationsrate, betragen die realen Zinsen 9 %.

$$i = \frac{(i'-f)}{(1+f)} = \frac{(0,14-0,045)}{(1+0,045)} = 9\% \quad (Homer)$$

Annual real interest rate (%)	<input type="text" value="9"/>
Project lifetime (years)	<input type="text" value="25"/>
System fixed capital cost (\$)	<input type="text" value="150"/>

Abb. 20: Eingabe des realen Zinssatzes in Homer

Von *Homer* berechnetes Ergebnis für eine *Pico-Lampe*:

Abb. 20 beinhaltet die Investitionskosten bei 25-jähriger Laufzeit. Beim „levelized COE“ sind, anders als beim Total NPC, die Zinsen miteinberechnet. Die Kosten mit und ohne Verzinsung fallen sehr unterschiedlich aus.

Levelized COE bezieht sich anders als bei Energiegestehungskosten auf die nutzvollere jährliche elektrische Energie, der beim 3-W Panel 2,49 kWh/jahr beträgt. Deswegen hat levelized COE einen viel höheren Wert als die Energiegestehungskosten.

Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%
PV array	4.71	100	DC primary load	2.49	100

Abb. 21: relevante Ergebnisse für die Berechnung von Levelized COE

$$COE = \frac{C_{ann,tot} - C_{boiler} E_{thermal}}{E_{prim,AC} + E_{prim,DC} + E_{def} + E_{grid,sales}} \quad (Homer)$$

Vollständigkeitshalber steht die komplette Formel, die für unseren Fall folgendermaßen vereinfacht werden kann:

$$a = \frac{(q-1)}{(1-q^{-n})} \quad (\text{Quaschnig, 2011, S. 368}), \text{ mit } q=1+p$$

$$a = \frac{(1,09-1)}{(1-1,09^{-25})} = 0,1018$$

$$Z = K_0 \cdot a \quad (\text{Quaschnig, 2011, S. 368})$$

$$COE = \frac{C_{\text{ann,tot}}}{E_{\text{prim,DC}}} = \frac{\text{Total NPC} \cdot a}{E_{\text{prim,DC}}} = \frac{229 \$ \cdot 0,1018}{2,51 \text{ kWh}} = 9,3 \$ / \text{kWh} \quad , K_0 \equiv \text{Total NPC}$$

Die Kosten “ Operating Cost” sind die Betriebskosten und kommen durch den Batterieaustausch zu Stande.

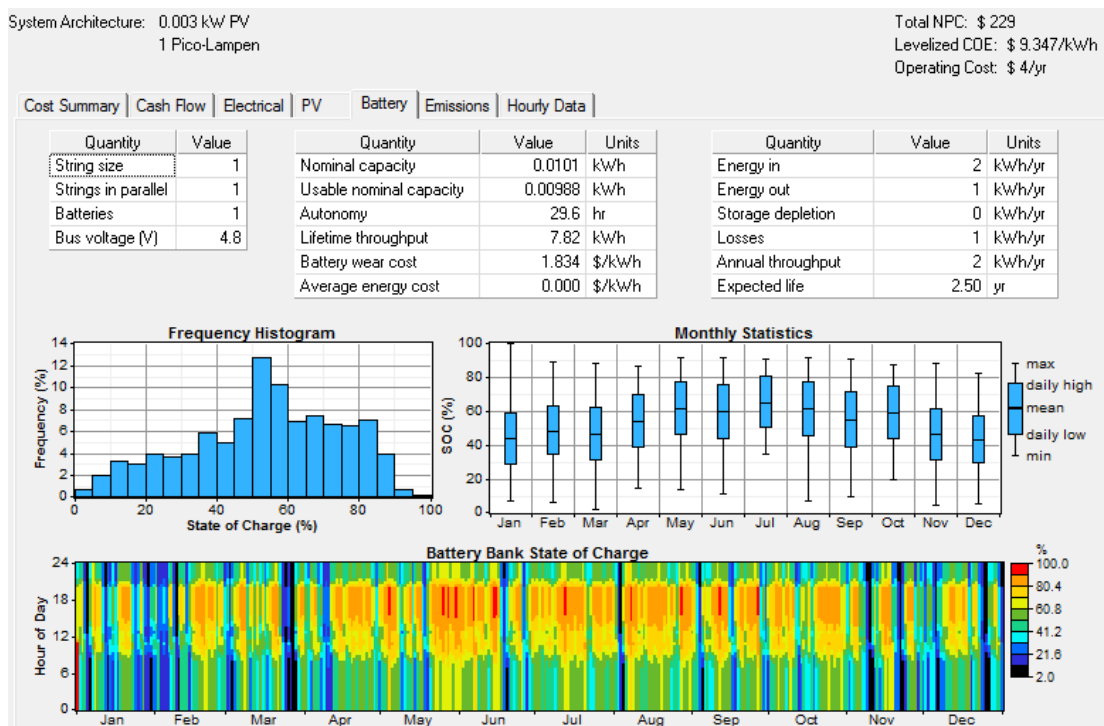


Abb. 22: NiMH-Akku-Ladezustand mit einem 3-W Panel

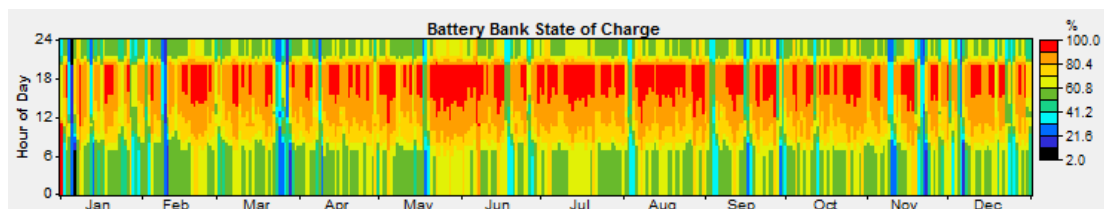


Abb. 23: NiMH-Akku-Ladezustand mit einem 5-W-Panel

Abb. 22 zeigt die Akkukapazität wenn eine *Pico-Lampe* installiert ist. Sie liegt in den Sommermonaten zwischen 30 und 60 % und in den Wintermonaten etwas höher. Abends werden oft niedrige Ladezustände erreicht. Für einen Vergleich zeigt die

Abb. 23 den Ladezustand der Batterie übers Jahr, wenn die installierte PV-Kapazität 5-Wp anstatt 3-Wp beträgt.

Die Investitionskosten setzen sich, wie in der Tabelle 3 dargestellt, zusammen. *Homer* benötigt für die Berechnung der Kosten die Realzinsen. Der Realzinssatz ist der Zinssatz nach Abzug der Inflation. Die Inflationsrate in Bolivien liegt jährlich bei 4,5% (Banco central) und der Kreditzinssatz liegt üblicherweise bei 14%.

Mit einem 3-W Panel wird zwar die Energie für 29 Stunden Autonomiedauer bereitgestellt, jedoch werden, wie die Abb. 22 und Abb. 23 verdeutlichen, mit einer höheren PV-Kapazität bessere Ladezustände der Batterie erreicht. *Homer* kann nur die Entstehungskosten mit einer Verzinsung berechnen, die der Projektlaufzeit, nämlich 25 Jahre, entspricht. Bei einer kürzeren Laufzeit wären die Kosten pro kWh deutlich niedriger.

6.2 Simulation mit *Homer* bei einem höheren Energieverbrauch

Im Folgenden werden die 3 Varianten der Energiespeicherung *Pico-Lampe*, Starterbatterie und Gel-Batterie mit Hilfe von *Homer* simuliert und verglichen.

