



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Fakultät Life Sciences

Untersuchung von solaren Wasserpumpen in Boliviens Hochland zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Wasserförderungsprojekten

Bachelorarbeit

im Studiengang Umwelttechnik

von

Kilian Blumenthal

2074359

Abgabe: Hamburg, am 20. Mai 2016

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

Nunca sabemos el verdadero valor del agua hasta que el pozo está seco.

Thomas Fuller, 1732

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen herzlich danken, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben.

Auf deutscher Seite:

Meinen lieben Eltern, Ursula und Frank Blumenthal, die mir das Studium ermöglicht haben und mich von Studienplatzauswahl bis Bachelorarbeitskorrektur dabei begleiteten.

Meinem betreuenden Professor Timon Kampschulte, ohne den ich niemals in Bolivien gelandet wäre.

Eva Schubert von der NGO KarEn, für die großartige Vermittlungsarbeit und zahlreichen Anregungen zu meiner Arbeit.

Auf bolivianischer Seite:

Meinem Betreuer während des Praxissemesters und danach, Reinhard Mayer Falk, für die vielen Ideen und Anregungen zum Thema der solaren Wasserförderung.

Dem gesamten Team von Ecoenergía Falk, für die wunderbare, hochspannende Praktikumszeit. Besonders María Ferrel Zelada für ihr Organisationsgeschick und Adriel Flores Calle, der mich eine Woche lang bei der Datensammlung begleitete.

Der NGO Energética, für das Bereitstellen der Daten. Besonders Sylvia Arnez Camacho, für viele Erklärungen zum Projekt und Adrian Sarmiento Merida, den ich bei Inspektionen im Hochland begleiten durfte.

Der NGO Complejo Solar de Oruro, speziell Jhony Cuiza Churqui, der mich einen Tag lang zur Datensammlung durch rurale Gebiete führte.

Michael Mechlinski und Ivan Fernandez Guzman von der GIZ in La Paz, für die Bereitstellung vieler Dokumente.

Dirk Hoffmann, Experte zum Klimawandel in Bolivien und Einstein Tejada Vélez, die mir wichtige Informationen lieferten.

Meiner lieben Karen Uyuni Peredo, die mich in all der Zeit in Bolivien begleitete und während des Schreibens meiner Arbeit meine rechte Hand vor Ort war.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Formelverzeichnis	vi
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund der Arbeit	1
1.2 Fragestellung der Arbeit	1
2 Grundlagen	3
2.1 Grundsituation in Bolivien	3
2.1.1 Landesspezifische Informationen	3
2.1.2 Klimatische Bedingungen	4
2.1.3 Wasser- und Elektrifizierungssituation	5
2.1.4 Potentiale Boliviens	7
2.2 Bestandteile eines Solarpumpensystems	7
2.2.1 Photovoltaikpanel	8
2.2.2 Wasserpumpe	9
2.2.3 Wechselrichter	9
2.2.4 Kontrolleinheit	9
2.2.5 Wassertank	9
2.2.6 Batterien	10
2.2.7 Laderegler	10
2.3 Grundlagen Wasserpumpen	10
2.3.1 Kreiselpumpen	11
2.3.2 Verdrängungspumpen	12
2.3.3 Motoren	12
2.4 Dimensionierung eines solaren Pumpsystems	13
2.5 Nachhaltigkeit	17
3 Methodik der Datenaufnahme	19
3.1 Erfasste Daten	19
3.2 Standorte der untersuchten Systeme	19
3.3 Schwierigkeiten bei der Datenerhebung	20
4 Ergebnisse der untersuchten Systeme	22
4.1 Allgemeines	22
4.2 Datengruppe 1	22
4.3 Datengruppe 2	24
4.4 Fehlergründe	24
4.4.1 Komponenten	24
4.4.2 Installationen	26
4.4.3 Eigenanteil	27
4.4.4 Weitere	28
5 Ergebnisdiskussion	30
5.1 Theoretische Systemauslegung im Hochland Boliviens	30
5.2 Das System	34
5.3 Komponenten	34
5.3.1 PV-Module	34
5.3.2 Wasserpumpen	35
5.3.3 Pumpencontroller	36
5.3.4 Wassertank	37

5.4	Projektplanung	38
5.4.1	Örtliche Gegebenheiten	38
5.4.2	Dimensionierung	40
5.4.3	Finanzierung	41
5.4.4	Eigenbeteiligung	41
5.4.5	Wassergebühr	43
5.4.6	Strukturbildung	43
5.4.7	Schulungen der Nutzer	44
5.4.8	Nutzerzufriedenheit	44
5.4.9	Wartung	45
5.5	Nutzen	46
5.6	Nachhaltigkeit	46
	Zusammenfassung	vi
	Literaturverzeichnis	vii
	Anhang	xi

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Δ	Delta
$^{\circ}C$	Grad Celsius
$^{\circ}$	Grad
$F_{\ddot{u}}$	Überdimensionierungsfaktor
A	Ampere
AC	Alternating Current
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
Bs	Bolivianos (1 Euro = 7,80 Bolivianos, Stand 17.05.2016)
DC	Direct Current
DG	Datengruppe
dyn	dynamisch
el	elektrisch
EZ	Entwicklungszusammenarbeit
GIZ	Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
H	Höhe
h	Stunde
hyd	hydraulisch
I	Strom
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
m	Meter
MPP	Maximum Power Point
NGO	Nichtregierungsorganisation
P	Leistung
PV	Photovoltaik
SHS	Solar Home System
SPS	solares Pumpensystem
STC	Standart Test Conditions
U	Spannung
US	United States
V	Volt
W	Watt
Wp	Wattpeak

1 Einleitung

1.1 Hintergrund der Arbeit

Sauberes Wasser ist in vielen Bereichen der Welt ein knappes und kostbares Gut. So nutzten im Jahr 2015 noch geschätzt 663 Millionen Menschen Wasser aus unverbesserten Wasserquellen. Dazu gehören ungesicherte Brunnen und Quellen sowie Oberflächenwasser. Da diese nicht gegen eine Kontamination von außen, insbesondere durch Fäkalien, geschützt sind, stellen sie eine Gefahr für die menschliche Gesundheit dar. Von dieser Problematik sind weltweit besonders Menschen in ruralen Gebieten betroffen. So stammten 2015 79% der Gesamtnutzer der unverbesserten Wasserquellen und 93% der Gesamtnutzer der Oberflächengewässer aus ruralen Gebieten [Weltgesundheitsorganisation, 2015]. Wasser ist neben einem unabdingbaren Lebensmittel auch ein Schlüssel zur Armutsbekämpfung, Krankheitsvermeidung, verbesserter Bildung und wirtschaftlicher Produktivität [UNESCO, 2014]. Besonders in Entwicklungsländern sind große Regionen oftmals weder elektrifiziert, noch existiert ein Zugang zu sauberem Trinkwasser.

In den ruralen Gebieten Boliviens haben trotz vieler durchgeführter Projekte erst 65,1% der Bevölkerung einen Trinkwasserzugang [Ministerio de Medioambiente y Agua, 2015]. Die indigenen Gruppen im Hochland gehen zum Großteil der Landwirtschaft und Viehzucht nach und hängen somit in ihrer Existenz direkt von der Ressource Wasser ab. Auch die Folgen des Klimawandels machen sich in Boliviens Hochland bemerkbar – in steigenden Temperaturen und einer Verringerung des Niederschlagswassers. So kam es in den ersten Monaten 2016, auch verstärkt durch das Wetterphänomen El Niño, zu heftigen Dürren, die zu großen Ernteaussfällen bei Quinoa und Kartoffeln führten [Página Siete, 2016].

Das Wasser zum Eigenbedarf und für die Tierhaltung und Landwirtschaft muss daher in höherem Maße aus dem Boden entnommen werden. Da in ruralen Gebieten meist nur größere Dörfer einen Anschluss an das Stromnetz haben, steht kleinen Gehöften für die Nutzung von Wasserpumpen die Energie nur in konventioneller, manueller oder regenerativer Art zur Verfügung. Dank klimatischer Bedingungen ist der Verbund aus Pumpe und Solarmodulen im Hochland Boliviens eine sehr interessante Kombination. Abbildung 1 zeigt ein solares Pumpensystem (SPS) mit auf dem Tank montierten Modulen im Norden Potosís. Wegen der hohen Investitionskosten sind viele Bauern jedoch nicht in der Lage ein solches System zu finanzieren. Staatliche, aber auch von nationalen und internationalen Nichtregierungsorganisationen (NGO's) durchgeführte Projekte versuchen mit verschiedenen Ansätzen, die Menschen in dieser Problematik zu unterstützen.

1.2 Fragestellung der Arbeit

Weltweit gibt es kaum Evaluationen von bereits durchgeführten Projekten zur solaren Wasserförderung, was mit der Schwierigkeit der Systemüberwachung zusammenhängt. Viele der Installationen befinden sich verstreut in ruralen Gebieten von Entwicklungsländern, wodurch Visiten vor Ort mit einem hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden sind. Zu den bereits in Bolivien installierten solaren Pumpensystemen liegen bisher noch keine Erfahrungsberichte über Haltbarkeit, Nutzen und Nachhaltigkeit vor. Im Rahmen dieser Arbeit werden Daten, die mit Hilfe von Ecoenergía Falk S.R.L., Energética und Complejo Solar de Oruro gewonnen wurden, ausgewertet, um Aussagen über die oben genannten Punkte treffen zu können.

Dazu wird zunächst auf die besonderen sozialen, klimatischen und geografischen Gegebenheiten Boliviens eingegangen und die gegenwärtige Wasser- und Elektrifizierungssituation beschrieben. Anschließend werden Grundlagen zum Aufbau von SPSs vermittelt und dabei auf Pumpentechnik und den Energiebedarf beim Pumpen von Wasser eingegangen. Eine durchgeführte Auslegungsberechnung zeigt die Schritte bei der Planung eines SPS und hilft die untersuchten Systeme auf



Abb. 1: Solares Wasserpumpensystem im Norden Potosis

ihre Dimensionierung hin zu bewerten. Im Anschluss an eine Definition zum Thema der Nachhaltigkeit werden Datenerfassung und Ergebnisse vorgestellt. In einer nachfolgenden Diskussion werden die Ergebnisse mit Hilfe von Erfahrungsberichten aus anderen Projekten verglichen, um Möglichkeiten zur Projektoptimierung zu erhalten. Daraus werden Vorschläge abgeleitet, wie man zukünftige Wasserförderungsprojekte in Bolivien effizient und nachhaltig gestalten kann. Da von der schwierigen Wasser- und Elektrifizierungssituation besonders das *Altiplano* (Hochland) Boliviens betroffen ist und hier ein Großteil der Projekte durchgeführt wird, liegt bei den folgenden Überlegungen und Auslegungsrechnungen der Fokus auf diesem Gebiet.

2 Grundlagen

2.1 Grundsituation in Bolivien

2.1.1 Landesspezifische Informationen

2012 lebten in Bolivien 10,03 Millionen Personen auf einer Fläche von 1.098.581 km². Der Anteil der indigenen Bevölkerung liegt bei rund 41%, es werden 37 verschiedene indigenen Gruppen anerkannt. Den Großteil machen dabei Quechua (46%) und Aymara (42%) aus. Das Land ist aufgegliedert in neun Departamentos, die in 112 Provinzen aufgeteilt sind, die sich wiederum aus über 300 Municipios zusammensetzen. Innerhalb der Municipios werden einzelne Dörfer oder Gebäudeansammlungen als Comunidades bezeichnet, welches die unterste Verwaltungseinheit darstellt [Instituto Nacional de Estadística, 2013].

Bolivien ist ein Plurinationaler Staat, der zur Zeit von Evo Aymara Morales regiert wird. Er liegt mit einem mittleren Entwicklungsstand auf Rang 119 des Human Development Indexes, das Bruttonationaleinkommen beträgt 5.760 US\$ [Vereinte Nationen, 2015, S.209]. 39% der Bevölkerung leben unter der nationalen Armutsgrenze [Weltbank, 2014]. Dabei sind besonders die indigenen Völker der Aymara und Quechua betroffen, die zu einem großen Teil als Farmer in ruralen Gebieten des Hochlandes leben [O'Hare und Rivas, 2007].

Durch die große Fläche und vergleichsweise niedrige Einwohnerzahl ist die Bevölkerungsdichte mit 9,7 Personen/km² sehr gering. Verstreute Gehöfte oder Dörfer mit weniger als 2.000 Personen werden in Bolivien zu den ruralen Gebieten gezählt. Der Anteil der Bevölkerung, die in diesem Gebiet lebt, liegt bei 33% [Instituto Nacional de Estadística, 2013]. Die Hauptbeschäftigung in den ländlichen Gebieten liegt mit 75 % in der Landwirtschaft und Viehzucht [Instituto Nacional de Estadística, 2009].

Bolivien lässt sich, wie in Abbildung 2 zu sehen, anhand der Höhenlage in drei Bereiche unterteilen:

- Westliche Andengebiete mit Bergregionen (>4.000 m) und Hochland (3.000 – 4.000 m)
- Östliche Tieflande (<1.000 m)
- Talregionen (1.000 – 3.000 m) zwischen Hoch- und Tiefland



Abb. 2: Verschiedene Höhenlagen in Bolivien [O'Hare und Rivas, 2007]

2.1.2 Klimatische Bedingungen

Auswirkungen des Klimawandels auf die Ressource Wasser

Abbildung 3 zeigt den aktuellen Niederschlag pro Jahr in verschiedenen Bereichen Boliviens. Der Niederschlag im Altiplano ist dabei mit unter 450 mm/Jahr besonders gering. Neben einem Anstieg der Durchschnittstemperatur ist eine weitere Folge des Klimawandels in Bolivien die Abnahme der Niederschläge, was die Wassersituation im Andenhochland weiter verschärft [Eскурra et al., 2013].

Mit steigenden Temperaturen sind in Bolivien auch Gletscher betroffen, die einen wichtigen Anteil an der Wasserverfügbarkeit haben. Mit ihrem Rückgang steht zwar erst eine größere Wassermenge zur Verfügung, die dann aber mit dem Verschwinden der Gletscher abrupt ganz versiegt [Hoffmann, 2012, S.30]. Aufgrund des Rückgangs des jährlichen Niederschlags, der Temperaturzunahme und der Abnahme des Gletscherwassers ist das Hochland Boliviens stark von Trockenheiten bedroht [Oxfam, 2009]. Abbildung 4 zeigt die Gefährdung in verschiedenen Bereichen Boliviens.

Nach meteorologischen Messungen, aber auch nach der Wahrnehmung der Bevölkerung des Hochlandes, hat sich die Art und Weise des Niederschlages geändert. Die Regenzeit, die normalerweise mit dem astronomischen Sommer Ende Dezember einsetzt, beginnt nun später. Sie ist von kürzerer Dauer, dafür jedoch intensiver [Hoffmann, 2012].

Über die in Bolivien verfügbaren Grundwassermengen sowie die Einflüsse des Klimawandels auf sie gibt es bislang keine Studien. Nach Energética gibt es dennoch ausreichende Indizien um annehmen zu können, dass die verfügbaren unterirdischen Wasserreservoirs beträchtlich sind. Dabei muss jedoch zwischen fossilem Wasser in tieferen Erdschichten und oberflächennahen Grundwasserleitern unterschieden werden. Letztere speisen sich größtenteils durch Niederschläge, sodass sie sich bei längeren Trockenheiten nicht ganz auffüllen, was zu einem Absinken des Grundwasserpegels führt [Fernandez et al., 2012].

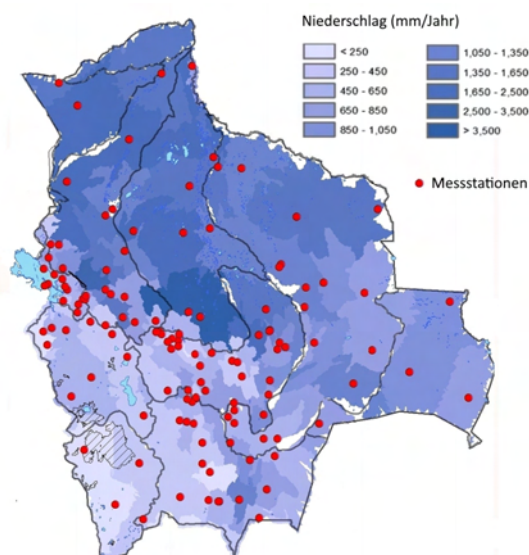


Abb. 3: Der Jahresniederschlag in Bolivien [Eскурra et al., 2013, angepasst]

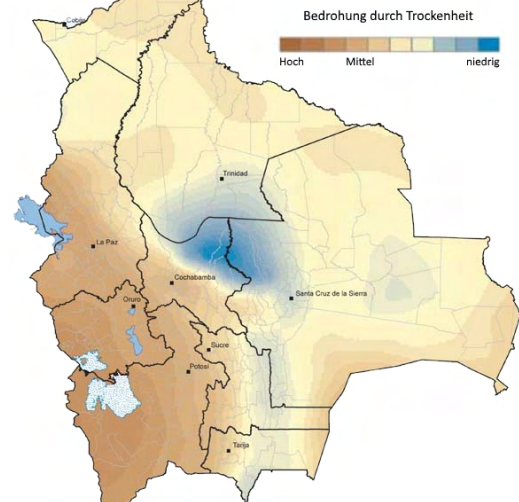


Abb. 4: Stärke der Bedrohung durch Trockenheit [Oxfam, 2009]

Temperaturen in Boliviens Hochland

Trotz der Höhe zwischen 3.000 m und 4.000 m herrscht im Hochland Boliviens ein kühlgemäßiges Klima, was mit der Nähe zum Äquator zusammenhängt. In den Monaten des astronomischen

Winters kommt es, besonders nachts, zu Frostereignissen. In den Sommermonaten übersteigt die Temperatur selten 20 °C. Tabelle 1 zeigt die durchschnittlichen monatlichen Temperaturen im Jahr 2015 in den Städten La Paz, Oruro und Potosí.

Tab. 1: Durchschnittliche monatliche Temperaturen in den Städten La Paz, Oruro und Potosí im Jahr 2015 in °C [Weather Underground, 2016]

	La Paz			Oruro			Potosí		
	T (Ø)	T min	T max	T (Ø)	T min	T max	T (Ø)	T min	T max
Januar	8,4	3,4	13,2	11,1	5,3	17,2	8,9	4,1	13,9
Februar	9,3	3,8	14,8	11,9	6,0	18,4	9,2	3,5	15,4
März	9,4	4,0	14,5	12,0	5,3	19,0	9,1	3,5	15,2
April	7,9	2,5	13,2	10,5	3,5	17,9	8,8	2,0	15,6
Mai	6,5	-1,8	14,6	5,9	-4,3	16,8	6,1	-2,8	15,2
Juni	6,0	-3,6	15,5	5,2	-6,3	17,3	7,0	-3,7	17,5
Juli	5,2	-3,9	14,4	4,1	-7,2	16,0	5,1	-4,5	15,0
August	6,1	-3,0	15,0	6,0	-4,2	16,5	6,3	-3,0	15,8
September	7,4	-1,0	15,5	8,6	-1,3	18,9	7,9	-1,5	17,4
Oktober	8,5	0,6	16,2	10,3	1,0	20,0	9,7	1,3	18,0
November	9,5	3,1	16,0	11,9	3,5	20,8	10,0	2,1	18,0
Dezember	9,4	2,9	15,9	12,1	4,2	20,7	10,5	2,2	18,7

2.1.3 Wasser- und Elektrifizierungssituation

Zugang zum Trinkwasser

Der Zugang zu Trinkwasser in urbanen Gebieten lässt sich in Bolivien in drei Typen unterteilen: Wasserleitungsnetz, öffentliche Wasserstellen und mobile Wassertanks. In den ruralen Gebieten wird Wasser aus Brunnen (mit und ohne Hilfe von Pumpen), Flüssen/Kanälen und Seen/Lagunen/Wasserlöchern genutzt [Hartmann-Luzio, 2003, S.24].

Tab. 2: Haushalte mit Zugang zum öffentlichen Wasserleitungsnetz und elektrischer Energie in % [Instituto Nacional de Estadística, 2013]

	Wasser		Strom	
	2001	2012	2001	2012
national	62,3	68,3	64,4	82,3
urban	82,9	83,3	89,5	95,6
rural	29,6	40,3	57,5	57,5

Tabelle 2 zeigt den Anteil an Unterkünften, die in den Jahren 2001 und 2012 einen Zugang zum öffentlichen Wasserleitungsnetz und elektrische Energie durch das Stromnetz, einen Generator oder Erneuerbare Energien hatten. Der starke Zuwachs wurde durch viele Programme der ländlichen Elektrifizierung und Erweiterungen des Wassernetzes erreicht. Auf die beiden wichtigsten Förderungen soll kurz eingegangen werden:

- Das Programm *Más inversión para agua – Mi Agua* startete 2011 mit einer ersten Phase, in der jedem Municipio 300.000 US\$ für Wasser- und Bewässerungsprojekte zur Verfügung gestellt wurden. Besonders in kleinen Comunidades konnten große Verbesserungen erzielt werden, das Programm durchläuft aktuell zwei weitere Phasen. Bis Juli 2015 entstanden in 335 Municipios insgesamt 2.778 Projekte zur Trinkwasserbereitstellung und Bewässerung. Die Kosten belaufen sich auf 2.814 Millionen Bolivianos. [Ministerio de Medioambiente y Agua, 2016]

- Das Regierungsprogramm *Electricidad para vivir con dignidad* sorgt mit vielen Teilprojekten für die Elektrifizierung vieler ruraler Gebiete. Das Programm ist in vier Phasen eingeteilt, die die vollständige Elektrifizierung bis zum Jahr 2025 zum Ziel hat. Auf das Unterprogramm *Infraestructura descentralizada para la transformación rural* entfallen dabei große Teile der Investitionen, um Elektrifizierungsprojekte in ruralen Gebieten durchzuführen. In der ersten Phase wurden mit Unterstützung der Weltbank 38,8 Millionen US\$ genutzt, um von 2003 bis 2011 über 10.000 Solar Home Systems (SHS) zu installieren, und über 20.000 Personen an das öffentliche Stromnetz anzubinden [Weltbank, 2011]. In einer aktuell laufenden zweiten Phase werden bis zu 14.500 Haushalte ans Stromnetz angeschlossen, sowie 12.500 SHSs installiert. Dieses Projekt läuft von 2014 bis 2021 und beläuft sich auf Kosten von ca 59,9 Millionen US\$ [Coaquira, 2015].

Im Jahr 2014 lag der Anteil der Bevölkerung mit Zugang zum Trinkwasser bei 82,4%. Dieser Prozentsatz berücksichtigt neben dem Wasserleitungsnetz auch andere Formen der Wasserversorgung wie öffentliche Wasserstellen, Wassertanks oder Brunnen. In ruralen Gebieten liegt der Anteil bei 65,1%, in urbanen Gebieten bei 90,5%. Das im Jahr 2000 unterzeichnete Millenniumsziel, eine nationale Abdeckung von 78,5% bis 2015 zu erreichen, wurde bereits im Jahre 2012 erreicht [Ministerio de Medioambiente y Agua, 2015].

Wassernutzung der ruralen Gebiete

In ruralen Gebieten wird das Wasser aus verschiedenen Quellen gefördert und genutzt, dazu gehören Flüsse, Quellen, Grundwasser und Regenwasser. Dieses wird als Trinkwasser, zum häuslichen Bedarf, zur Bewässerung von Feldern und zur Versorgung der Tiere genutzt. In vielen Gebieten des Hochlandes, in denen der Lama- und Alpakazucht nachgegangen wird, steht nur das Niederschlags- und Grundwasser zur Verfügung. Hier werden, wie in Abbildung 5 gezeigt, einfache manuelle Pumpen genutzt, um Wasser besserer Qualität zu erhalten. Abbildung 6 zeigt die Wasserlöcher, sogenannte *vigiñas*, mit denen die Tierherden mit Wasser versorgt werden. Es handelt sich dabei um offene Gruben, in denen sich Regenwasser und oberflächennahes Grundwasser sammelt. Die Wasserqualität der Löcher ist jedoch sehr schlecht, da es zum einen durch Winde zu einem Eintrag von Staub- und Schmutzpartikeln kommt, zum anderen die Fäkalien der Tiere oft ins Wasser gelangen. Die Nutzung der Wasserlöcher führt oft zu Erkrankungen der Tiere, ist jedoch die einzige Möglichkeit der Wasserversorgung.

In vielen Bereichen des Hochlandes hat das Grundwasser und der Boden einen erhöhten Salzgehalt. Davon sind besonders die zentralen Bereiche in den Departamentos La Paz und Oruros betroffen, die im Einzugsgebiet des Flusses Desaguadero liegen. Die erhöhten Salzkonzentrationen erschweren zum Teil die Landwirtschaft [Coudrain-Ribstein et al., 1995].



