

Abschlussbericht

über den

SOLARKIOSK

Projektverantwortliche:

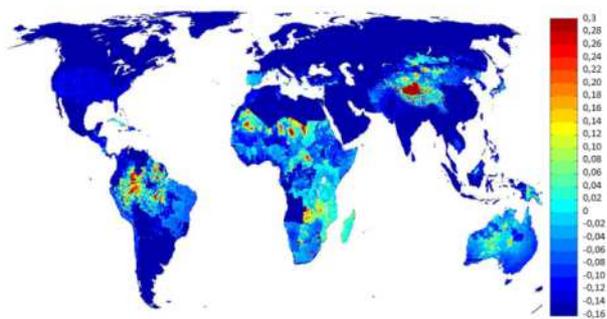
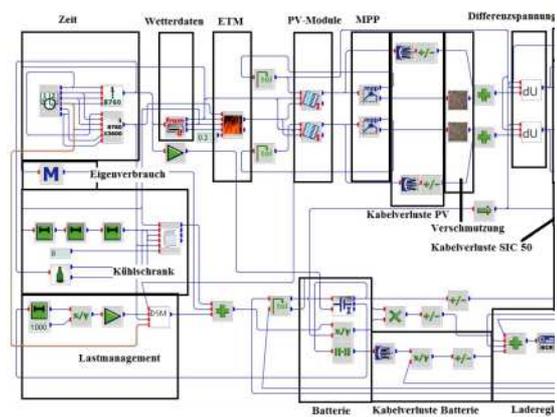
Matthias Resch

Christian Breyer

Projektmitarbeiter:

Niels Harborth, Caspar Wiik, Elisa Gaudchau, Felix Schnorr, Miro Wolff,

Arne Bartschat



Fördernummer: KF2888301RP1

Berlin, 09.12.2012

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung des Projekts.....	3
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	5
1 Einleitung.....	6
1.1 Ziel des Projektes.....	6
1.2 Aufbau des Berichts	6
2 Arbeitspaket 1: Energiesystemauslegung	6
2.1 Recherche von Wissenschaft und Technik	6
2.2 Software zur Lastkurvengenerierung	8
2.3 Entwicklung des Energiesystems zur Erstellung des Prototyps	11
2.3.1 Verringerungen von Verschattungsverlusten durch Entwicklung eines MPP- optimierten Systems	11
2.3.2 Verringerungen von Ertragsverlusten durch Entwicklung eines Hinterlüftungskonzeptes der Module als Teil eines gesamtheitlichen Kühlungs- systems	12
2.3.3 Verringerungen von Ertragsverlusten durch Entwicklung eines Reinigungsmechanismus der Module	13
2.3.4 Optimale Kabelauslegung zur Übertragungsverlustminimierung.....	14
2.3.5 Minimierung der Überschussenergie durch intelligentes Lastmanagement.....	15
2.3.6 Wirtschaftliche Betrachtung	20
2.4 Optimierung des Systemaufbaus.....	23
2.5 Komponentenauswahl im Hinblick auf eine Serienfertigung.....	24
3 Arbeitspaket 2: Modulare Erweiterung und Kopplung des Energiesystems.....	25
4 Arbeitspaket 3: Angepasstes Monitoring-Konzept.....	28
5 Verwertung der Ergebnisse der FuE-Kooperation	29
6 Form der gemeinsamen zukünftigen Verwertung	29
7 Quellen	30
8 Anhang	31

Zusammenfassung des Projekts

Die im Rahmen des FuE Projektes angestrebten Ziele bei der Entwicklung des Energiesystems eines modularen SOLARKIOSKs wurden zum Teil über die Erwartung hinaus erreicht. In diesem Abschlussbericht sind die Ergebnisse der im Antrag genannten Arbeitspakete dokumentiert. Im Folgenden werden die entscheidenden Arbeitspakete, deren Ziele und Ergebnisse kurz umrissen. Ziel des **Arbeitspakets 1.1** war die Analyse verschiedener Systemansätze und die Erstellung eines Referenzdesigns. Die Ziele wurden erreicht und sind in Kapitel 2.1 dokumentiert.

Arbeitspakets 1.2 befasst sich mit der Implementierung von Wetterdatenbanken und der Bestimmung von Modellen für die Ermittlung der Temperaturabhängigkeit von Lasten. Das Ziel wurde durch die Programmierung von zwei Softwaretools und Modellbildung einer Kühltruhe übererfüllt. Darüber hinaus ist hervorzuheben, dass es erstmalig gelungen ist ein sehr genaues Vorhersagemodell für Lastkurven von Kühltruhen zu erstellen.

In **Arbeitspaket 1.3** wurde die Performance Ratio (Gesamtwirkungsgrad) des Systems über das Ziel von 65 % hinaus auf 69 % gesteigert (Abschnitt 2.3.5). Dies gelang unter anderem durch die Entwicklung eines verschattungsresistenten Systems (**Arbeitspaket 1.3.1** in Abschnitt 2.3.1) mittels eines MPPT Ladereglers. Weiter wurde ein thermisches Modell des Solarmoduls entwickelt welches verschiedene Einbausituationen und Hinterlüftungsvarianten quantifizierbar macht (**Arbeitspaket 1.3.2** in Abschnitt 2.3.2). Aufgrund der Anwendung dieses thermischen Modells wurde eine Einbausituation gewählt, welche die thermischen Verluste, die bei der Erhitzung der Solarzelle durch Einstrahlung entstehen, um 46 % anstatt der geforderten 20 % verringert (Abschnitt 2.3.5). Ein Reinigungsmechanismus wurde entwickelt, welcher den Anforderungen des Antrags entspricht und den Minderertrag durch Verschmutzung bei zyklengerechter Anwendung unter den geforderten 5 % hält (**Arbeitspaket 1.3.3** in Abschnitt 2.3.3). Die geforderten Übertragungsverluste in den Leitungen wurden nachweislich unter 0,4 % gehalten (**Arbeitspaket 1.3.4** in Abschnitt 2.3.4). Dazu wurde eine in Deutschland übliche Berechnungsmethode für den afrikanischen Kontinent und deren höhere Einstrahlungsverhältnisse angepasst. Als Kernstück kann die Reduzierung der Überschussenergie von ursprünglich 42 % auf unter 2 % angesehen werden. Damit ist nicht nur das Ziel übererfüllt, es sind auch substantielle technische Neuerungen entstanden, die den SOLARKIOSK gegenüber anderen Produkten auszeichnen und kostengünstiger machen (**Arbeitspaket 1.3.5** in Abschnitt 2.3.5). Diese Ergebnisse wurden außerdem bereits für Veröffentlichungen genutzt und in Konferenzen vorgestellt. Die Wirtschaftlichkeit des SOLARKIOSK als Teil des **Arbeitspakets 1.3** ist in Abschnitt 2.3.6 untersucht und macht deutlich, dass der Solarkiosk in weiten Teilen der Welt konkurrenzfähig zu gängigen Kiosken ist, deren Energieerzeugung auf einen Dieselgenerator beruht. Die Modularität des Energiesystems des Solarkiosks wird in Abschnitt 3 im Rahmen des **Arbeitspakets 2** untersucht. Sie entspricht den Zielen des Antrags, wurde aber aus Platzgründen stark gekürzt. Ein mehr als 20 Seiten langer Bericht wurde der SOLARKIOSK GmbH zur weiteren Verwendung überlassen. Auch das Monitoringkonzept, das in **Arbeitspakets 3** bearbeitet ist, erfüllt die Anforderungen des Antrags und konnte erfolgreich in einen Solarkiosk am Lake Langano in Äthiopien implementiert werden und funktioniert zuverlässig.

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating current, dt. Wechselstrom
BatFuse	Batteriesicherung
DC	Direct current, dt. Gleichstrom
DSM	Demand Side Management
ETM	erweitertes thermisches Modell
INSEL	Integrated Simulation Environment Language
LZ	Leistungszahl
PV	Photovoltaik
PR	Performance Ratio
LCOE	Levelized cost of electricity, dt. Stromgestehungskosten
RLI	Reiner Lemoine Institut gGmbH
SOC	State of Charge, dt. Ladezustand der Batterie
WR	Wechselrichter

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 – Im Referenzsystem verwendete Komponenten.....	7
Abbildung 2 – Einpoliger Stromlaufplan des Referenzsystems (Prototyp 1).....	7
Abbildung 3 – Theoretisches Kühltruhenmodell.....	8
Abbildung 4 – Kühltruhe in der Klimakammer während der Parameterbestimmung.....	9
Abbildung 5 – Schema der Versuchsreihe der Parameterbestimmung des Kühltruhenmodells	9
Abbildung 6 – Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Leistungen und Energien der Kühltruhe.....	9
Abbildung 7 - EXCELtool zur Lastkurvenbestimmung.....	10
Abbildung 8 – Exemplarischer Ausschnitt einer Lastkurve des SOLARKIOSK Modells erstellt mit INSEL.....	11
Abbildung 9 - Reinigungsprinzip.....	13
Abbildung 10 - Halterungsdetail.....	13
Abbildung 11 - Prototyp.....	13
Abbildung 12 – Lastgänge und SOC des Basisszenarios	15
Abbildung 13 - Lastgänge und SOC des DSM Szenarios mit Lastverschiebung.....	16
Abbildung 14 - Lastgänge und SOC des DSM Szenarios mit Lastverschiebung und Nutzung der Kühltruhe als Energiesenke.....	17
Abbildung 15 - SuMeWa SYSTEM [10].....	17
Abbildung 16 – In INSEL implementiertes Programm zur Berechnung des gereinigten Wassers des SuMeWa SYSTEMs aufgrund von Überschussenergie.....	17
Abbildung 17 – Versuchsaufbau PCM.....	18
Abbildung 18 – Temperaturverläufe bei Abschaltung der Kühltruhe mit und ohne PCM.....	18
Abbildung 19 – Linkes Diagramm: Verluste des Energiesystems bei Beginn des Forschungsprojektes; rechtes Diagramm: Verluste des Energiesystems nach Optimierung im Rahmen des AiF-Forschungsprojektes.....	19
Abbildung 21 – Standorte.....	20
Abbildung 20 – Lastkurvenvarianten der standortbezogenen Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	20
Abbildung 22 - Kostenvorteil Solarkiosk gegenüber. Dieselenergie in €/ kWh weltweit.....	22
Abbildung 23 – Temperaturverlauf des heißesten Tages des Jahres in Kedougou im Senegal ...	23
Abbildung 24 – Versuchsreihe zur Bestimmung der Gerätetemperatur des Prototypen 1 in Kedougou.....	23
Abbildung 25 – Versuchsreihe zur Bestimmung der Gerätetemperatur des Prototypen 2 in Kedougou.....	24
Abbildung 26 – Einpoliger Stromlaufplan des Prototypen 2.....	24
Abbildung 27 - Einpoliger Stromlaufplan des Grundsystems des Prototypen 2.....	25
Abbildung 28 – Schema zur Erweiterung der Batteriebank von 12 V auf 24 V.....	26
Abbildung 29 - Schema zur Erweiterung des Ladereglers von 12 V auf 24 V.....	26
Abbildung 30 - Schema zur Erweiterung der Batteriebank von 12 V auf 24 V und um zusätzliche Batterien.....	27
Abbildung 31 – Position der Wettersensoren und Temperaturfühler.....	28
Abbildung 32 - Position der Sensoren Messgeräte des Energiesystems.....	28
Abbildung 33 – Tagesverlauf der Lade- und Entladeströme des Prototypen am Lake Langano, Äthiopien.....	28

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 – Vorkommen und Klassifizierung der Einstrahlung am Lake Langano in Äthiopien	14
Tabelle 2 – Verbraucher des Prototypen 1 und 2; wichtigste Parameter.....	31
Tabelle 3 – Leitungslängen und Leistungsverlust.....	31
Tabelle 4 – Übersicht der LCOE der verschiedenen Varianten der standortbezogenen Varianten der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Auszug).....	32
Tabelle 5 – Auszug des Bauteilkatalogs des Prototypen 2.....	33

1 Einleitung

Die Reiner Lemoine Institut gGmbH konzentrierte sich auch die Entwicklung des Energiesystems.

1.1 Ziel des Projektes

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines Energiesystems für einen modularen SOLARKIOSK bis zur Serienreife.