Tabelle 5 zeigt den dimensionierten Stromverbrauch eines Tages. Dieser Stromverbrauch ist zwar moderat, aber 3-mal so groß als im vorherigen Beispiel. Die LED-Lampen strahlen in einem energiesparenden Modus 4 stundenlang. Abb. 24 zeigt die Eingaben in *Homer*. Abends stehen die Lampen nur für die Beleuchtung zur Verfügung, tagsüber können Radio und Handy laden.

Gerät	Anzahl	Leistung/W	Stunden/h	Tageszeit	Energieverbrauch /Wh
Lampe	3	1	4	abends	12
Radio	1	4	2	Mittags	8
Handy	1	5	0,5	Mittags	2,5
Laderegler	1				2
Gesamt					25

Tabelle 5 Stromverbrauch mit 3 Lampen

Die anfallenden Investitionskosten entsprechen Tabelle 3. Weil 2 *Pico-Lampen* zusätzlich installiert werden, liegen die Investitionskosten bei $150 \$ + 2 \cdot 65 \$ = 280 \$$.

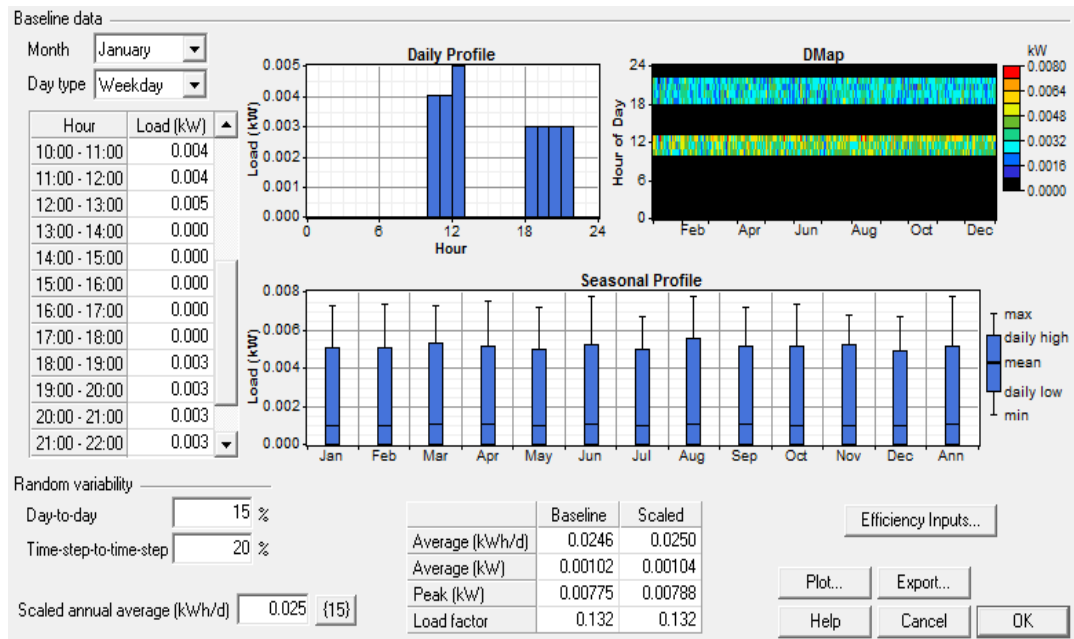


Abb. 24: Homereintrag zum Stromverbrauch über einen Tag

6.2.1 Pico-Lampe

Eingaben in Homer:

Die Eingaben entsprechen den Eingaben für eine *Pico-Lampe*. Der tägliche Stromverbrauch bezieht sich auf die Tabelle 5.

Ergebnisse:

Abb. 25 zeigt eine grafische Darstellung der Ergebnisse aus *Homer*. Die benötigte Photovoltaik-Kapazität und die Anzahl an benötigten *Pico-Lampen* ist in Abhängigkeit des täglichen Stromverbrauchs und der jährlichen Kapazitätsengpässe aufgetragen. Die Photovoltaik-Leistung ist farblich eingezeichnet und nimmt Werte zwischen 0 und 50 Wp an.

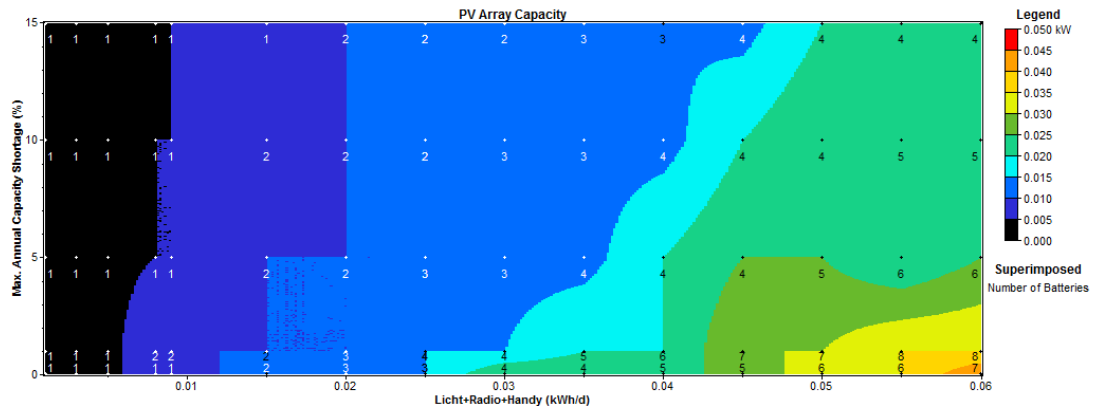


Abb. 25: Benötigte Lampen/Batterien für das Picosystem abhängig vom Stromverbrauch

Abb. 26 zeigt die berechneten Gesamtkosten der Pico-Systeme in Abhängigkeit des täglichen Stromverbrauchs auf der X-Achse und den Kapazitätsengpässen auf der Y-Achse. Die Anzahl der benötigten *Pico-Lampen* variieren zwischen 1 und 8. Beträgt die Anzahl der Batterien einen von 3 abweichenden Wert, muss die Abweichung mit 65 \$ multipliziert, vom Total NPC abgezogen bzw. dazu addiert werden. Beispiel: Bei 0,02 kWh/d täglichem Stromverbrauch und einem Kapazitätsengpass von 5%, berechnet *Homer* zwei benötigte *Pico-Lampen*. Die Kosten „Total NPC“ kann man in der Abbildung 25 ablesen und liegen bei ungefähr 480\$. Nach Abzug von $1 \cdot 65$ \$, liegen die Gesamtkosten bei: $480 \$ - 1 \cdot 65 \$ = 415 \$$