Abb. 5: Eine manuelle Wasserpumpe im Hochland



Abb. 6: Ein Wasserloch zur Versorgung von Lamas und Alpakas

2.1.4 Potentiale Boliviens

Die Abgelegenheit vieler Ortschaften und einzelner Gehöfte macht den Anschluss an öffentliche Wasser- oder Stromnetze sehr teuer oder durch geografische Gegebenheiten sogar unmöglich. Die Kosten für eine Erweiterung des Stromnetzes liegen schätzungsweise bei 10.000 bis 16.000 US\$/km [Meah et al., 2008]. Die Anwendung von autarken Systemen erneuerbarer Energien könnte hier helfen, Strom zu produzieren. Dieser lässt sich nutzen, um Wasser für die menschlichen Grundbedürfnisse, die Tierhaltung und für die Landwirtschaft zur Verfügung zu stellen.

Abbildung 7 zeigt die jahresdurchschnittliche tägliche Sonneneinstrahlung in Bolivien. Im Hochland werden dabei tägliche Werte von mindestens 6 kWh/m² erreicht, knapp das Doppelte der Einstrahlung in Deutschland. So kommt Freiburg im Süden Deutschlands auf 3,1 kWh/m²/Tag [JRC – Institute for Energy and Transport, 2012]. Die Gründe für die hohe Einstrahlung sind zum einen die Höhenlage, aber auch die Nähe zum Äquator und die damit verbundenen hohen Sonnenstände. Die Einstrahlung verbunden mit den für diese Höhenlage eher gemäßigten Temperaturen sorgen im Hochland für optimale Bedingungen für den Einsatz von Photovoltaikmodulen zur Energiegewinnung.

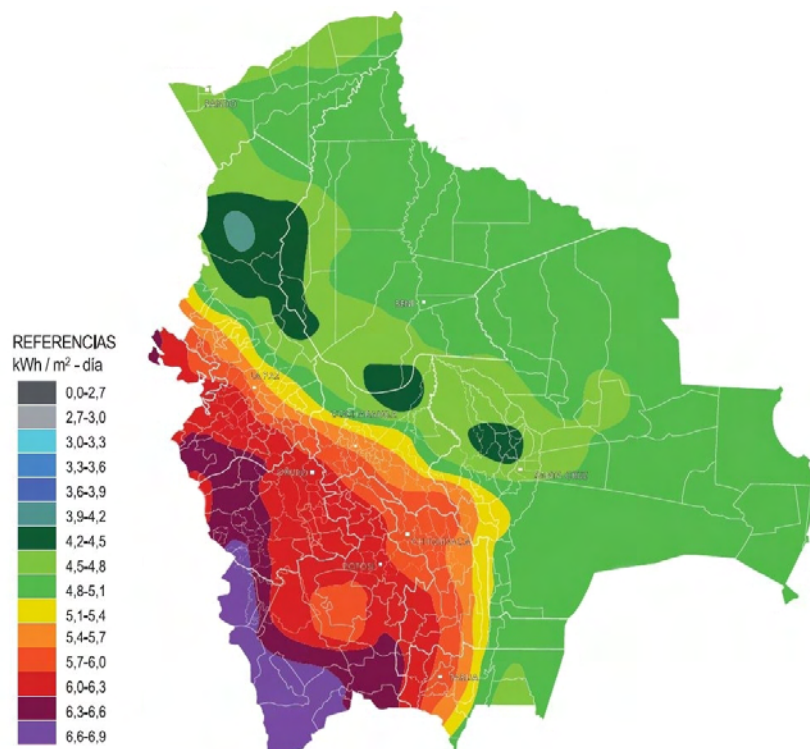


Abb. 7: Die jahresdurchschnittliche tägliche Sonneneinstrahlung in Bolivien in kWh/m² und Tag [Energética, 2011]

2.2 Bestandteile eines Solarpumpensystems

Abbildung 8 zeigt den allgemeinen Aufbau eines autarken Pumpsystems zur solaren Wasserförderung. Das Wasser wird während des Tages aus einem Brunnen oder Bohrloch gefördert und in einem Wassertank gespeichert, von wo es dann, unabhängig von der Tageszeit, genutzt und verteilt werden kann. Im Folgenden wird auf die verschiedenen Komponenten des Systems eingegangen.

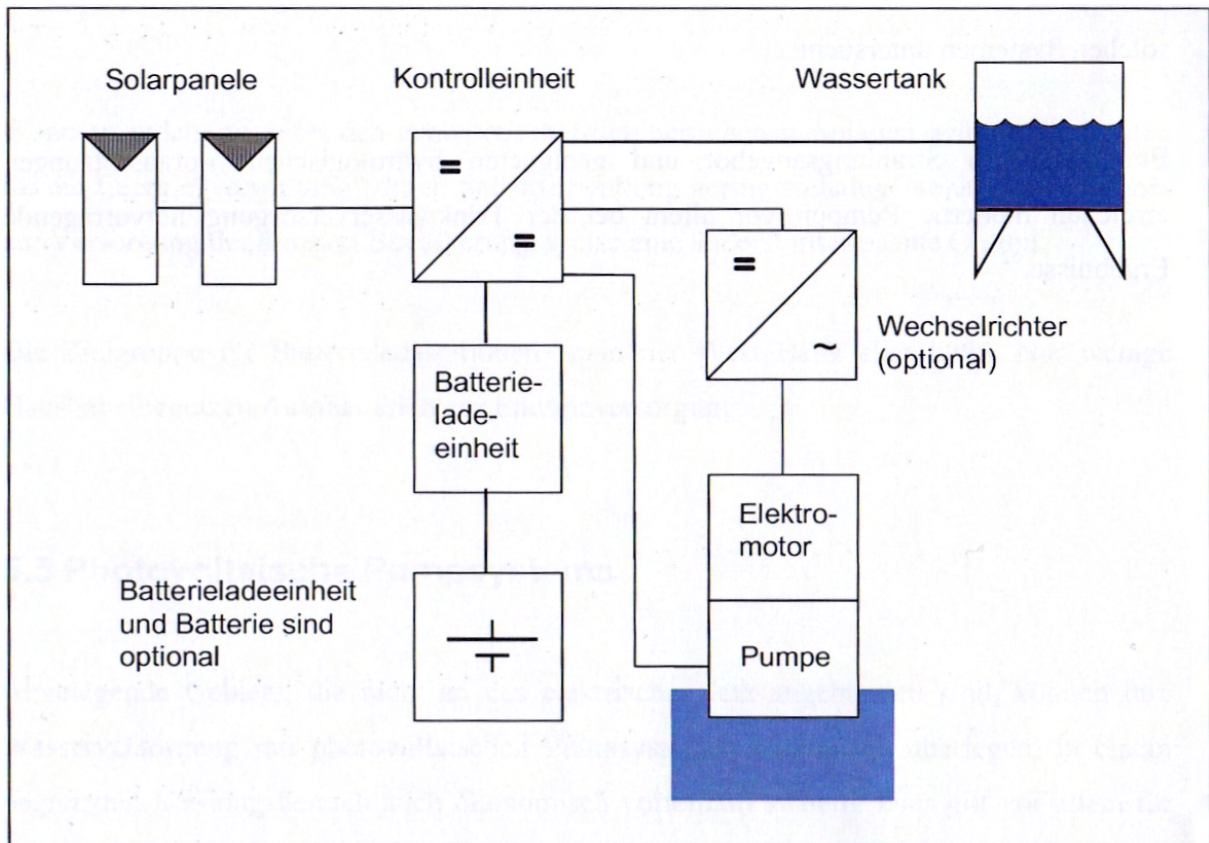


Abb. 8: Allgemeiner Aufbau von PV-Pumpsystemen [Schulz, 2004]

2.2.1 Photovoltaikpanel

Das Photovoltaikpanel ist eine von zwei Hauptkomponenten des solaren Pumpsystems und dient der Energiebereitstellung. Die Dimensionierung der Panele erfolgt nach einer Auslegungsrechnung, die in Kapitel 2.4 vorgestellt wird. Dabei können einzelne Panele parallel oder in Serie geschaltet werden, um die Leistungsanforderungen der Pumpe zu erfüllen.

Da sich Bolivien auf der Südhalbkugel befindet, müssen die Panele nach Norden ausgerichtet sein. Der Neigungswinkel der Solarmodule sollte in etwa mit dem Breitengrad übereinstimmen, um einen möglichst großen Teil solaren Einstrahlung aufzunehmen [Luque und Hegedus, 2011]. Im Fall von Bolivien liegt dieser zwischen 10° und etwa 23° . Bei Winkeln $<30^\circ$ kommt es jedoch insbesondere durch Staub zu stärkeren Verschmutzungen, da die Selbstreinigung durch Regenwasser schlechter funktioniert. Dadurch kann es zu Leistungsverlusten kommen, die bis zu 10% betragen [Mertens, 2015]. Im Hochland Boliviens können die Beeinträchtigungen höher liegen, da die Regenfälle saisonal bedingt sind, der Boden eher trocken ist und durch die Tierherden in der Nähe der Panele zusätzlich Staub aufgewirbelt wird. Für ein effektiv arbeitendes System müssen die Panele im regelmäßigen Abstand gesäubert werden.

In Bolivien kommt es, besonders in den grenznahen Gebieten zu Chile, verstärkt zu Diebstählen von PV-Panele. Diese werden von Banden über Nacht abgeschraubt und entwendet. Es macht daher Sinn, die Schrauben speziell zu sichern oder die Panele bei größeren Systemen zu umzäunen.

Bei den Panele ist auf eine richtige Platzwahl zu achten, um Verschattungen zu vermeiden. Da es im Hochland keinen Baumbewuchs gibt, liegen Schatten bebauungsbedingt vor (z.B. Haus, Wassertank auf Gestell, Umzäunung). Mit einer durchdachten räumlichen Anordnung, der Installation von Panele auf dem Wassertank (falls möglich) oder auf einem Gestell, können Verringerungen der Systemleistung durch Schattenwurf vermieden werden. Die Installation der

Photovoltaik-Module auf Gerüste hat weitere Vorteile: eine bessere Luftzirkulierung und damit Kühlung, einen guten Schutz vor Beschädigungen durch Nutztiere und ein größeres Hemmnis zum Schutz gegen Diebstähle.

2.2.2 Wasserpumpe

Die Wasserpumpe ist die zweite Hauptkomponente. Während konventionelle Wasserpumpen meist mit Wechselstrom arbeiten, sind spezielle solare Wasserpumpen für Gleichstrom ausgelegt, der direkt vom Solarpanel oder aber auch von einer Batterie kommt. Im Kapitel 2.3 wird genauer auf verschiedene Pumptypen und deren Eignung eingegangen.

2.2.3 Wechselrichter

Je nach Pumptyp wird für das System ein Wechselrichter benötigt, der den vom Panel ausgehenden Gleichstrom in einen Wechselstrom umwandelt. Diese Komponente ist jedoch oft zu vernachlässigen, da mittlerweile eine große Auswahl an solaren Wasserpumpen zur Verfügung steht und genutzt wird, die auf Basis von Gleichstrom funktionieren.

2.2.4 Kontrolleinheit

Die Kontrolleinheit, auch Pumpencontroller genannt, regelt die Leistungsversorgung der Pumpe. Während des Betriebsvorgangs ändern sich stetig verschiedene Parameter, die durch die Pumpenkontrolleinheit geregelt werden. Dazu zählt der sich in Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung kontinuierlich ändernde Strom, die statische Höhe des Wassers (siehe Abbildung 11, S.15) und die Füllhöhe des Wassertanks. Durch die Kontrolleinheit wird geregelt, dass die Pumpe erst angesteuert wird, wenn durch die Module die erforderliche Leistung zur Verfügung gestellt wird. Außerdem werden über Sensoren verschiedene Wasserstände gemessen, damit der Trockenlauf der Pumpe und das Überlaufen des Tankes verhindert wird [Morales und Busch, 2010]. Durch MPP-Tracker wird der Ausgang des Panels stetig überprüft und angepasst, sodass auch bei wechselnden Einstrahlungen eine maximale Leistungsabgabe erfolgt [Mertens, 2015, S.192]. Der Controller wird meist als eigenständige Komponente installiert, bei einigen Pumpen ist dieser jedoch schon in der Pumpe integriert.

2.2.5 Wassertank

Der Wassertank dient als Energie- und Wasserspeicher. Das geförderte Wasser gelangt zuerst in ihn, von wo es dann weiter verteilt werden kann. Je nach Dimensionierung kann das an sonnigen Tagen geförderte Wasser auch in der Nacht oder an folgenden, wolkigen Tagen genutzt werden. Um der Verdunstung und Verschmutzung vorzubeugen, eignen sich geschlossene Tanks. Bei niedrigen Temperaturen kann es zum Gefrieren des Wassers und damit zu Schäden am Tank kommen [M.Abu-Aligah, 2011]. Da es bei erneuerbaren Energien immer Schwankungen je nach Wetterlage gibt, müssen die Wasserspeicher größer dimensioniert werden, als es bei konventionellen Pumpsystemen der Fall wäre. So steht auch bei wolkigem Himmel oder Wartungen am System Wasser zur Verfügung. Für die Dimensionierung gilt daher die dreifache Größe des täglichen Wasserbedarfs als Erfahrungswert. Die Größe des Tanks hängt aber auch von lokalen Bedingungen ab. So kann dieser, in sonnenreichen Gegenden oder bei Vorhandensein anderer Wasserquellen, kleiner ausgelegt werden [Argaw, 2004]. Abhängig von der Größe können Wassertanks unterirdisch, auf dem Boden, oder auch auf einem Plateau errichtet werden. Um bei einem überirdischen Standort trotz anspruchsvollen Witterungsbedingungen eine hohe Lebensdauer zu erreichen, müssen UV-beständige Materialien verwendet werden. Um Leitungsrohre vor Frosteinflüssen oder äußeren

Beschädigungen zu schützen, sollten diese unterirdisch verlegt werden [Morales und Busch, 2010]. Steht der Wassertank auf einem Podest, sorgt die Höhe für einen Wasserdruck zur weiteren Verteilung. Innerhalb des Tankes muss ein Schwimmerschalter installiert werden, der über die Kontrolleinheit die Wasserförderung regelt [Christopher W. Sinton, 2004].

2.2.6 Batterien

Batterien können in PV-Pumpsysteme integriert werden, um an wolkigen Tagen als Energiezwischenspeicher zu agieren. Ist die Einstrahlung zu gering, kann die Pumpe durch die Batterie gespeist werden, um ein häufiges Ein- und Ausschalten der Pumpe zu vermeiden und ihre Lebensdauer zu erhöhen [Schulz, 2004]. Auch für den Fall, dass das während des Tages geförderte Wasser nicht ausreicht, könnten Batterien die Pumpe auch nach Sonnenuntergang weiter betreiben [Thomas, 1987]. In der Praxis werden jedoch meist keine Batterien verbaut, da sie die Pumpsysteme komplexer machen, die Kosten und Wartung erhöhen, zu Leistungsverlusten führen und eine zusätzliche mögliche Fehlerquelle darstellen [Morales und Busch, 2010] [Argaw, 2004].

2.2.7 Laderegler

Batterieladeeinheiten werden im System zwingend benötigt, wenn Batterien verbaut werden. Der Laderegler sorgt für den Über- und Tiefentladeschutz, verhindert ungewollte Entladung und zeigt den Ladezustand der Batterie an [Mertens, 2015].

2.3 Grundlagen Wasserpumpen

Tab. 3: Gegenüberstellung verschiedener Pumpalternativen [Christopher W. Sinton, 2004] [Thomas, 1987] [M.Abu-Aligah, 2011]

System Typ	Vorteile	Nachteile
Photovoltaik	<ul style="list-style-type: none"> - automatischer Betrieb - geringe Wartung - einfache Installation - lange Lebensdauer - portables System möglich - flexibel auf den Bedarf abgestimmt - geringe laufende Kosten - keine Brennstoffkosten 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Investitionskosten - geringe Förderung bei Bewölkung - Reparatur bedarf ausgebildete Techniker
Diesel	<ul style="list-style-type: none"> - moderate Investitionskosten - portables System - einfache Installation - umfassend erprobtes System 	<ul style="list-style-type: none"> - Treibstoff nötig - Lärm und Rauch - hohe Wartungskosten - geringe Lebensdauer - Reparatur bedarf ausgebildete Techniker - Besuche zur Betriebsführung nötig
Handpumpe	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Investitionskosten - einfache Technik - keine Treibstoffkosten - einfache Wartung 	<ul style="list-style-type: none"> - regelmäßige Wartung - niedriger Volumenstrom - unproduktive Nutzung von Zeit und Energie - unökonomische Nutzung des teuren Bohrloches
Wind	<ul style="list-style-type: none"> - lange Lebensdauer - geringe Investitionskosten - keine Treibstoffkosten 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Wartung nötig - saisonale Schwankungen bei Förderung - keine Förderung bei Windstille - Ersatzteilbeschaffung schwierig - aufwendige Installation mit Spezialwerkzeug

Die grundlegenden Möglichkeiten zur Wasserförderung sind in Tabelle 3 dargestellt. Da manuelle Pumpen für größere Volumen ausscheiden und die Installation von windbetriebenen Pumpsystemen in ruralen Gebieten schwierig zu gestalten ist, eignen sich für die Förderung vor allem PV-Pumpen oder Dieselpumpen. Letztere haben den Vorteil, wetterunabhängig Wasser fördern zu können und erprobte Systeme zu sein. Sehr nachteilig sind jedoch die laufenden Kosten für Treibstoffe und ihre schwierige Beschaffung in ruralen Gebieten, die Wartungshäufigkeit und die Lärm- und Abgasemissionen der Motoren.

Solare Wasserpumpen haben in weit abgelegenen Gebieten den Vorteil, automatisch und ohne Treibstoff zu funktionieren. Einmal installiert, beginnen sie bei ausreichender Einstrahlung mit dem Fördern von Wasser, ohne dass der Nutzer sich weiter um das System kümmern muss. Den Vorteilen stehen die Nachteile der hohen Investitionskosten und der Wetterabhängigkeit gegenüber, wobei die Systeme in vielen Fällen durch staatliche Programme oder mit anderen Hilfen subventioniert werden. Für die ruralen Gebiete im Hochland, in denen ganzjährig hohe Einstrahlungen vorhanden sind, ist daher die Photovoltaik-Wasserpumpe mit gut dimensioniertem Wassertank die beste Technik zur Wasserförderung.

Je nach Art der Wasserquelle lassen sich Pumpen in drei Typen einteilen:

- Tauchpumpen
- Oberflächenpumpen
- Schwimmpumpen

Tauchpumpen dienen meist für tiefe Brunnen, wo sie unterhalb des Wasserspiegels installiert sind und das Wasser nach oben drücken. Oberflächenpumpen eignen sich bei niedrigen Wassertiefen in Brunnen, Flüssen oder Tanks. Sie saugen das Wasser an die Oberfläche und schieben es weiter in einen Tank. Schwimmpumpen werden bei Wasserquellen mit sich stark ändernder Höhe verwendet und treiben an der Wasseroberfläche. Bei Tauch- und Schwimmpumpen sind Motor und Pumpe miteinander verbaut, bei Oberflächenpumpen können diese separat ausgewählt werden [Chandel et al., 2015].

Tauchpumpen sind vor Einflüssen wie Frost, UV-Strahlung oder Staub gesichert. Oberflächenpumpen sollten in einem verschließbaren Pumpenhaus betrieben werden. Sie lassen sich zu portablen Systemen, beispielsweise Schubkarren mit Panelen, verbauen. Damit kann das System an verschiedenen Wasserlöchern genutzt und vor Diebstahl geschützt werden.

Wasserpumpen lassen sich in zwei Kategorien unterteilen, Kreiselpumpen und Verdrängungspumpen. Auf diese wird im Folgenden eingegangen. Tabelle 4 zeigt einen Vergleich der Hauptmerkmale der beiden Pumpenkategorien.

Tab. 4: Vergleich der Eigenschaften einer Kreisel- und Verdrängungspumpe [Lorentz]

Pumpenkategorie	Modell	max. Förderhöhe	max. Volumenstrom	max. Leistungsaufnahme
Kreiselpumpe	PS150	20 m	4,0 m ³ /h	0,3 kW
Verdrängungspumpe – Exzentrerschnecke	PS200	40 m	1,3 m ³ /h	0,3 kW

2.3.1 Kreiselpumpen

Bei Kreiselpumpen treibt der Motor ein Laufrad mit Schaufeln an. Durch die Zentrifugalkraft wird das Wasser entlang der Schaufeln von innen nach außen beschleunigt. Die Rotationsgeschwindigkeit des Wassers wird durch eine Umlenkung im Gehäuse der Pumpe in Druck umgewandelt, der abhängig von der Drehgeschwindigkeit des Rades ist. Bei gleicher Drehzahl ist

das Fördervolumen abhängig von der Förderhöhe. Mit steigender elektrischer Stromaufnahme und damit Leistung steigt auch der Volumenstrom des geförderten Wassers [Weiß, 2014]. Damit passen sich diese Pumpen dem Ausgang des Solarpanels an, ohne vorgeschaltete Kontrolleinheiten oder MPP Tracker zu benötigen. Kreiselpumpen haben eine hohe Effizienz, die jedoch bei niedrigen Drehzahlen abnimmt. Sie eignen sich bei kleinen bis mittleren Förderhöhen und großen Volumenströmen [Chandel et al., 2015]. Abbildung 9 zeigt das Schaubild einer einfachen Kreiselpumpe.

2.3.2 Verdrängungspumpen

Die für die solare Wasserförderung genutzten Verdrängungspumpen sind Hubkolbenpumpen, Membranpumpen und Exzentrerschneckenpumpen. Der Motor bewegt in diesen Systemen Kolben, Membranen oder Schrauben. Dabei werden Hohlräume mit Wasser gefüllt, auf das durch die Bewegung eine Kraft wirkt. Es baut sich ein Druck auf, der die Wassersäule nach oben schiebt [M.Abu-Aligah, 2011]. Der Volumenstrom von Verdrängungspumpen ist direkt proportional zur Pumpendrehzahl und quasi unabhängig von der Förderhöhe. Bei diesem Typ von Pumpen müssen MPP-Tracker und Kontrollelektronik zwischen Panel und Pumpe installiert werden, um die speziellen Drehzahl-Drehmoment-Anforderungen zu erfüllen. Sie eignen sich für kleine Fördervolumen bei hoher Förderhöhe [Chandel et al., 2015]. Abbildung 10 zeigt die Funktionsweise von Membranpumpen sowie eine Exzentrerschneckenpumpe.

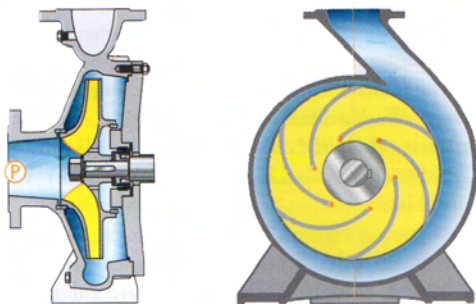


Abb. 9: Schaubild einer Kreiselpumpe [Hellmann, 2011]

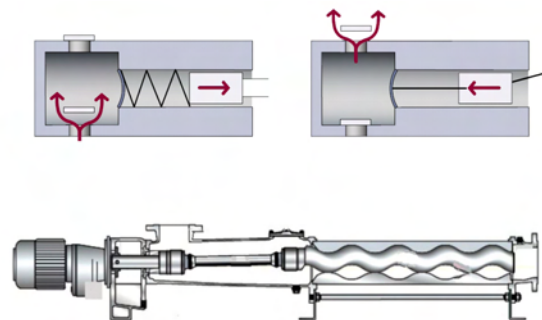


Abb. 10: Funktionsweise der Membranpumpe (oben) und Exzentrerschneckenpumpe (unten) [Grundfos, 2004] [Surek, 2014]

2.3.3 Motoren

Für den Antrieb der Pumpen kommen verschiedene Motortypen zum Einsatz. Dazu zählen:

- **AC-Motoren:** Synchron- und Asynchronmotoren für Pumpsysteme >7 kW. Im Verbund mit Solarmodulen sind DC-AC-Inverter nötig, die jedoch die Systemkosten erhöhen und die Effizienz durch Wandlungsverluste vermindern.
- **DC-Motoren:** Bürsten- und bürstenlose DC-Motoren können den vom Solarmodul erzeugten Gleichstrom direkt nutzen. Die bürstenlosen Motoren haben den Vorteil, kein Verschleißteil verbaut zu haben, das im regelmäßigen Abstand gewechselt werden muss.

[Gopal et al., 2013]

2.4 Dimensionierung eines solaren Pumpsystems

Tab. 5: Schritte bei der Dimensionierung eines solaren Pumpsystems [Morales und Busch, 2010]

Schritt 1	Wasserbedarf
Schritt 2	Typ der Wasserquelle
Schritt 3	Wasserspeicher
Schritt 4	System Layout
Schritt 5	Solare Einstrahlung
Schritt 6	Volumenstrom der Pumpe
Schritt 7	Förderhöhe der Pumpe
Schritt 8	Pumpenauswahl
Schritt 9	Auswahl Solarmodul

Schritt 1 – Wasserbedarf

Der erste Schritt bei der Dimensionierung eines Pumpsystems ist die Errechnung des Wasserbedarfs. Dieser lässt sich mit Hilfe von Durchschnittswerten abschätzen, die sich in der Literatur finden lassen. Tabelle 6 zeigt Angaben zum durchschnittlichen Wasserbedarf von Menschen und Nutztieren. Lokale Bedingungen und der sich über das Jahr ändernde Wasserverbrauch müssen berücksichtigt werden [Morales und Busch, 2010]. Neben der Abschätzung mit Hilfe von Literaturangaben sollte auch mit den Nutzern gesprochen werden. So lassen sich möglichst genaue Informationen zu momentanen und zukünftigen Wassernutzungsgewohnheiten erhalten.