1.2 Aufbau des Berichts

Alle geforderten Nachweise für den Verwendungsnachweis des Sachberichts sind in diesem Dokument enthalten. Die Zusammenfassung des Projekts befindet sich am Anfang des Dokuments. Die Ergebnisse des Projekts einschließlich eines Vergleichs der angestrebten und erreichten technischen Parameter sind in den Kapiteln 2 bis 4 beschrieben. Im Anschluss werden die Verwertung der Ergebnisse der FuE-Kooperation und die Form der gemeinsamen zukünftigen Verwertung dargestellt.

2 Arbeitspaket 1: Energiesystemauslegung

2.1 Recherche von Wissenschaft und Technik

Ziel dieses Arbeitspaketes war es ein Energiesystem als Referenz aufzustellen. Dazu wurden die Randbedingungen für den Entwurf des Systems aufgezeigt, um dann die Anforderungen an die zu wählenden Komponenten definieren zu können. Weiter wurde der Frage nach der Systemspannung nachgegangen und verschiedenen Systemvarianten gegenübergestellt. Für jede Variante wurde ein einpoliges Blockschaltbild, eine Teileliste, ein Kosten- und qualitativer Vergleich aufgestellt. Durch unsere enge Zusammenarbeit mit der SOLARKIOSK GmbH wurde daraus ein Referenzsystem erstellt. So wurde eine Photovoltaikleistung (PV-Leistung) von 1 kWp realisiert, die auf einer Dachfläche von 3300 x 2000 mm² untergebracht wurde. Um ein Wachstum des Kiosks zu ermöglichen, wurde das System einfach erweiterbar gestaltet. Da das Geschäftsmodell neben dem Verkauf von gekühlten Waren, die Ladung von diversen Batterien und akkubetriebenen Geräten vorsieht, wurden passende Spannungslevel und ein Kühlschranks in das System eingebracht. Um etwaige Probleme frühzeitig erkennen zu können, wurde eine Fernabfrage von Betriebsdaten vorgesehen. Darüber hinaus sollte die solare Energie möglichst vollständig zur Erfüllung des Geschäftsmodells genutzt werden. Hierzu wurden die Systemverluste minimiert werden und eine Laststeuerung konzeptioniert und umgesetzt, welche zusätzlich die Belastung des Systems optimiert. Als ein Baustein zur Optimierung wurde der Kühlschrank mittels Latentwärmespeicher (PCM) als Energiespeicher und verschiebbare Last in dem System genutzt. Des Weiteren sollte versucht werden, das System möglichst tolerant gegenüber Verschattungssituationen zu gestalten.

Im Rahmen des Projektes wurde nach eingehender Marktrecherche das in Abbildung 1 dargestellte Referenzsystem (Prototyp 1) erstellt. Es besteht aus vier Solarmodule des Typs YL260C-30b der Firma Yingli, zwei Laderegler SIC-50 und einem Batteriewechselrichter SI-2012 der Firma SMA, sechs Bleibatterien des Typs solar.power 8OPzV1000 von Hoppecke, einer Kühltruhe des Typs 166+ von Steca, sechs DC-DC Wandlern der Firma Voltcraft sowie einem Datenlogger (WebBox) und die dazu passenden für die Anlagenüberwachung ausgewählten Sensoren der Firma SMA.



Abbildung 1 – Im Referenzsystem verwendete Komponenten.

Der einpolige Stromlaufplan des Prototypen 1 ist im Folgenden dargestellt und beruht auf den in Abbildung 1 dargestellten Komponenten.

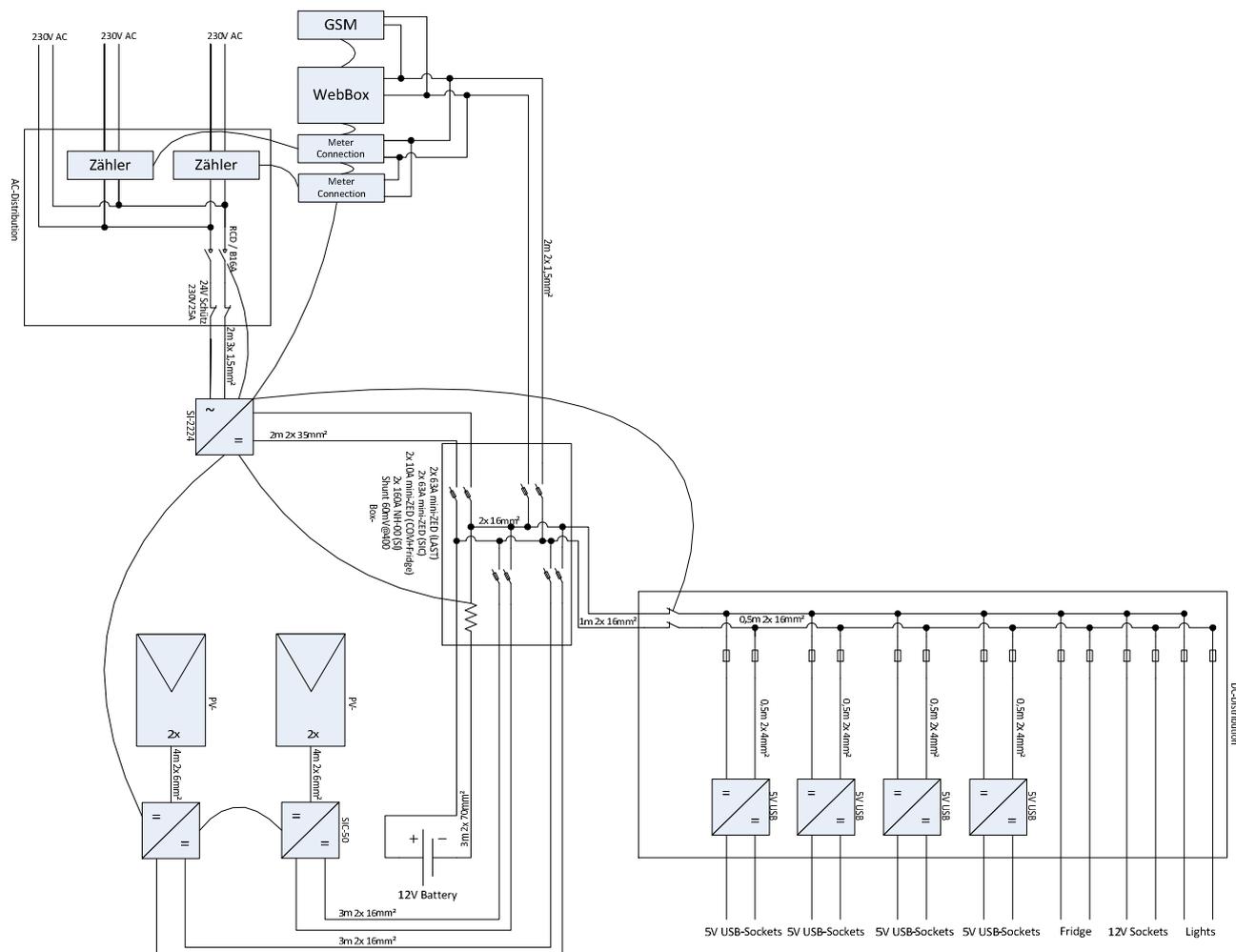


Abbildung 2 – Einpoliger Stromlaufplan des Referenzsystems (Prototyp 1)

Abschließend werden die Nach- und Vorteile des Referenzsystems diskutiert, und dessen Weiterentwicklung angesprochen.

Vorteile:

1. 12 V Verbraucher können einfach versorgt werden.
2. 230 V Verbraucher können versorgt werden
3. Großer elektrischer Speicher
4. Sehr gute Erweiterbarkeit
5. Sehr gutes Datenüberwachungssystem

Nachteile:

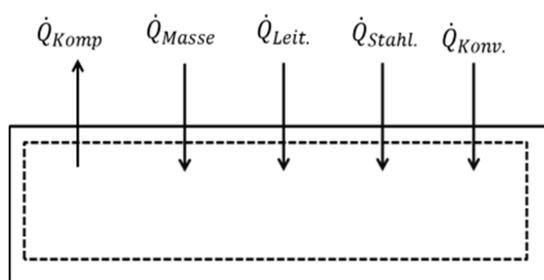
1. Sehr hoher Preis
2. 5 V Versorgung hat relativ hohe Verluste
3. Sehr große Bauteile

Aufgrund der Betriebserfahrung des Referenzsystems (Prototyp 1) am Lake Langano in Äthiopien wurde der Prototyp 2 entwickelt (siehe Abschnitt 2.4 und 2.5).

2.2 Software zur Lastkurvengenerierung

Basierend auf den Arbeitsschritten des Projektantrages wurden zwei Softwaretools programmiert, die weltweite Gesamtlastkurven des SOLARKIOSKS erstellen. Nach einer eingehenden Komponentenrecherche wurde eine Datenbank an Verbrauchern erstellt, die individuell zusammengestellt werden können, um je nach Bedarf Gesamtlastkurven für SOLARKIOSKe zu erstellen. Um den Verbrauch der temperaturabhängigen Lasten weltweit berechnen zu können wurde eine Wetterdatenbank in die beiden Tools integriert. Die benutzten Wetterdaten decken eine 22-jährige Messperiode von 1984-2005 ab und basieren auf Daten der NASA die durch das DLR weiterentwickelt wurden [1]. Die bedeutendste temperaturabhängige Last ist die Kühltruhe. Sie bildet die wichtigste Säule des in Abschnitt 2.3.5 entwickelten Demand Side Managements DSM (dt. Laststeuerung). Hier wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit von Miro Wolff, die am RLI durchgeführt wurde, basierend auf heuristischen Verfahren ein Modell entwickelt, um dessen Leistungsaufnahme präzise vorherzusagen. Theoretisch kann man eine Kühltruhe mit der folgenden Energiebilanz beschreiben.

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q}_{Komp.} + \dot{Q}_{Masse} + \dot{Q}_{Leit.} (+ \dot{Q}_{Strahl.} + \dot{Q}_{Konv.}) \quad (2.1)$$



$\frac{dU}{dt}$..Änderung der Inneren Energie
 $\dot{Q}_{Komp.}$.. Wärmetransport des Kompressors
 \dot{Q}_{Masse} ..Wärmetransport durch Masseneintrag
 $\dot{Q}_{Leit.}$.. Wärmetransport durch Leitung
 $\dot{Q}_{Strahl.}$.. Wärmetransport durch Strahlung
 $\dot{Q}_{Konv.}$.. Wärmetransport durch Konvektion

Abbildung 3 – Theoretisches Kühltruhenmodell

Den Wärmetransport durch Strahlung und Konvektion kann man vernachlässigen, deswegen sind sie in Formel (2.1) in Klammern gesetzt. Nach der Entwicklung eines analytischen Modells der Kühltruhe wurden die Formeln für die Leistungszahl LZ und die Leistung P experimentell ermittelt. Dafür wurden die an der Kühltruhe anliegende Spannung und der Strom bei verschiedenen Außentemperaturen und Beladungen gemessen, um die Leistung zu berechnen. Der Verlauf der

Leistung wurde mit der Methode der kleinsten Quadrate angenähert und in eine quadratische Formel überführt. Die folgenden beiden Bilder veranschaulichen den Aufbau und die Versuchsdurchführung.



Abbildung 4 – Kühltruhe in der Klimakammer während der Parameterbestimmung

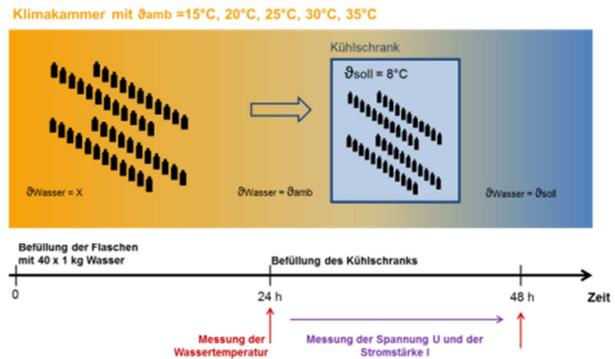


Abbildung 5 – Schema der Versuchsreihe der Parameterbestimmung des Kühltruhenmodells

In Abbildung 6 wurden dem simulierten Kühltruhenmodell die gemessenen Daten gegenübergestellt. In der Klimakammer wurde dabei ein typischen Temperaturverlauf in Addis Abeba, Äthiopien, eingestellt. Es wurde sowohl die Innentemperatur der Kühltruhe, als auch die zugegebene und entnommene Masse variiert. Der Fehler betrug demnach ca. 10% nach einen 96-stündigen Versuchsdurchlauf.