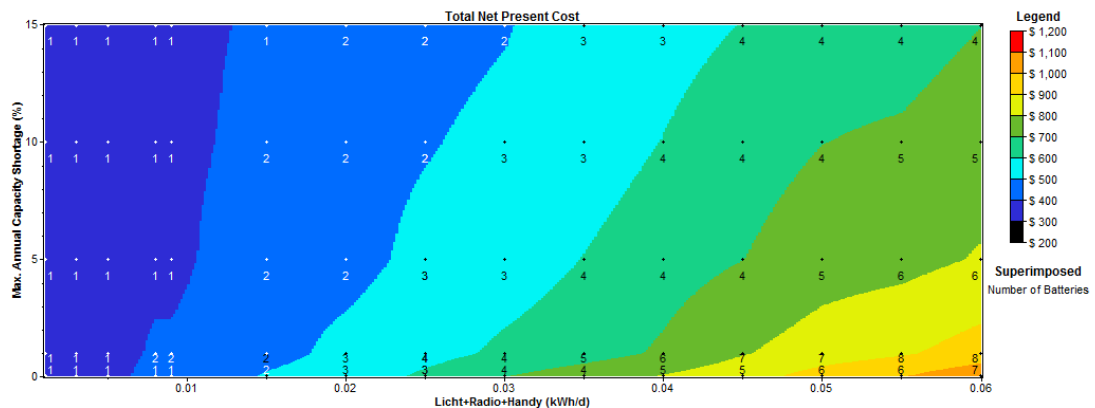


Abb. 26: Total NPC für Pico-Systeme abhängig vom Stromverbrauch

Abb. 27 zeigt den Batterieladezustand bei einem Prozent Kapazitätsengpass, wenn 3 *Pico-Lampen* installiert sind. Bei 0% Kapazitätsengpass werden 4 Lampen benötigt. Der Batterieladezustand liegt übers Jahr zwischen 60 und 90%. *Homer* rechnet 20 Wp, die doppelte PV-Leistung als die von *Phocos* angegebene Leistung.

$$\text{COE} = \frac{C_{\text{ann,tot}}}{E_{\text{prim,DC}}} = \frac{\text{Total NPC} \cdot a}{E_{\text{prim,DC}}} = \frac{564 \$ \cdot 0,1018}{9,06 \text{ kWh}} = 6,33 \$ / \text{kWh}$$

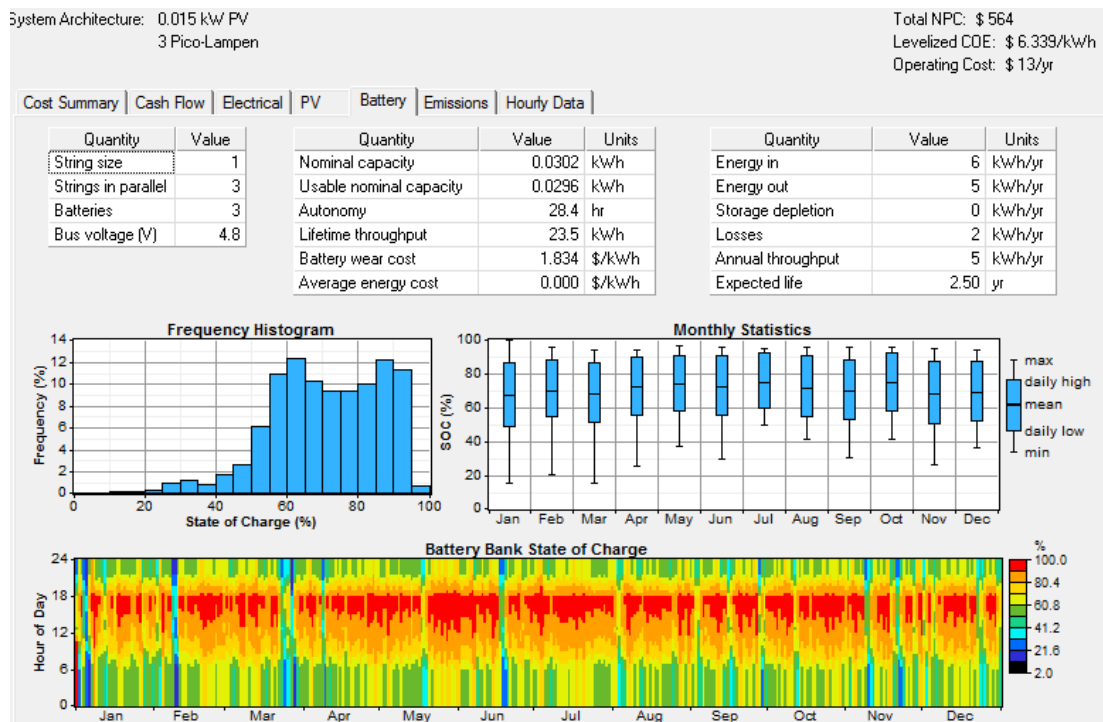


Abb. 27: Batterieladenzustand über ein Jahr für das Pico-System

6.2.2 Simulation der Kosten für Systeme mit Blei-Akkumulatoren

Die Kapazität der neuen Batterien muss kleiner sein, damit die Batterie weniger wiegt und der Austausch leichter fällt. Um kleinere Batterien einzusetzen, muss der Energieverbrauch sinken.

LED-Lampen haben zwar eine kleinere Lichtausbeute als CFL-Lampen, aber diese reicht zum Lesen und Schreiben aus. Ein weiterer Vorteil ist die längere Lebensdauer. Spätestens nach 8.000 Stunden muss eine CFL-Lampe ausgetauscht werden. Statistisch liegt die Lebensdauer einer LED-Lampe, Rückgang der Lichtintensität auf 80% des Anfangswertes, bei 50.000 Stunden. *Phocos*-LED-Lampen sind einstellbar auf 2 Beleuchtungsstufen. Auf der höchsten Stufe verbraucht die Lampe 2 W bei 120 lm Lichtintensität. Auf der zweiten Stufe verbraucht die Lampe 1 W mit 70 lm.

In Bolivien gibt es keine große Auswahl an Batterieherstellern. Es gibt einen bolivianischen Hersteller namens *Batebol*, der zwar Akkus für den solaren Einsatz anbietet, diese sind aber auf Flüssigsäurebasis und wiegen ca. 30 kg. Wartungsfreie Gel-Akkus werden zwar angeboten, sind aber meist Importware, und dementsprechend kosten sie fast doppelt so viel wie in den Herkunftsländern.

6.2.2.1. Simulierung mit Starterbatterien

In vielen Orten Boliviens ist der Austausch der schweren Solar-Batterien wegen der langen Wege mit vielen Hürden verbunden.

In der Einleitung wird bereits darauf eingegangen, welche Konsequenzen es hat, eine Starterbatterie in solaren Systemen einzusetzen. Sie wird bei zyklischer Nutzung bei 50% Entladung bereits nach wenigen Wochen nicht mehr zu gebrauchen sein. Gibt es keine andere Batterie, kann auf Starterbatterien zurückgegriffen werden. (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2011, S. 301).

Im Gegensatz dazu belegen Studien über SHSs in Bolivien, in denen Starterbatterien eingesetzt wurden, mit Laufzeiten bis zu 9 Jahren. Die zwischen 1988 und 1993 installierten SHSs verfügten über überdimensionierte 12-V-Starterbatterien mit 120 Ah Kapazität, damit die tägliche Entladung 10% der Nennkapazität nicht überschreitet.

Die Einstellung des Ladereglers vermeidet eine Entladung über 50%, damit der Ladezustand der Batterie nicht zu weit absinkt, und die Elektroden nicht sulfatieren. Bei Überschreitung wird der Stromkreis unterbrochen. Außerdem liegt die Elektrolytdichte bei $1,24 \text{ g/cm}^3$ statt normalerweise $1,28 \text{ g/cm}^3$, denn eine kleinere Elektrolytkonzentration verhindert die Korrosion an den Platten. Eine indigene Organisation wurde ausgebildet und übernahm die Wartung vom Projektbeginn bis 1992. Danach war jeder Haushalt selbst für sein SHS verantwortlich. 1997 wurden die Batterien der SHSs untersucht.

Der Kapazitätsrückgang reicht zwar je nach Benutzung von 50% bis 98%, aber bei 80% der Haushalte waren die Batterien weiterhin im Einsatz.