Tab. 6: Wasserbedarf von Mensch und Nutztieren [Hankins, 2010] [Tejada, 2016]

	Typischer täglicher Wasserbedarf in Liter/Tag
Mensch	20 – 40 (ländliche Gebiete in Entwicklungsländern)
Rind	40
Milchkuh	80 – 150
Schaf/Ziege	5 – 10
Schwein	15
Lama/Alpaka	6
Hühner (pro 100)	15

Schritt 2 – Typ der Wasserquelle

Da der Aufbau des SPS je nach Art der Wasserquelle variiert, ist ihre Bestimmung wichtig. Auch lässt sich dadurch sagen, ob die Quelle den Wasseranforderungen entspricht. Typische Wasserquellen sind Brunnen, Bohrlöcher, Flüsse oder Quellen. Wenn es sich dabei um einen Brunnen oder ein Bohrloch handelt, müssen zusätzlich das statische und dynamische Wasserlevel bestimmt werden [Morales und Busch, 2010].

- **Wasserqualität**

Wenn das Wasser für den menschlichen Bedarf genutzt wird, muss ein Test der Wasserqualität vorgenommen werden, um mögliche Verunreinigungen festzustellen. Die Gehalte von Sedimenten, Schlamm und Salz sollten ebenfalls überprüft werden, da sie mit ein Kriterium zur Auswahl der Pumpe sind.

- **Statisches Wasserlevel**

Das statische Wasserlevel beschreibt die Distanz zwischen Oberfläche und Wasserspiegel. Dabei wird nicht gepumpt und das Wasser hatte genug Zeit, nachzufließen. Klimabedingt und abhängig der Jahreszeit kann sich das statische Wasserlevel verändern.

- **Dynamisches Wasserlevel**

Das dynamische Wasserlevel beschreibt die Distanz zwischen Oberfläche und Wasserspiegel, wenn gepumpt wird. Durch den Pumpvorgang sinkt der Wasserspiegel ab, abhängig von der Größe des Schachts und der Nachflussrate des Wassers. Wenn es Unklarheiten über die Kapazität der Wasserquelle gibt, lässt sich durch Tests das dynamische Wasserlevel und die Nachflussrate bestimmen. Dazu wird Wasser mit verschiedenen Volumenströmen gepumpt und der sich darauf einstellende Wasserpegel gemessen.

Falls in der Umgebung Wasserbrunnen installiert sind, lassen sich auch durch sie Rückschlüsse auf die Wasserhydrologie des Gebietes ziehen [Morales und Busch, 2010].

Schritt 3 – Wasserspeicher

Die Größe des Wassertanks ist von den lokalen Bedingungen abhängig. Ist das SPS die einzige Wasserquelle, sollte der Tank ein Fassungsvermögen des dreifachen Tagesbedarfs haben.

Schritt 4 – System Layout

Um einen Überblick über das System, die verbauten Komponenten und die Anordnung zu bekommen, macht es Sinn, eine Skizze des Systems zu erstellen. Diese sollte auch die Höhenlage und die Distanz zwischen den Komponenten beinhalten:

- Wasserquelle
- Solarmodule
- Wassertank
- Wasserpumpe
- Kontrolleinheit
- Leitungen

Die Solarmodule sollten möglichst nahe an der Pumpe platziert werden, damit die elektrische Leitungslänge kurz ist. So werden Leitungsverluste und Installationskosten gesenkt. Gleiches gilt für die Anordnung des Wassertanks, um die Wasserleitungslänge zu minimieren.

[Morales und Busch, 2010]

Schritt 5 – Solare Einstrahlung

Um das SPS passend auszulegen, muss die solare Einstrahlung des Installationsortes bestimmt werden. Dies kann durch verschiedene Programme oder frei zugängliche Datenbanken geschehen. So lässt sich auf tägliche oder monatliche Einstrahlungswerte zugreifen, die von verschiedenen Messstationen oder per Satellit aufgenommen wurden. Für Europa, Afrika und Südwestasien können beispielsweise Werte von PVGIS abgerufen werden, ein frei zugängliches Programm vom Joint Research Centre der Europäischen Kommission [JRC – Institute for Energy and Transport, 2012]. Bei speziellen Ortskoordinaten lässt sich durch das Atmospheric Science Data Center der NASA auf weltweite Einstrahlungsdaten zugreifen. Diese sind die monatlichen Mittelwerte aus über 22 Jahren gesammelter Werte [NASA, 2016].

Aktuelle und exakte Einstrahlungswerte können auch durch Messungen von qualifizierten Experten am Installationsort erhalten werden [Morales und Busch, 2010]. Tabelle 7 zeigt die monatlichen Werte am Beispiel der Stadt Oruro (siehe Ortslage in Abbildung 2, Seite 3). Die täglichen effektiven Sonnenstunden (h/Tag) sind dabei ein Äquivalent der Einstrahlung (kWh/m²/Tag) [Luque und Hegedus, 2011, S.862].

Tab. 7: Die durchschnittlichen Einstrahlungswerte (kWh/m²/Tag) und Sonnenstunden (h/Tag) in Oruro [NASA, 2016]

	Jan.	Febr.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Ø
Einstrahlung	5,87	5,99	5,76	5,44	5,25	4,93	5,08	5,41	5,92	6,41	6,67	6,38	5,75
Sonnenstunden	5,87	5,99	5,76	5,44	5,25	4,93	5,08	5,41	5,92	6,41	6,67	6,38	5,75

Schritt 6 – Volumenstrom der Pumpe

Der Volumenstrom, für den die Pumpe ausgelegt ist, basiert auf den Spitzensonnenstunden und dem Wasserbedarf pro Tag. In der Regel wird der Monat mit den geringsten Einstrahlungswerten für die Auslegungsrechnung verwendet. Damit wird erreicht, dass das System das ganze Jahr über nicht unterdimensioniert ist. Für den Volumenstrom wird der tägliche Wasserbedarf durch die Anzahl an Spitzensonnenstunden geteilt.

$$\text{Volumenstrom} = \frac{\text{Täglicher Wasserbedarf}}{\text{Spitzensonnenstunden}} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (1)$$

Schritt 7 – Förderhöhe der Pumpe

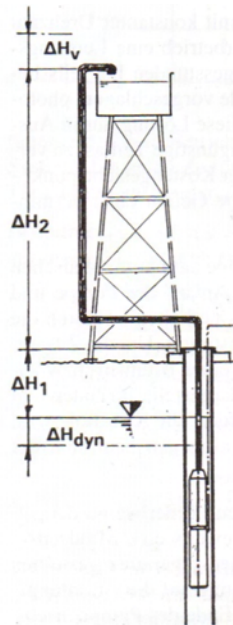


Abb. 11: Gesamtförderhöhe des Wassers [Schmid, 1994]

Die Auswahl der Komponenten hängt von der Höhe ab, die das Wasser gefördert werden muss. Abbildung 11 zeigt die Gesamtförderhöhe mit ihren statischen und dynamischen Anteilen. Für sie gilt:

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_{dyn} + \Delta H_V \quad [\text{m}] \quad (2)$$

Die Förderhöhe setzt sich dabei aus einem statischen Anteil

ΔH_1 = Tiefe des Wasserpegels unter der Oberfläche

ΔH_2 = Förderhöhe von der Oberfläche bis zum Einlauf in den Wassertank

und einem dynamischen Anteil zusammen

ΔH_{dyn} = Pegelabsenkung innerhalb des Brunnens während der Wasserförderung

ΔH_V = Druckverlust in den Rohrleitungen.

Innerhalb der Rohre bestimmen vier Faktoren den Druckverlust im Leitungssystem: innerer Rohrdurchmesser, Länge und Rauigkeit der Rohre und Volumenstrom des Wassers. Die Rohrverluste können anhand von Tabellen für verschiedene Rohrtypen errechnet werden. Sie werden als zusätzliche dynamische Höhe in der Gesamtförderhöhe berücksichtigt [Morales und Busch, 2010]. Anhang A zeigt eine solche Tabelle. Bei ihrer Nutzung müssen die Rohrlänge, Rohrtyp und Volumenstrom bekannt sein.

Die Länge des Rohres lässt sich berechnen durch:

$$\text{Rohrlänge} = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_{dyn} + \text{Distanz zwischen Brunnen und Tank} \quad [\text{m}] \quad (3)$$

Mit Gleichung 4 lässt sich mit Hilfe von Tabellen der Druckverlust in den Rohrleitungen errechnen:

$$\Delta H_V = \frac{\text{Druckverlust aus Tabelle}}{100 \text{ m}} \cdot \text{Rohrlänge} \quad [\text{m}] \quad (4)$$

Schritt 8 – Pumpenauswahl

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, gibt es verschiedene Pumptypen, deren Einsatz von der Art der Wasserquelle abhängt. Nach der Auswahl eines Pumptyps muss die Pumpengröße ausgewählt werden. Dies geschieht mit Hilfe des in Schritt 6 berechneten Volumenstroms und der in Schritt 7 berechneten Gesamtförderhöhe. Durch den Vergleich verschiedener Pumpenleistungskurven der Hersteller lässt sich eine passende Wasserpumpe auswählen, die die zuvor berechneten Anforderungen erfüllt. Anhand der Leistungskurve wird mit dem Volumenstrom und der Gesamtförderhöhe die benötigte Spitzengeneratorsleistung bestimmt [Morales und Busch, 2010].

Schritt 9 – Auswahl Solarmodul

Der in Schritt 8 bestimmte Spitzenleistungsbedarf dient zur Auswahl der Solarmodule. Dabei müssen auch die benötigte Betriebsspannung und der Betriebsstrom berücksichtigt werden. Die Spitzenleistung der Module muss dem Spitzenleistungsbedarf der Pumpe entsprechen [Morales und Busch, 2010].

Um Leistungseinbußen durch Hitze, Staub und Leitungsverluste auszugleichen, müssen die Module größer dimensioniert werden. Die auf den Datenblättern angegebene Leistung wird vermindert durch:

- **Temperaturverluste**

Gegenüber den Angaben nach Standard Test Conditions (STC) vermindert sich die Panelleistung um etwa 5% pro 10 K Temperaturerhöhung in den Modulen [Mertens, 2015, S.103]. Mit den Angaben des Datenblattes lassen sich für verschiedene Umgebungstemperaturen die Leistungsverluste der Module abschätzen. Dabei sind in Sommermonaten Verluste bis zu 25% möglich [Luque und Hegedus, 2011, S.878].

- **Verluste in Gleichstromleitungen**

Die von den Solarmodulen erzeugte Leistung kann sich durch Leitungsverluste um bis zu 6% verringern [Mertens, 2015, S.259].

- **Modulverschmutzung**

Bei einer Modulneigung unter 30° kann es durch Staub, Vogelkot oder Blätter zu Verlusten bis zu 10% kommen, wenn die Panele nicht regelmäßig gereinigt werden [Mertens, 2015, S.287].

Für die Wahl der Modulleistung und Verschaltung werden folgende Informationen benötigt:

Kennzahlen der Pumpe

- Spitzenleistung der Pumpe
- Minimale Betriebsspannung
- Maximale Eingangsspannung
- Maximaler Eingangsstrom
- Maximale Leistungsaufnahme

Kennzahlen der Module

- Modulspitzenleistung
- Betriebsspannung
- Betriebsstrom

Die überdimensionierte, von den Modulen zu erbringende Leistung zeigt Gleichung 5:

$$\text{Benötigte Spitzenleistung der Gesamtmodule} = \text{Pumpenleistungsbedarf} \cdot F_{\ddot{u}} \quad [\text{kWp}] \quad (5)$$

$F_{\ddot{u}}$ = Überdimensionierungsfaktor, der sich aus Abschätzungen der realen Modulleistung zusammensetzt.

Die benötigte Anzahl der Module errechnet sich wie in Gleichung 6:

$$\text{Anzahl der Module} = \frac{\text{Benötigte Spitzenleistung der Gesamtmodule}}{\text{Modulspitzenleistung}} \quad (6)$$

Werden mehrere Module verwendet, müssen diese parallel, in Serie oder in einer Kombination aus beiden geschaltet werden. So werden die Strom- und Spannungsanforderungen der Pumpe erfüllt, deren maximale Eingangswerte nicht überschritten werden dürfen, um Zerstörung zu vermeiden. Bei Modulen, die in Serie geschaltet werden, addiert sich die Spannung. Werden sie parallel geschaltet, addiert sich der Strom [Morales und Busch, 2010].

2.5 Nachhaltigkeit

Der ursprüngliche Begriff der Nachhaltigkeit stammt aus der Forstwirtschaft des 18. Jahrhunderts. Er beschrieb die Arten der Waldnutzung, bei denen nur so viel Holz geerntet wird, wie auch nachwächst. So konnte eine bestandserhaltende und damit nachhaltige Nutzung des Waldes gewährleistet werden [Enquete-Kommission, 1998].

Die bekannteste Definition des heutigen Verständnisses der Nachhaltigkeit stammt von der internationalen Weltkommission für Umwelt und Entwicklung, die 1983 im Auftrag der Generalversammlung der Vereinten Nationen entstand: "Dauerhaft ist eine Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass zukünftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können." [Brundtland et al., 1987]

Nachhaltigkeit ist im Vergleich zum historischen Verständnis nicht nur umweltbezogen, sondern geht auch auf wirtschaftliche und soziale Belange ein [Rat für Nachhaltige Entwicklung, 2012]. Abbildung 12 zeigt ein geläufiges Modell der Nachhaltigkeit mit den drei Komponenten Ökologie, Ökonomie und Soziales, die untereinander in gleichwertiger und wechselseitiger Abhängigkeit stehen:

- Unter die *ökologische Dimension* fällt die Verbesserung der Umweltqualität, die Verringerung des Rohstoff- und Energieverbrauchs und der Schutz der biologischen Vielfalt.
- Die *ökonomische Dimension* beinhaltet die Funktionsfähigkeit des Wirtschaftssystems, Vollbeschäftigung und soziale Sicherheit, ökonomische Leistungsfähigkeit und Innovationskompetenz, intergenerationeller Ausgleich und die internationale sowie wirtschaftliche Stabilität.
- Bei der *sozialen Komponente* handelt es sich um eine selbstbestimmte Lebensführung durch eigene Arbeit, umweltverträgliche Befriedigung der Grundbedürfnisse, Chancengleichheit und gesellschaftliche Grundsicherung und eine aktive gesellschaftliche Teilhabe im Rahmen von Nachhaltigkeitsstrategien.

[Glathe, 2010, S.19]

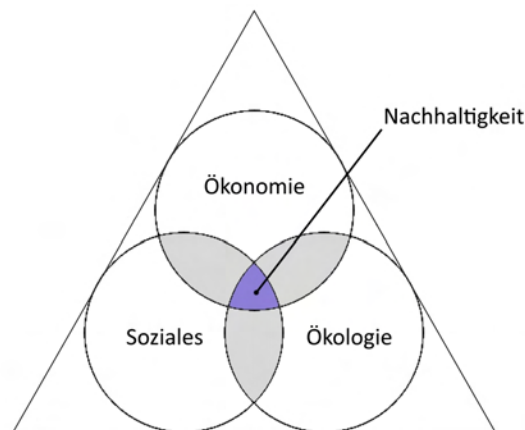


Abb. 12: Nachhaltigkeitsdreieck mit 3 Dimensionen

In der Entwicklungszusammenarbeit (EZ) gilt für nachhaltige Projekte, dass Erfolge auf längere Sicht tragfähig sein müssen und ihre positiven Wirkungen auch nach Beendigung der Förderung fortbestehen. Sie leisten Hilfe zur Selbsthilfe, die zu dauerhaften Verbesserungen führt bzw. diese anstößt [Holtz, 2000].

Nachhaltigkeit in Wasserförderungsprojekten ist demnach dann gegeben, wenn die installierten Systeme über den Zeitraum der Förderung hinweg zu einer Verbesserung der Lebensbedingungen von Menschen und Tieren führen, wobei ökologische, ökonomische und soziale Faktoren berücksichtigt werden müssen.

Ökologische Komponente Das Ziel der Wasserförderung im Hochland Boliviens ist die Verbesserung der Wasserqualität für Menschen und Tiere. Durch eine saubere und gesicherte Wasserversorgung verbessern sich die Lebensbedingungen, was eine Verringerung von Krankheiten mit sich führt. Beim Einsatz von solaren Wasserpumpen wird keine Energie in Form von fossilen Brennstoffen benötigt.

Ökonomische Komponente Bauern, die von der Tierhaltung leben, sind auf Wasser angewiesen, um ihre Herden zu versorgen. Das Vorhandensein von Wasser in ausreichender Qualität ist demnach wichtig für die wirtschaftliche Existenz. Die Finanzierung der SPSs bedarf wegen der hohen Investitionskosten meist externe Hilfe. Auch müssen Lösungen zur Finanzierung von Wartungs- und Ersatzteilkosten gefunden werden.

Soziale Komponente In der sozialen Komponente gilt es, dass die Nutzer ihre menschlichen Grundbedürfnisse befriedigen können, also unter anderem Zugang zu sauberem Trinkwasser haben. Die trockenen Regionen des Hochlandes bleiben weiterhin bewohnbar, die Bauern können ihrer Lebensführung weiterhin nachgehen.

3 Methodik der Datenaufnahme

Im Rahmen dieser Arbeit werden solare Wasserpumpen untersucht, die zum Großteil im Hochland Boliviens installiert sind. Ein Teil der dafür genutzten Daten wurde während eigener Vor-Ort-Begehungen gesammelt. Die Informationen über die Standorte dieser Systeme stammen von Ecoenergía Falk in La Paz und Complejo Solar de Oruro aus gleichnamiger Stadt. Die Mehrheit der Daten kommt von Energética aus Cochabamba und basiert auf durchgeführten Projekten. Diese wurden von der deutschen NGO KarEn mit Mitteln des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) finanziert.

3.1 Erfasste Daten

Die eigens gesammelten Daten wurden mit Hilfe eines erstellten Fragebogens (siehe Anhang A) aufgenommen. Dieser besteht aus drei Abschnitten:

1. Basisdaten: Abgefragt werden unter anderem Informationen über den Standort des Systems, Wassertiefe, Wasserbedarf und -qualität.
2. Soziales: Die hier gestellten Fragen gehen auf Nutzen und Auswirkungen des SPS ein, fragen die Zufriedenheit der Anwender ab und beschäftigen sich mit der Wartung der Systeme.
3. Technik: Im Technikteil werden die verbauten Komponenten aufgenommen und das System visuell und durch Fragen auf seine Funktionalität überprüft. Die Solarpanele werden auf Ausrichtung und Anstellwinkel kontrolliert und ihre Leerlaufspannungen, sofern möglich, per Multimeter gemessen.

Die von Energética bereitgestellten Daten stammen aus dem Projekt *Verbesserung der Wasserversorgung auf Basis erneuerbarer Energien in der Region Altiplano, Bolivien*. Die erhaltenen Prüfberichte liefern Angaben zum Standort der Anlagen, Anzahl der Familien die das System nutzen, Herdengröße sowie Beobachtungen und durchgeführte Wartungen. In drei Phasen wurde die Technik der Systeme überprüft und ausgebessert:

1. Bei einer vorbeugenden Instandhaltung wurden alle Systeme planmäßig auf ihre Funktionalität überprüft und kleinere Ausbesserungen vorgenommen.
2. Bei einer korrektiven Instandhaltung wurden alle Systeme besucht, die bei der vorbeugenden Instandhaltung nicht funktionstüchtig waren, da Ausbesserungsarbeiten seitens der Nutzer durchgeführt werden mussten.
3. Bei einer weiteren korrektiven Instandhaltung wurden Nutzer besucht, deren Systeme nach den ersten beiden Instandhaltungen technische Probleme bekamen, die nicht telefonisch gelöst werden konnten.

3.2 Standorte der untersuchten Systeme

Der Großteil der untersuchten SPSs befindet sich im Hochland in den Departamentos Oruro und Potosí. Einige Systeme liegen in den hohen Talregionen des Departamentos Cochabamba. Abbildung 13 zeigt die Standorte der Systeme.

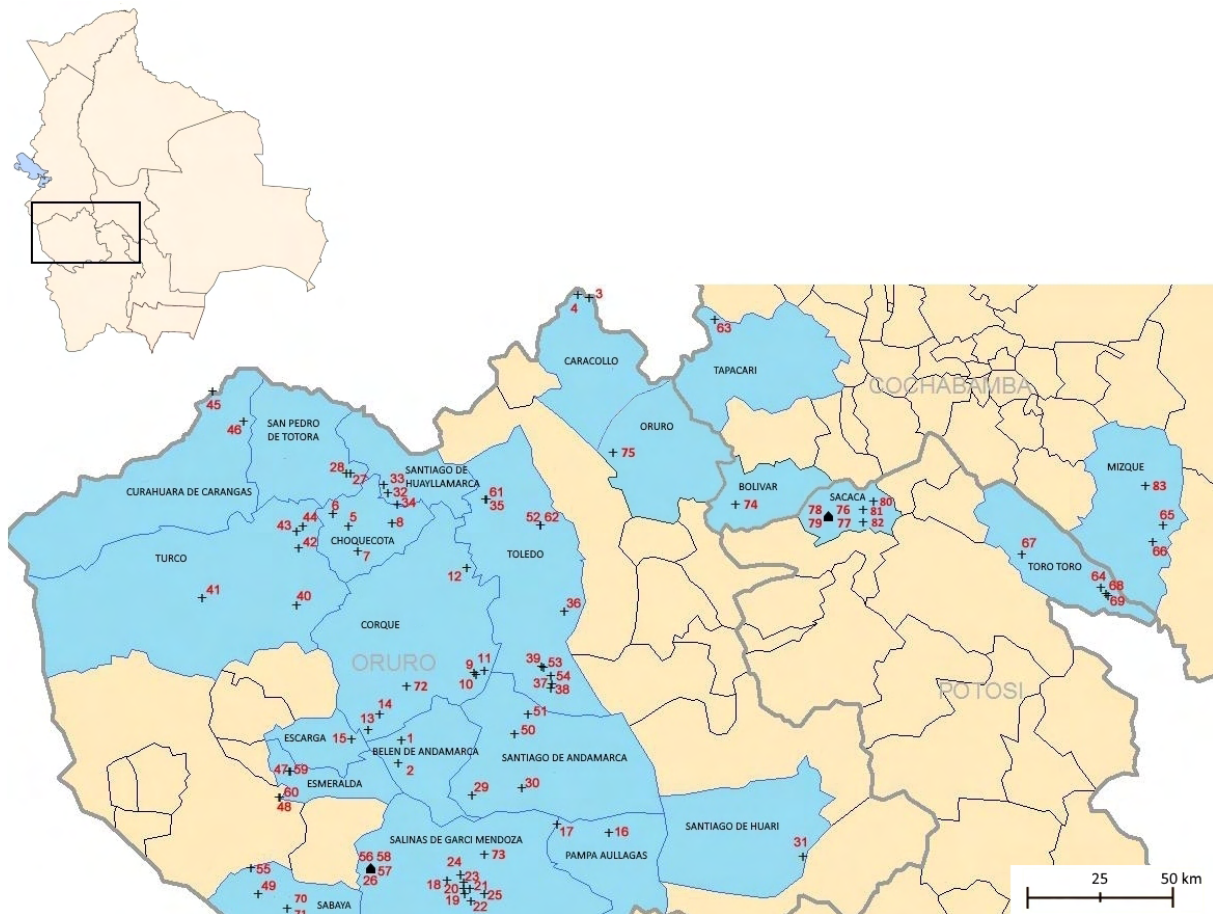


Abb. 13: Standorte der überprüften Systeme in den Departamentos Oruro, Potosí und Cochabamba [nach Energética]

3.3 Schwierigkeiten bei der Datenerhebung

Um die Datenerhebung effizient zu gestalten, sollte ihr eine ausreichende Planung vorausgehen. Dabei sollten einige Punkte beachtet werden, die im Folgenden genannt werden.

- Die Abgelegenheit vieler Gehöfte, die mit einem SPS ausgestattet sind, macht die Anreise langwierig. Für die Besuche muss daher genügend Zeit eingeplant werden. Abbildung 13 zeigt die Distanzen zwischen den verschiedenen Installationen.
- Die Qualität der Straßen nimmt mit zunehmender Entfernung von Städten stark ab und führt oft über unbefestigtes Geröll. Es empfiehlt sich ein Fahrzeug mit Allradantrieb, zusätzlichem Treibstoff und den nötigsten Reparaturmaterialien.
- Ein Ortsansässiger erleichtert das Auffinden einzelner Comunidades oder Gehöfte, da die Anfahrt oft kompliziert und meist nicht ausgeschildert oder in Karten verzeichnet ist. GPS-Geräte können bei bereits bekannten Geo-Daten nützlich sein.
- Ein Großteil der Einwohner der ländlichen Gebiete im Hochland gehört zu indigenen Gruppen. Ihre Muttersprache ist meist Aymara oder Quechua, während Spanisch oft nur als Zweitsprache bekannt ist. Ein Dolmetscher ist daher hilfreich.
- Besuche sollten im Vorfeld telefonisch angekündigt werden, um sich der Anwesenheit der Systemnutzer zu vergewissern.