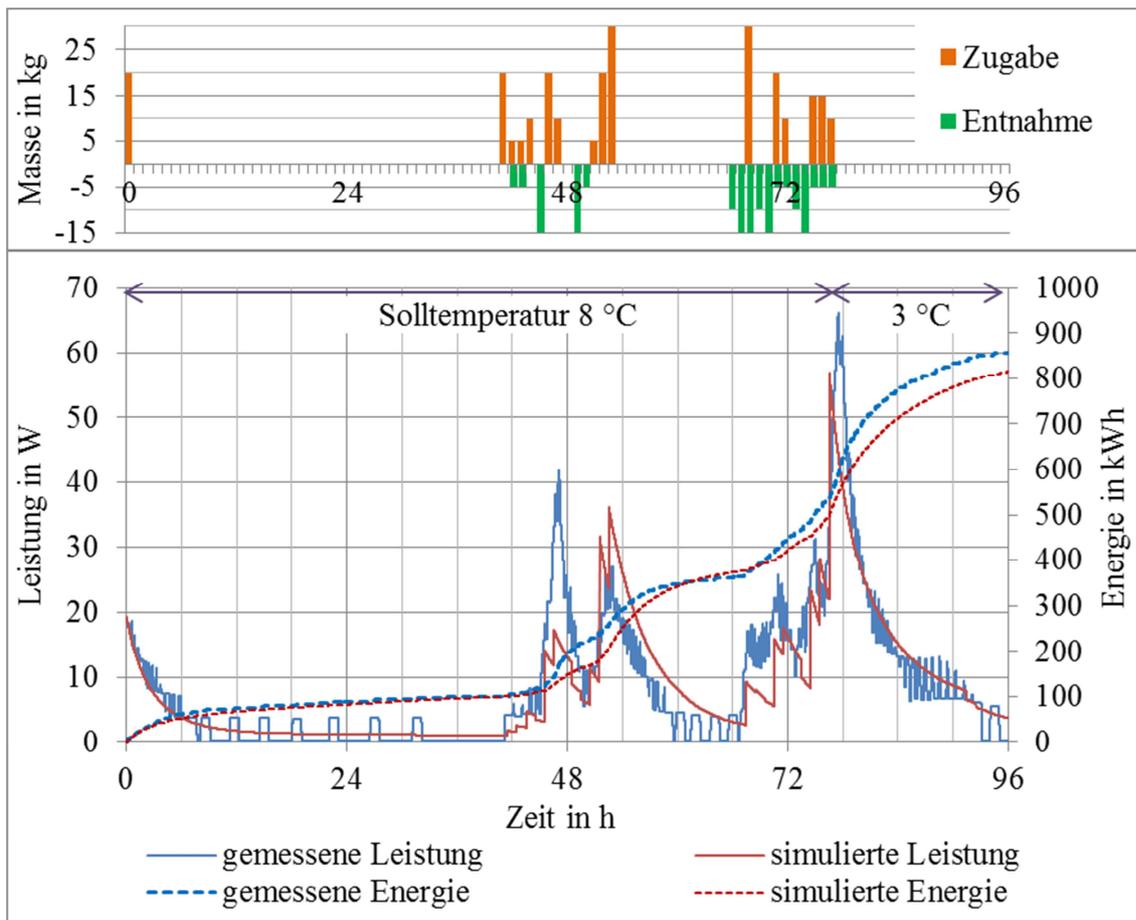
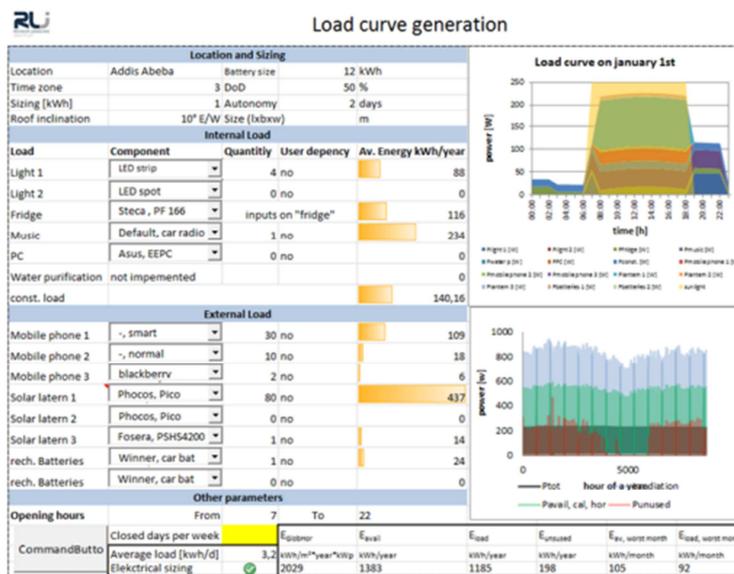


Abbildung 6 – Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Leistungen und Energien der Kühltruhe

Die Schrittweite der Simulation der Leistungsaufnahme der Kühltruhe beträgt 5s. Das Modell wurde in EXCEL, INSEL [2] und MATLAB implementiert. Aufbauend auf dieses Modell konnten zwei verschiedene Softwaretools geschrieben werden. Eins basiert auf EXCEL und berechnet die Leistung der Kühltruhe nur sehr grob, hat aber den Vorteil, dass es intuitiv bedienbar ist (siehe Abbildung 7). Es ermöglicht die Überprüfung der Systemauslegung und die Berechnung der Jahreslast in Stundenwerten. Als Eingabeparameter muss der Aufstellungsort, die Anlagengröße, die verschiedenen elektrischen Lasten und weitere Parameter, wie z.B. die Öffnungszeit angegeben werden. Dieses Tool ermöglicht es dem Nutzer sehr einfach abzuschätzen, ob eine bestimmte Last für einen festgelegten Standort durch ein bestimmtes Energiesystem gedeckt werden kann oder nicht, so dass man eine erste Systemauslegung durchführen kann.



M.Resch

V.0.3

Abbildung 7 - EXCELtool zur Lastkurvenbestimmung

Um die Last in genaueren Schritten zu berechnen und eine Rückkopplung des Energiesystems auf die Last zu ermöglichen, wurde auf INSEL zurückgegriffen. Es wurde ein Programm für INSEL entwickelt, das die Last in Abhängigkeit des Ladezustandes der Batterie (state of charge, eng. SOC) den Öffnungszeiten und der Tageszeiten berechnet. Darüber hinausgehend berechnet es das oben entwickelte Kühltruhenmodell in 5 s Schritten während sie durch eine zufällig generierte Ladung und Entladung eine zusätzliche Dynamik erhält. Außerdem erlaubt das Programm dem Energiesystem regelnd auf die Kühltruheninnentemperatur und damit indirekt auf den Energiebedarf der Kühltruhe einzugreifen.

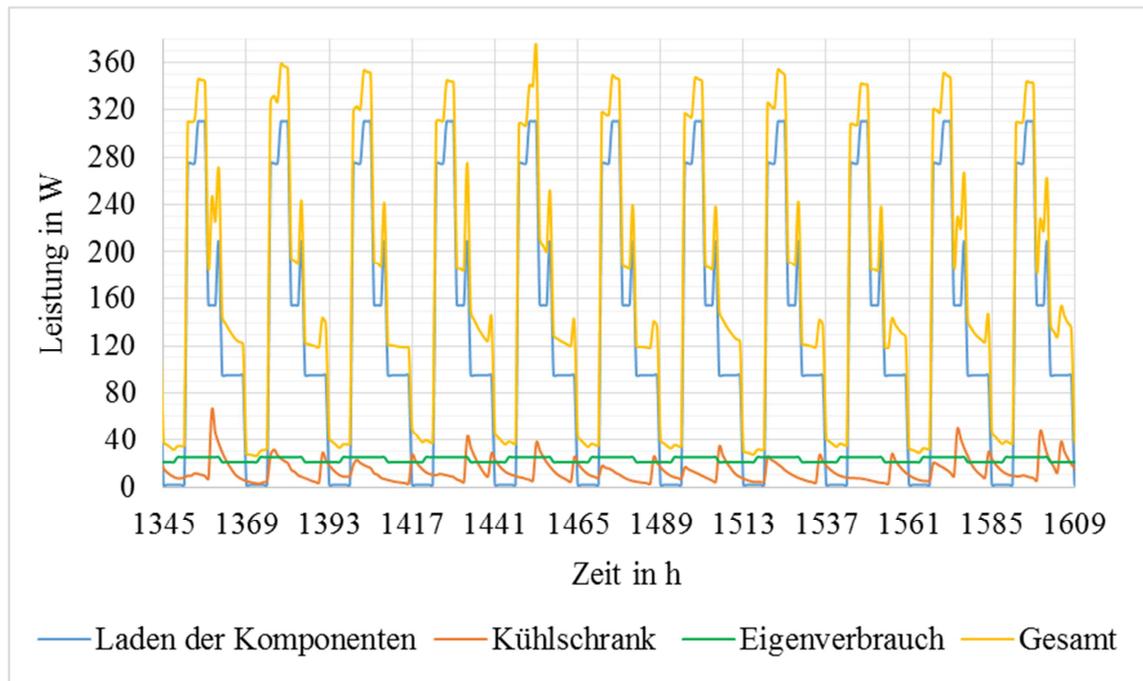


Abbildung 8 – Exemplarischer Ausschnitt einer Lastkurve des SOLARKIOSK Modells erstellt mit INSEL

In Abbildung 8 sind dabei einige Tage exemplarisch dargestellt. Man sieht wie sich das Laden der Komponenten bestehend aus Mobiltelefonen und Solarlampen (blauer Graph) und der Eigenverbrauch des Energiesystems jeden Tag wiederholen, während die Leistung der Kühltruhe starken Schwankungen unterworfen ist. Das liegt, wie schon erwähnt, an der Rückkopplung des Energiesystems mit der Kühltruhe. Dies wirkt sich entsprechend auf die Gesamtlast aus (gelbe Kurve).

2.3 Entwicklung des Energiesystems zur Erstellung des Prototyps

2.3.1 Verringerungen von Verschattungsverlusten durch Entwicklung eines MPP-optimierten Systems

Es wurden sowohl Serienladeregler, MPPT-Laderegler, als auch Modulwechselrichter für ihren Einsatz im SOLARKIOSK untersucht. Die Variante der Modulwechselrichter wurde im Laufe des Projektes fallengelassen, da es keine off-grid fähigen Modulwechselrichter auf dem Markt gibt. Von einer eigenen Hardwareentwicklung wurde abgesehen, da weder die Projektlaufzeit dafür ausreichend gewesen wäre, noch der Kostenanteil der Leistungselektronik am Gesamtsystem diesen Aufwand gerechtfertigt hätte. Es wurden Experteninterviews und eigene Simulationen in INSEL durchgeführt, die belegen, dass es aus Effizienzgründen keinen deutlichen Vorteil von Serienladeregler gegenüber MPPT-Laderegler gibt. Der große Vorteil der MPPT-Laderegler ist, dass man Standardmodule mit höheren Spannungen verwenden kann, als sie für Serienladeregler passend wären. Das führt zu einem maßgeblichen Kostenvorteil, da der spezifische Preis von Standardmodulen gegenüber 12 V oder 24 V Modulen wesentlich geringer ist. Auch wenn die Verschattungsresistenz unserer Systemtopologien wegen der extremen Standortabhängigkeit des Schattenwurfes nicht quantifizierbar ist, wird aufgrund des Einsatzes von zwei MPPT-Laderegler pro 1 kWp PV-Generator von einer kaum verbesserungsfähigen Systemtopologie sowohl für den Prototypen 1 also auch für den Prototypen 2 ausgegangen.