Es hat sich bei den Untersuchungen herausgestellt, dass der Hauptgrund für den Kapazitätsverlust zum einen die Überbrückung des Ladereglers darstellte und zum anderen Korrosionen an den Platten, die aufgrund von Überladungen, zum Kapazitätsverlust führten. (Lorenzo, 1998)

In Bolivien werden Autobatterien mit 35 Ah Kapazität und 12 V Spannung hergestellt. Diese serienmäßig hergestellten Batterien kosten ca. 65 \$ bei einem Gewicht von ungefähr 12 kg. Aufgrund des relativ niedrigen Gewichts fällt der Transport leichter als bei üblichen Solar-Akkus. Wie in der Studie sollte der tägliche Stromverbrauch unter 10-20% der Batteriekapazität liegen.

Im geladenen Zustand, ist der Kapazitätsrückgang aufgrund von Sulfatierung minimal.

Zwar wird davon abgeraten, Autobatterien für den solaren Einsatz zu verwenden, aber bei einem sehr niedrigen Energieverbrauch erreichen LKW-Batterien eine Lebenserwartung von 2 Jahren, bis die verfügbare Kapazität auf 80% der Nennkapazität sinkt. Wie in der Studie aus Bolivien zu Starterbatterien können sie aber weiterhin genutzt werden.

Bei dieser Simulation bezieht sich der Stromverbrauch auf die Tabelle 5.

Kosten:

Regler	40\$
Kabel	35\$
drei 2-W LED-Lampe	75\$
Radio	20\$
Photovoltaik-Stand	5\$
Zigarettenanzünderbuchse	20\$
= Systemkapitalkosten in <i>Homer</i>	195\$
Batterie	65 \$
PV-Panel	8 \$/Wp

Tabelle 6 Investitionskosten für Starter- und Gel-Batterie

Manuelle Berechnung der Kapazitäten:

PV-Kapazität:

$$P = \frac{E}{K_{Temp} \cdot V_{Anpassung} \cdot N_{sonne} \cdot K_{schräg} \cdot V_{Leitung} \cdot V_{Umwandlung}}$$

$$= \frac{25 \text{ Wh}}{0,9 \cdot 0,9 \cdot 5,2 \text{ h} \cdot 1,1 \cdot 0,94 \cdot 0,8} = 7,2 \text{ W}$$

Benötigte Batteriekapazität bei 20% Entladetiefe und 3 Tage Autonomiedauer:

$$C_n = \frac{E \cdot N_a}{t_z \cdot U_n} = \frac{25 \text{ Wh} \cdot 3 \text{ Tage}}{20\% \cdot 4,8\text{V}} = 31,25 \text{ Ah}$$

Eingegebene Daten in *Homer*:

Die Einstellungen zum Stromverbrauch und zum PV-Panel sind dieselben wie die für die *Pico-Lampe*.

Es ist schwer, konkrete Zahlen zur Lebensdauer einer Autobatterie zu nennen, da nur wenige Tests mit Autobatterien zur Verfügung stehen. Aus den Zahlen der Literatur und der Studie in Bolivien wird für die Simulation eine maximale Lebensdauer, Floatlife, von 4 Jahren angenommen. Die eingeschätzte Vollzyklen-Lebensdauer ist um einiges niedriger als bei Nass-Solar-Akkus, mit 150 bis 250 Vollzyklen. Für die Kapazitätskurve ist nur der C_{20} -Wert, 35 Ah, bekannt. Abb. 28 zeigt die Angaben zu den Zyklenzahlen, Wirkungsgrad und weitere Daten der Starterbatterie in *Homer*.

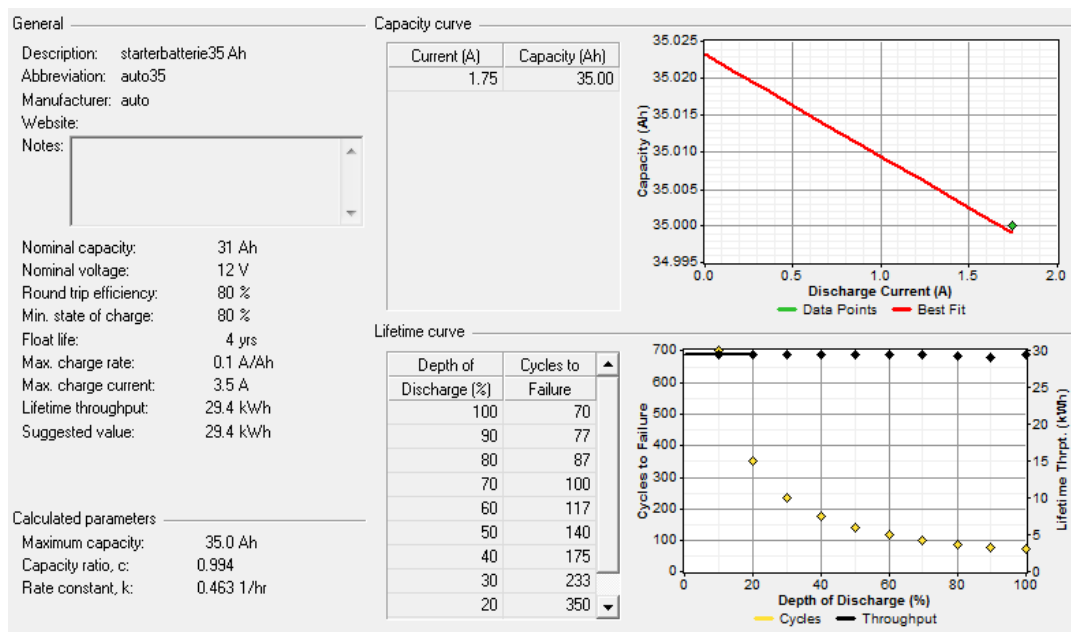


Abb. 28: Eigenschaften der Starterbatterie

Abb. 29 zeigt die angenommenen Kosten der Starterbatterie beim Neukauf und Ersatz. Da Starterbatterien Wartung benötigen, wurde 5 \$ jährlich für die Wartung der Batterie veranschlagt.

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1	65	65	5.00

Abb. 29: Kosten für den Austausch und die Wartung von Starterbatterien

Ergebnisse aus *Homer* für Starterbatterien:

Abb. 30 zeigt farblich die benötigte Modul-Kapazität in Abhängigkeit vom täglichen Stromverbrauch. Der Stromverbrauch auf der X-Achse reicht von 0 bis 60 Wh. Die Y-Achse bezieht sich auf die jährlichen Kapazitätsengpässen.

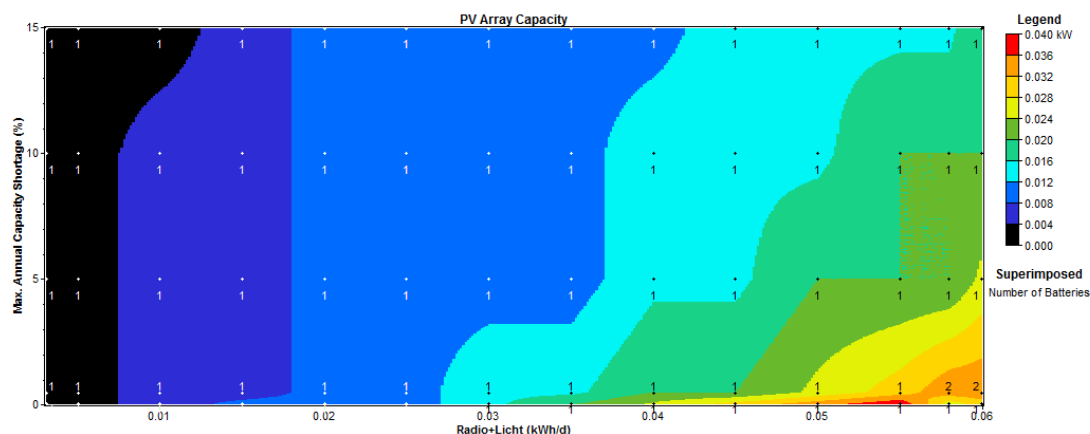


Abb. 30: Benötigte PV-Leistung abhängig vom Stromverbrauch bei Starterbatterien

Abb. 31 zeigt die entstehenden Kosten in Abhängigkeit vom täglichen Stromverbrauch und den Kapazitätsengpässen.