- Vor der Besichtigung der Systeme muss mit den Besitzern, Autoritäten oder Wasserverantwortlichen gesprochen werden, auch etwa um Zutritt zu mit Zäunen geschützten Anlagen zu bekommen. Vor dem Hintergrund von Systemdiebstählen ist das Misstrauen Fremden gegenüber oft hoch, weswegen die Überprüfung der Komponenten im Beisein der Nutzer geschehen sollte.

4 Ergebnisse der untersuchten Systeme

4.1 Allgemeines

Als Basis zur Untersuchung der SPSs dienen 83 Datensätze. Tabelle 8 zeigt eine Einordnung der Systeme nach Erheber, Standort und Systemgröße.

Tab. 8: Einteilung der untersuchten Systeme nach Erheber, Standort und Systemgröße

	Systeme	Departamento			Systemgröße	
		Oruro	Potosí	Cochabamba	<200 Wp	>200 Wp
Datengruppe 1 (Energética)	73	66	4	3	66	7
Datengruppe 2 (Eigene)	10	1	7	2	8	2
Gesamt	83	67	11	5	74	9

4.2 Datengruppe 1

In Datengruppe 1 handelt es sich bei 90% um kleine Systeme (66 SPS mit <200 Wp), die im Departamento Oruro installiert sind und den indigenen Bauern hauptsächlich Wasser für die Tierhaltung zur Verfügung stellen. Abbildung 14 zeigt ein Schema der Installation. Diese Systeme setzen sich zusammen aus zwei Panels mit je 55 Wp der Firma Grealtec, einer Tauchpumpe 9300 und einer Kontrolleinheit LCB-G von Shurflo. Gespeichert wird das Wasser in einem geschlossenen PVC-Tank mit 2.300 l Fassungsvermögen. Die 1/2" - Rohrleitungen bestehen aus PVC und sind gegen Frost isoliert. Der Schachtbrunnen wurde von den Anwendern auf ca. 6 m ausgehoben, die nötigen Betonringe wurden selber hergestellt. In Eigenarbeit wurden außerdem ein zwei Meter hoher Sockel als Untersatz für den Wassertank, sowie eine Tränke für die Tiere gebaut.

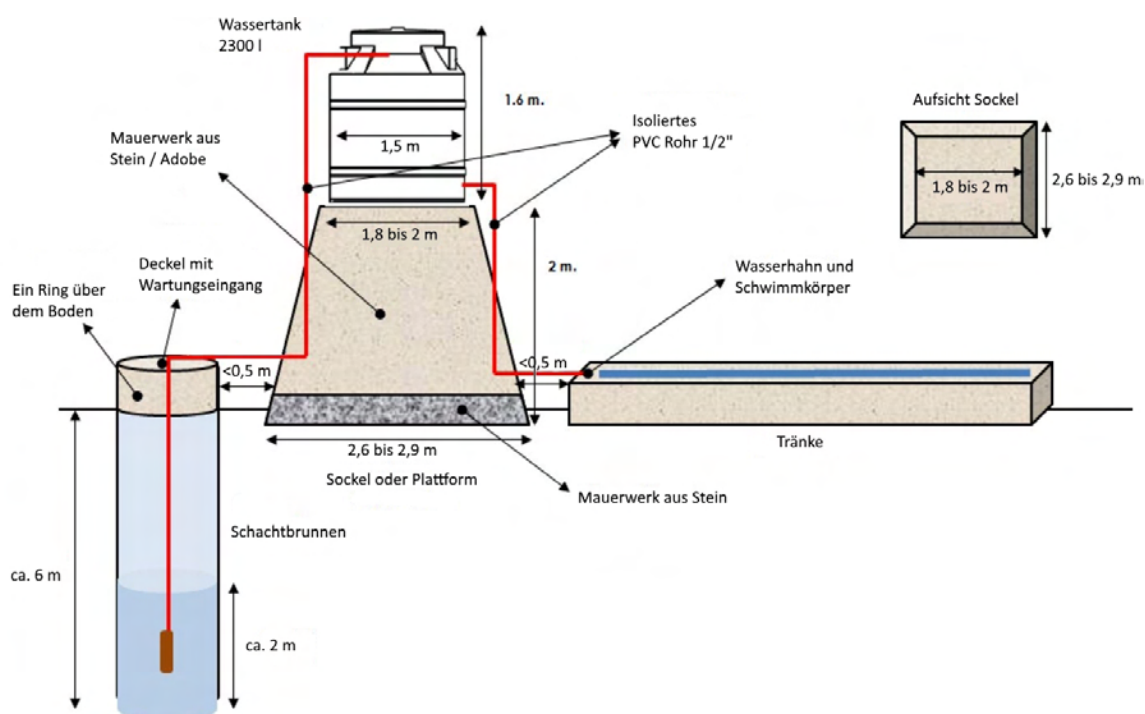


Abb. 14: Aufbau der kleinen Wasserfördersysteme [nach Energética]

Die einzelnen Systeme werden von mehreren Familien genutzt, im Schnitt teilen sich 4 Familien ein SPS. Die Anzahl geht von minimal 3 bis maximal 8 Familien pro System. Abbildung 15 zeigt die Häufigkeit der Anzahl der Familien, die die Systeme gemeinschaftlich nutzen. Auf jedes System kommen im Durchschnitt 545 Tiere, das entspricht 136 Tiere pro Familie. Abbildung 16 zeigt die Verteilung der Herdengröße pro installiertem System.

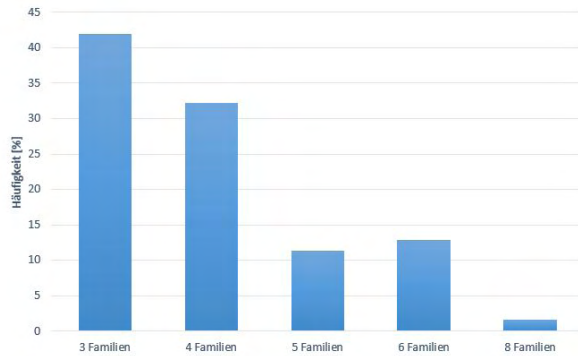


Abb. 15: Anzahl der Familien, die ein SPS gemeinschaftlich nutzen

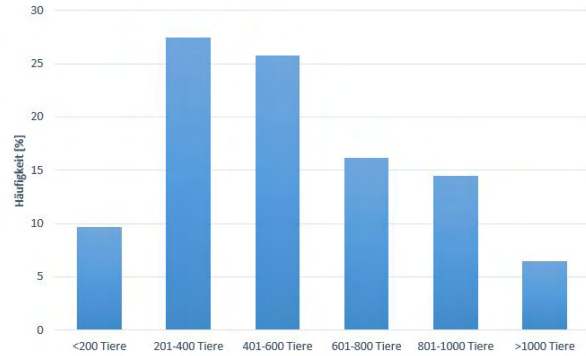


Abb. 16: Verteilung der Herdengrößen

Bei den übrigen sieben Systemen (>200 Wp) der Datengruppe 1 handelt es sich um Tiefbrunnen, die das Wasser aus 100 – 150 m Wasser fördern. Sie dienen der Trinkwasserversorgung für Menschen und Tiere und stehen in den Departamentos Potosí (vier Installationen) und Cochabamba (drei Installationen). Sie wurden an bereits genutzten Bohrlöchern installiert und speichern das Wasser in existierenden Tanks mit einem Fassungsvermögen von 5 – 10 m³. Zum Einsatz kommen verschieden große solare Wasserpumpen und Panele in der Größenordnung von 500 – 2000 Wp. Die SPSs lösen Diesel-Motorpumpen ab, die zuvor das Trinkwasser förderten, aber wegen Defekten oder den hohen laufenden Kosten nicht mehr genutzt werden können. Im Schnitt werden 18 Familien pro System versorgt, die Anzahl geht von 6 bis 45 Familien/System.

Die SPSs der Datengruppe 1 wurden zwischen November 2012 und November 2013 installiert, der Termin der ersten vorbeugenden Wartung lag zwischen wenigen Tagen bis zu 10 Monaten. Im Schnitt lag der Zeitpunkt dieser ersten Wartung bei ca. 6 Monaten nach Installation. Wurden beim ersten Besuch Mängel am Eigenanteil (Podest, Tränke) festgestellt, wurde mit den Nutzern ein Termin vereinbart, zu dem sie die Defekte ausbessern mussten. Für den Fall, dass nach der ersten Wartung Fehler auftraten, wurden die betroffenen Systeme von Technikern besucht und repariert. Die vorliegenden Daten dieser korrektiven Wartung reichen bis Dezember 2015.

Defekte Systeme

Von den 73 installierten Systemen aus der Datengruppe 1 zeigt Tabelle 9 den defekten und verbesserungsbedürftigen Anteil. Als „funktionsunfähig“ sind dabei die Installationen benannt, die zum Zeitpunkt des Besuchs dem eigentlichen Zweck der Wasserförderung nicht mehr nachkamen. Die Fehler können aus technischen Gründen (Schäden an Komponenten) aber auch aus strukturellen Gründen (Schäden an Sockel, Tränke) sein. Die mangelbehafteten Systeme funktionieren an sich, zeigen jedoch Fehler, die vor einer erneuten Inbetriebnahme behoben werden müssen. Damit soll größerer Schaden vermieden werden.

Tab. 9: Fehlerhaft vorgefundene Systeme in der Datengruppe 1

	Vorbeugende Wartung		Korrektive Wartung
	funktionsunfähig	mangelbehaftet	funktionsunfähig
Anzahl	14	8	10
Anteil	19%	11%	14%

Die bei der vorbeugenden Wartung festgestellten Fehler, die zur Funktionsunfähigkeit des Gesamtsystems führten, waren vor allem technische Fehler bei Kontrolleinheit und Pumpe, sowie strukturelle Fehler am Sockel. Bei den sieben mangelbehafteten Installationen wurden Fehler an Sockeln, Pumpen und elektrischen Leitungen festgestellt.

Die bei der korrektiven Wartung vorgefundenen Fehler lagen besonders bei Rohrleitungen, Wasserverfügbarkeit und Kontrolleinheit. Tabelle 10 zeigt eine Einteilung der Fehlergründe der funktionsunfähigen und mangelbehafteten Systeme.

Tab. 10: Anzahl und Art der Fehlergründe der funktionsunfähigen und mangelbehafteten Systeme

Fehlergrund	Vorbeugende Wartung		Korrektive Wartung
	funktionsunfähig	mangelbehaftet	funktionsunfähig
Diebstahl	1	-	1
Sockel	4	4	-
Pumpe	3	2	-
Kontrolleinheit	5	-	2
Wasserverfügbarkeit	-	-	3
Elektrische Leitungen	1	2	1
Rohrleitungen	-	-	3

4.3 Datengruppe 2

Bei Datengruppe 2 handelt es sich um 10 Systeme in den Departamentos Oruro, Potosí und Cochabamba. Acht davon sind kleine Systeme mit einer Leistung <200 W, die zum Großteil mit Tauchpumpen vom Typ 9300 und 8000 von Shurflo ausgestattet sind. Die verwendeten Solarmodule sind verschiedener Hersteller: Zytech Solar, BrightSun, Siemens und Kyocera. Die Systeme dieser Datengruppe wurden im Juni 2015 besucht, konstruiert wurden sie zwischen den Jahren 2000 und 2013. 60% der Systeme können dem eigentlichen Zweck der Wasserförderung nicht nachkommen. Tabelle 11 zeigt die Fehlergründe der Systeme. Diese waren ein Diebstahl und ein Pumpdefekt. Bei vier der besuchten Installationen sind die Pumpen vorhanden und neu, jedoch nicht angeschlossen. Die Panele in Kombination mit einem Laderegler und einer Batterie dienen zur Beleuchtung der Häuser.

Tab. 11: Fehlerbehaftete Systeme in der Datengruppe 2

Fehlergrund	Anzahl betroffener Systeme
Pumpe	1
Diebstahl	1
Bedarf	4

4.4 Fehlergründe

4.4.1 Komponenten

PV-Module

Die Panele aus Datengruppe 1 und 2 zeigen keine äußeren Beschädigungen. Auch die durchgeführten Messungen der Leerlaufspannung ergaben keine Fehler. Sämtliche Systeme sind nach Norden ausgerichtet. 4 Panele aus Datengruppe 2 haben eine Modulneigung von 45° , bei den

übrigen Systemen liegt der Winkel zwischen 20° und 30° . Bis auf zwei Ausnahmen wurde bei der Installation immer darauf geachtet, Verschattung zu vermeiden. In einem Fall lag Verschattung im Tagesgang durch ein Hausdach vor (Datengruppe 2), zweiten Fall war die Ursache der Verschattung Sockel und Wassertank (Datengruppe 1). Eine leichte bis mittlere Verschmutzung durch Staub wurde bei einer großen Anzahl von 74 Modulen festgestellt. Abbildung 17 zeigt ein System aus Datengruppe 2, das zum einen einen zu steilen Neigungswinkel hat, zum anderen im Laufe des Tages vom Hausdach verschattet wird.



Abb. 17: Modul mit zu steilem Neigungswinkel und Verschattung im Tagesgang

Wasserpumpe

Bei sechs der untersuchten Systeme lag ein Defekt an der Pumpe vor. In Datengruppe 1 führte in drei Fällen ein Wassereintritt in die Elektronik zu einem Kurzschluss. Dieser machte die verbaute Shurflo 9300 erneuerungsbedürftig. Abbildungen 18 und 19 zeigen die Beschädigungen durch einen Wassereintritt an den elektronischen Komponenten der Pumpe. Bei zwei Pumpen der Tiefbrunnen selbiger Datengruppe funktionierte das System eingeschränkt, die Pumpen zeigten aber ein auffälliges Betriebsverhalten: Eine der Pumpen schaltete sich wiederholend im laufenden Betrieb ein und aus. Bei der zweiten Pumpe hat sich die geförderte Wassermenge seit Installation ca. halbiert, im Betrieb vibrierte sie stark.

Kontrolleinheit

Die Kontrolleinheit war sieben Mal Grund für den Ausfall des SPS. Ausschließlich in Datengruppe 1 wurden Fehler an dieser Komponente festgestellt. In einem Fall gelangten Wespen ins Innere und bauten dort ein Nest, was zu einem Kurzschluss auf der Platine führte. Abbildungen 20 und 21 zeigen das betroffene System. In zwei anderen Fällen führte ein Blitzeinschlag in der Nähe zur Zerstörung der Kontrolleinheit.



Abb. 18: Durch Wassereintritt beschädigte Pumpe [Energética]



Abb. 19: Durch Wassereintritt beschädigte elektrische Verbindung [Energética]

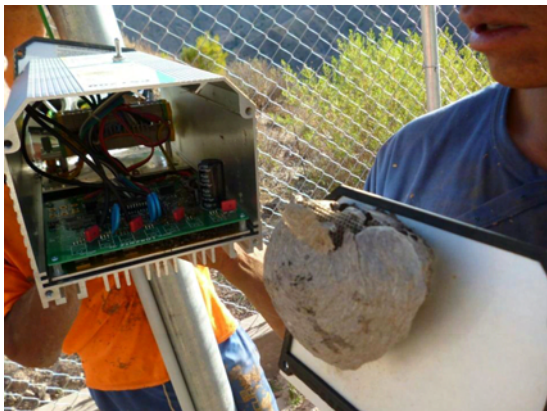


Abb. 20: Wespennest im inneren der Kontrolleinheit [Energética]

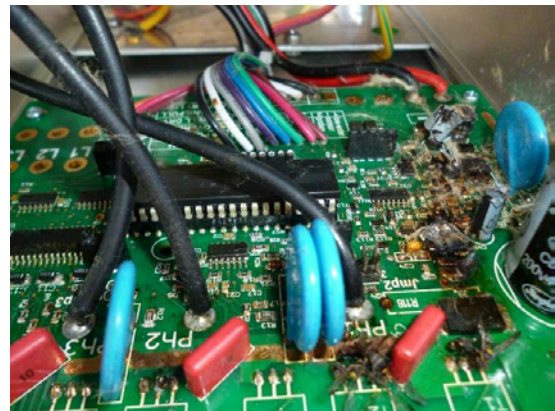


Abb. 21: Durch tote Wespen ausgelöster Kurzschluss und Brand auf der Platine [Energética]

Wassertank

Der Wassertank führte in keinem der untersuchten Systeme zum Ausfall. Als Teil der vorbeugenden Wartung wurden bei 22 Systemen die Gegengewichte des Wasserfüllstandsanzeigers neu eingestellt, damit sich die Pumpe beim Erreichen einer bestimmten Füllhöhe automatisch abstellt.

4.4.2 Installationen

Elektrische Anschlüsse

Fehler in der Verkabelung führten in zwei Fällen der Datengruppe 1 zum Ausfall des Systems. In einem Fall löste sich die Verkabelung zwischen Füllstandsanzeiger und Kontrolleinheit, wodurch die Pumpe nicht mehr angesteuert wurde. In einem anderen Fall war das Stromkabel zwischen Solarpanel und Pumpe auf dem Boden nicht ausreichend geschützt durch Tiere beschädigt. In zwei Fällen führte eine falsche Verkabelung zwischen Füllstandsanzeiger und Kontrolleinheit da-

zu, dass sich die Pumpe nach Erreichen der Füllhöhe nicht automatisch abschaltete.

Wasseranschlüsse

In drei Fällen der Datengruppe 1 führten Fehler an den Rohrleitungen zwischen Brunnen und Tank zur Funktionsunfähigkeit des Systems. Insgesamt wurden 5 Rückschlagventile, 24 Wasserhähne und 4 Rohrverschraubungen ausgewechselt, da sie beschädigt und undicht waren. Hervorgerufen wurden diese Probleme durch das Gefrieren von Wasser innerhalb der Leitungen bei nächtlichen Frostereignissen. Bei 10 Systemen lagen Teile der Rohrleitung zwischen Pumpe und Tank ungeschützt am Boden und waren damit Schäden durch die Hufe der Tiere ausgesetzt.

4.4.3 Eigenanteil

Sockel

Die durch die Anwender konstruierten Sockel führten bei den kleinen Systemen aus DG1 in 8 Fällen direkt oder indirekt zum Ausfall. In vier Fällen kam es, wie Abbildung 22 zeigt, auf Grund einer mangelhaften Bauweise zum Einsturz des Sockels.



Abb. 22: Durch mangelhafte Bauweise eingestürzter Sockel [Energética]

Dabei kam es bei drei Systemen zu starken Schäden an den Wasserleitungen und Leitungskomponenten, Abbildung 23 zeigt einen dadurch zerstörten Tank. Bei vier Sockeln wurden tiefe Risse und Abbrüche festgestellt. Um einen Einsturz zu vermeiden wurden diese Systeme abgeschaltet,



Abb. 23: Durch einen Sockeleinsturz zerstörter Wassertank [Energética]



Abb. 24: Stark einsturzgefährdeter Sockel [Energética]

die Nutzer sind aufgefordert, einen neuen Sockel zu errichten. Abbildung 24 zeigt eine der einsturzgefährdeten Installationen. In vier Fällen war die Sockelhöhe kleiner als 1,50 m und damit deutlich unter den geforderten 2 m. Um den Sockel widerstandsfähiger gegen Witterung zu machen wurde den Nutzern ein Verputz mit Zementmörtel nahe gelegt, in 20 Fällen wurde jedoch kein Verputz angebracht.

Tränke

Von den kleinen Systemen aus Datengruppe 1 war eine Tränke auf Grund von mangelhafter Bauweise zerstört, zwei weitere zeigten Risse in den Seitenwänden.

Brunnen

Die von den Anwendern ausgehobenen Brunnen in Datengruppe 1 der kleinen Systeme und die zugehörigen Betonringe befanden sich im guten Zustand. In 8 Fällen wurde der Brunnendeckel ohne Wartungsklappe hergestellt.

4.4.4 Weitere

Diebstahl

Insgesamt führten Diebstähle von Komponenten drei Mal zum Ausfall des installierten SPS. Bei den zwei Fällen in Datengruppe 1 wurden einmal nur die Pumpe, ein anderes Mal Pumpe und Kontrolleinheit entwendet. In Datengruppe 2 kam es in einem Fall zum Diebstahl des Solarpanels.

Wasserverfügbarkeit

Drei mal führte in Datengruppe 1 bei den kleinen Systemen ein zu niedriger Wasserpegel im Brunnen zum Ausfall des Systems. In zwei Fällen wurde der Brunnen in Anwesenheit der Techniker um ca. einen halben Meter vertieft und die Pumpe tiefer gehängt. Im dritten Fall betrug die vorhandene Wasserhöhe nur noch 50 cm, sodass das System abgeschaltet wurde, bis der Brunnen tiefer ausgegraben wird. Der niedrige Wasserpegel zeigte sich erst bei der korrektiven Wartung, während der vorbeugenden Wartung wurden bei den betroffenen Systemen normale Wasserstände beobachtet.

Bedarf

In vier Fällen waren in Datengruppe 2 die vorhandenen Wasserpumpen nicht in Gebrauch. Die für die solare Wasserrförderung ausgelegten Systeme wurden modifiziert, um für die Beleuchtung der Häuser zu funktionieren. Für die Pumpen wurden keine Bohrlöcher ausgehoben, die Anwender nutzen weiterhin Wasser aus einem nahegelegenen Fluss. Abbildung 25 zeigt eine der vorgefundenen, unangeschlossenen Pumpen.



Abb. 25: Eine der vier vorgefundenen, nicht angeschlossenen Pumpen

5 Ergebnisdiskussion

In der Entwicklungszusammenarbeit gelten Projekte als nachhaltig, wenn ihr Nutzen auch nach Ende der Förderung fortbesteht. Es müssen daher Planung und Technik so ausgelegt werden, dass die solaren Wasserpumpensysteme möglichst lange funktionieren und ihren Zweck erfüllen. Dabei wird durch die theoretische Lebensdauer der Komponenten eine äußere Grenze gesteckt, die durch gute Planung, Betrieb und Wartung erreicht oder sogar übertroffen werden kann. Damit wird der Nutzen maximal groß. Abbildung 26 verdeutlicht diese Überlegung. So bieten Hersteller von PV-Modulen meist 20 Jahre Garantie auf ihre Produkte [Luque und Hegedus, 2011], während die Lebenserwartung des Pumpsystems (Pumpe und Controller) bei ungefähr 7 Jahren liegt [Lorentz und DRFN, 2008]. Damit diese theoretischen Werte auch in der Praxis Bestand haben, muss für die jeweiligen Projekte die passende Technik gewählt, sowie Planung, Umsetzung und Betrieb korrekt durchgeführt werden. So ist nach Short und Thompson jedes Projekt durch die sozialen, ökonomischen und technologischen Fähigkeiten der Beteiligten definiert. Nur durch die Beachtung der verschiedenen Fähigkeiten können PV-Pumpensysteme nachhaltig gestaltet werden [Short und Thompson, 2003].

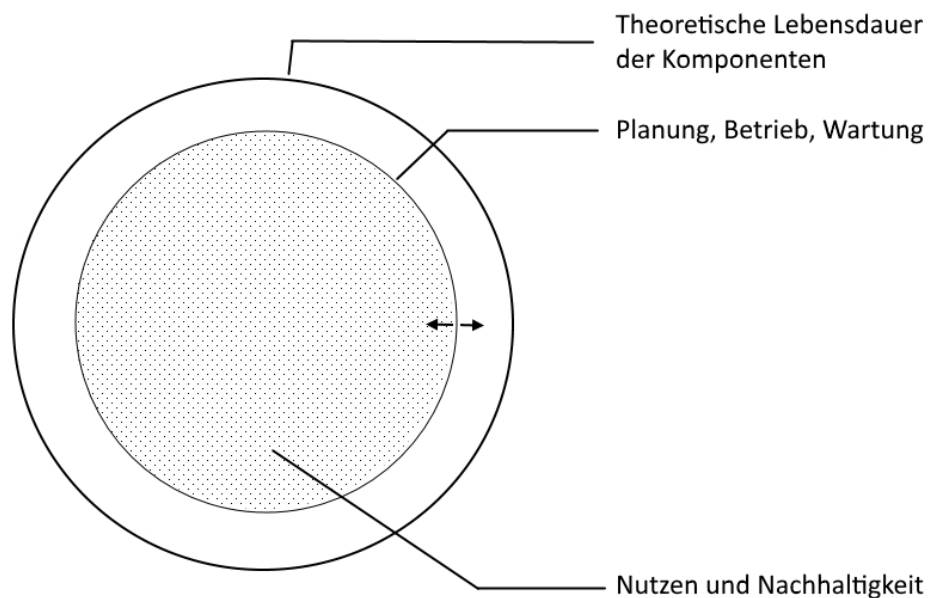


Abb. 26: Zusammenhang von theoretischer Lebensdauer der Komponenten in Bezug auf Planung, Wartung und Betrieb

5.1 Theoretische Systemauslegung im Hochland Boliviens

Um in einem späteren Schritt die Dimensionierung der untersuchten Systeme zu bewerten, soll in diesem Abschnitt ein SPS theoretisch ausgelegt werden. Die Vorgehensweise basiert auf Kapitel 2.4.