2.3.2 Verringerungen von Ertragsverlusten durch Entwicklung eines Hinterlüftungskonzeptes der Module als Teil eines gesamtheitlichen Kühlungssystems

Ziel dieses Abschnittes ist es zu untersuchen, welches Hinterlüftungskonzept für die in dem SOLARKIOSK integrierten Solarmodule sinnvoll ist. Um die Auswirkung einer forcierten Hinterlüftung auf der Modulrückseite zu ermitteln, wurden mehrere thermische Modelle in Betracht gezogen. Das DEQ-Modell von Schumacher [3] berücksichtigt nur frei umströmte Module, das NOCT-Modell [4] benötigt für jeden Aufbau Messdaten der Einstrahlung, Modultemperatur und Umgebungstemperatur, die von Standort zu Standort anders sind. Die thermischen Verluste auf die wir uns im Projektantrag bezogen haben beziehen sich auf vollständig dachintegrierte Module. Diese beiden Modelle können den Mehrertrag durch einen von der Vorderseite der Module abweichenden Luftstrom nicht berechnen. Das dritte thermische Modell beruht auf empirischen Daten, die vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, die in Zusammenarbeit mit der Deutschen Gesellschaft für Solarenergie entwickelt wurden und empirischer Natur ist. Es berücksichtigt aber verschiedene Einbauarten [5]. Dabei wird jedoch weder die Windgeschwindigkeit berücksichtigt noch kann man dessen Ergebnisse in südliche Länder, z.B. in Afrika übertagen. Basierend auf dem DEQ-Modell von Schumacher, wurde ein erweitertes thermisches Modell (ETM) entwickelt, das vor allem eine Differenzierung der Windgeschwindigkeit zwischen der Front- und der Rückseite des Moduls zulässt. Gerade im Hinblick auf eine mögliche Erweiterung des Solarkiosks durch eine gezielte Kühlung der Geräte und auch des PV-Moduls über einen gelenkten Luftstrom wurde die Auswirkungen durch die Simulation dargestellt und untersucht. Dieses Modell wurde von Felix Schnorr im Rahmen seiner Bachelorarbeit am RLI entwickelt und in INSEL implementiert [6]. Durch die folgende Formel lässt sich die Temperaturänderung und damit die thermischen Verluste am Modul iterativ ermitteln.

$$d\vartheta = \frac{\dot{Q}_E - \dot{Q}_{LS} - P_{el} - \dot{Q}_{KR} - \dot{Q}_{KF}}{m_{mod}c_{mod}} \quad (2.2)$$

d ϑ ..Temperaturänderung

\dot{Q}_E ..kurzwelliger Wärmetransport durch Strahlung

\dot{Q}_{LS} ..langwelliger Wärmetransport durch Strahlung

P_{el} ..elektrische Leistung

\dot{Q}_{KR} ..konvektiver Wärmeübergang Modulrückseite

\dot{Q}_{KF} ..konvektiver Wärmeübergang Modulfrontseite

m_{mod} ..Masse des Moduls

c_{mod} ..Spezifische Wärmekapazität des Moduls

Unser Ziel war es die Modultemperatur übers Jahr so weit zu senken, dass die thermischen Verluste um 20 % gegenüber dem Basisszenario gesenkt werden können. Um derartige Gewinne zu erzielen, ist bei einer Lufttemperatur, die der Außentemperatur entspricht, eine Strömungsgeschwindigkeit auf der Rückseite des Moduls von ca. 2 m/s zu erreichen. Im Experiment der HTW in der Klimakammer konnten aber lediglich Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 0,5 m/s erreicht werden, was zu keinem messbaren Mehrertrag geführt hat. Die Energiebilanz einer aktiven Kühlung durch eine forcierte Lüftung wäre also negativ und ist nicht weiter zu verfolgen. Nach Berechnungen der Gruppe von Herrn Prof. Bunte an der HTW wird eine passive Hinterlüftung ebenfalls keinen nennenswerten Luftstrom hinter den Modulen erwirken und wird deswegen auch nicht weiter verfolgt. Es wäre zu empfehlen die Module möglichst frei von Luft umströmt und nicht dachintegriert zu verbauen. Dadurch wäre eine Steigerung des Ertrags von ca. 6 % für den Standort Lake Langano in Äthiopien möglich. Dies wurde konstruktiv in der Modulintegration des Prototypen 2 berücksichtigt.

2.3.3 Verringerungen von Ertragsverlusten durch Entwicklung eines Reinigungsmechanismus der Module

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sind drei verschiedene Reinigungsmechanismen auf ihre Eignung untersucht worden. Dazu wurde ein PV-Modul im gleichen Neigungswinkel, wie er auch bei dem Solarkiosk auftritt, aufgestellt. Anschließend wurde die Oberfläche des PV-Moduls im ersten Schritt mit feinem Sand und im zweiten Schritt mit einem Wassersandgemisch verdreckt, um eine Verschmutzung zu simulieren. Die aufgetragene Schmutzschicht ist danach mit verschiedenen, untersuchten Reinigungsmechanismen wieder beseitigt worden, sodass eine anschließende Bewertung der eingesetzten Reinigungsmechanismen und Verfahren möglich wurde. Beim Durchführen der Versuche ist lediglich das Reinigungsvermögen der unterschiedlichen Mechanismen optisch beurteilt worden. Es erfolgte keine Messung der durch die Verschmutzung erzeugten Verschattungsverluste. In den Versuchen wurden drei verschiedene Reinigungsmechanismen (Materialien) eingesetzt, die im Folgenden vorgestellt werden sollen:

- 1) Einfache Bürste, die ohne Rotation um ihre eigene Achse eingesetzt wurde
- 2) Einfache Schaumstoff-Abziehlippe
- 3) Bürste mit Rotation entgegen der Bewegungsrichtung

Mit Variante 3) konnten die besten Reinigungsergebnisse und die oberflächenschonendste Reinigung realisiert werden. Die guten Reinigungsergebnisse mit der rotierenden Rundbürste haben dazu geführt, dass eine einfache mechanische Konstruktion entwickelt wurde, die das Reinigen der PV-Module des Solarkiosks mit einer rotierenden Bürste ermöglicht.



Abbildung 9 - Reinigungsprinzip

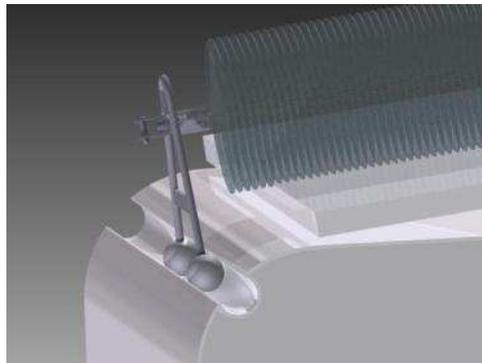


Abbildung 10 - Halterungsdetail



Abbildung 11 - Prototyp

Das Konzept sieht vor, eine mechanische Vorrichtung auf dem Lüftungsschacht, welcher mittig über das Solarkioskdach verläuft, zu ziehen. Diese Vorrichtung treibt zwei seitlich angebrachte Rundbürsten über eine Übersetzung direkt an, die durch die Rotation die PV-Module reinigen (Abbildung 9). An den seitlich des Solarkioskdaches verlaufenden Alu-Profilen werden zusätzlich zwei Führungselemente platziert, an denen Zugseile angebracht werden können (Abbildung 10). Abbildung 11 zeigt den funktionsfähigen Prototypen. Literaturrecherchen haben gezeigt, dass man mindestens wöchentlich die Module reinigen sollte, in Trockenzeiten in wüstenähnlichen Klimazonen ist sogar eine tägliche Reinigung zu empfehlen [7], [8], [9], [10].

2.3.4 Optimale Kabelauslegung zur Übertragungsverlustminimierung

Das Ziel der Leitungsoptimierung ist es den gesamten Jahresenergieverlust auf 0,4% zu reduzieren. Hierzu wurde ein Modell entwickelt, mit dem die Leitungsbelastung im Jahresdurchschnitt berechnet werden kann. Als afrikanischen Referenzstandort für die Einstrahlungswerte (GHI) wurde der Ort Lake Langano in Äthiopien gewählt, da sich dort der erste ausgestellte SOLARKIOSK befindet. Für die Erstellung des Berechnungsmodells wurden Einstrahlungswerte des DLR für das Jahr 1995 genutzt, da dieses ziemlich genau einem Durchschnittsjahr in den Jahren 1985-2005 an dem Standort entspricht. Je nach Häufigkeit der Einstrahlungsstärken wurden 100 W/m² Klassen erstellt. In Anlehnung an den europäischen Wechselrichterwirkungsgrad wurden die Klassen gröber und konservativer gestaltet (wie in der folgenden Tabelle gezeigt), um die Leitungen in jedem Fall ausreichend zu dimensionieren.

Tabelle 1 – Vorkommen und Klassifizierung der Einstrahlung am Lake Langano in Äthiopien

GHI in W/m ²	Vorkommen der GHI in %	gewertet als	Leitungsberechnung
1050-950	3,1	1000	
949-850	7,8	1000	
849-750	11,8	1000	
749-650	13,4	1000	
649-550	10,3	1000	46,4%
549-450	12,0	500	
449-350	9,6	500	21,6%
349-250	9,8	300	9,8%
249-150	12,4	200	12,4%
149-50	9,8	100	9,8%
49-0	Nicht gewertet	Nicht gewertet	-

Im Weiteren wurden die jeweiligen Spannungen, Leitungslängen und die maximalen Stromstärken ermittelt und mit der sehr konservativ gewichteten Betrachtung der Einstrahlungswerte aus der vorherigen Tabelle dem Modell zur Leitungsbelastungsrechnung übergeben. Durch das Modell konnte gezeigt werden, dass der mittlere ohmsche Energieverlust, der durch den Leitungswiderstand verursacht wird mit 0,32% kleiner als die geforderten leitungsbedingten Energieverluste von 0,4% sind. Eine genaue Auflistung der relevanten Parameter aller Leitungen findet man im Anhang in Tabelle 4.

2.3.5 Minimierung der Überschussenergie durch intelligentes Lastmanagement

Dem Thema Demand Side Management (DSM, dt. Intelligentes Lastmanagement) haben wir uns auf verschiedenen Ebenen genähert. In mehreren Simulation in INSEL haben wir untersucht welche Komponenten sich am besten für ein DSM eignen. Im Anschluss wurden die vielversprechendsten Ansätze im Prototypen 2 umgesetzt.

Simulation

Im Projektantrag wurde berechnet, dass man mit der gegebenen Systemkonfiguration des Prototypen 1 eine Last von ca. 2,1 kWh/d decken kann. Durch eine Verfeinerung der Lastaufteilung, Verbesserung der Performance Ratio und unter der Vorgabe, dass man die zwischen 40 % und 50 % liegende anfallende Überschussenergie ebenfalls den Lasten zuführt, haben wir ein Szenario entwickelt bei dem man mit der prinzipiell gleichen Systemkonfiguration (gleiche Leistung der Module, gleiche Batteriekapazität) eine tägliche Last von ca. 4 kWh/d decken sollte (siehe Anhang Tabelle 3). Als interne Lasten kann man dabei sämtliche Lasten verstehen, die in dem Kiosk verbaut sind (Leuchtmittel, Kühltruhe, usw.), die externen Lasten sind Lasten die zusätzlich eingebracht werden. Das Laden von Mobiltelefonen aber auch von Solarlaternen, die gemäß dem Geschäftsmodell der SOLARKIOSK GmbH einen wesentlichen Beitrag zur Wirtschaftlichkeit liefern, ist hier als Beispiel zu nennen. Die externe Last wurde in Zusammenarbeit mit der SOLARKIOSK GmbH auf 1,8 kWh/d festgelegt. Um zu zeigen, dass und wie diese Steigerung der täglichen Last durch den Einsatz von DSM ermöglicht werden kann, haben wir vier Szenarien entwickelt. Als Standort wurde der Lake Langano in Äthiopien festgelegt, da dort der Prototyp 2.1 (siehe Abschlussbericht von der GRAFT GmbH) realisiert wurde.

1. Basisszenario

In diesem Szenario wird lediglich grundsätzlich das Trennen von Stromkreisen, die der Ladung von Solarlampen und Mobiltelefonen dienen, ab einen SOC von 67 % untersucht. Die Kühltruhe und alle anderen Lasten werden bei einem SOC von 50 % von der Batterie getrennt. Lediglich der Eigenverbrauch der elektrischen Komponenten, die für den Betrieb des Energiesystems unerlässlich sind, wird darüber hinaus noch gedeckt. Es findet also so gut wie kein DSM statt. Die Kühltruhe wird bei einer Unterschreitung des Füllstands von 16 l mit 55 l beschickt, dabei ist die einzige Bedingung, dass der Kiosk geöffnet hat. Die Solltemperatur liegt konstant bei 8°C. Die Ladung der Komponenten findet innerhalb der Öffnungszeiten statt.