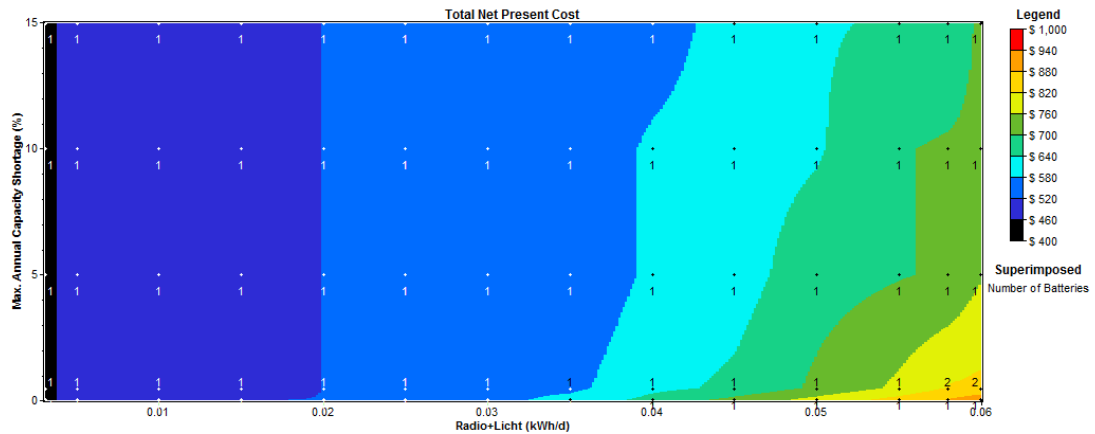


Abb. 31: Kosten über 25 Jahre mit Starterbatterien

Abb. 32 zeigt die Ergebnisse zur benötigten PV-Leistung und die Kosten bei 25 Wh Stromverbrauch täglich bei Einsatz einer Starterbatterie. Der Ladezustand der Autobatterie erreicht fast nie die 80% Grenze.

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{prim,DC}} = \frac{Total\ NPC \cdot a}{E_{prim,DC}} = \frac{472 \$ \cdot 0,1018}{9,12\ kWh} = 5,27 \$ / kWh$$

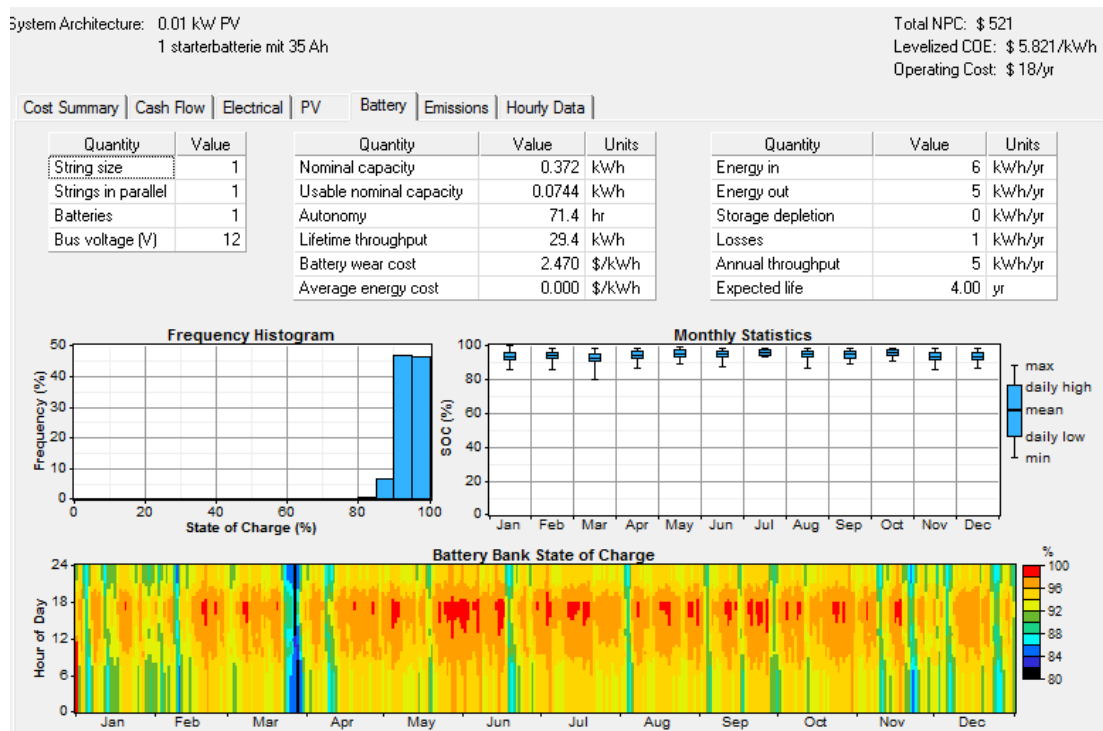


Abb. 32: Batterieladezustand bei 25 Wh Stromverbrauch bei einer Starterbatterie

6.2.2.2. Simulierung von Gel-Akkus in *Homer*

Eingaben in *Homer*:

Die Firma „Sonnenschein“ produziert Solar-Gel-Akkus ab 6,6 Ah (C_{100}) Kapazität mit 12 V Spannung. Die Kapazitätskurve, in der Abb. 33, bezieht sich auf Daten von Sonnenschein. Die Zyklenzahlen stammen aber aus der Literatur und haben konservativere Werte als die Angaben von Sonnenschein.

Die maximal erreichbare Lebensdauer wird mit 8 Jahren geschätzt. Dies wäre zweimal so lang wie die Lebensdauer von Solar-Nass-Akkus. (Mertens, 2011, S. 202). Außerdem liegt die Brauchbarkeitsdauer von Nass-Solarakkus bei 20°C bei 6 Jahren, bei Gel-Akkus wird mit einem größeren Wert gerechnet und 8 Jahre angenommen.