Daten zum Installationsort

- **Ort:** Rurales Gebiet im Municipio Turco (Departamento Oruro) mit den Koordinaten $-18,50^{\circ}$ $-68,50^{\circ}$.

- **Familien- und Herdengröße:** Das System teilen sich vier Familien, die insgesamt 550 Tiere besitzen (siehe 4.2). Darunter sind 300 Lamas und Alpakas, sowie 250 Schafe. Trinkwasser für den menschlichen Bedarf wird nicht aus dem System entnommen.
- **Wasserquelle** Ein Schachtbrunnen ist bereits vorhanden, aus dem in der Vergangenheit Wasser mit einer benzinbetriebenen Pumpe gefördert wurde.

Schritt 1 – Wasserbedarf

Der von dem System zu deckende Wasserbedarf hängt nur von den Nutztieren ab. Dieser ergibt sich aus den in Tabelle 6 (S.13) gegebenen Daten:

$$\text{Wasserbedarf} = 300 \text{ Lamas/Alpakas} \cdot \frac{6 \text{ l}}{\text{Lama/Alpaka}} + 250 \text{ Schafe} \cdot \frac{10 \text{ l}}{\text{Schaf}} = 4.300 \text{ l} = 4,3 \text{ m}^3$$

Schritt 2 – Typ der Wasserquelle

- **Statisches Wasserlevel**
Messungen im Schachtbrunnen ergaben ein statisches Wasserlevel von 6 m.
- **Dynamisches Wasserlevel**
Erfahrungswerte der vorherigen Nutzung ergaben ein dynamisches Wasserlevel von 8 m.
- **Wasserqualität**
Das Wasser ist von guter Qualität, ohne Anzeichen von Partikeln.

Schritt 3 – Wassertank

Das Volumen des Tanks wird auf den dreifachen täglichen Wasserbedarf ausgelegt. Zwar existieren in der Umgebung natürliche Wasserquellen, diese führen durch eine Dürre aber nur noch wenig Wasser und drohen in Zukunft wegzufallen. Trotz der sehr guten Einstrahlungswerte wird auf eine kleinere Dimensionierung verzichtet. So kann das System bei steigendem Wasserbedarf einfacher hochskaliert werden.

$$\text{Volumen} = 3 \cdot 4,3 \text{ m}^3 \approx 13 \text{ m}^3$$

Der Tank hat eine Höhe von 3 m und wird auf einen 2 m hohen Sockel gestellt.

Schritt 4 – System Layout

Abbildung 27 zeigt die Anordnung der Komponenten des Systems.

- Distanz zwischen Panel und Pumpe: 3 m
- Distanz von Brunnen zum Tank: 3 m

Schritt 5 – Solare Einstrahlung

Die solaren Strahlungswerte für den Standort der Anlage der Koordinaten $-18,50^\circ$ $-68,50^\circ$ zeigt Tabelle 12.

Tab. 12: Die durchschnittlichen Einstrahlungswerte ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{Tag}$) und Sonnenstunden (h/Tag) am Installationsort [NASA, 2016]

	Jan.	Febr.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Ø
Einstrahlung	6,49	6,61	6,09	5,77	5,44	5,09	5,27	5,77	6,57	7,13	7,45	7,11	6,22
Sonnenstunden	6,49	6,61	6,09	5,77	5,44	5,09	5,27	5,77	6,57	7,13	7,45	7,11	6,22

Juni ist der Monat mit der geringsten solaren Einstrahlung. Das System wird daher auf Basis dieses Monats ausgelegt, um über das ganze Jahr betrachtet ausreichend Wasser zu liefern.

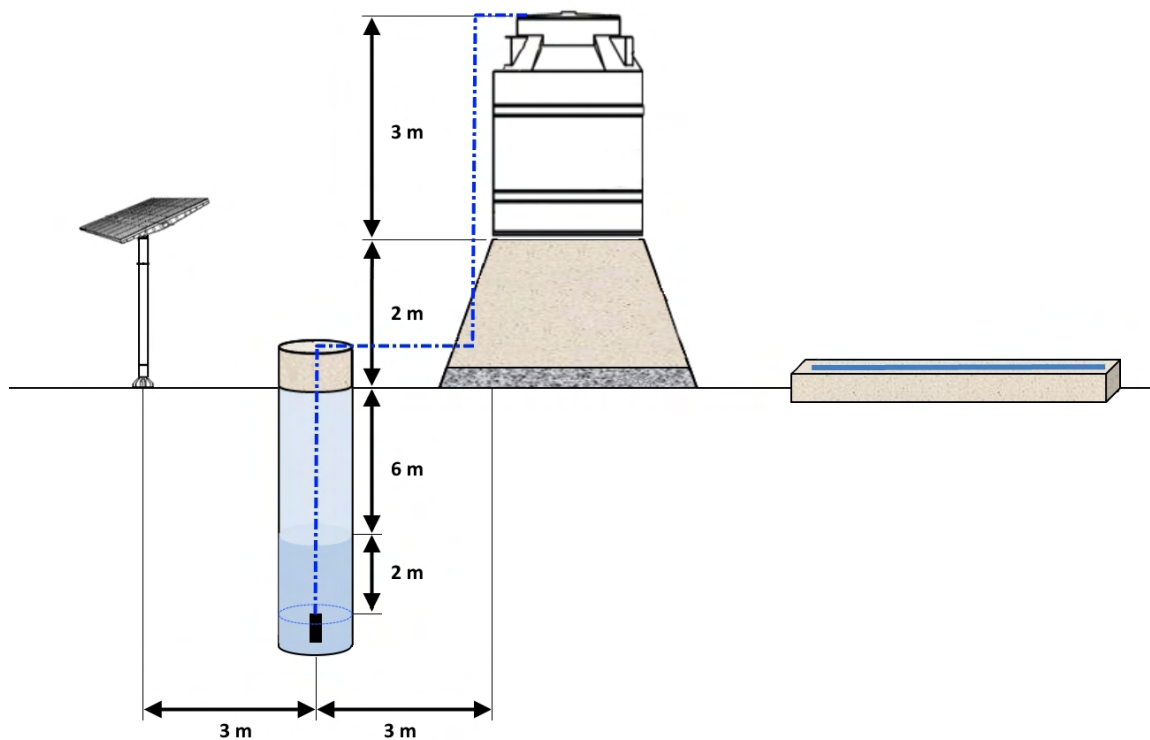


Abb. 27: Layout des Systems

Schritt 6 – Volumenstrom der Pumpe

Gleichung 1 dient zur Berechnung des Volumenstroms. Die Spitzensonnenstunden betragen nach Schritt 5 für den Monat Juni ca. 5,1 h.

$$\text{Volumenstrom} = \frac{4,3}{5,1} \approx 0,85 \text{ m}^3/\text{h}$$

Schritt 7 – Förderhöhe der Pumpe

Nach Gleichung 3 beträgt die Rohrlänge:

$$\text{Rohrlänge} = 6 \text{ m} + 5 \text{ m} + 2 \text{ m} + 3 \text{ m} = 16 \text{ m}$$

Mit der so berechneten Rohrlänge lässt sich mit Hilfe der Tabelle im Anhang B der Druckverlust in den Rohrleitungen errechnen. Dabei werden folgende Daten berücksichtigt:

- Rohrtyp: 1/2" - Polyethylenrohr
- Rohrverbindungsstücke: drei 90° Rohrbögen entsprechen ca. 6 m zusätzlicher Rohrlänge
- Rohrlänge: 16 m
- Volumenstrom: $0,85 \text{ m}^3/\text{h} \approx 15 \text{ l}/\text{min}$

$$\Delta H_V = \frac{10 \text{ m}}{100 \text{ m}} \cdot (16 \text{ m} + 6 \text{ m}) = 2,2 \text{ m}$$

Damit ergibt sich für die Gesamtförderhöhe nach Gleichung 2:

$$\Delta H = 6 \text{ m} + 5 \text{ m} + 2 \text{ m} + 2,2 \text{ m} \approx 15 \text{ m}$$

Schritt 8 – Pumpenauswahl

Mit Hilfe der zuvor errechneten Gesamtförderhöhe und des Volumenstroms kann die Pumpe ausgewählt werden. Für die Auslegungsrechnung wird hier die Tauchpumpe PS150 der Firma Lorentz genutzt. Anhand der Leistungskurve lässt sich ein Spitzenleistungsbedarf von 105 Wp ablesen. Für den Fall eines in Zukunft steigenden Wasserbedarfs ist das System skalierbar. Für eine Verdopplung des Volumenstroms erhöht sich der Leistungsbedarf auf 190 Wp. Abbildung 28 veranschaulicht den Zusammenhang von Volumenstrom, Förderhöhe und Leistungsbedarf der beiden Fälle.

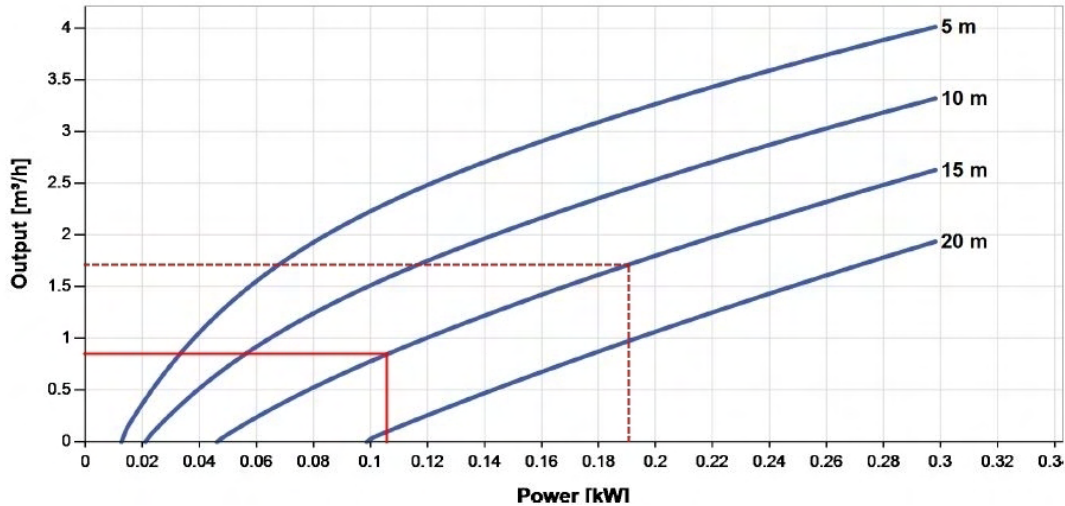


Abb. 28: Die Pumpenleistungskennlinie mit ausgelegtem (durchgezogene Linie) und skaliertem (gestrichelte Linie) Volumenstrom [Lorentz, angepasst]

Die Anforderungen der Pumpe lassen sich dem Datenblatt, siehe Anhang C, entnehmen. Tabelle 13 zeigt diese.

Tab. 13: Leistungsmerkmale der PS150

Betriebsspannung	> 17 V
Maximale Eingangsspannung	50 V
Maximaler Eingangsstrom	18 A
Maximale Leistungsaufnahme	0,30 kW

Schritt 9 – Auswahl des Solarmoduls

Der in Schritt 8 bestimmte Spitzenleistungsbedarf von 105 Wp dient zur Auswahl der Solarmodule. Die größer dimensionierte, von den Modulen zu erbringende Leistung errechnet sich nach Gleichung 5. Hier wird ein Faktor $F_{\ddot{u}}$ von 1,25 gewählt, der die gemäßigten Temperaturen des Hochlandes sowie Modulverschmutzung und Leitungsverluste berücksichtigt.

$$\text{Benötigte Spitzenleistung Modul} = 105 \text{ Wp} \cdot 1,25 \approx 130 \text{ Wp}$$

Anhand der so errechneten benötigten elektrischen Leistung können die Module und Verschaltung ausgewählt werden. In diesem Fall werden Module des Herstellers BrightSun verwendet, die in Bolivien verfügbar sind. Tabelle 14 zeigt die zur Auslegung wichtigen Moduldaten, die dem Datenblatt (siehe Anhang D) entnommen wurden.

Die benötigte Anzahl der Module errechnet sich nach Gleichung 6:

$$\text{Anzahl der Module} = \frac{130 \text{ Wp}}{65 \text{ Wp}} = 2$$

Tab. 14: Leistungsmerkmale PV-Modul

Typ	Polykristallines Silizium
Spitzenleistung (P_{max})	65 W
Spannung (U_{MPP})	17,2 V
Strom (I_{MPP})	3,78 A

Um die Spannungsanforderungen der Pumpe zu erfüllen, werden die beiden Module in Serie geschaltet. Damit werden die von der Pumpe benötigten Kenngrößen erzielt, ohne die maximal zulässigen Werte zu übersteigen. Soll der Volumenstrom in Folge eines erhöhten Wasserbedarfs verdoppelt werden, müssen $190 \text{ Wp} \times 1,25 \approx 240 \text{ Wp}$ von den Solarmodulen erbracht werden. Dies ließe sich durch eine Zuschaltung von 2 weiteren Modulen erreichen, die parallel zu den zwei bereits installierten geschaltet werden. Tabelle 15 zeigt die so erlangten Kenngrößen der beiden Varianten.

Tab. 15: Kenngrößen bei der Verschaltung von 2 bzw. 4 Modulen

Anordnung	2 Module in Serie	4 Module in Serie und parallel
Spitzenleistung (P_{max})	$2 \cdot 65 \text{ Wp} = 130 \text{ Wp}$	$4 \cdot 65 \text{ Wp} = 260 \text{ Wp}$
Spannung (U_{MPP})	$2 \cdot 17,2 \text{ V} = 34,4 \text{ V}$	$2 \cdot 17,2 \text{ V} = 34,4 \text{ V}$
Strom (I_{MPP})	3,78 A	$2 \cdot 3,78 \text{ A} = 7,56 \text{ A}$

5.2 Das System

Von den 83 installierten SPSs aus DG1 und DG2 waren bei der Überprüfung 20 Systeme ohne Funktion, weitere 8 hatten starke Mängel und konnten aus Gründen der Betriebssicherheit nicht weiter genutzt werden. Die insgesamt 28 fehlerhaften SPSs machen einen Anteil von 34 % der Gesamtsysteme aus. Dazu kommen 10 Systeme (12 %) aus DG1, die zu einem späteren Zeitpunkt dem Zweck der Wasserförderung nicht mehr nachgehen konnten. Insgesamt ist damit die Anzahl der fehlerbehafteten Systeme sehr hoch.

Bei einer Evaluierung von Solar Home Systems, die Jonathan Krink im Jahr 2011 in den Departamentos Cochabamba und Oruro durchführte, waren unter den 61 untersuchten Installationen lediglich 4 Defektsysteme, was einem Anteil von 6,5 % entspricht [Krink, 2011]. Sind bei SHSs mit Ausnahme des PV-Moduls alle Komponenten geschützt im Inneren einer Unterkunft installiert, befinden sich die solaren Wasserfördersysteme die komplette Nutzungsdauer über im Freien. Damit sind sie anfälliger gegen Witterung und Diebstahl. Auch arbeiten viele Systeme abseits der Unterkünfte, sodass auftretende Fehler nicht direkt bemerkt und zeitnah gelöst werden können. Im Vergleich zu SHSs sind die solaren Pumpsysteme komplexer, da neben der elektrischen Verkabelung auch ein Wasserleitungsnetz installiert werden muss und durch die Pumpe elektrische in mechanische Energie umgewandelt wird. Insgesamt sind solare Pumpsysteme daher deutlich fehleranfälliger als Solar Home Systems.

5.3 Komponenten

5.3.1 PV-Module

Bei den untersuchten Systemen gab es in keinem Fall Probleme mit Defekten an den Photovoltaikmodulen. Generell gelten diese, dank internationaler Zertifizierungen, als sehr zuverlässig, sofern sie auf Trägerstrukturen installiert sind [Nieuwenhout et al., 2004]. Auch Krink konnte in

seiner Untersuchung keine Fehler an dieser Komponente nachweisen.

Bis auf vier Ausnahmen ist der Neigungswinkel immer zwischen 20° und 30° eingestellt. Für Bolivien ist ein Winkel von 20° optimal. Eine Anstellung auf 30° kann jedoch Sinn machen, damit es zu einer besseren Selbstreinigung kommt. So können Leistungseinbußen vermindert werden. Da sich die Regenzeit über die Sommermonate Dezember bis März erstreckt, ist die Wasserförderung in der Trockenheit der Wintermonate besonders wichtig. Um in diesen Monaten bessere Wirkungsgrade zu erzielen, kann ein steilerer Neigungswinkel bis 35° wegen der etwas niedrigeren Sonnenstände eine sinnvolle Anpassung sein.

Bei vier Systemen aus DG2 wurden Winkel von 45° beobachtet. Es handelt sich um Systeme im Municipio Sacaca, die als SHS zweckentfremdet wurden, siehe Kapitel 4.4.4. Die deutlich zu steile Neigung lässt auf eine Installation von nicht fachkundigem Personal schließen. Dass eines dieser Systeme im Tagesgang zusätzlich verschattet wird, verstärkt diesen Eindruck. In DG1 kam es lediglich in einem Fall zur Verschattung im Tagesverlauf, da die räumliche Anordnung der Systembestandteile vom Nutzer nachträglich geändert wurde.

Der Großteil der Module war beim Besuch verstaubt. Bei den Paneelen aus DG1 mussten die Techniker in 65 Fällen die Module reinigen, obwohl den Nutzern während einer Schulung die Grundlagen der Wartung vermittelt wurden.

Bei einer Untersuchung von SHSs in einem ruralen und staubigen Gebiet Chiles gaben 91% der Befragten an, eine Schulung zum Zeitpunkt der Installation bekommen zu haben. Trotzdem war ein Großteil der Module stark verunreinigt. Durch die Anbringung auf hohe Gestelle waren die Module für viele der älteren Nutzer schwer zu erreichen, doch auch bei Anwesenheit von jüngeren Generationen wurden die Panele nicht gesäubert. Ein effektiveres Training, welches zu langfristigen Erfolgen führt, ist daher von Bedarf [Cancino et al., 2001].

5.3.2 Wasserpumpen

In insgesamt sechs Fällen führte die Pumpe zum Systemausfall oder zum fehlerhaften Betrieb. Vier Mal war dabei eine Shurflo 9300 verbaut, wobei der Defekt in drei Fällen an einem Wassereintritt an den elektronischen Komponenten lag. Dies hatte einen Kurzschluss zur Folge. Die übrige Shurflo 9300 war nicht mehr im System verbaut, die Anwohner konnten keine Informationen liefern. Weshalb genau es zu den Wassereintritten kam, ist nicht bekannt.

Tauchpumpen, wie die betroffene 9300 - Serie von Shurflo, sind für den ganzjährigen Betrieb im Wasser ausgelegt. Sie sind aus Materialien gefertigt, die sie vor Korrosion, Salzwasser und chemischen Angriffen schützen. Das macht sie zu einem bewährten Pumpentyp, der bei jährlicher Wartung solange im Betrieb gehalten werden kann, wie es Ersatzteile seitens des Herstellers gibt [Protogeropoulos und Pearce, 2000].

Die Defekte traten bereits in den ersten Monaten bis zur vorbeugenden Instandhaltung auf. Diese lag bei den drei beschriebenen Fällen bei 8 Monaten nach der Installation. Ein Materialfehler, der nach so kurzer Zeit zu einem Wassereintritt führt, ist unwahrscheinlich. Die Häufung des gleichen Defekts lässt auf einen fertigungsbedingten oder installationbedingten Fehler schließen. Bei einem fertigungsbedingten Fehler sind meist ganze Serien betroffen und das Problem allgemein bekannt. Eine weitere mögliche Fehlerquelle ist eine unsachgemäße Installation seitens der Techniker. Wird beispielsweise beim Herunterlassen der Pumpe das Stromkabel zu sehr belastet, kann es sein, dass die Verbindung zwischen Kabel und Pumpe eine leichte Beschädigung davonträgt, die mit der Zeit zu einem Wassereintritt und damit zum Kurzschluss führt.

Bei zwei Systemen >200 W zeigte sich ein fehlerhaftes Betriebsverhalten. 10 Monate nach Installation vibrierte eine der Pumpen im Betrieb, die Wasserförderleistung hatte sich im Vergleich zum Zeitpunkt der Installation halbiert. Die betroffene Pumpe wurde in einer Werkstatt untersucht und zeigte Schäden am Motorkopf, die durch den Eintritt von Wasser und feinem Sand hervorgerufen wurden. Mit einem Tausch des Motors konnte die Pumpe wieder in Stand gesetzt werden. Weswegen es zu einem Wassereintritt kam, ist unbekannt. Das zweite System schaltete sich im laufenden Betrieb kontinuierlich ein und aus. Bis zu diesem Zeitpunkt lief es 25 Monate

fehlerfrei. Die Pumpe wurde in einer Werkstatt gewartet und die Füllstandssensoren im Wassertank neu ausgerichtet, was das Problem behob.

Andere Untersuchungen zeigen, dass die Pumpe oft der Hauptgrund für ein defektes Wasserfördersystem ist. Bei einer Untersuchung wurden zwischen 1995 und 1998 in abgelegenen Dörfern Thailands 489 solare Wasserpumpen überprüft, von denen 220 (45%) nicht mehr funktionierten. Der Hauptgrund der Defekte lag mit 32% bei Fehlern, die sich auf Verstopfung der Pumpen und Rohre durch Algen, Wasserpflanzen und Sedimenten zurückführen ließen [Kauamuang et al., 2001].

Bei der Auswahl der Pumpe müssen neben den Spezifikationen für die Wasserförderung auch die örtlichen Gegebenheiten beachtet werden. Tabelle 16 zeigt verschiedene Pumpen- und Motorvariationen mit ihren Haupteigenschaften. Für das Hochland Boliviens eignen sich daher eher Tauchpumpen, die vor den extremen Witterungsverhältnissen geschützt sind. Um Wartungen so weit wie möglich einzuschränken, sollten Pumpen mit bürstenlosen Gleichstrommotoren verwendet werden. Die Wahl der Pumpenkategorie hängt dabei von Fördermenge und -höhe sowie der Wasserqualität ab.

Tab. 16: Vergleich der Haupteigenschaften verschiedener Pumpen/Motoren [Hellmann, 2011] [Protogeropoulos und Pearce, 2000] [Meah et al., 2008] [Chandel et al., 2015]

Pumpentyp		
Tauchpumpe	Oberflächenpumpe	
<ul style="list-style-type: none"> - witterungsgeschützt - große Förderhöhen - bessere Energienutzung - selbstansaugend - Dichtungen fehleranfällig 	<ul style="list-style-type: none"> - außerhalb des Wassers - einfachere Wartung - witterungsanfällig - evtl Kühlung notwendig - geringe Förderhöhe 	
Pumpenkategorie		
Kreiselpumpe	Verdrängungspumpe	
<ul style="list-style-type: none"> - kleine bis mittlere Förderhöhen - große Volumenströme - anfällig gegen Sand - empfindlich bei Trockenlauf 	<ul style="list-style-type: none"> - große Förderhöhen - Membranpumpen empfindlich bei hohen Salzgehalten 	
Motor		
AC	DC	
	Bürsten	bürstenlos
<ul style="list-style-type: none"> - Inverter nötig 	<ul style="list-style-type: none"> - regelmäßige Wartung der Bürsten - kein Inverter nötig 	<ul style="list-style-type: none"> - wartungsunabhängiger - kein Inverter nötig

5.3.3 Pumpencontroller

In sieben Fällen lag ein Defekt am Pumpencontroller vor, der zur erneuten Inbetriebnahme des Systems ausgetauscht werden musste. Nur in drei Fällen ist der Grund für den Ausfall des Controllers bekannt. Ein Eintritt von Wespen, die im Controllerkasten ein Nest bauten, führte in einem Fall zu einem Kurzschluss und Brand auf der Platine. Der Eingang der Kabel zur Kontrolleinheit wurde dabei von den Insekten zum Eintritt genutzt. Bei der Installation muss also unbedingt darauf geachtet werden, dass der Controller keinen Zugang für Insekten bietet. Sind bei Kabeleingängen kleine Lücken vorhanden, müssen diese fachgerecht abgedichtet werden.

In zwei Fällen sorgten Blitzeinschläge in unmittelbarer Nähe der Systeme zum Ausfall des Controllers, obwohl bei den Systemen >200 Wp ein Blitzschutz installiert war. Durch den Schutz wurden hier eventuell stärkere Beschädigungen an den übrigen Komponenten verhindert. Je nach dem in welcher Distanz ein Blitz einschlägt, kommt es zu unterschiedlichen Auswirkungen:

- Fernschläge (>1000 m): meist nur kapazitive Einwirkungen, ungefährlich für das System
- Naheinschläge (<500 m): starke magnetische Felder können Überspannungen auf das elektrische System induzieren
- direkte/indirekte Einschläge: starke Blitzteil- und Blitzströme, die große Schäden an den elektrischen Verbindungen und Komponenten hervorrufen

[VDE, 2003]

An den übrigen vier defekten Pumpcontrollern konnte kein Fehlergrund festgestellt werden. Möglich wäre hier, dass es durch Naheinschläge zu zu hohen induzierten Spannungen gekommen ist, die die Komponenten des Controllers zerstörten.