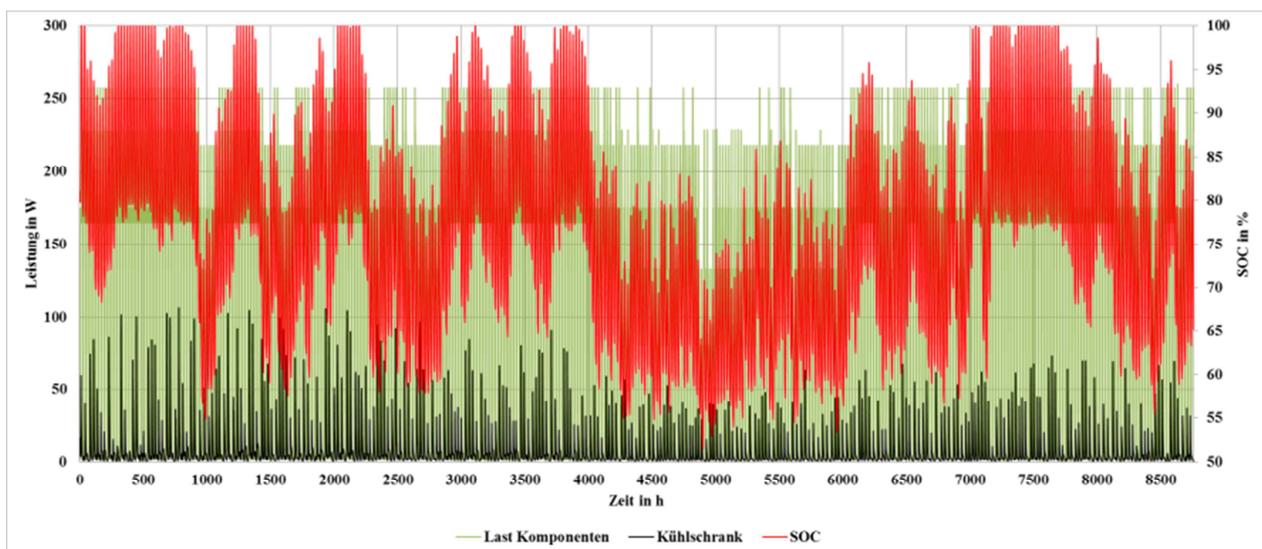


Abbildung 12 – Lastgänge und SOC des Basisszenarios

In Abbildung 12 kann man sehen, dass der Füllstand der Batterie relativ selten einen Wert von 100% erreicht (rote Kurve). In der Regenzeit (Stunde 4000 bis 6000, also von August bis September) und darüber hinaus wird ein SOC von 85 % nur knapp überschritten. Hier sind auch die meisten Trennungen der Komponenten vom Netz zu erkennen (hellgrüne Kurve). Die Leistungsaufnahme des Kühlschranks ist gerade in der warmen Zeit, also zu Beginn des Jahres, enorm hoch (schwarze Kurve). In der Regenzeit nimmt die Außentemperatur ab, womit die Leistungsaufnahme sinkt. Dadurch findet eine positive Kompensation statt, denn eine steigende Leistungsanforderung des Kühlschranks bei fallendem SOC hat immer auch eine Limitierung der Geräte, die geladen werden können, zur Folge. Am Ende des simulierten Jahres konnten 15% (98 kWh) der benötigten Energie für die Deckung der externen Lasten nicht gedeckt werden. Dieses Szenario ist als ungenügend zu bewerten.

2. Demand Side Management durch Lastverschiebung

Hier wurde die externe Last als verschiebbar in den Tagesstunden angenommen. Die Trennungsbedingungen aus Szenario 1 treffen hier auch zu, hinzu kommt aber, dass der Kühlschrank bei einer Unterschreitung des Füllstands von 30 l mit 20 l beschickt wird, wenn Einstrahlung vorhanden ist. Außerdem erfolgt um 11 Uhr jeden Tages eine Vollladung. Eine Zugabe von 15 l im sonnenfreien Zeitraum erfolgt nur, wenn der Füllstand unter 5 l fällt. Die Ladung der externen Lasten wird nur während des Tages vollzogen. Am Verlauf des SOC-Graphen ist zu erkennen, dass der Füllstand nur noch zweimal im Jahr einbricht. Hierauf beschränkt sich ebenfalls der Lastabwurf, wie in Abbildung 13 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu sehen ist. Der erste Zeitraum liegt in der Mitte des Februars und weist eine relativ kurze Dauer auf. Der zweite Zeitraum hält länger an und hat zur Folge, dass der Füllstand der Batterie einen Wert von 100 % nicht erreicht. Ebenfalls ist die viel gleichmäßigere und geringere Leistungsaufnahme der Kühltruhe auffallend.

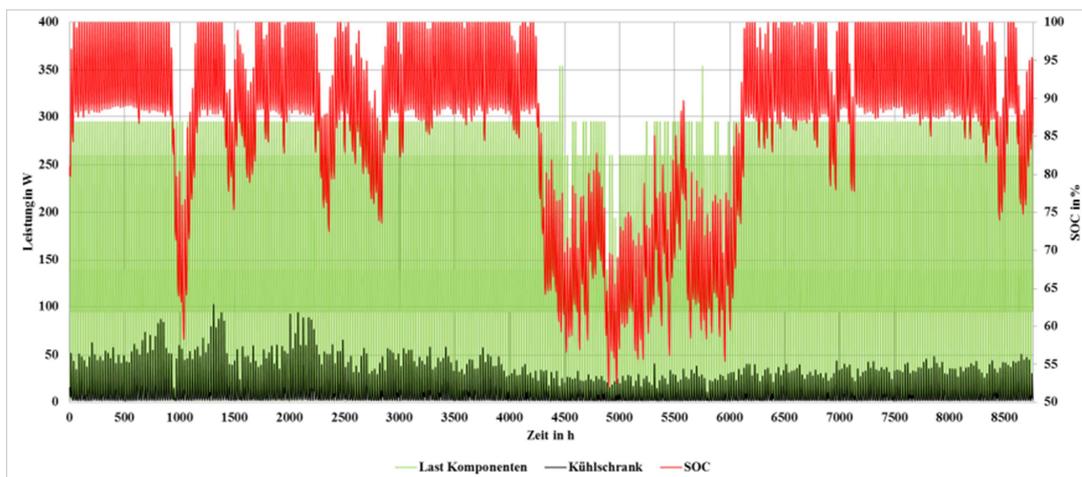


Abbildung 13 - Lastgänge und SOC des DSM Szenarios mit Lastverschiebung

Am Ende des simulierten Jahres konnten 4 % (28 kWh) der benötigten Energie für die Deckung der externen Lasten nicht gedeckt werden. Trotzdem steht dem System eine Überschussenergie von 63 kWh zur Verfügung, die in Szenario 3 und 4 durch die Nutzung von Energiesenken reduziert wird.

3. Demand Side Management durch Lastverschiebung und Nutzung der Kühltruhe als Energiesenke

Im Unterschied zu Szenario 2 ist die Kühltruheninnentemperatur hier variabel (3°C - 12°C) und während der Regenzeit wird die Anzahl der geladenen Mobiltelefone und Solarlaternen reduziert. Nachts wird die Kühltruheninnentemperatur auf 12 C angehoben, was aufgrund der Verwendung von PCM mit einer Nachtabschaltung zu realisieren ist (siehe praktische Realisierung).

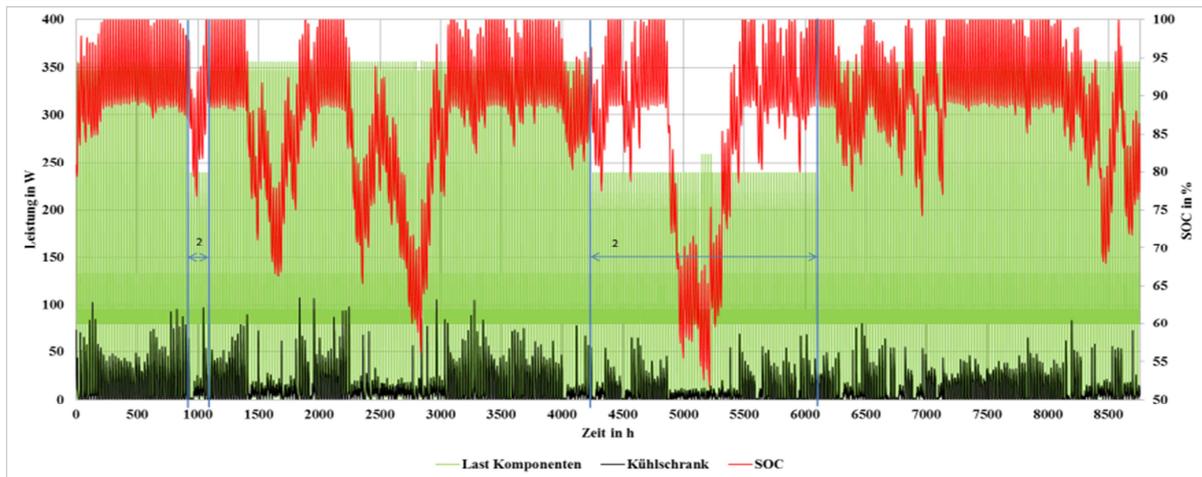


Abbildung 14 - Lastgänge und SOC des DSM Szenarios mit Lastverschiebung und Nutzung der Kühltruhe als Energiesenke

In den in Abbildung 14 mit einer 2 gekennzeichneten Zeiträumen kommt die Reduzierung der externen Ladung zum Tragen. Wie zu erwarten erkennt man deutlich die stark schwankende Leistung der Kühltruhe auf insgesamt niedrigem Niveau. In diesem Szenario können alle Lasten gedeckt werden, während durch die Ausnutzung der Kühltruhe als Energiesenke die Überschussenergie um 58 % auf 26 kWh gesenkt werden konnte.

Dieses Szenario ist damit am besten zu bewerten und wird von uns empfohlen umzusetzen.

4. Demand Side Management durch Lastverschiebung und Nutzung einer Wasseraufbereitung als Energiesenke

Dieses Szenario entspricht dem vorherigem mit dem Unterschied, dass als Energiesenke das Wasseraufbereitungssystem SuMeWa | SYSTEM von AUTARCON [11] in INSEL modelliert wurde und dem Energiesystem hinzugefügt wurde. Die Kühltruhe wurde nicht als Energiesenke genutzt.

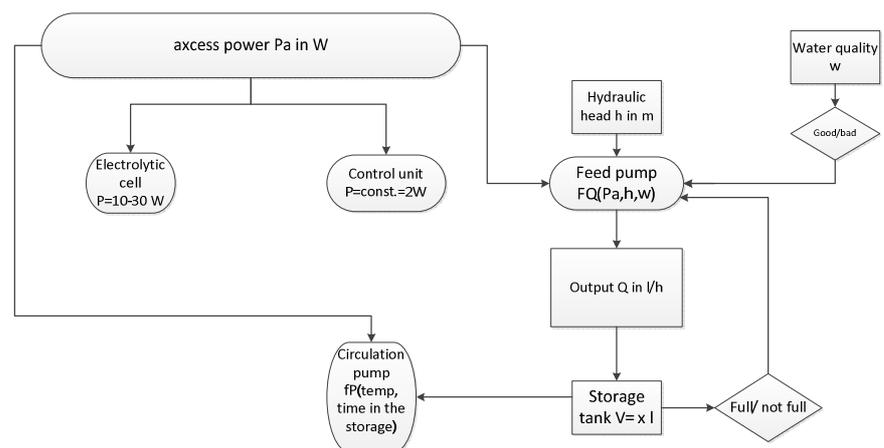


Abbildung 15 - SuMeWa | **Abbildung 16** – In INSEL implementiertes Programm zur Berechnung des gereinigten Wassers des SuMeWa | SYSTEMs aufgrund von Überschussenergie

Das Ergebnis ist dem des Szenarios 3 sehr ähnlich. Auch hier wurde die Überschussenergie auf 23 kWh drastisch reduziert. Es können aber im Gegensatz zu Szenario 3 analog zu Szenario 2 nicht alle Lasten gedeckt werden und darüber hinaus reicht die verwendete Energie nur aus, um für diesen Standort 27 m³/a Wasser im Jahr aufzubereiten. Der wirtschaftlichen Bedeutung dieser

Art der Energiesenke stehen die recht hohen Anschaffungskosten im Weg. Dieses Geschäftsmodell macht nur für entlegene Regionen Sinn, wenn man pro m³ Trinkwasser zwischen 1 und 10 € verlangen kann [12].