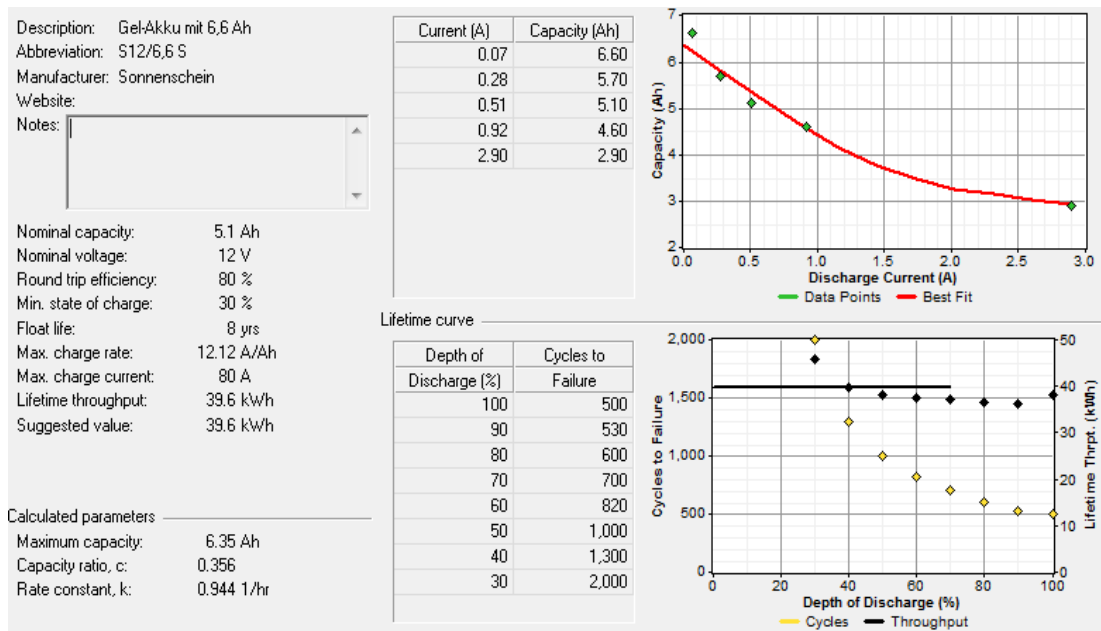


Abb. 33: Eigenschaften der Gel-Batterie

Investitionskosten bei Einsatz von Gel-Akkus:

Regler	40\$
Kabel	35\$
drei 2-W LED-Lampe	75\$
Radio	20\$
Photovoltaik-Stand	5\$
Zigarettenanzünderbuchse	20\$
= Systemkapitalkosten in <i>Homer</i>	195\$
Zusätzlich Batterie	110 \$
PV-Panel	8 $\frac{\$}{W_p}$

Tabelle 7 Kosten bei Systemen mit Gel-Akku

Manuelle Berechnung der PV-Kapazität:

$$P = \frac{E}{K_{Temp} \cdot V_{Anpassung} \cdot N_{Sonne} \cdot K_{Schräg} \cdot V_{Leitung} \cdot V_{Umwandlung}} =$$

$$= \frac{25 \text{ Wh}}{0,9 \cdot 0,9 \cdot 5,2 \text{ h} \cdot 1,1 \cdot 0,94 \cdot 0,8} = 7,2 \text{ W}$$

Benötigte Kapazität bei 70% Entladetiefe und 3 Tage Autonomiedauer:

$$C_n = \frac{E \cdot N_a}{t_z \cdot U_n} = \frac{25 \text{ Wh} \cdot 3}{70\% \cdot 12\text{V}} = 9,1 \text{ Ah}$$

Ergebnisse zu Gel-Akkus:

Die benötigte Photovoltaik-Kapazität abhängig vom Stromverbrauch ist in Abb. 34 zu sehen. Ab 50 Wh Stromverbrauch und 0% Kapazitätsengpass werden 2 Batterien benötigt. Abb. 35 zeigt die entstehenden Kosten in Abhängigkeit des Stromverbrauchs.

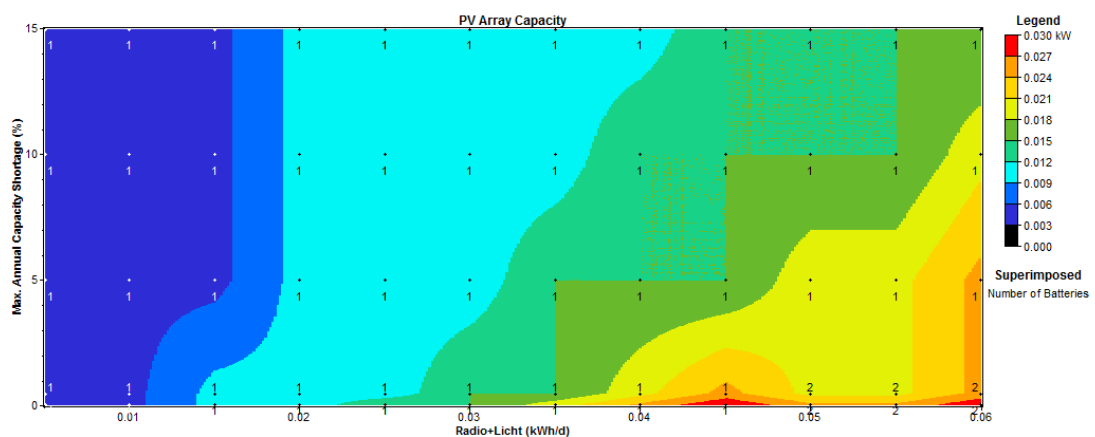


Abb. 34: Benötigte PV-Leistung bei 6,6 Ah Gel-Akkus

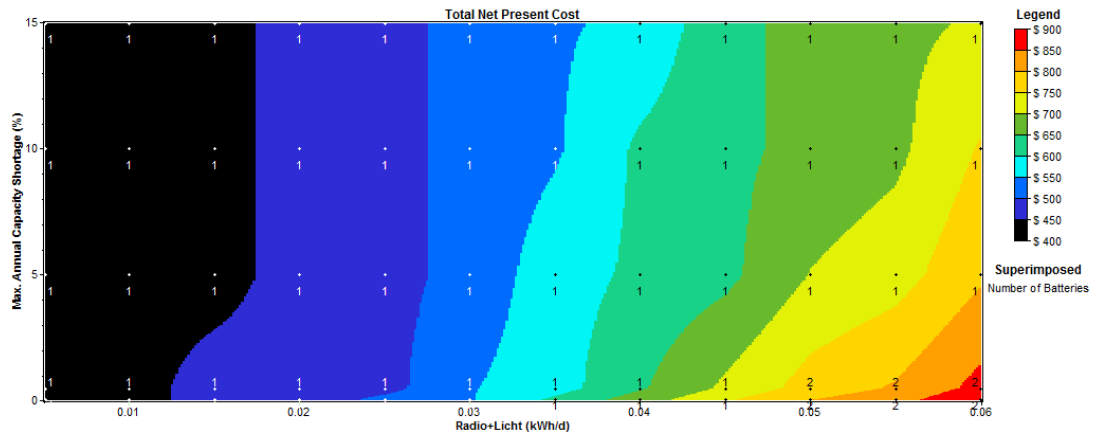


Abb. 35: Gesamte Kosten mit Gel-Akkus abhängig vom Verbrauch

Für 25 Wh Stromverbrauch täglich, zeigt Abb. 36 den Ladezustand der Batterie für ein Jahr.

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{prim,DC}} = \frac{Total\ NPC \cdot a}{E_{prim,DC}} = \frac{515 \$ \cdot 0,1018}{9,13\ kWh} = 5,7 \$ / kWh$$