Auch Einflüsse durch Witterungsbedingungen wie Wassereintritt oder zu starker Frost könnte zu Schäden geführt haben. Um Schäden dieser Art zu vermeiden sollten die Kontrolleinheiten in verschließbaren Kästen untergebracht werden. Abbildung 29 zeigt eine solche Installation.

Im Fall der 489 in Thailand untersuchten solaren Wasserpumpensystemen waren 19% der defekten Systeme auf einen Ausfall des DC-AC-Konverters zurückzuführen. Die Ausfälle kamen durch Blitzeinschläge, unzureichenden Schutz gegen Feuchtigkeit und Temperaturanstieg sowie Kurzschlüsse durch Insektenester zustande [Kaunmuang et al., 2001]. Damit ähneln sich die Fehler sehr den in Bolivien beobachteten. Generell könnten sich einige Defekte an der Kontrolleinheit durch geeignete Blitzschutzmaßnahmen zumindest reduzieren. Schäden durch Insekten- oder Feuchtigkeitseintritt sollten sich durch eine durchdachte Planung ganz vermeiden lassen.

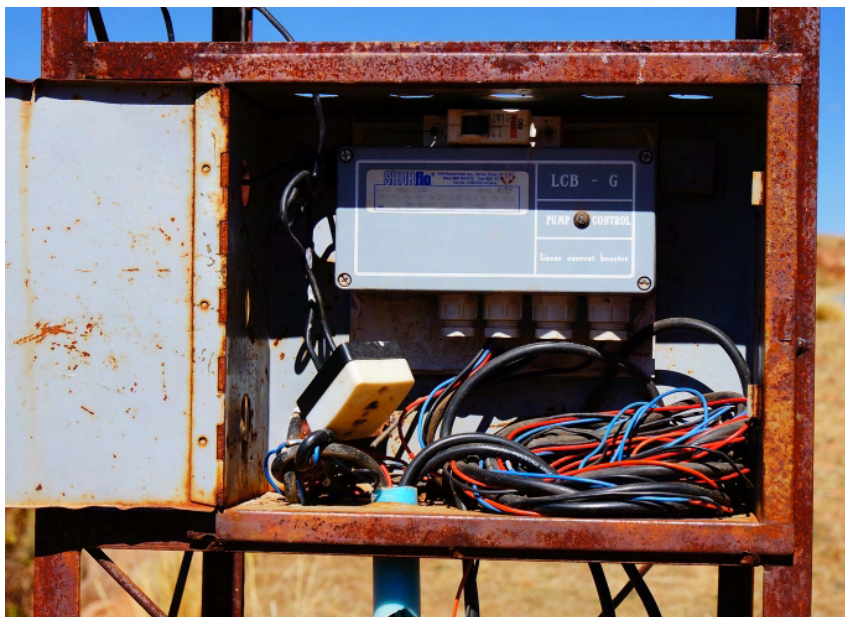


Abb. 29: Shurflo LCB-G75 Pumpcontroller im Norden Potosis

5.3.4 Wassertank

In keinem der untersuchten Systeme kam es zu Ausfällen, die durch den Wassertank ausgelöst wurden. Ein zerstörter Wassertank war die Folge eines Sockeleinsturzes.

5.4 Projektplanung

5.4.1 Örtliche Gegebenheiten

Temperatur

Bei der Planung des SPS spielen die örtlichen Gegebenheiten, besonders aber die klimatischen Bedingungen eine wichtige Rolle. Verringern hohe Umgebungstemperaturen die Effizienz der Solarmodule, sind im Hochland Boliviens eher Frosteinflüsse und die Temperaturspreizung innerhalb von 24 h das Problem. Nächtliche Temperaturen weit unterhalb des Gefrierpunktes in den Monaten Mai bis September (siehe Kapitel 2.1.2) lassen das in den Leitungen stehende Wasser gefrieren. Beim Wechsel des Aggregatzustandes von Wasser zu Eis kommt es zu einer Volumenzunahme von 9%, was bei geschlossenen Systemen zu einer starken Druckzunahme führt. Diese kann Schäden an Rohrleitungen und Verbindungen hervorrufen [Pfullmann, 2007].

Bei drei Systemen aus DG1 kam es zu einem Ausfall des Systems, da das Wasserrohr zwischen Brunnen und Tank durch Frosteinflüsse brach. Weiterhin wurden auf der planmäßigen Wartung 22 Wasserhähne, 5 Rückschlagventile und 4 Rohrverschraubungen ausgetauscht, da diese undicht waren oder ihrer Funktion nicht mehr nachkamen. Die große Anzahl an Defekten und nötigen Austauschen weist auf Fehler innerhalb der Planung und im Betrieb hin. Zwar wurden die Rohre isoliert, anscheinend war die Stärke des Dämmstoffes jedoch nicht ausreichend. Besonders die Wasserhähne, siehe Abbildung 30, waren von Frostschäden betroffen, hier wurde kein Dämmmaterial angebracht. Sie sind für den autonomen Betrieb ausgelegt und öffnen und schließen sich automatisch je nach Füllhöhe des Wassers innerhalb der Tränke.

Verbesserungen ließen sich zum einen durch eine effizientere Isolierung der Rohrstücke und frostunempfindlichere Wasserhähne erreichen. Außerdem sollte verhindert werden, dass sich Wasser innerhalb der Leitungen befindet: So könnte sich der automatische Wasserhahn in unmittelbarer Nähe zum Wassertank befinden. Dort ist er durch die Wärmekapazität des Tanks besser geschützt. Rohrleitungen zur Tränke könnten abfallend konstruiert werden, sodass sämtliches Wasser stets heraus fließt. In den aktuell bestehenden Systemen müssen die Nutzer in der Winterzeit darauf achten, dass die Hähne geöffnet sind und sich in den Rohren kein Wasser anstaut.



Abb. 30: Wasserhahn zur Befüllung der Tränke [Energética]



Abb. 31: Durch Tiere zerstörte Leitungssysteme [Falk]

Leitungsverlauf

Bei 10 überprüften Installationen der DG1 wurden Wasser- und Stromleitungen vorgefunden, die ungeschützt auf dem Boden verliefen. In diesem Zustand können die Leitungen durch zum Beispiel die Hufe von Tieren beschädigt werden. In einem Fall kam es zum Ausfall des Systems,

weil Tiere die Verkabelung zwischen Modul und Pumpe zerstörten. Bei der Installation muss also darauf geachtet werden, dass die Leitungen nicht über Trampelpfade von Menschen und Tieren verlaufen. Durch einen unterirdischen Verlauf können Leitungen gegen Frost und äußere Beschädigungen geschützt werden. Auch eine Abdeckung aus Steinen kann zum Schutz dienen. Abbildung 31 zeigt Beschädigungen an Leitungen, die über einem Trampelpfad verliefen.

Diebstahl

Bei drei Systemen kam es zur Entwendung von Komponenten. Da Pumpsysteme, im Gegensatz zu SHSs, oft in einiger Entfernung zu Behausungen erbaut sind, stellen sie für Diebe ein attraktives Ziel dar. Wie die Pumpsysteme >200 Wp aus DG2 sind viele größere Installationen umzäunt und mit Stacheldraht geschützt. Dies schreckt Täter zumindest ab, macht Diebstahl jedoch nicht unmöglich. Bei kleineren Systemen stehen Kosten und Aufwand eines solchen Schutzes oft nicht im Verhältnis zum Diebstahlrisiko.

Durch mechanische Sicherheitstechniken an der Verschraubung können Diebstähle von PV-Modulen wesentlich erschwert werden, da sich die Schrauben mit handelsüblichen Werkzeugen nicht lösen lassen. Somit steigt die Zeit, die zum Abbau benötigt wird und damit das Entdeckungsrisiko. Befestigungen, die sich nur mit Hilfe von Spezialwerkzeugen oder durch Zerstörung lösen lassen, sind beispielsweise Innensechskantschrauben mit eingeschlagenen Stahlkugeln, überdrehten Kanten oder Gießharzausfüllung oder aber Spezialschrauben [Bayrisches Landeskriminalamt, 2007]. Abbildung 32 zeigt Schrauben mit einhämmerbaren Zapfen, die das Abschrauben erschweren. Der Diebstahl von Tauchpumpen lässt sich durch verschließbare Brunnenabdeckungen erschweren.



Abb. 32: Schrauben mit zusätzlichem Sicherungspin gegen Diebstahl [Phaesun, 2016]

Wasser Verfügbarkeit

Wasser Verfügbarkeit und Wasserqualität müssen vor der Installation des Pumpsystems untersucht werden, um Rückschlüsse auf die späteren Pumpbedingungen ziehen zu können. In unbekanntem Gebieten müssen daher Probebohrungen durchgeführt werden, um die Tiefe des Wasserpegels, die Regenerationsleistung des Wassers und seine Qualität zu bestimmen.

Bei den untersuchten Systemen der DG1 <200 Wp liegt der Wasserspiegel bei 2 – 3 m. Die Brunnen dieser Installationen wurden auf 4 – 5 m ausgehoben, sodass im Tagesverlauf durchgehend Wasser gefördert werden kann. Bei drei Installationen kam es zum Ausfall, da die Wassermenge im Brunnen nicht mehr ausreichte. Durch die angeschlossenen Sensoren konnte ein Trockenlauf der Pumpe verhindert werden. Die Brunnen wurden in Folge des Ausfalls von den Nutzern vertieft und die Pumpe und Sensoren in der Höhe angepasst. Bei der Installation und der vorbeugenden Instandhaltung wurden keine ungewöhnlichen Wasserstände festgestellt. Dies lässt darauf schließen, dass der Wasserspiegel durch klimatische Bedingungen abgesunken ist.

Zur Einschätzung der Wasserqualität gehören Untersuchungen auf:

- den Salzgehalt, da dieser in erhöhten Konzentrationen Schäden an bestimmten Pumptypen hervorrufen kann,
- Feststoffbestandteile wie Sand, Partikel, Algen. Diese können, wie auch bei der Untersuchung in Thailand von Kaunmuang et al. festgestellt, Pumpe und Rohre verstopfen oder Beschädigungen an Antriebsrad, Lager oder Kammern der Pumpe hervorrufen [Gaber, 1998].
- Keime, wenn das Wasser für den menschlichen Trinkwasserbedarf genutzt wird.

In zwei Fällen der in Bolivien untersuchten SPSs war die Wasserqualität sehr schlecht, die Systeme waren aber aufgrund eingestürzter Sockel ohnehin nicht mehr im Betrieb. Das Wasser war sehr trüb und versandet, da die Nutzer keinen Sandschutz installiert hatten. Dabei handelt es sich um eine Ausschüttung des Brunnenbodens mit Kies oder Steinen, zwischen denen sich Sedimente absetzen können. So löst sich vom Boden weniger Sand, auch Sedimente setzen sich innerhalb der Schüttung ab und wirbeln weniger schnell auf.

5.4.2 Dimensionierung

Eine gute Dimensionierung ist wichtig, um den Zweck des Systems zu erfüllen und um den Erwartungen der Nutzer zu entsprechen. Die Bedürfnisse der Anwender müssen also im Vorfeld genau abgefragt. Bei den Systemen <200 Wp der DG1 wurden die Anzahl der Familien, die sich ein System teilen und die Herdengrößen ermittelt. So kommen auf jedes installierte System im Schnitt 4 Familien und 545 Tiere.

Die im Kapitel 5.1 durchgeführte Auslegungsrechnung basiert auf dieser Herdengröße und nutzt den Wasserbedarf für Tiere nach Tabelle 6. Demnach ist ein täglicher Wasserbedarf von 4.300 l notwendig, wenn die Tiere nur von dem so geförderten Wasser leben. Wird die Größe des Tanks auf den dreifachen täglichen Wasserbedarf ausgelegt, müsste dieser ein Fassungsvermögen von etwa 13 m³ besitzen.

Die installierten Systeme <200 Wp der DG1 beinhalten die gleichen Komponenten, obwohl die Herdengröße stark schwankt (siehe Abbildung 16, S.23). Die Pumpe fördert täglich um die 2.000 l, der Wassertank besitzt ein Fassungsvermögen von 2,3 m³. Die Werte unterscheiden sich demnach stark von denen der durchgeführten Auslegungsrechnung. Ein Grund dafür ist, dass die Tiere innerhalb eines Gebietes umherziehen und so auch andere Wasserquellen nutzen. Vergleichbar werden die Werte nur für die Annahme, dass durch eine extreme Dürre sämtliche oberflächlichen Wasserquellen verschwinden. In diesem Fall wäre der Großteil der Systeme unterdimensioniert. In DG2 wurde die Zufriedenheit mit dem SPS abgefragt. Bei drei der vier funktionierenden Systemen waren die Nutzer unzufrieden, weil das geförderte Wasser seit Beginn quantitativ unzureichend war. Hier lag also eine Fehlplanung vor. Ein weiteres Problem ist die Vergabe von Systemen an Menschen, die eigentlich kein Interesse an ihrem Nutzen haben. Bei vier Systemen aus DG2 zeigt sich diese Problematik. Über ein Regierungsprojekt bekamen die Nutzer die Anschaffung eines solaren Pumpsystems stark subventioniert. Beim Besuch vor Ort stellte sich heraus, dass die Systeme modifiziert und zur Beleuchtung der Unterkünfte genutzt wurden und die Pumpen nicht installiert waren. Wäre der Bedarf der Bewohner im Vorfeld besser herausgestellt worden, hätten statt der Pumpsysteme direkt SHSs angeschafft werden können.

Ein wichtiger Punkt in der Planung und Dimensionierung ist die Skalierbarkeit des Systems. Die Möglichkeit, die existierende Wasserförderung an einen steigenden Wasserbedarf anzupassen, erhöht die Nachhaltigkeit der Installation und die Zufriedenheit der Nutzer [Barua et al., 2011]. Die erhofften positiven Effekte eines Wasserförderprojektes sind die Verbesserung der wirtschaftlichen Situation, der Gesundheit und der Lebensqualität. Bei einer verbesserten Grundsituation kann es zu einem gesteigerten Wasserbedarf kommen, wenn sich die Herden vergrößern oder der

Wasserverbrauch der Nutzer steigt. Auch bei stärkeren Dürren kann eine Erhöhung der Förderleistung nötig sein.

Solare Pumpsysteme sind generell gut skalierbar. Wie auf der Leistungskurve in Abbildung 28 (S.33) zu sehen ist, reicht bei steigendem Wasserbedarf eine Vergrößerung der elektrischen Leistung, um das Fördervolumen zu erhöhen. Dazu muss die Pumpe jedoch so ausgewählt werden, dass sie sich nicht bereits in der Maximalförderung befindet. Auch das Grundwasser muss eine ausreichend hohe Rückflussrate haben.

Die in den Systemen <200 Wp der DG1 genutzte Shurflo 9300 fördert in ihrer jetzigen Auslegung bereits im maximalen Bereich. Eine Erhöhung des Volumenstroms ist daher mit der Neuanschaffung eines angepassten Systems verbunden. Bei den bestehenden Systemen aus DG2, deren Wasserförderung nicht ausreicht, könnte überprüft werden, ob eine Zuschaltung von PV-Modulen möglich ist.

5.4.3 Finanzierung

Photovoltaische Pumpsysteme benötigen hohe Investitionskosten, was zum Teil auf die Modulpreise zurückzuführen ist. Die Kosten schließen dabei meist diejenigen aus, die das Wasser am dringendsten benötigen, es sei denn externe Geldgeber wie Regierungen, Hilfsorganisationen oder NGOs unterstützen die Vorhaben [Short und Thompson, 2003].

Bei den Systemen aus DG1 war der deutsche Verein KarEn Finanzier des Projekts. Die in Berlin ansässige NGO bezieht das Geld vom BMZ und aus Spenden. Auch die Systeme aus DG2 wurden mit externer Hilfe finanziert.

Die Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) in Bolivien hatte mit der Implementation von solaren Wasserpumpen keinen Erfolg. Dies begründet sie mit den hohen Investitionskosten und den niedrigen Wasserfördermengen. Im Rahmen der Nachhaltigkeit haben Projekte der GIZ einen hohen finanziellen Eigenanteil, der von den Begünstigten geleistet werden muss. Bei durchgeführten Wasserförderungsprojekten für die landwirtschaftliche Bewässerung wurde daher auf Benzinpumpen gesetzt [Guzman, 2016].

Die Anschaffung von solaren Pumpsystemen ist mit hohen Investitionskosten verbunden. Die folgenden Betriebs- und Wartungskosten sind jedoch gering. So kostet die in Kapitel 5.1 verwendete Lorentz PS150 im Verbund mit Pumpencontroller und Modulen in Bolivien rund 11.000 Bs. Benzinpumpen charakterisieren sich durch niedrige Investitionskosten bei hohen Folgekosten. Der Anschaffungspreis einer Kipor KGP20 Benzinpumpe liegt bei 2.500 Bs.

Ein Vergleich der Lebenszykluskosten zeigt, dass sich SPSs bis zu einer bestimmten Grenze bereits in wenigen Jahren amortisieren. Bei schlechten ökonomischen Bedingungen (z.B. hohe Preise für Module, niedrige Brennstoffkosten) liegt die Grenze bei einem Energiebedarf von 15 kWh/Tag. Sind die ökonomischen Bedingungen gut, sind SPSs bis zu einem Energiebedarf von 68 kWh/Tag die kostengünstigere Alternative [Kolhe et al., 2002].

5.4.4 Eigenbeteiligung

Das zu den Systemen aus DG1 gehörige Projekt setzt neben der Finanzierung durch eine externe Quelle auch auf die Eigenbeteiligung der Nutzer. Diese wird in finanzieller und materieller Form sowie durch Einbindung in die Konstruktion erbracht. Die finanzielle Beteiligung beläuft sich auf eine Zahlung von 500 Bolivianos. In ruralen Gebieten des Hochlands entspricht dies ungefähr dem Monatseinkommen eines Haushalts [Zamora, 2007]. Zusätzlich war für die Zulassung zum Projekt der Bau eines Schachtbrunnens, eines Sockels für den Wassertank sowie einer Tränke für Tiere die Voraussetzung. Der Bau der Strukturen wurde von den Nutzern durchgeführt, in einigen Fällen engagierten sie lokale Handwerker. Den Bauarbeiten ging eine Schulung voraus, in denen die Anforderungen an Brunnen, Tränke und Sockel erklärt wurden und Hinweise zur Konstruktion und örtlicher Ausrichtung gegeben wurden. Bei der Finanzierung der Materialien bekamen die Nutzer

Unterstützung von der Landwirtschaftsbehörde SEDAG. Während sich Brunnen und Tränken der verschiedenen Nutzer in der Art ähneln, werden bei den Sockeln verschiedenste Bauweisen sichtbar: Metallkonstruktionen, Ziegelsteine, Beton mit Bewehrung, Beton mit großen Steinen und Konstruktionen aus Adobe. Abbildung 33 zeigt verschiedene Konstruktionen.

Fehler an den Sockeln waren bei den Systemen <200 Wp in DG1 ein häufiger Grund für den Ausfall. In vier Fällen kam es zum Einsturz des Sockels, bei weiteren vier Fällen zeigten sich starke Risse. Grund der Einstürze waren fehlerhafte Konstruktionen seitens der Nutzer. Bei vollem Wassertank liegen 2,3 t auf dem Podest, wodurch dieses stark belastet wird. Alle fehlerhaften Sockel wurden aus Adobe gefertigt. Die Lehmziegel sind preiswert, da sie in Eigenarbeit hergestellt werden können. Viele Unterkünfte in ruralen Gebieten sind mit diesem Baustoff konstruiert und es besteht in der Bevölkerung ein großes Knowhow bei ihrer Herstellung. Die Adobe haben jedoch den Nachteil, sehr anfällig für Wasser zu sein, da sie nur sonnengetrocknet sind. Im Bereich der Wasserförderung, wo es immer zum Austritt von Wasser kommen kann, ist die Nutzung von Adobe daher nicht zu empfehlen. Bei einer Durchweichung verlieren die Ziegel ihre Stabilität, was zum Einsturz führen kann.



Abb. 33: Verschiedene Sockelbauweisen [Energética]

In der Literatur wird in vielen Studien die Wichtigkeit der Eigenpartizipation beschrieben. Nach einer Studie der Weltbank ist sie der wichtigste Faktor für die Nachhaltigkeit von ruralen Wasserprojekten [Narayan, 1995, S.75]. Dabei wird durch die finanzielle und materielle Beteiligung sowie der Mithilfe an der Konstruktion ein Gefühl des Eigentums bei den Nutzern hervorgerufen,

auch wenn es sich um ein Gemeinschaftsprojekt handelt. So entsteht ein gesteigertes Interesse für einen guten Umgang mit dem System, ein größeres Verantwortungsbewusstsein und eine größere Bereitschaft, die Installation im Falle eines Defekts reparieren zu lassen [Marks und Davis, 2012]. Bei Beteiligung an der Konstruktion besteht jedoch, wie sich an den eingestürzten Sockeln sehen lässt, ein erhöhtes Fehlerrisiko. Es muss also bei der Planung abgewägt werden, in welcher Form eine Beteiligung der Nutzer sinnvollerweise erfolgt. Auch können durch Schulungen vor dem Bau der Anlage mögliche Fehlerquellen, z.B. das Nutzen von Adobe als Baustoff, vermieden werden. Um die Systeme aus DG1, die durch eingestürzte Sockel funktionsuntüchtig waren, erneut zu nutzen, bekamen die Anwender die Anweisung zur erneuten Konstruktion. Von den acht beschädigten Sockeln wurden fünf erneut errichtet, diesmal aus widerstandsfähigeren Materialien. In vier Fällen konnte das SPS neu eingerichtet und daraufhin wieder genutzt werden. Bei drei der acht defekten Sockel kümmerten sich die Anwender in der abgesprochenen Zeit nicht um eine erneute Konstruktion. Auch andere Anzeichen wie fehlende Tränke, versandeter Brunnen oder schlammiges Wasser ließen auf ein Desinteresse der Nutzer schließen, das System weiter zu nutzen. Diese Installationen wurden von den Technikern demontiert und mitgenommen, um sie für andere Standorte zu nutzen.

5.4.5 Wassergebühr

Die Systeme >200 Wp aus DG1 und DG2 dienen zur Trinkwasserversorgung von kleineren Comunidades. Bei der Wasserbereitstellung wird bei den Nutzern keine Gebühr erhoben. Für eine Langlebigkeit des Systems kann dies jedoch durchaus Sinn machen. Nach Short muss vor einer Implementierung aber beachtet werden

- wer bezahlt,
- wohin das gezahlte Geld geht,
- ob sich die Nutzer den geforderten Beitrag leisten können und
- ob die Nutzer bereit sind, für Wasser zu zahlen.

Die Beiträge könnten genutzt werden, um Betriebs- und Investitionskosten zu decken, Wartungen durchführen zu lassen oder Kapital für einen zukünftigen Komponententausch anzusparen. So kann eine längerfristige und damit nachhaltigere Nutzung möglich gemacht werden [Short und Thompson, 2003].

Die große Anzahl an defekten SPSs in Thailand führen Kaunmuang et al. auf die Nichtimplementierung von Wassermanagementsystemen, inklusive Wassergebühr, zurück. Auf Grund dessen kommt es zu einem Mangel an Verantwortung und Selbstverpflichtung und dadurch zum Ausfall der Pumpsysteme [Kaunmuang et al., 2001].

5.4.6 Strukturbildung

Die Schaffung von Trägerstrukturen ist wichtig für die Nachhaltigkeit in Entwicklungsprojekten und ist einer der Grundsätze der deutschen EZ [BMZ, 2008]. Nur durch so gebildete Strukturen lässt sich die Hilfe zur Selbsthilfe realisieren. Dabei geht es besonders um das Einbinden oder Ausbilden von lokalen Technikern, die nach Ende der Projekte in der Region bleiben. Wasserkomitees, die sich aus der lokalen Bevölkerung zusammensetzen, sollten in Wasserprojekten vorhanden sein. Sie überwachen die Funktion des Systems und managen Wartungen, das Sammeln von Wassergebühren, die Wasserverteilung oder den Kauf von Ersatzteilen [Sara und Katz, 2005]. So wird erreicht, dass auch bei politischen Wechselseln die Zuständigkeit für das System erhalten bleibt.

5.4.7 Schulungen der Nutzer

Die Nutzer sollten die Grundlagen von Funktion und Betrieb ihres SPS kennen, um ein Bewusstsein zum richtigen Umgang entwickeln zu können. So lassen sich zum einen Fehler in der Betriebsführung vermeiden, zum anderen können einfache Wartungsarbeiten vom Nutzer selbst durchgeführt werden. Kleine Fehler im System ließen sich damit früher erkennen und beheben, bevor sie einen größeren Schaden anrichten [Sara und Katz, 2005]. Bei den Systemen aus DG1 bekamen die Anwender zum Zeitpunkt der Installation eine Schulung. Bei der vorbeugenden Wartung wurden erneut die wichtigsten Punkte durchgesprochen. An die Installationen selber wurden Informationstafeln, wie in Abbildung 34 zu sehen, angebracht. Diese sind so gestaltet, dass sie auch von Personen, die nicht lesen können, aufgrund der Abbildungen verstanden werden können.