Praktische Umsetzung

Es wurde die SOC gesteuerte Lastabschaltung, das einstrahlungsgesteuerte Ein-/ Ausschalten von Lasten und die Nachtabschaltung der Kühltruhe im Prototypen 2 realisiert. Die Laststeuerung geschieht über ein Relais und ist kabelgebunden. Damit kann man das oben berechnete Szenario 2 realisieren. Exemplarisch wird im Folgenden auf die Möglichkeiten der Nachtabschaltung der Kühltruhe eingegangen. In der Klimakammer der HTW wurde getestet, ob der Einsatz von PCM in der Kühltruhe gewährleisten kann, dass diese in der Nacht abgeschaltet werden kann, ohne, dass die Innentemperatur 12°C überschreitet. Dazu wurde die Kühltruhe mit 2 PCM Platten des Typs RT 5HC (Speicherkapazität 295 Wh je Platte) und mit 2 PCM Platten des Typs RT 10HC (Speicherkapazität 335 Wh je Platte) von Rubitherm bestückt. Die Kühltruhe war ansonsten leer und wurde nach Erreichen der Nenninnentemperatur von 3°C bei einer Außentemperatur von 45°C abgeschaltet (Abbildung 17). In einem Vorversuch wurde die Innentemperatur ohne den Einsatz von PCM über 48 Stunden aufgenommen. In Abbildung 18 ist zu erkennen, dass die Kühlschrankinnentemperatur nach 720 min (12 Stunden) ungefähr die Außentemperatur erreicht hat. Während nach dem gleichen Zeitraum bei Einsatz von PCM die Innentemperatur sowohl im oberen (wärmeren) als auch im unteren Bereich unter 12°C gehalten werden konnte. Am Boden der Kühltruhe wurden die 12°C erst nach 24 Stunden überschritten. Da der Versuch ein „worst case“ Szenario abbildet wird davon ausgegangen, dass man mit dem Einsatz von PCM problemlos die Kühltruheninnentemperatur während der Nacht und nach dessen Abschaltung halten kann.



Abbildung 17 – Versuchsaufbau PCM

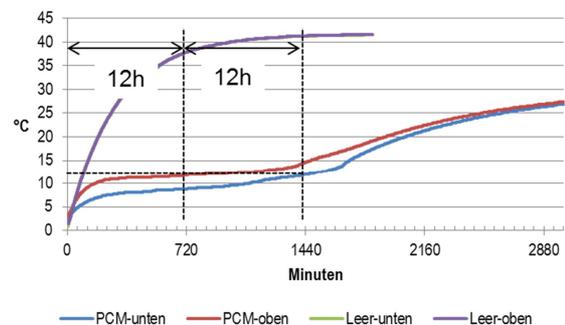


Abbildung 18 – Temperaturverläufe bei Abschaltung der Kühltruhe mit und ohne PCM

Performance Ratio Steigerung

Ein weiterer zentraler Punkt des Forschungsvorhabens war die Steigerung der Performance Ratio von 42,5 % auf über 65 %. Mit den oben beschriebenen Maßnahmen der Laststeigerung und Reduzierung der Überschussenergie unter 2% wurde eine Performance Ratio (PR) für Szenario 1 von über 69 % erreicht.

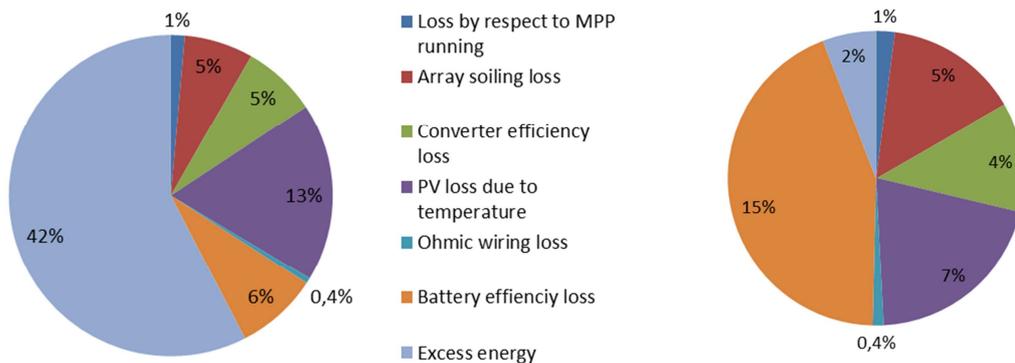


Abbildung 19 – Linkes Diagramm: Verluste des Energiesystems bei Beginn des Forschungsprojektes; rechtes Diagramm: Verluste des Energiesystems nach Optimierung im Rahmen des AiF-Forschungsprojektes

Zurückzuführen ist das vor allem auf die Reduzierung der Überschussenergie durch DSM Maßnahmen, aber auch durch die freie Hinterlüftung der Module in Prototyp 2 (siehe Abschlussbericht der Graft GmbH). Die höheren Batterieverluste im rechten Graphen beruhen unter anderem auf einer anderen eingesetzten Batterie, aber auch auf einem anderen Batteriemodell. Darüber hinaus ist wegen des DSM in Szenario 2 eine Steigerung um 2% und in Szenario 3 um 7% möglich, da die Hauptlast in die Tagesstunden geschoben wird ohne in der Batterie zwischengespeichert zu werden. Szenario 4 wiederum hat eine PR die gegenüber Szenario 3 um 2% geringer ist, da in dem Wasseraufbereitungssystem Komponenten rund um die Uhr versorgt werden müssen, damit das Wasser stets Trinkwasserqualität behält [12].

2.3.6 Wirtschaftliche Betrachtung

In diesem Abschnitt wurden mithilfe einer MATLAB-Simulation die Energiegestehungskosten des Solarkiosks an verschiedenen Standorten untersucht. Ziel war es, für verschiedene Kioskvarianten an verschiedenen Standorten optimale Systemkonfigurationen zu ermitteln und die spezifischen Einflussfaktoren auf die Energiekosten zu untersuchen. Die Energiegestehungskosten wurden nach der Formel der levelized cost of electricity (LCOE) berechnet.

$$LCOE = \frac{capex \cdot crf + opex}{E_{cons}} \quad (2.3)$$

$$crf = \frac{WACC \cdot (1+WACC)^n}{(1+WACC)^n - 1} \quad (2.4)$$

- capex.. capital expenditures (dt. Investitionskosten)
- crf.. capital recovery factor (dt. Kapitalrückflussfaktor)
- opex.. operation and maintenance expenditures (dt. Betriebsführungskosten)
- E_{cons}.. annual consumed energy (dt. Jahresenergiebedarf)
- WACC.. weighted average costs of capital (dt. Kapitalkostensatz)
- n..lifetime (Lebensdauer)

So konnten zum Beispiel Mindesteinnahmen für Energiedienstleistungen ermittelt werden. Die Kioskvarianten sollten dabei sowohl in der Leistungsgröße variieren als auch unterschiedliche Tagesverläufe abbilden. In einem weiteren Schritt sollten für eine der Varianten Weltkarten erstellt werden, um das Potential des Solarkiosks auch im Vergleich zu dieselbasierten Energiekosten in einem globalen Kontext zu erfassen und darzustellen.

Standortspezifische Berechnung der LCOE für verschiedene Varianten

Es wurden fünf verschiedene Standorte in Afrika mit jeweils fünf verschiedenen Lastkurven in Abhängigkeit des Geschäftsmodells untersucht. Der Lastgang der Kühltruhe wurde für jeden Standort in Abhängigkeit der Befüllung, der Außentemperatur und der eingestellten Solltemperatur extra berechnet und den Lastgängen in Abbildung 20 hinzuaddiert.



Abbildung 21 – Standorte der Wirtschaftlichkeitsanalyse

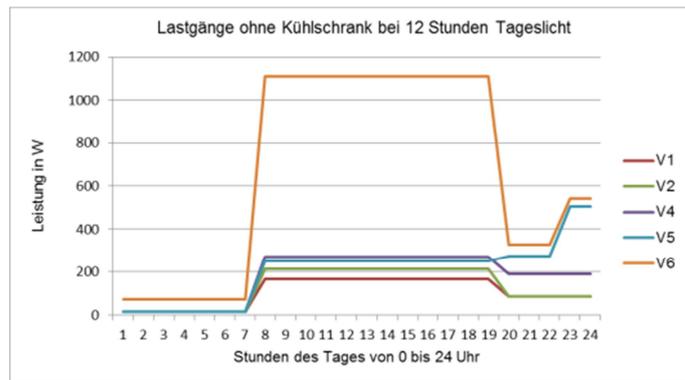


Abbildung 20 – Lastkurvenvarianten der standortbezogenen Wirtschaftlichkeitsanalyse

Im Folgenden wird kurz auf die verschiedenen Varianten der Lastgänge und damit einhergehende Geschäftsmodelle eingegangen:

Variante 1: Laden und Kühlen (V1) (Standardgeschäftsmodell)

Bei dieser Variante handelt es sich um den kleinsten Kiosk. Vorgesehen ist neben der Grundausstattung (Kühlschrank und interne Lasten) ausschließlich die Möglichkeit Lampen und Mobiltelefone zu laden. Dieser Kiosk eignet sich für geringe Energiebedürfnisse.

Variante 2: Laden und Kühlen + kleine Wechselstromanwendungen (V2)

Dieser Kiosk ähnelt Variante 1. Hier besteht aber außerdem die Möglichkeit geringe Mengen Wechselstrom zu nutzen und so zusätzliche Dienstleistungen, wie zum Beispiel Haare schneiden, anzubieten.

(Variante 3: Laden und Kühlen mit intelligenter Kühltruhe)

Diese Variante entspricht Variante 1, nur dass die Kühltruhe als Energiesenke verwendet wird (siehe 2.3.5 Abschnitt 3). Das Demand Side Management der Kühltruhe wurde nicht in MATLAB integriert, da sie technisch noch nicht umgesetzt wurde und den Zeitrahmen des Projektes gesprengt hätte. Sie führt aber prinzipiell zu etwas niedrigeren LCOE als für Variante 1

Variante 4: Laden und Kühlen + Internetcafé (V4)

Auch Variante 4 stellt eine Erweiterung des Standardkiosks „Laden und Kühlen“ dar. Hier steht zusätzlich ein Kombigerät zum Drucken und Faxen bereit sowie 3 Notebooks, die zur Nutzung des Internets zur Verfügung stehen. Im Gegensatz zu Variante 2 ist nicht nur der Leistungs- und Energiebedarf am Tag größer sondern auch in den Abendstunden, da von einer erhöhten Nachfrage für Internetnutzung nach Sonnenuntergang ausgegangen wird.

Variante 5: Multimediakiosk (V5)

Auch Variante 5 bietet die Möglichkeiten eines Internetcafés mit Notebooks und Kombigerät. Außerdem hat dieser Kiosk ein Fernsehgerät sowie einen Beamer. Es können Nachrichten gezeigt werden, Filme oder andere Sendungen. So wird dieser Kiosk auch zu einem kulturellen Treffpunkt. Da hier bereits von einem gewissen Elektrifizierungsgrad der Bevölkerung ausgegangen werden sollte, entfällt bei dieser Variante das Laden von Lampen und Mobiltelefonen. Dadurch sinkt der Energiebedarf am Tage leicht, nimmt aber in den Abendstunden aufgrund der Nutzung von TV und Beamer stärker zu.

Variante 6: Multimedia- und Werbekiosk (V6)

Bei Variante 6 handelt es sich um eine Erweiterung des Multimediakiosks um ein LED-Display zur Außenwerbung oder alternativ einen anderer Großverbraucher. Dieses führt zu einem stark erhöhten Energiebedarf, könnte aber eine zuverlässige Einnahmequelle für den Kioskbetreiber darstellen.