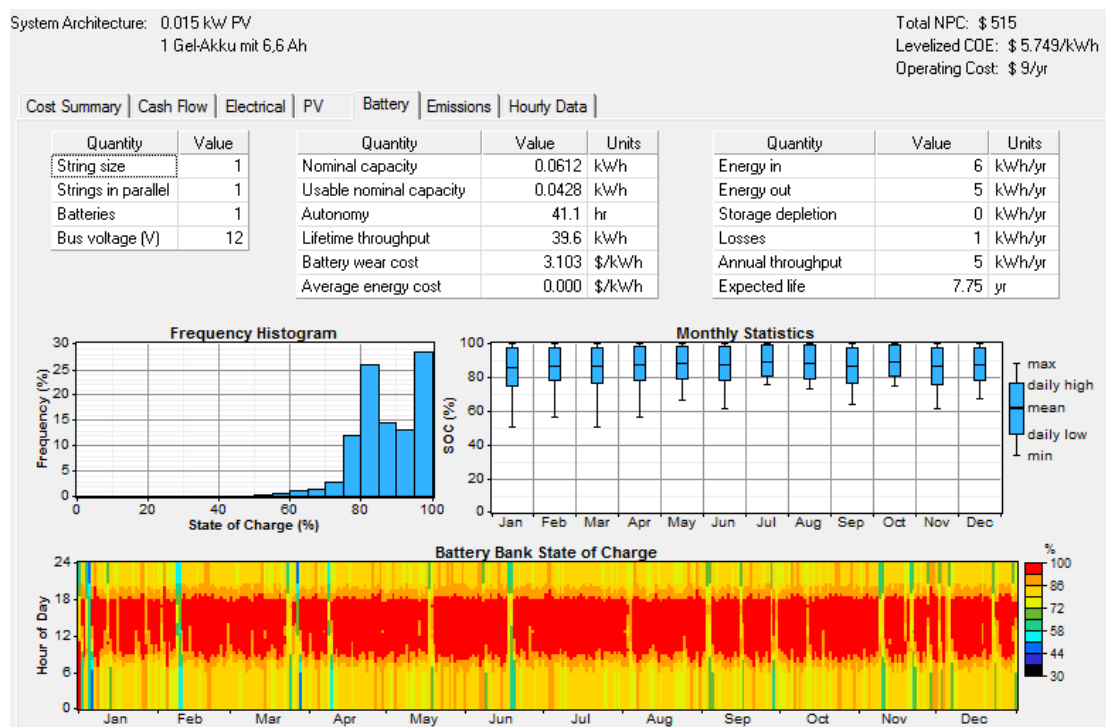


Abb. 36: Batterie-Ladezustand bei Gel-Akkus für ein Jahr

6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse aus *Homer*

Tabelle 8 zeigt zusammenfassend einen Kostenvergleich der mit *Homer* berechneten Varianten

	Täglicher Stromverbrauch/ Wh	Zahl an Picolampe / Batterien	PV-Kapazität/W	Autonomie-dauer/h	Total NPC/ \$	Levelized COE \$/kWh
Pico 1	8	1	3	29,6	229	9,3
Pico 3	25	3	10	28,4	564	6,3
Starterbatterie	25	1	10	71,4	521	5,3
Gel-Batterie	25	1	15	41,1	515	5,7

Tabelle 8 Kostenvergleich der mit *Homer* berechneten Varianten

7 Fazit

In der Bachelorarbeit werden der Einsatz von NiMH-, Starter- und Gel-Akkus auf ihre Wirtschaftlichkeit und Langlebigkeit untersucht, um festzustellen, welche von ihnen für entlegene Orte in Bolivien am besten geeignet ist. Bei allen drei Varianten wird der Austausch der Batterien aus Gewichtsgründen leichter fallen, als bei den klassischen Systemen.

Voraussetzung ist eine Verringerung des Stromverbrauchs durch den Einsatz von LED- statt CFL-Lampen. Durch den Einsatz von LED-Lampen sinkt nicht nur der Energieverbrauch, sondern auch die Kosten. LED-Lampen haben eine Lebenserwartung von 50.000 Stunden und damit ist die Lebensdauer mehr als sechsmal so lang wie die von CFL-Lampen und die Kosten für den Austausch entfallen. *Pico-Lampen* arbeiten mit NiMH-Akku und *Phocos* gewährt für die *Pico-Lampe* zwei Jahre Garantie. Somit ist es fraglich, ob die *Pico-Lampe* die gesamte Projektdauer ohne Austausch überlebt.

Die Simulation mit *Homer* ergibt, dass für die minimale Versorgung eines Haushalts mit Strom und Licht eine *Pico-Lampe* in Verbindung mit einem 3-W PV-Panel bereits ausreicht. Ist die installierte PV-Leistung größer als 3 W, werden bessere Batterieladezustände erreicht. Bei 8 Wh täglichem Stromverbrauch entsteht knapp die Hälfte der Kosten verglichen mit Starterbatterie-Systemen oder Gel-Akkus. Für den in der Simulation mit *Homer* angenommenen größeren Stromverbrauch, nämlich

25 Wh täglich, zeigt sich ein Kostenvorteil durch die Nutzung von Gel- und Starterbatterien.

Die Kosten nehmen beim Picosystem proportional zum Stromverbrauch zu. Beim Einsatz von Starterbatterien beginnen die Kosten bei 400 \$ und steigen langsam an. Die Autonomiedauer von Gel-Akkus beträgt damit knapp das 1,5-fache des Picosystems, und 35-Ah-Starterbatterien weisen mehr als die 2,5-fache Autonomiedauer des Pico-Systems auf. *Pico-Lampen* in Verbindung mit Kurbelgeräten können den Haushalt auch in strahlungsarmen Zeiten mit Strom versorgen.

Starterbatterien werden in Bolivien selbst hergestellt und machen das Land weniger abhängig von Importen. Bei der Installation von Akkus mit flüssigem Elektrolyt bestehen spezielle Anforderungen in Bezug auf den Ort der Installation. Tritt Gas aus, können Rauch und offene Flammen eine Gefährdung darstellen, weswegen der Raum durchlüftet sein sollte. Viele Haushalte in ländlichen Gebieten Boliviens erfüllen diese Sicherheitsvorkehrungen allerdings nicht (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2011, S. 309).

Studien aus Bolivien belegen zwar eine lange Lebensdauer von Starterbatterien, diese hängt aber davon ab, wie regelmäßig der Besitzer die Batterie wartet. Die heutigen Laderegler besitzen einen Überladungs- und Tiefentladungsschutz, außerdem macht der *Phocos* CML- Laderegler den Nutzer durch Warnsignale auf eine bevorstehende Stromknappheit aufmerksam, sodass er seinen Stromverbrauch umstellen kann.

Die Elektrolytkonzentration muss bei der Installation von Starterbatterien verringert werden, der Besitzer muss regelmäßig Wasser nachfüllen und die Gefahr, den Laderegler zu überbrücken, ist bei einem externen Laderegler vorhanden. Somit sind Starterbatterien bei schlechter Behandlung anfälliger, einen Schaden zu erleiden. Werden die Systeme durch ein ausgebildetes Personal betreut, ergeben die Tests mit *Homer* und die Studien aus Bolivien eine lange Lebenszeit, niedrigere Kosten und eine bessere Autonomiezeit im Vergleich zu den *Pico*-Systemen.

Für abgelegene Orte ohne Wartung kann somit der Einsatz von Gel-Akkus oder *Pico*-Systemen eine große Erleichterung bedeuten. NiMH-Akkus weisen zwar eine hohe Selbstentladungsrate auf, das Überbrücken des Ladereglers ist aber bei Einsatz von *Pico-Lampen* nicht möglich, und *Pico*-Systeme sind auch bei unsachgemäßer Behandlung weniger anfällig für Schäden als Gel-Akkus.

Das Fernsehen ist mit den *Pico*-Systemen nicht möglich. Weitere Tests mit *Homer* zeigen, dass mit Starterbatterien und Gel-Akkus zwar Fernsehen möglich ist, aber beschränkt auf 15 bis höchstens 30 Minuten täglich. Aufgrund der hohen Entladeströme bei 60-W-Fernseher erreicht die 35-Ah-Starterbatterie bzw. der 6,6 Ah-Gel-Akku bereits nach dieser Zeitspanne einen Ladezustand, der dem Akku langfristig schadet. Eine andere Möglichkeit ist der Einsatz von verbrauchsärmeren Fernsehgeräten wie Schwarz-Weiß-Fernsehern mit einem kleinen Bildschirm.