Abb. 34: Informationstafel mit den wichtigsten Schritten der Systemwartung [Energética]

Neben der technischen Seite sollte bei den Schulungen auch auf die Hygiene und einen sparsamen Wasserverbrauch eingegangen werden. Wasserbezogene Krankheiten sind in ruralen Gebieten geläufig, trotzdem sehen die Betroffenen nicht immer die Verbindung zwischen Krankheit und Auslöser. Die Nutzer müssen über die Gesundheitsverbesserungen durch den Gebrauch von verbesserten Wasserquellen aufgeklärt werden. So entsteht ein größerer Wille, die Wasserquelle zu schützen und sauber zu halten sowie das System aufrechtzuerhalten [Sara und Katz, 2005].

5.4.8 Nutzerzufriedenheit

Wenn Haushalte mit einer neuen Technologie ausgestattet werden, spielt die Nutzerzufriedenheit eine wichtige Rolle. Wenn der Anwender den Nutzen der Technologie nicht sieht, wird er diese

weniger gebrauchen und im Falle eines Defekts mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit ersetzen [Barua et al., 2011]. Das SPS muss also passend dimensioniert sein und die geplanten Wassermengen tatsächlich fördern können. Sind die Anwender mit der Technologie zufrieden, wird sie sich durch Mund zu Mund Propaganda weiter verbreiten können [Barua et al., 2011]. Diese Wirkung wurde auch beim von Energética durchgeführten Projekt beobachtet. Viele Familien, die sich in der ersten Projektphase noch nicht für ein SPS entscheiden wollten, taten dies in einer weiteren Phase. Sie hatten Funktion und Nutzen der Technik durch Nachbarn, die ein System besitzen, kennen gelernt. Nach den 66 installierten Systemen werden in einem Folgeprojekt bis Ende 2016 weitere 111 Systeme im Departamento Oruro installiert.

5.4.9 Wartung

Tab. 17: Ergebnisse der durchgeführten Wartungen in DG1

	Vorbeugende Wartung	Korrektive Wartung
Fehlerhafte Systeme	22	10
Behobene Fehler	18	8
Anteil	82%	80%

Durch die vorbeugende und die korrektive Wartung konnte der Großteil der aufgetretenen Fehler in DG1 behoben werden. Tabelle 17 zeigt die Ergebnisse der Reparaturen und verdeutlicht die Bedeutung der Wartung für einen möglichst großen Nutzen des Systems.

Durch verschiedene Faktoren kam es bei 22 Installationen bereits in den ersten Monaten nach Inbetriebnahme zu Ausfällen. Der Großteil der Systeme konnte nach einem Austausch der betroffenen Komponenten wieder in einen funktionsfähigen Zustand versetzt werden. Neben der Reparatur der Defektsysteme wurden bei der präventiven Instandhaltung auch kleinere Fehler behoben und Anpassungen durchgeführt. Diese Eingriffe beugen Systemausfällen vor, was im späteren Verlauf zu weniger korrektiven Wartungen führt. Diese waren in DG1 in zehn Fällen erforderlich. Der Vergleich der präventiven und korrektiven Wartung zeigt, dass sich neben der Häufigkeit auch die Fehlerart verändert (siehe Tabelle 10, S.24). Lagen die Defekte bei der ersten Überprüfung überwiegend bei Sockel, Pumpe und Kontrolleinheit, waren es bei der korrektiven Instandhaltung eher niedrige Wasserpegel und Rohrleitungsdefekte.

Die Implementierung von Wartungen als Projektbestandteil ist ein wichtiger Punkt für die Nachhaltigkeit technischer Systeme. Im Projekt der DG1 sind innerhalb von zwei Jahren nach Installation zwei präventive Wartungen und eventuell anfallende korrektive Wartungen vorgesehen. Neben Instandhaltungen, die nur von Technikern durchgeführt werden können, gibt es von den Nutzern durchzuführende Aufgaben. Dazu gehören die regelmäßige Reinigung der PV-Module, des Wassertanks und in größeren Abständen des Brunnens. Auch vom Nutzer zu erbringende Inspektionen sind wichtig. So können

- unnatürliche Geräusche oder Vibrationen,
- Korrosion,
- lose Teile oder elektrische Verbindungen,
- Befall von Insekten,
- Leckagen im Wassersystem oder
- eine verminderte Wasserqualität

festgestellt und behoben werden, bevor größere Schäden daraus entstehen [Argaw et al., 2003]. Der Reinigung der Paneele wurde in den besuchten Systemen beider Datengruppen nicht gründlich nachgegangen, ob Brunnen und Tank regelmäßig gereinigt wurden ist unbekannt aber fragwürdig.

5.5 Nutzen

In Datengruppe 1 haben die Systeme zu einer verbesserten Anpassung an die Wasserknappheit im Hochland Boliviens geführt. Auch die hohe Nachfrage an einem Folgeprojekt zeigt den Bedarf der Bauern an zusätzlichen Wasserquellen. Durch die fortlaufende Betreuung und Wartung nach der Installation ist sichergestellt, dass das Wasserförderprojekt einen möglichst großen Nutzen bringt. Von den 73 Installationen wurden vier abgezogen, weil die Nutzer nötige Reparaturen nicht durchführten. Unter den 69 verbleibenden Pumpsystemen waren zum Ende Dezember 2015 lediglich zwei Systeme (3%) nicht funktionsfähig.

In Datengruppe 2 dienen die vier funktionierenden der 10 untersuchten Systeme zur Trinkwasserversorgung kleinerer Comunidades und erfüllten hier ihren Zweck. Fünf der untersuchten Installationen kommen ihrem eigentlichen Zweck der Wasserförderung nicht nach, werden jedoch zum Betrieb anderer Verbraucher genutzt.

Den Nutzen einer vorhandenen Wasserförderung zeigt auch eine Studie von Isabell Nordhausen, die im Norden des Departamentos Potosí eine Untersuchung durchführte. Dabei wurden 47 Landwirte, die über ein von der GIZ gestelltes Bewässerungssystem verfügten und 23 Landwirte, die kein Bewässerungssystem hatten, befragt. Die Themen zielten auf die menschliche Anpassung an die Folgen des Klimawandels in Bezug auf das Vorhandensein einer Bewässerungsmethode. Durch den Zugang zur Bewässerung die Landwirte gegen Einflüsse von Trockenheiten und unregelmäßigen Regenfällen besser gewappnet. Zum Nutzen des Bewässerungssystems gaben 95,7% der Begünstigten an, dass sich die Lebensbedingungen innerhalb der Familie positiv verändert hätten. 57,4% haben ihre Produktion vielfältiger gestalten können und dadurch auch die Ernährung der Familien verbessert. Bei 21,3% kam es zu einer Verbesserung Gesundheitssituation innerhalb der Familie, während sich bei 29,8% durch das Bewässerungssystems die wirtschaftlichen Lage gebessert hat [Nordhausen, 2015].

5.6 Nachhaltigkeit

Nachhaltige Projekte zeichnen sich dadurch aus, dass ihr Nutzen auch nach Ende der Förderung anhält. Die meisten der in DG1 untersuchten Systeme überschreiten ein Alter von 3 Jahren nicht und waren durch die im Projekt verankerten Wartungen abgedeckt. Genaue Aussagen zur Nachhaltigkeit des Projekts sind daher zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich. Viele der Punkte, die in der Literatur für nachhaltige Projekte als wichtig angesehen werden, finden bei den untersuchten Systemen der DG1 jedoch Berücksichtigung. Hierzu zählen der Eigenanteil, die implementierte Wartung und die Betreuung durch eine in Bolivien ansässige Organisation. Die aufgetretenen Defekte wurden repariert, sodass zum Ende der Überprüfung 97% der Systeme der Wasserförderung nachkamen.

Die geringe Anzahl an SPSs in DG2 sowie mangelnde Hintergrundinformationen zu den Projekten lassen Aussagen zur Nachhaltigkeit nur für einzelne Systeme zu. Die Mehrheit funktionierte dabei nicht gemäß ihrer eigentlichen Bestimmung, bei den funktionierenden Systemen war die Unzufriedenheit der Nutzer hoch. Die Nachhaltigkeit vieler dieser Systeme ist daher nicht gegeben oder eher gering.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 83 solare Pumpsysteme (SPS) im Hochland Boliviens untersucht, um Aussagen über Funktion, Nutzen und Nachhaltigkeit treffen zu können. Ein Teil der Daten stammt aus eigenen Besichtigungen der installierten Systeme (DG2), der Großteil wurde von der NGO Energética zur Verfügung gestellt (DG1) und basiert auf durchgeführten Wartungsbesuchen.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass durch verschiedene Ursachen in 38 Fällen die Wasserförderung nicht wie geplant funktionierte. Grund dafür waren in rund 34% der Fälle Fehler an den verbauten Komponenten. Während sich die PV-Module technisch als sehr zuverlässig erwiesen und an ihnen keine Defekte vorgefunden wurden, kam es zu Defekten an Pumpen und Pumpencontrollern. Bei 40% der nicht funktionierenden Systeme lag der Fehler nicht an den Komponenten selber, sondern an der Art und Weise der Installation. Hier kam es besonders durch die aus Adobe gefertigten Sockel und durch Defekte an elektrischen und wasserführenden Leitungssystemen zu Ausfällen. Bei 26% der Systeme, die kein Wasser förderten, liegen die Gründe außerhalb der Technik. Diese sind mangelnder Bedarf am SPS, Diebstahl und die Absenkung des Wasserspiegels. Viele der Ausfälle könnten durch eine bessere Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten vermindert werden.

Die Anzahl der Defekte zeigt die Wichtigkeit der Wartung, die optimalerweise Teil des Projektes sein sollte. Die für die Nachhaltigkeit als wichtig angesehene Eigenbeteiligung der Nutzer wurde bei den Systemen der DG1 in das Projekt integriert. In einigen Fällen kam es durch ihre mangelhafte Durchführung jedoch zu Systemausfällen. Eine zu geringe Dimensionierung der Systeme führte in DG2 in einigen Fällen zur Unzufriedenheit. In DG1 werden die SPSs als Ergänzung der zuvor genutzten Wasserquellen verwendet. Aussagen über die Dimensionierung sind daher zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich. Die durchgeführte Auslegungsrechnung zeigt aber, dass die installierten Systeme alleine den Wasserbedarf der Tiere in den meisten Fällen nicht decken können.

In Nutzen und Nachhaltigkeit unterscheiden sich die beiden Datengruppen stark. In DG1 befanden sich zum Ende der Untersuchung 97% der Systeme in einem funktionierenden Zustand und kamen dem Zweck der Wasserförderung unter hoher Zufriedenheit der Nutzer nach. Aufgrund des geringen Alters konnte die Nachhaltigkeit des Projektes zu diesem Zeitpunkt nicht bewertet werden. Viele Punkte, die für nachhaltige Projekte wichtig sind, fanden bei den in dieser Arbeit untersuchten Systemen jedoch Berücksichtigung.

Für einen Großteil der Systeme aus DG2, die nicht gemäß ihrer eigentlichen Bestimmung funktionierten, war die Nachhaltigkeit nicht gegeben, bei den funktionierenden Systemen war die Unzufriedenheit der Nutzer hoch.

Insgesamt wird klar, dass die Projektgestaltung einen großen Anteil am Nutzen und an der Langlebigkeit der Installation hat. Sie wirkt sich zum Teil direkt auf die Lebensdauer der Komponenten aus und beeinflusst die Zufriedenheit und Verantwortungsübernahme der Nutzer. Die Planer der Systeme müssen daher neben der technischen Seite auch soziale, geografische und klimatische Bedingungen genau beachten, sowie Nachhaltigkeitskonzepte im Projekt verankern.

Ausblick

Um genauere Aussagen über die Nachhaltigkeit der Systeme aus DG1 treffen zu können, müssen diese in den kommenden Jahren weiter untersucht werden. Dabei macht es Sinn, auch die sozialen Auswirkungen näher zu betrachten, die bisher in dieser Datengruppe nicht erhoben wurden. So lassen sich Aussagen treffen, wie sich die solare Wasserförderung auf Aspekte wie die wirtschaftliche Situation, Gesundheit, Bildung oder Landflucht auswirkt. Bei vielen der defekten

Komponenten (Pumpen und Controller) war in beiden Datengruppen nicht immer klar, wodurch die Fehler ausgelöst wurden. Genauere Untersuchungen der Bauteile könnten helfen, die Ursachen zu finden, um die Systeme zukünftig darauf anzupassen.

Eine weitere Projektphase sieht die Installation einer großen Anzahl neuer SPSs im gleichen Gebiet vor. Inwiefern es dadurch zu einer Ansiedlung lokaler Techniker oder Ersatzteilgeschäfte kommt, wäre eine interessante Nachforschung. Eventuell könnte hier sogar ganz gezielt durch strukturelle Maßnahmen versucht werden, lokale Techniker zu fördern.

Literaturverzeichnis

- [Argaw, 2004] Argaw, N. 2004: *Renewable Energy Water Pumping Systems Handbook*; Technischer Bericht; National Renewable Energy Laboratory; Denver, Colorado
- [Argaw et al., 2003] Argaw, N., Foster, R. und A.Ellis. 2003: *Renewable Energy for Water Pumping Applications in Rural Villages*; Technischer Bericht; National Renewable Energy Laboratory; New Mexico
- [Barua et al., 2011] Barua, R., van der Kroon, B., Renner, T. et al. 2011: *Sustainability Assessment Framework for Energising Development Projects*; Technischer Bericht; Institute for Environmental Studies; Amsterdam
- [Bayrisches Landeskriminalamt, 2007] Bayrisches Landeskriminalamt. 2007: Diebstahl von Photovoltaikanlagen - Sicherheitsempfehlungen
- [BMZ, 2008] BMZ. 2008: Leitlinien für die bilaterale Finanzielle und Technische Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern der deutschen Entwicklungszusammenarbeit
- [Brundtland et al., 1987] Brundtland, G., Khalid, M., Agnelli, S. et al. 1987: *Our Common Future ('Brundtland report')*; Oxford Paperback Reference; Oxford University Press, USA
- [Cancino et al., 2001] Cancino, B., Gálvez, E., Roth, P. et al. 2001: Introducing photovoltaic systems into homes in rural Chile; *IEEE Technology and Society Magazine*; 20: 29–36
- [Chandel et al., 2015] Chandel, S., Naik, M.N. und Chandel, R. 2015: Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 49: 1084 – 1099
- [Christopher W. Sinton, 2004] Christopher W. Sinton, Roy Butler, R.W. 2004: *Guide to Solar-Powered Water Pumping Systems in New York State*; Technischer Bericht; New York State Energy Research and Development Authority; Albany, New York
- [Coaquira, 2015] Coaquira, T. 2015: Marco de gestión ambiental para proyectos de densificación de redes eléctricas y sistemas fotovoltaicos
- [Coudrain-Ribstein et al., 1995] Coudrain-Ribstein, A., Pratz, B., Quintanilla, J. et al. 1995: Salinidad del recurso hidrico subterráneo del Altiplano central; *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines*; 24(3): 483–493
- [Energética, 2011] Energética. 2011: Mapa Solar de Bolivia; www.energetica.org.bo; letzter Aufruf 19.05.2016
- [Enquete-Kommission, 1998] Enquete-Kommission. 1998: *Konzept Nachhaltigkeit - Vom Leitbild zur Umsetzung*; Technischer Bericht Drucksache 13/11200; Deutscher Bundestag; Berlin
- [Escurra et al., 2013] Escurra, J.J., Vazquez, V., Cestti, R. et al. 2013: Climate change impact on countrywide water balance in Bolivia; *Regional Environmental Change*; 14: 727–742
- [Fernandez et al., 2012] Fernandez, M.H., Abdalla, K. und Vera, I. 2012: Cambio Climático, Agua y Energía en Bolivia
- [Gaber, 1998] Gaber, M. 1998: *Water Wells Producing Sand or Turbidity*; Technischer Bericht; Department of Environmental Quality; Lansing, Michigan
- [Glathe, 2010] Glathe, C. 2010: *Kommunikation von Nachhaltigkeit in Fernsehen und Web 2.0*; VS, Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden

- [Gopal et al., 2013] Gopal, C., Mohanraj, M., Chandramohan, P. et al. 2013: Renewable energy source water pumping systems - A literature review; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 25: 351 – 370
- [Grundfos, 2004] Grundfos. 2004: *Pump Handbook*; Technischer Bericht; Grundfos Industry
- [Guzman, 2016] Guzman, I. 2016: GIZ Landesbüro Bolivien in La Paz; E-mailkorrespondenz am 21.03.2016
- [Hankins, 2010] Hankins, M. 2010: *Stand-alone solar electric systems the Earthscan expert handbook for planning, design and installation*; Earthscan, London
- [Hartmann-Luzio, 2003] Hartmann-Luzio, F. 2003: Acceso al Agua Potable y al Saneamiento Básico para los Pueblos Indígenas y Originarios Identificados en Bolivia
- [Hellmann, 2011] Hellmann, D.H. 2011: *KSB-Kreiselpumpen-Lexikon*; KSB Aktiengesellschaft, Frankenthal
- [Hoffmann, 2012] Hoffmann, D. 2012: *Bolivia en un mundo 4 grados más caliente : escenarios sociopolíticos ante el cambio climático para los años 2030 y 2060 en el altiplano norte*; Fundación PIEB, La Paz
- [Holtz, 2000] Holtz, U. 2000: Nachhaltigkeit in der Entwicklungszusammenarbeit; *Grenzenlos - Kommunikation, Kooperation, Entwicklung*; 13: 54–60
- [Instituto Nacional de Estadística, 2009] Instituto Nacional de Estadística. 2009: Área rural: distribución porcentual de la población en la ocupación principal; <http://www.ine.gob.bo/indice/EstadisticaSocial.aspx?codigo=30402>; letzter Aufruf 19.05.2016
- [Instituto Nacional de Estadística, 2013] Instituto Nacional de Estadística. 2013: Censo Nacional de Población y Vivienda 2012
- [JRC – Institute for Energy and Transport, 2012] JRC – Institute for Energy and Transport. 2012: PVGIS; <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/imaps/index.htm>; letzter Aufruf am 19.05.2016
- [Kaunmuang et al., 2001] Kaunmuang, P., Kirtikara, K., Songprakorb, R. et al. 2001: Assessment of photovoltaic pumping systems in Thailand – one decade experience; *Solar Energy Materials and Solar Cells*; 67: 529 – 534
- [Kolhe et al., 2002] Kolhe, M., Kolhe, S. und Joshi, J. 2002: Economic viability of stand-alone solar photovoltaic system in comparison with diesel-powered system for India; *Energy Economics*; 24: 155–165
- [Krink, 2011] Krink, J. 2011: *Evaluation von PV-Inselsystemen in Bolivien*; Diplomarbeit; Hamburg
- [Lorentz und DRFN, 2008] Lorentz und DRFN. 2008: *Solar Water Pumps in Namibia*; Technischer Bericht; Lorentz and Desert Research Foundation of Namibia
- [Luque und Hegedus, 2011] Luque, A. und Hegedus, S. 2011: *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*; John Wiley & Sons, New York; 2 Auflage
- [M.Abu-Aligah, 2011] M.Abu-Aligah. 2011: Design of Photovoltaic Water Pumping System and Compare it with Diesel Powered Pump; *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*; 5(3): 273–280
- [Marks und Davis, 2012] Marks, S.J. und Davis, J. 2012: Does User Participatin Lead to Sense of Ownership for Rural Water Systems? Evidence from Kenya; *World Development*; 40(8): 1569–1576

- [Meah et al., 2008] Meah, K., Fletcher, S. und Ula, S. 2008: Solar photovoltaic water pumping for remote locations; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 12(2): 472 – 487
- [Mertens, 2015] Mertens, K. 2015: *Photovoltaik : Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*; Hanser, Fachbuchverlag, München
- [Ministerio de Medioambiente y Agua, 2015] Ministerio de Medioambiente y Agua. 2015: Separata especial por el Día Mundial del Agua
- [Ministerio de Medioambiente y Agua, 2016] Ministerio de Medioambiente y Agua. 2016: Más Inversión para Agua - MIAGUA
- [Morales und Busch, 2010] Morales, T. und Busch, J. 2010: *Design of Small Photovoltaic (PV) Solar - Powered Water Pump Systems*; Technischer Bericht; United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service
- [Narayan, 1995] Narayan, D. 1995: The Contribution of People’s Participation - Evidence from 121 Rural Water Supply Projects; *Environmentally Sustainable Development Occasional Paper Series No. 1*
- [NASA, 2016] NASA. 2016: Surface meteorology and Solar Energy - Location; <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>; letzter Aufruf am 19.05.2016
- [Nieuwenhout et al., 2004] Nieuwenhout, F., de Villers, T., Mate, N. et al. 2004: Reliability of PV stand-alone systems for rural electrification
- [Nordhausen, 2015] Nordhausen, I. 2015: Estrategias de hogares en el contexto del cambio climático: Riego familiar y migración rural en la región Norte de Potosí, Bolivia
- [O’Hare und Rivas, 2007] O’Hare, G. und Rivas, S. 2007: Changing poverty distribution in Bolivia: the role of rural-urban migration and urban services; *GeoJournal*; 68(4): 307–326
- [Oxfam, 2009] Oxfam. 2009: Bolivia, climate change, poverty and adaption
- [Página Siete, 2016] Página Siete. 2016: Fenómeno de El Niño llega con más sequía y afecta a cultivo de quinua y papa; <http://www.paginasiete.bo/sociedad/2016/2/20/fenomeno-nino-llega-sequia-afecta-cultivos-quinua-papa-87431.html>; letzter Aufruf am 19.05.2016
- [Pfullmann, 2007] Pfullmann, T. 2007: Frosteinwirkung auf wasserführende Leitungssysteme; *Schadenprisma 1/2007 - Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung*; (15-21)
- [Phaesun, 2016] Phaesun. 2016: Phaesun - Komponentenhandel; <http://dev.phaesun.com/de.html>; letzter Zugriff 19.05.2016
- [Protogeropoulos und Pearce, 2000] Protogeropoulos, C. und Pearce, S. 2000: Laboratory evaluation and system sizing charts for a 'second generation' direct PV-powered, low cost submersible solar pump; *Solar Energy*; 68(5): 453–474
- [Rat für Nachhaltige Entwicklung, 2012] Rat für Nachhaltige Entwicklung. 2012: Der Deutsche Nachhaltigkeitskodex
- [Sara und Katz, 2005] Sara, J. und Katz, T. 2005: Making Rural Water Supply Sustainable: Report on the Impact of Project Rules; *Water and Sanitation Program*
- [Schmid, 1994] Schmid, J. 1994: *Photovoltaik : Strom aus der Sonne : Technologie, Wirtschaftlichkeit und Marktentwicklung*; Müller, Heidelberg
- [Schulz, 2004] Schulz, A. 2004: *Einsatz der Solarenergie zur dezentralen Stromversorgung*; AWP Verlag, Norderstedt

- [Short und Thompson, 2003] Short, T. und Thompson, P. 2003: Breaking the mould: solar water pumping – the challenges and the reality; *Solar Energy*; 75(1): 1 – 9
- [Surek, 2014] Surek, D. 2014: *Pumpen für Abwasser- und Kläranlagen Auslegung und Praxisbeispiele*; Springer Vieweg, Wiesbaden
- [Tejada, 2016] Tejada, E. 2016: Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen, Emailkorrespondenz am 14.03.2016
- [Thomas, 1987] Thomas, M.G. 1987: *Water pumping: the solar alternative*; Technischer Bericht; Sandia National Laboratories; Albuquerque, New Mexico
- [UNESCO, 2014] UNESCO. 2014: Water in the post-2015 development agenda and sustainable development goals
- [VDE, 2003] VDE. 2003: *Der Blitzschutz in der Praxis*; Technischer Bericht; Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik; Frankfurt am Main
- [Vereinte Nationen, 2015] Vereinte Nationen. 2015: Human Development Index and its components; *Human Development Report 2015*; Seiten 201–273
- [Weather Underground, 2016] Weather Underground. 2016: Durchschnittliche monatliche Temperaturen in den Städten La Paz, Oruro und Potosí; www.wunderground.com; letzter Aufruf am 19.05.2016 - Eigene Datenaufarbeitung
- [Weiß, 2014] Weiß, M. 2014: *Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung*; Kapitel Wasserförderung, Seiten 399–492; Springer Fachmedien, Wiesbaden
- [Weltbank, 2011] Weltbank. 2011: *Implementation Completion and Results Report*; Technischer Bericht; Weltbank
- [Weltbank, 2014] Weltbank. 2014: Poverty headcount ratio at national poverty lines; <http://data.worldbank.org/indicator/SI.POV.NAHC/countries/BO?display=graph>; letzter Aufruf 19.05.2016
- [Weltgesundheitsorganisation, 2015] Weltgesundheitsorganisation. 2015: *Progress on Sanitation and Drinking Water: 2015 Update and MDG Assessment*; UNICEF und Weltgesundheitsorganisation, Genf
- [Zamora, 2007] Zamora, E. 2007: La diversificación de los ingresos rurales en Bolivia; *Revista de Ciencias Sociales*; (29): 63–76

Anhang

A-1. Cuestionario de Evaluación

Cuestionario para la evaluación de sistemas de bombas solares

Fecha: _____ Encuestador: _____

Parte I: Identificación del sistema

Cantidad de familias que utilizan la bomba: _____ Municipio: _____
Departamento: _____ Comunidad: _____
Provincia: _____ Altura sobre nivel de mar [m]: _____

Número de beneficiarios del sistema que viven permanente en el lugar: _____ Profundidad de agua : _____
Necesidad del agua [*litros/día*]: _____ Cantidad de animales: _____
Distancia del pozo a instalaciones sanitarias [m]: _____ Calidad de agua: _____
Contaminación alrededor del pozo: _____

Parte II: Social

- 1.) ¿Existe un acceso a la electricidad?
 - Si
 - No

- 2.) ¿Con que frecuencia se utiliza el sistema?
 - diariamente
 - __ x por semana
 - __ x por mes
 - Otro: _____
 - No se utiliza

- 3.) ¿Cómo se utiliza el agua, ganado por el pozo?
 - Ganadería
 - Riego
 - Uso doméstico (beber, cocinar)
 - Lavar
 - Otro: _____

4.) ¿El usuario está feliz con el sistema y por qué?