Für alle Varianten gilt: Geladen werden Lampen und Mobiltelefone während der Öffnungszeiten und nur bei Tageslicht. Die Lastkurven werden in 5°-Schritten im Bereich von 37,5° Süd bis 37,5° Nord an den lokalen Sonnenauf- und untergang angepasst. Der Kiosk hat täglich von 7 bis 24 Uhr geöffnet. Das DSM durch Lastverschiebung, dass in Kapitel 2.3.5 Abschnitt 2 vorgestellt ist, wurde also für alle Varianten berücksichtigt. Durch das Verfeinern der DSM-Methoden (siehe V3) ist sogar prinzipiell noch eine weitere Senkungen der LCOE möglich.

Für jeden Standort und jede Lastkurve wurde die wirtschaftlich optimale Systemkonfiguration sowie die Energiegestehungskosten unterteilt in Investitionskosten, Personalkosten und energiebezogene Kosten ermittelt. Darüber hinaus wurde für jede der 25 Varianten je eine Variante mit und ohne die Möglichkeit der Windkraftnutzung einbezogen. Weiter wurden eine Sensitivitätsanalyse der Kosten und eine zeitlich aufgelöste Darstellung von Überschuss- und Ausfallenergie durchgeführt.

Die genaue Kostenaufstellung befindet sich im Anhang in Tabelle 5. Es ist festzustellen, dass die Energiegestehungskosten bei gekoppelten PV und Wind Systemen in der Leistungsklasse in der sich der SOLARKIOSK bewegt sich in keiner sinnvollen Höhe darstellen lassen, obwohl solche Systeme prinzipiell zu gleichmäßigeren Energieerzeugungen tendieren [1]. Das lässt sich auf den hohen Anschaffungspreis von Kleinwindanlagen zurückführen, in diesen, für die Windindustrie, kleinen Leistungsklassen. Die Wirtschaftlichkeit von PV-Systemen ist in dieser Leistungsklasse derer von Kleinwindanlagen signifikant überlegen und eine Konsequenz der sehr hohen Modularität von PV-Systemen, da auch verhältnismäßig kleine Anlagen, wie für den off-grid SOLARKIOSK benötigt, vollumfänglich an den drastischen Kostensenkungen der netzgekoppelten PV-Anlagen der vergangenen Jahre partizipieren können.

Weltweite Berechnung der LCOE für Varianten 1 (Standardgeschäftsmodell)

Es wird angenommen, dass die Alternative, um in nicht elektrifizierten Gebieten Strom zu erzeugen, meistens ein Dieselgenerator ist. Deshalb werden die energiebezogenen Kosten des SOLARKIOSKs an jedem Standort mit denen eines Dieselgenerators verglichen. Die LCOE von Dieselgeneratoren hängen maßgeblich von den Rohstoffkosten ab. Um standortaufgelöste Dieselpreise zu berechnen wurden nationale Dieselpreise bestimmt und zusätzlich um einen Faktor erweitert, der die Transportkosten zum Einsatzort berücksichtigt [13]. Das Ergebnis zeigt Abbildung 22. Dargestellt ist der Kostenvorteil, den der Solarkiosk gegenüber der Dieselerzeugung erreicht.

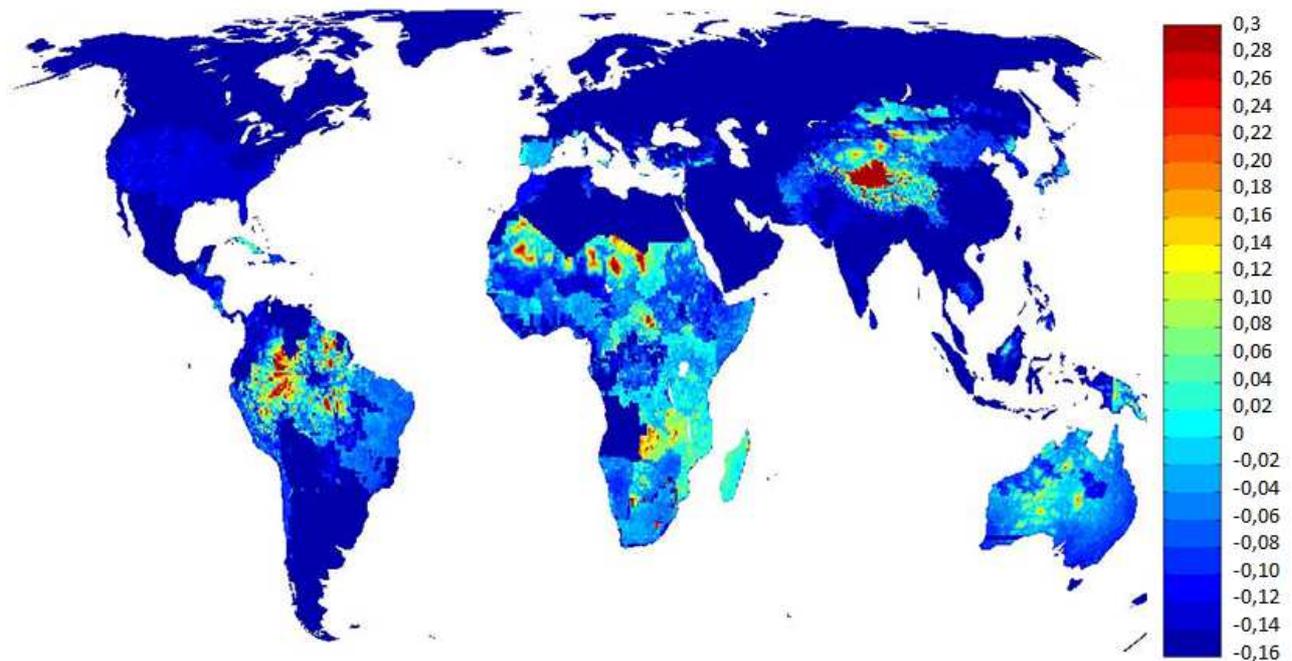


Abbildung 22 - Kostenvorteil Solarkiosk gegenüber. Dieselerzeugung in €/ kWh weltweit

Große Einsparungen lassen sich besonders in abgelegenen Gebieten erreichen. Auffällig sind beispielsweise der Himalaya und das Amazonasgebiet. Der aufwändige Dieseltransport führt an solchen Orten zu hohen Diesel-Energiegestehungskosten und damit zu großen Einsparpotentialen. In ölfördernden Ländern wie Saudi-Arabien, Algerien oder Angola ist ein Solarsystem dagegen nicht wettbewerbsfähig. In weiten Teilen Afrikas lässt sich ein Kostenvorteil oder ein nur geringer Kostennachteil des Solarkiosk gegenüber einem Dieselgenerator feststellen. Berücksichtigt man, dass die Dieselpreise auf Daten von 2010 beruhen und tendenziell in den letzten Jahren gestiegen sind während die Kosten für PV-Komponenten zurückgingen, so sind zunehmend auch die Gebiete interessant, in denen die Solarkioskenergie nach den zugrunde liegenden Berechnungen geringfügig teurer ist, als dieselbasiert erzeugte Energie.

2.4 Optimierung des Systemaufbaus

Feldtests in Äthiopien am Prototypen 1 haben nach einer 79-tägigen Messkampagne ergeben, dass nur 0,36% der Last am Solarkiosk Wechselstromlasten waren. Dies rechtfertigt den hohen Aufwand eines kombinierten AC/DC-Systems nicht. Daraufhin wurde ein System entwickelt, dessen Vorteil die hohen Wirkungsgrade auf der DC-Seite sind und das wesentlich günstiger, als das System in Prototyp 1 ist. Ein weiterer Vorteil ist die bessere Verträglichkeit der Leistungselektronik bei hohen Temperaturen (das Derating setzt erst bei über 72°C ein). Darüber hinaus sind die Komponenten wesentlich platzsparender. Bei Bedarf kann, wie in Abschnitt 3 kurz erwähnt, eine AC-Erweiterung wie in Prototyp 1 erfolgen. Um die höhere Temperaturverträglichkeit zu demonstrieren, wurde nach den Versuchen mit den verschiedenen Wand- und Fußbodenaufbauten in der Klimakammer der HTW in der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Bunte die Kombination Lehmwand und Kiesboden ausgewählt. Als simulierter Standort wurde derselbe verwendet, wie bei den Versuchen zur Ermittlung der besten Fußboden/ Wand Kombination. Da es sich um einen der wärmsten Standorte in Afrika handelt und sich deswegen sehr gut für eine „worst case“ Betrachtung eignet. Im Folgenden ist der Temperaturverlauf für den Versuchsaufbau dargestellt. Für diesen Versuch wurde ein PV- Simulator verwendet, der die

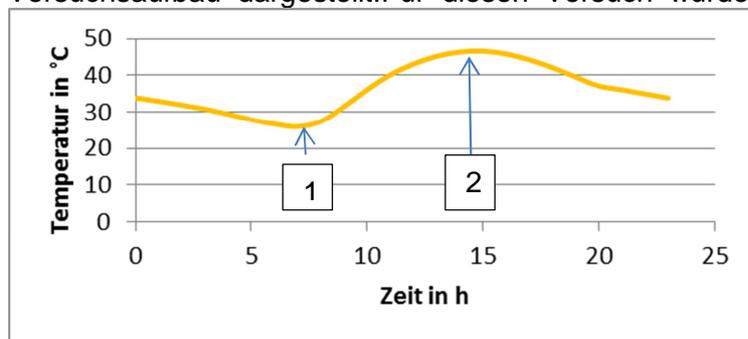


Abbildung 23 – Temperaturverlauf des heißesten Tages des Jahres in Kedougou im Senegal

genaue Einstrahlung an diesem Standort an diesem ausgewählten Tag in Kedougou berechnet und der Leistungselektronik übergibt und die vom RLI ausgerechnete Last als elektrische Last verarbeitet (siehe Abschlussbericht HTW Arbeitsgruppe Prof. Bunte). Es wird also von einer realistischen Auslastung der Leistungselektronik ausgegangen. In

Abbildung 24 ist der Zeitpunkt der Aufnahmen der beiden Thermographiebilder vermerkt. Zum

Zeitpunkt 1, also während der kalten Stunden vor Sonnenaufgang, sind die niedrigsten Temperaturen zu erwarten. Während Zeitpunkt 2 sind die höchsten Temperaturen zu erwarten.

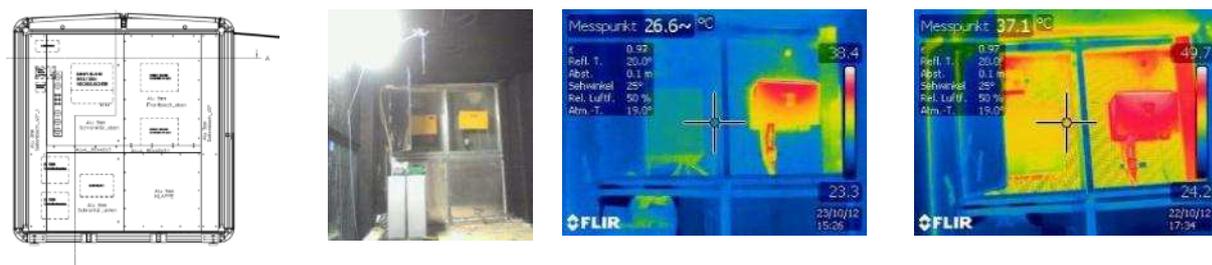


Abbildung 24 – Versuchsreihe zur Bestimmung der Gerätetemperatur des Prototypen 1 in Kedougou

Der Versuchsreihe für den Prototypen 1 lässt sich entnehmen, dass während der kritischen Stunden die Gehäusetemperatur auf ca. 50°C steigt. Obwohl das Derating (also die Abregelung der Leistungselektronik) des Ladereglers erst bei 70°C einsetzt, kann es aufgrund der höheren Temperaturen in dem Gerät bereits eintreten. Beachtet man, dass der Wechselrichter schon bei 45°C anfängt abzuregulieren, sollte man bei einer AC-Variante des Prototypen ein besonderes Augenmerk auf die Kühlung legen (siehe Abschlussbericht Graft GmbH).