Der Umbau der kaputten Systeme kann mit allen drei genannten Akkuvarianten erfolgen. Werden sie durch Gel-Akkus ersetzt, so ist eine kleine Modifikation am Laderegler notwendig. Der *Phocos*-Laderegler ist sowohl für Flüssigsäure- als auch Gel-Akkus geeignet. Der Laderegler wird durch das Schließen einer Steckbrücke auf Gel-Betrieb umgestellt (*Phocos*, S. 12).

Bei der Simulation mit *Homer* fällt auf, dass *Homer* nicht für kleine SHSs entworfen ist, sondern für große Hybridsysteme. Sehr oft fehlen konkrete Daten von Seiten der Akku-Hersteller oder der Literatur, um eine sichere Simulation durchzuführen: Es fehlen Parameter wie die Zyklenzahlen der Batterien oder die maximale Lebensdauer (Float Life) der Akkus. Deshalb basieren einige Eingaben auf Annahmen. Die Kapazitätskurven von Starterbatterien und von NiMH-Akkus wurden ausgelassen, da es auch hier an verfügbaren Daten mangelt. Diese fehlerbehafteten Annahmen beeinflussen die Ergebnisse.

In vielen Orten Boliviens liegt die Tagestemperatur zwischen 10 und 15 °C. Niedrige Temperaturen und niedrige Entladeströme wirken sich positiv auf die maximale Lebensdauer der Batterie aus, wie auch die Studie des World Conference in der Hochebene Boliviens belegt (Lorenzo, 1998). Es ist schwer, die konkrete maximale Lebensdauer einer Batterie einzuschätzen, aber die Simulation mit *Homer* bestätigt, dass groß dimensionierte Batterien aufgrund der niedrigen Entladeströme eine lange Lebensdauer erreichen können.

Zusammenfassung

In Bolivien werden seit Ende der 80er Jahren SHSs genutzt. Inzwischen wurden in Bolivien über 25.000 herkömmliche Photovoltaik-Systeme installiert (Hegedus, 2010, p. 1096). Ein Großteil ist jedoch nicht mehr in Betrieb, da der Austausch der schweren Solar-Akkus in entlegenen Orten nicht immer leicht fällt.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, ob die in Bolivien installierten Solar-Akkus durch Leichtere ausgetauscht werden können. Zunächst werden die verschiedenen Akkumöglichkeiten vorgestellt, nämlich Flüssigsäure-Solar-, Gel-Solar-, Starter-, NiMH-, NiCd- und Lithium-Ionen-Akkus. Anschließend werden NiMH-, Starter- und Gel-Akkus näher untersucht.

Mit der Software *Homer* werden diese Akkumulatoren auf ihre Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit untersucht, wenn sie in Verbindung mit PV-Panels in Bolivien eingesetzt werden. Die Software *Homer* führt eine Simulation mithilfe von Daten der NASA durch, um den Akkuladezustand, die Akkulebensdauer und die benötigte PV-Leistung bei einer 25-jährigen Laufzeit festzustellen. Zunächst wird mit *Homer* eine *Pico-Lampe* simuliert, dann folgen weitere Tests mit Starter- und Gelbatterien.

Der Energieverbrauch wurde kleiner dimensioniert als für klassische Systeme, denn durch den Einsatz von LED- statt CFL-Lampen verringert sich der Stromverbrauch. Alle drei untersuchten Systeme (*Pico-Lampen* mit NiMH-Akkus, Starterbatterien und Gel-Solar-Akkus) haben wegen ihres geringeren Gewichts den Vorteil gegenüber Nasssolar-Akkus, leichter ausgetauscht werden zu können.

Das Ergebnis der Simulation ist, dass die Entscheidung, welches der drei Systeme am besten geeignet ist, vom Stromverbrauch abhängt.

Bei einem sehr niedrigen täglichen Stromverbrauch, nämlich bei ca. 8 Wh, ist die Installation von *Pico-Lampen* gegenüber Starter- und Gel-Akkus wirtschaftlicher. *Homer* schlägt ein größeres PV-Modul vor als das PV-Modul von Phocos, um bessere Batterieladezustände zu erreichen. Zusätzlich kann Radio gehört und Handys aufgeladen werden.

Bei dem dreifachen Stromverbrauch halten sich Starterbatterien und Gel-Akkus finanziell die Waage und kosten weniger als *Pico*-Systeme. Gel-Akkus wiegen im Gegensatz zu Starterbatterien weniger, da die Starterbatterien überdimensioniert sind. Somit fällt der Transport von Gel-Akkus leichter. Außerdem sind sie aufgrund der verschlossenen Konstruktion weniger Gefahren ausgesetzt. Der Wechsel auf Gel-Akkus könnte sich jedoch für einige entlegene Orte als problematisch erweisen, da diese Akkus meist nur in größeren Städten verkauft werden. 60-W Fernseher haben einen zu großen Stromverbrauch und können mit 35 Ah-Starterakkus bzw. 6,6 Ah Gel-Akkus nur für 15 bis 30 Minuten täglich betrieben werden. Zum Fernsehen eignen sich eher kleine Fernseher mit wenig Verbrauch.

Gel- und NiMH-Akkus haben den großen Vorteil, wartungsfrei zu sein. Der Umbau der kaputten Systeme kann mit allen drei Varianten erfolgen. Am Wichtigsten ist jedoch für diese Systeme der Umstieg auf LED-Lampen.

Die Simulation und eine Studie aus dem Altiplano ergibt zusätzlich, dass aufgrund der niedrigen Entladeströme bei allen 3 Akkuvarianten die maximal angenommene Lebensdauer erreicht werden kann.

Literaturverzeichnis

Antonio Luque, S. H. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Wiley.

Auswärtiges Amt, A. A. (16. Juli 2012). Abgerufen am 16. Juli 2012 von http://www.auswaertiges-amt.de/DE/Aussenpolitik/Laender/Laenderinfos/01-Nodes_Uebersichtsseiten/Bolivien_node.html

Banco central, B. c. Abgerufen am 2012. Juli 16 von <http://www.bcb.gob.bo>

battcenter. *battcenter*. Abgerufen am 16. Juli 2012 von <http://www.battcenter.de/downloads/infoblatt.pdf>

Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, D. G. (2011). *Planing and Installing Photovoltaic Systems*. Earthscan.

Falk, R. M. (2011). *Tecnologías de Energía Solar en Bolivia*.

Häberlin. (2010). *Photovoltaik*.

Hegedus, A. L. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Wiley.

Hegedus, A. L. (2010). *Handbook of Photovoltaic Science and engineering second Edition*. Wiley.

Homer

Kiehne, H.A. (2003). *BATTERY TECHNOLOGY HANDBOOK Second Edition*

Krink, J. (2011). *Evaluation von PV-Inselsystemen in Bolivien*.

Lorenzo. (1998). a field experience with automotive Batteries in SHS's. Wien, Österreich.

Mertens, K. (2011). *Photovoltaik*. München: Hanser.

pico. *phocos*. Abgerufen am 2012. Juli 20 von http://www.phocos.com/sites/default/files/document/Pico_System_Catalog_1mb.pdf

Quaschnig, V. (2011). *Regenerative Energiesysteme (Technologie-Berechnung-Simulation)*. München: Hanser-Verlag.

renova-energia. (kein Datum). Abgerufen am 2012. 07 29 von <http://www.renova-energia.com/pdf/paneles/Zytech%20ZT3P.pdf>

Sonnenenergie, D. G. (2011). *Planing and Installing Photovoltaic Systems*. Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungskommission vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.