- Sí
 - No
-

5.) ¿Quién ha financiado el sistema?

- Recursos propios
- Se ha recibido el sistema sin costos de: _____
- Apoyo parcial (efectivo/materiales) de: _____

6.) ¿Hubo modificaciones en el sistema?

- Sí
 - No
- En caso de sí, cuáles? _____

7.) ¿Quién hace el mantenimiento?

- Técnico de la comunidad
- Mantenimiento incluido en un proyecto
- El usuario mantiene el sistema su-mismo
- Otro: _____

8.) En el caso que el usuario mantiene el sistema su-mismo:

- Los usuarios han recibido una capacitación suficiente
- La capacitación no era suficiente
- No han recibido ninguna capacitación

9.) ¿Funciona el mantenimiento?

- Sí
 - No
- En caso de no, ¿por qué? _____

10.) ¿Existe un técnico en la comunidad?

- Sí
- No

11.) ¿Hay un responsable de agua en la comunidad?

- Sí
- No

12.) ¿Cómo procede el usuario si el sistema tiene un problema?

- Contactar al técnico
- Reparación propia
- Contactar gente con conocimiento dentro de la comunidad
- Otro: _____

13.) ¿Existen documentos sobre el sistema instalado?

- Si
- No

14.) ¿Los documentos del sistema instalado están fáciles de entender?

- Si
- No

15.) ¿Funciona el sistema sin problemas?

- Si
- No

En caso de no, ¿por qué? _____

16.) ¿Qué partes se han roto hasta ahora y por qué, si conocidas?

17.) ¿Quién paga por repuestos/al técnico en caso de problemas?

18.) ¿Qué conocimiento tiene el usuario?

- No tiene conocimiento
- Sabe lo básico sobre el sistema
- Tiene gran conocimiento del sistema

19.) ¿Le capacitaron sobre el manejo del sistema?

- Si
- No

20.) ¿El volumen de agua que se obtiene es suficiente?

- Si
- No, desde el principio no fue suficiente
- No, porque subió la cantidad de animales
- No, porque cultivan más tierras
- No, porque han regresado personas desde las ciudades

21.) En caso de que no es suficiente, ¿cuánto falta?

22.) ¿El sistema ayuda a mejorar los ingresos?

- No hubo cambios
- Los ingresos han subido moderadamente
- Los ingresos han subido muy fuerte
- Los ingresos han bajado
- El usuario no tiene opinión

23.) ¿El sistema ha ayudado a mejorar la situación de salud de la familia?

- Si
 - No
 - El usuario no tiene opinion
-

24.) ¿La instalación de sistemas tiene efectos de migración en la comunidad?

- Migración de familias desde ciudades
- Migración de técnicos del campo a las ciudades
- No había cambios
- Otro: _____

25.) ¿El sistema tiene otras consecuencias positivas?

- Si: _____
- No, por que: _____

26.) ¿El sistema tiene consecuencias negativas?

- Si: _____
- No

Parte III: Técnica

Datos de los paneles	
Número de paneles:	Fecha de instalación:
Fabricante:	Potencia del panel:
Nombre:	Tensión en circuito abierto:
Orientación:	Altura de paneles sobre suelo:
Ángulo de inclinación:	

27.) ¿Existe sombra al panel?

- Si
- No

28.) ¿El panel está sucio?

- Si
- No

29.) ¿El panel muestra daños exteriores?

- Si
- No

En caso de sí, cuales: _____

30.) ¿El panel esta suficiente ventilado?

- Si
- No

31.) ¿En caso de varios paneles, como es la conexión?

- Conexión en serie
- Conexión en paralelos
- Conexión en serie y paralelo

32.) ¿El panel esta asegurado contra robo?

- Si
- No

33.) ¿Que tipo de estructura se utiliza por el panel?

Diámetro de pozo:	Datos de la bomba
<u>Si existente:</u>	Fabricante:
Tipo regulador de Carga:	Tipo:
Tipo protección contra sobre-tensión:	Rendimiento:
	Fecha de instalación:
	Cantidad de extraída:

34.) ¿El pozo tiene una cobertura?

- Si
- No

35.) ¿Que tipo de pozo hay?

- Noria
- Tubos

36.) ¿Que tipo de bomba hay?

- Bomba sumergible
- Bomba en la superficie

37.) ¿Existe un regulador?

- Si
- No

38.) ¿Hay una cantidad de agua constante o se vacia el pozo durante el día en uso?

- El pozo se vacia
- El agua sigue constante
- Otro: _____

39.) ¿El agua que se saca es turbia?

- Sí
- No

40.) ¿Había y hay control de la calidad de agua?

- Sí, en un interval de: _____
- No

41.) ¿Quién instaló el sistema?

42.) ¿ Hay cualquier cosa al respecto al sistema que puede ser mejorada según el usuario?

Otras observaciones, sugerencias, notas:

A-2. Fragebogen zur Datenerhebung - Übersetzung

Fragebogen zur Untersuchung von solaren Wasserpumpen

Datum: _____ Erheber: _____

Teil 1: Identifikation des Systems

Anzahl der Familien, die die Pumpe nutzen: _____ Municipio: _____
Departamento: _____ Comunidad: _____
Provinz: _____ Höhe über Normalnull: _____

Anzahl der Nutzer, die permanent vor Ort leben: _____ Wassertiefe : _____
Wasserbedarf [Liter/Tag]: _____ Wasserqualität: _____
Distanz zwischen Brunnen und Sanitäreanlage : _____ Verschmutzung in Brunnennähe: _____
Art der Landwirtschaft: _____ Herdengröße: _____
Tierarten: _____

Teil II: Soziales

1.) Existiert ein Anschluss an das öffentliche Stromnetz?

- Ja
- Nein

2.) Mit welcher Frequenz wird das Pumpsystem genutzt?

- täglich
- ___ x pro Woche
- ___ x pro Monat
- Anderes: _____
- Es wird nicht genutzt

3.) Wie wird das aus dem Brunnen geförderte Wasser genutzt?

- Wasserversorgung der Tierherden
- Bewässerung
- Für den häuslichen Bedarf (Trinkwasser, zum Kochen)
- Zum Waschen
- Anderes: _____

4.) Ist der Nutzer mit dem System zufrieden und warum?

- Ja
 - Nein
-

5.) Wer hat das System finanziert?

- Eigene Mittel
- Das System wurde kostenlos erhalten von: _____
- Unterstützung (finanziell & materiell) von: _____

6.) Wurden am System Veränderungen vorgenommen?

- Ja
 - Nein
- Falls ja, welche? _____

7.) Von wem werden Wartungsarbeiten durchgeführt?

- Techniker aus der Comunidad
- Die Wartung ist Teil des Projekts
- Der Nutzer führt die Wartungen durch
- Anderes: _____

8.) Wenn der Nutzer die Wartung durchführt:

- Die Nutzer haben eine ausreichende Schulung bekommen
- Die Schulung war nicht ausreichend
- Die Nutzer haben keine Schulung erhalten

9.) Funktioniert die Wartung?

- Ja
 - Nein
- Falls nein, warum nicht? _____

10.) Gibt es einen Techniker in der Comunidad?

- Ja
- Nein

11.) Gibt es einen Wasserverantwortlichen in der Comunidad?

- Ja
- Nein

12.) Wie geht der Nutzer vor, wenn das System einen Defekt hat?

- Kontakt zum Techniker aufnehmen
- Eigene Wartung
- In der Comunidad um Hilfe fragen

Anderes: _____

13.) Existieren Dokumente der verbauten Komponenten?

- Ja
- Nein

14.) Sind die Dokumente über das System einfach zu verstehen?

- Ja
- Nein

15.) Funktioniert das System ohne Probleme?

- Ja
- Nein

Falls nein, warum? _____

16.) Welche Defekte traten bisher auf und warum?

17.) Wer zahlt für Ersatzteile / den Techniker im Falle eines Defekts?

18.) Wie weit kennt sich der Nutzer über dem System aus?

- Der Nutzer hat keine Kenntnisse über das System
- Der Nutzer weiß das Grundlegende über das System
- Der Nutzer kennt sich gut über das System aus

19.) Gab es eine Schulung zum Betrieb des Systems?

- Ja
- Nein

20.) Ist das geförderte Wasser ausreichend?

- Ja
- Nein, seit Beginn war es nicht ausreichend
- Nein, da die Herdengröße angestiegen ist
- Nein, weil mittlerweile mehr Land bewirtschaftet wird
- Nein, weil Personen aus den Städten zurückgekehrt sind
- Anderes: _____

21.) Für den Fall, dass das Wasser nicht ausreichen ist. Wie viel Wasser fehlt?

22.) Hat das System geholfen, die Einkünfte zu steigern?

- Es gab keine Veränderungen
- Das Einkommen ist moderat gestiegen

- Die Einkünfte sind stark gestiegen
- Die Einkünfte haben sich reduziert
- Der Nutzer hat keine Meinung

23.) Hat das System die gesundheitliche Situation der Nutzer verbessert?

- Ja
 - Nein
 - Der Nutzer hat keine Meinung
-

24.) Hatte die Installation Auswirkungen auf Migration?

- Migration von Familien
- Migration von Technikern
- Es gab keine Veränderungen
- Anderes: _____

25.) Hat das System andere positive Effekte?

- Ja: _____
- Nein, weil: _____

26.) Hat das System negative Effekte?

- Ja, weil: _____
- Nein

Teil III: Technik

Moduldaten	
Anzahl Module:	Installationsdatum:
Hersteller:	Peakleistung:
Modell:	Leerlaufspannung:
Ausrichtung:	Höhe der Module über dem Boden:
Neigungswinkel:	

27.) Werden die Module verschattet?

- Ja
- Nein

28.) Sind die Module verunreinigt??

- Si
- No

29.)Haben die Module äußere Schäden?

- Ja
- Nein

Falls ja, welche?: _____

30.)Werden die Systeme ausreichend belüftet?

- Ja
- Nein

31.)Wenn mehr als ein Modul genutzt wird, wie ist die Verschaltung?

- Reihenschaltung
- Parallelschaltung
- Reihen – und Parallelschaltung

32.)Sind die Module gegen Diebstahl gesichert?

- Ja
- Nein

33.)Welche Struktur hält die Module?

Durchmesser des Brunnens:	Pumpendaten
<u>Falls verbaut:</u>	Hersteller:
Typ Laderegler:	Modell:
Typ Kontrolleinheit:	Volumenstrom:
Typ Überspannungsschutz:	Leistung:
	Volumenstrom:

34.)Ist der Brunnen gegen Verunreinigungen geschützt?

- Ja
- Nein

35.)Welche Art Brunnen liegt vor?

- Rohrbohrung
- Schachtbrunnen

36.)Welcher Pumpentyp wird verwendet?

- Tauchpumpe
- Oberflächenpumpe

37.)Lässt sich eine konstante Menge Wasser fördern oder läuft der Brunnen leer?

- Der Brunnen läuft leer
- Der Wasserspiegel bleibt konstant

Anderes: _____

38.) Ist das geförderte Wasser trüb?

- Ja
 Nein

39.) Wurde und wird das Wasser auf seine Qualität überprüft?

- Ja, in einem Intervall von: _____
 Nein

40.) Wer hat das System installiert?

41.) Was könnte nach Meinung des Nutzers am System verbessert werden?

Ander Beobachtungen, Notizen:

B. Rohrverlust



Friction Loss in Plastic Pipe with Standard Inside Diameter (SIDR)


Head loss from friction in vertical m/ft per 100 m/ft of pipe


Flow Rate Volumenstrom		Pipe Diameter Leitungsdurchmesser											
[US-Gal./min]	[l/min]	½*	¾	1	1¼	1½	2	2½	3	4	5	6	in nominal in actual
1	3.8	1.0	0.40	0.10	0.02								
2	7.6	3.0	1.2	0.40	0.10	0.05							
3	11	6	2.3	0.7	0.20	0.10							
4	15	10	4.0	1.2	0.32	0.15	0.05						
5	19	16	6	1.8	0.48	0.23	0.07						
6	23	22	8	2.5	0.7	0.32	0.10	0.04					
7	27		11	3.2	0.9	0.43	0.13	0.06					
8	30		13	3.9	1.1	0.5	0.16	0.07					
9	34		16	4.9	1.3	0.6	0.19	0.08					
10	38		19	6	1.6	0.8	0.24	0.10	0.04				
11	42		23	7	1.9	0.9	0.28	0.12	0.04				
12	45		26	8	2.2	1.0	0.30	0.14	0.05				
14	53			11	2.9	1.4	0.40	0.18	0.06				
16	61			14	3.7	1.8	0.5	0.23	0.08				
18	68			16	4.5	2.2	0.7	0.28	0.10				
20	76			20	5.4	2.6	0.8	0.34	0.12	0.03			
22	83			23	6	3.1	0.9	0.40	0.14	0.04			
24	91			28	8	3.6	1.1	0.47	0.17	0.05			
26	99				9	4.2	1.3	0.5	0.19	0.05			
28	106				10	4.7	1.4	0.6	0.22	0.06			
30	114				11	5	1.6	0.7	0.25	0.07			
35	133				15	7	2.1	0.9	0.30	0.09			
40	152				19	9	2.7	1.2	0.40	0.11	0.04		
45	171				23	11	3.3	1.4	0.5	0.14	0.05		
50	190				28	13	4.0	1.7	0.6	0.17	0.06		
55	208					16	4.7	2.0	0.7	0.19	0.07		
60	227					18	5.5	2.4	0.8	0.23	0.08	0.03	
65	246					21	6	2.7	1.0	0.26	0.09	0.04	
70	265					24	7	3.1	1.1	0.30	0.10	0.04	
75	284						8	3.5	1.2	0.34	0.12	0.05	
80	303						9	3.9	1.4	0.38	0.13	0.05	
85	322						10	4.4	1.6	0.42	0.14	0.06	
90	341						11	4.8	1.7	0.47	0.16	0.07	
95	360						12	5	1.9	0.5	0.18	0.07	
100	379						14	6	2.1	0.6	0.19	0.08	
150	569						28	12	4.3	1.2	0.39	0.17	
200	758							20	7	1.9	0.66	0.27	

*) ½ in data applies to polyethylene pipes only. PVC pipes have a smaller ID of 0.612 in

Don't undersize pipes Use this chart to determine the additional head imposed on your pump due to pipe friction, based on flow rate, pipe size and pipe length. Consider the TOTAL pipe length from the pump to the pipe outlet to the tank.

Pipe fittings impose additional friction loss. A sharp 90° pipe elbow adds friction approximately equal to 2 m/6 ft of pipe of the same size.

 This chart applies only to PVC pipes, schedule 40 (160 PSI), and to polyethylene (PE) pipes with SIDR designation (most common 100 PSI black flexible pipe).

 Shaded values are velocities over 5 ft per second and should be avoided. Choose a larger pipe diameter.

C. Datenblatt PS150



PS150 C-SJ5-8

Solar Submersible Pump System for 4" wells

System Overview

Head	max. 20 m
Flow rate	max. 4.0 m ³ /h

Technical Data

Controller PS150

- Control inputs for dry running protection, remote control etc.
- Protected against reverse polarity, overload and overtemperature
- Integrated MPPT (Maximum Power Point Tracking)
- Battery operation: Integrated low voltage disconnect

Power	max. 0.30 kW
Input voltage	max. 50 V
Optimum Vmp*	> 17 V
Nominal voltage (battery operation)	12 V & 24 V**
Motor current	max. 18 A
Efficiency	max. 98 %
Ambient temp.	-30...50 °C
Enclosure class	IP54

Motor ECDRIVE 150-C

- Maintenance-free brushless DC motor
- Water filled
- Premium materials, stainless steel: AISI 304/316
- No electronics in the motor

Rated power	0.30 kW
Efficiency	max. 92 %
Motor speed	600...3300 rpm
Insulation class	F
Enclosure class	IP68
Submersion	max. 250 m


Pump End PE C-SJ5-8

- Non-return valve
- Premium materials, stainless steel: AISI 304

Pump Unit PU C-SJ5-8 (Motor, Pump End)

Borehole diameter	min. 4,0 in
Water temperature	max. 50 °C

Standards

 2006/42/EC, 2004/108/EC, 2006/95/EC

IEC/EN 61702:1995,
IEC/EN 62253 Ed.1

The logos shown reflect the approvals that have been granted for this product family. Products are ordered and supplied with the approvals specific to the market requirements.

*Vmp: MPP-voltage under Standard Test Conditions (STC): 1000 W/m² solar irradiance, 25 °C cell temperature

**Reduced flow rate. Please refer to the pump characteristic chart in COMPASS.



BERNT LORENTZ GmbH & Co. KG
Kroegerskoppel 7, 24558 Henstedt-Ulzburg, Germany,
Tel +49 (0)4193 7548-0, Fax -29, www.lorentz.de

Created by LORENTZ COMPASS 3.0.10.9

All specifications and information are given with good intent, errors are possible and products may be subject to change without notice. Pictures may differ from actual products depending on local market requirements and regulations.

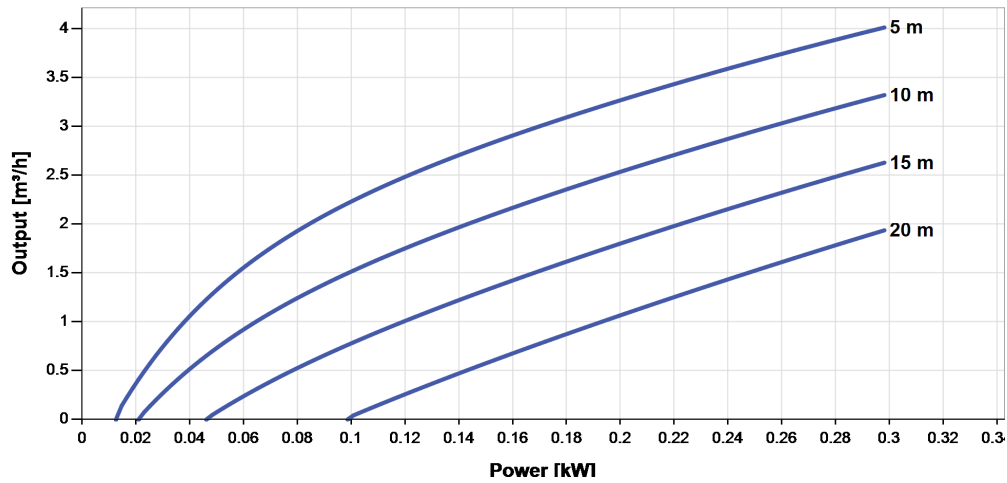
Sun. Water. Life.

PS150 C-SJ5-8

Solar Submersible Pump System for 4" wells

Pump Chart

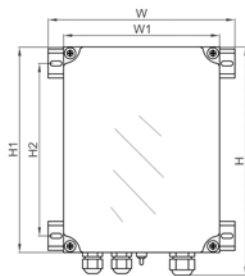
Vmp* > 17 V



Dimensions and Weights

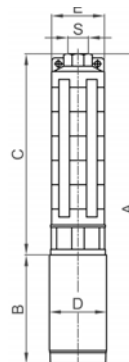
Controller

- H = 276 mm
- H1 = 248 mm
- H2 = 208 mm
- W = 225 mm
- W1 = 188 mm
- D = 108 mm
- D1 = 100 mm



Pump Unit

- A = 524 mm
- B = 185 mm
- C = 339 mm
- D = 96 mm
- E = 98 mm
- S = 1.5 in



	Net weight
Controller	1.2 kg
Pump Unit	11 kg
Motor	7.0 kg
Pump End	4.2 kg

*Vmp: MPP-voltage under Standard Test Conditions (STC): 1000 W/m² solar irradiance, 25 °C cell temperature

BERNT LORENTZ GmbH & Co. KG
 Kroegerskoppel 7, 24558 Henstedt-Ulzburg, Germany,
 Tel +49 (0)4193 7548-0, Fax -29, www.lorentz.de

Created by LORENTZ COMPASS 3.0.10.9

All specifications and information are given with good intent, errors are possible and products may be subject to change without notice. Pictures may differ from actual products depending on local market requirements and regulations.

Sun. Water. Life.

D. Datenblatt BS65



SOLAR POWERED PRODUCTS

High Efficiency, High Quality PV Module.

BS60-12/ BS65-12

Electrical Characteristics	BS60-12	BS65-12
Maximum power (Pmax)	60W	65W
Voltage at Pmax (Vmp)	17.2V	17.2V
Current at Pmax (Imp)	3.49A	3.78A
Open-circuit voltage (Voc)	21.6V	21.6V
Short-circuit current (Isc)	3.86A	4.21A
Temperature coefficient of Voc	(0.065±0.015)%/ °C	(0.065±0.015)%/ °C
Temperature coefficient of Isc	-(80±10)mV/°C	-(80±10)mV/°C
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/ °C	-(0.5±0.05)%/ °C
NOCT (Air 20°C; Sun 0.8kW/m wind 1m/s)	47±2°C	47±2°C
Operating temperature	-40°C to 85°C	-40°C to 85°C
Maximum system voltage	600V DC	600V DC
Power tolerance	± 5%	± 5%



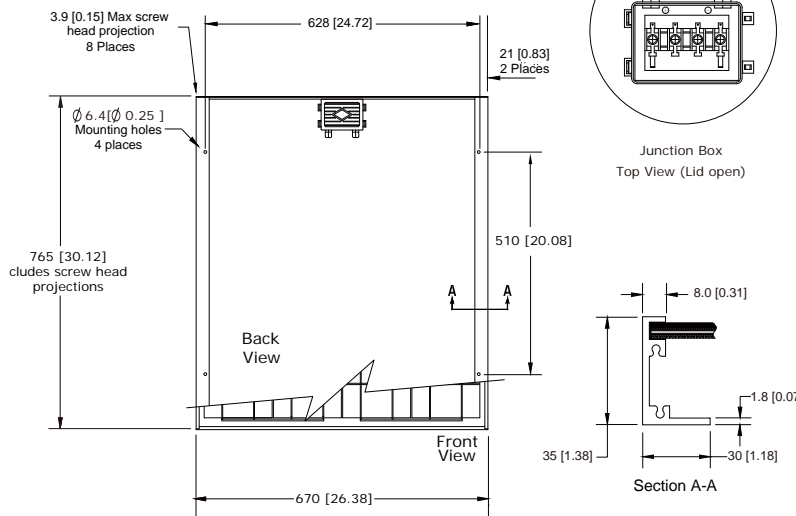
*STC: Irradiance 1000W/m², AM1.5 spectrum, module temperature 25°C

Module Diagram

Dimensions in brackets are in inches.

Un-bracketed dimensions are in millimeters.

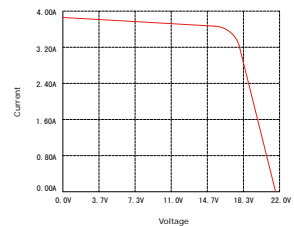
Unit: mm[in.]



Features

- Nominal 12V DC for standard output.
- Outstanding low-light performance.
- Heavy-duty anodized frames.
- High transparent low-iron, tempered glass.
- Cells are laminated with TPT and EVA ensuring longer life and maximum performance.
- Rugged design to withstand high wind pressure, hail and snow load.
- Aesthetic appearance.
- 25 years limited power output warranty.
- Custom design capabilities allow us to meet unique customer demands.

Characteristics



Specifications	BS60-12	BS65-12
Cells	Multicrystalline silicon solar cell	Multicrystalline silicon solar cell
No. of cells and connections	36(4X9)	36(4X9)
Module Dimension	765mm[30.12in.]x670mm[26.38in.]x35mm[1.38in.]	823mm[32.4in.]x670mm[26.38in.]x35mm[1.38in.]
Weight	6.0kg[13.23lbs]	6.3kg[13.89lbs]

* Specifications are subject to change without notice at any time.

www.brightsunpower.com

info@brightsunpower.com

TEL (1) 305 396 4065

Ref. No. BS60652009

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Wörtliche oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.