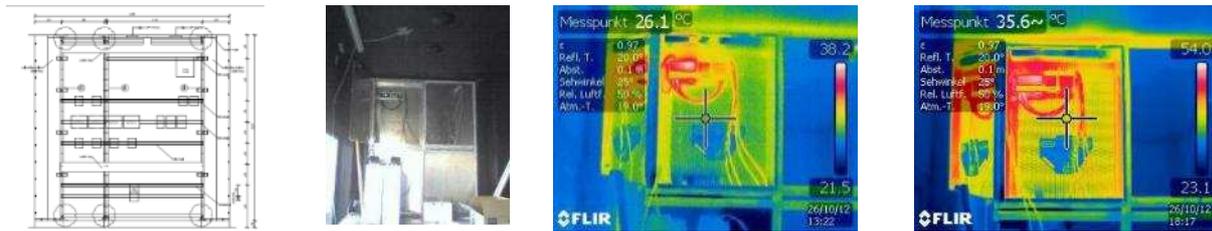


Abbildung 25 – Versuchsreihe zur Bestimmung der Gerätetemperatur des Prototypen 2 in Kedougou

Mit der Leistungselektronik, die im Prototypen 2 verbaut ist, sind weniger Probleme zu erwarten. Am kritischen Zeitpunkt (Messpunkt 2) sind die Gehäusetemperaturen knapp über 50°C. Das Derating beginnt bei 72°C. Da kein Einsatz von AC-Komponenten vorgesehen ist, ist erst einmal keine zusätzliche forcierte Kühlung notwendig. Es werden keine Verluste durch Derating entstehen.

Die folgende Abbildung zeigt den einpoligen Stromlaufplan des Energiesystems des Prototypen 2.

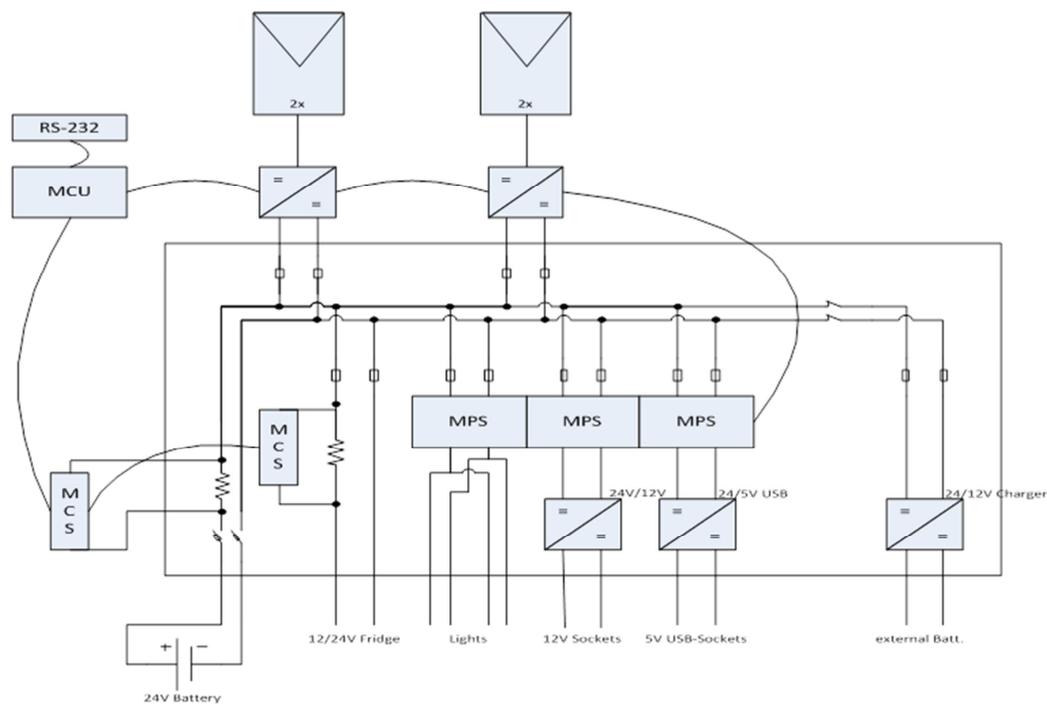


Abbildung 26 – Einpoliger Stromlaufplan des Prototypen 2

2.5 Komponentenauswahl im Hinblick auf eine Serienfertigung

Alle Ergebnisse aus den Recherchen, Studien, Messungen und der Felderfahrung wurden in Bauteilkatalogen für den Prototypen 1 und den Prototypen 2 aufgenommen. Die Ergebnisse wurden der SOLARKIOSK GmbH zu Verfügung gestellt. Ein kurzer Ausschnitt des Bauteilkataloges für den Prototypen 2 befindet sich im Anhang in Tabelle 6.

3 Arbeitspaket 2: Modulare Erweiterung und Kopplung des Energiesystems

Um das System simpel und flexibel zu gestalten wurden verschiedene Baugruppen definiert, um eine spätere Erweiterung und Anpassung zu vereinfachen. Die Zusammenfassung von Einzelbauteilen zu Baugruppen vereinfacht die Handhabung und ermöglicht eine Standardisierung. So wurde für jede Baugruppe eine detaillierte, bebilderte Bauanleitung angefertigt, was dem örtlichen Installateur die Arbeit erheblich erleichtert. Nachfolgende Baugruppen wurden ausführlich mit Stücklisten und Blockschaltbildern dokumentiert.

- Monitoring
- PV-DC
- PV-AC
- PV-Modulerweiterung
- Batterie
- Batteriebank-Erweiterung-1
- Batteriesicherung (Bat-fuse)
- DC-Verteilung-gesteuert
- DC-Verteilung-ungesteuert
- DC-Verteilung-Erweiterung
- AC-Verteilung
- Relaissteuerung
- 12V-Versorgung
- 5V-Versorgung
- Kühlschrank

Im Folgenden wird kurz auf das Grundsystem und die wichtigsten Erweiterungsschritte eingegangen.

Grundsystem

In der Grundform wird ein möglichst einfaches, günstiges und doch flexibel erweiterbares 12V-DC-System aufgebaut. Es wurde darauf geachtet, dass alle zu Beginn eingebauten Komponenten sowohl bei einem 12 V, als auch bei einem 24 V Spannungslevel funktionsfähig sind und die Laderegler bei beiden Spannungen die volle Leistungskapazität nutzen. Die PV-Module und Laderegler wurden so auswählen, dass die Module zweier Laderegler sinnvoll auf einen Laderegler verdichtet werden können. Deswegen wurden anfangs gleiche Modultypen und –leistungen pro Laderegler eingeplant, wobei bei einer Erweiterung immer zwei gleiche Laderegler verbaut werden sollten, damit die Einzelsysteme gleich sind. Im Fall einer Erweiterung kann der Umbau dann mit wenigen, schnellen Handgriffen erfolgen. Komponenten die bei Erweiterungen nicht verändert werden:

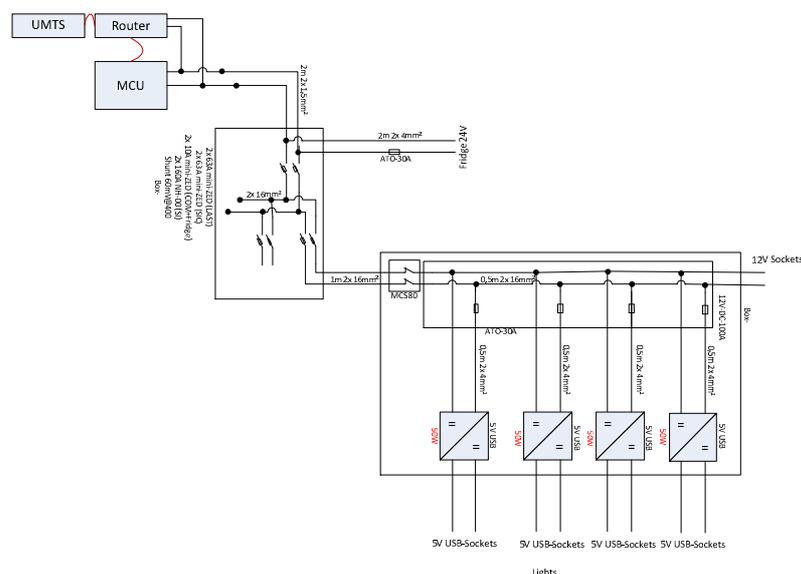


Abbildung 27 - Einpoliger Stromlaufplan des Grundsystems des Prototypen 2

Der Aufbau nach Abbildung 28(exklusive der Batterien) kann recht beliebig erweitert werden. In den normalen Fällen wird einfach ein weiterer Laderegler mit Modulen zugeschaltet, so kann das System in 420W Schritten erweitert werden. Die Batterie wird nur unter bestimmten Bedingungen erweitert, z.B. wenn die Kapazität erweitert werden sollte, oder die Spannung erhöht wird. Im Falle einer Spannungserhöhung muss wie im folgenden Punkt vorgegangen werden.

24V DC-Erweiterung

Bei einer Systemspannungserhöhung von 12V auf 24V muss die Batteriespannung und kann die Ladereglerleistung angepasst werden. Um aus der 12 V Batteriebank eine 24 V Batteriebank zu machen wird die Parallelschaltung der Batteriebank aufgespaltet und in Reihe geschaltet, so wie in Abbildung 28 dargestellt.

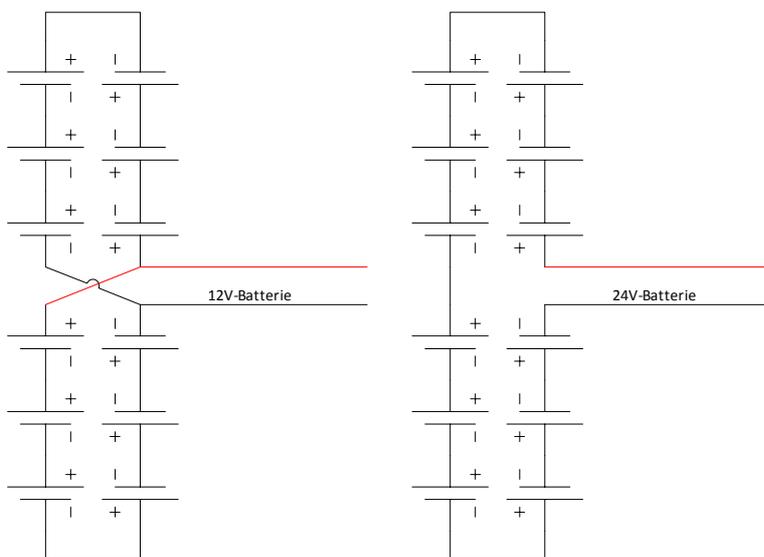


Abbildung 28 – Schema zur Erweiterung der Batteriebank von 12 V auf 24 V

Durch die Art der Schaltung der Laderegler, kann man diese nun mit der zweifachen Modulleistung belegen. Hierzu werden zwei Y-Kupplungen an den Modulen angebracht. In der folgenden Abbildung ist die nötige Änderung der Verschaltung bei einem MPPT-Regler gezeigt.

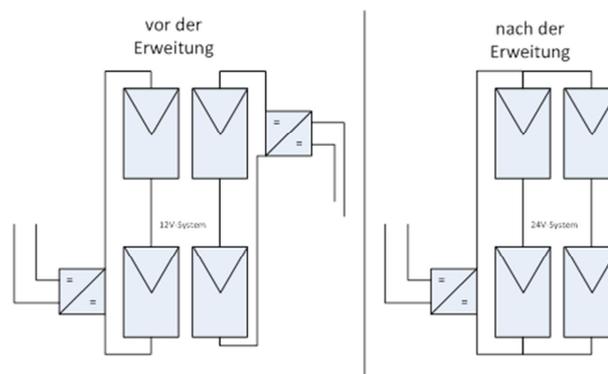


Abbildung 29 - Schema zur Erweiterung des Ladereglers von 12 V auf 24 V

So kann man abermals 4 Module auf eine neue Fläche bringen und erweitert so die Leistung des Systems um 100%. Um auch weiterhin vorhandene 12V-Verbraucher versorgen zu können, werden zusätzlich noch eine Verteilung und ein 24V/12V-DC/DC-Wandler benötigt.

Batteriebankerweiterung

Wenn die Batteriekapazität erweitert werden soll, muss bedacht werden, dass die neueren Batterien nicht direkt mit den schon genutzten Batterien parallel geschlossen werden sollten. Um dennoch eine Erweiterbarkeit anbieten zu können, muss ein Batteriesplitter installiert werden, welcher die Lastflüsse an die Batterien und den SOC anpasst. In der folgenden sind mögliche Verschaltungen aufgeführt.

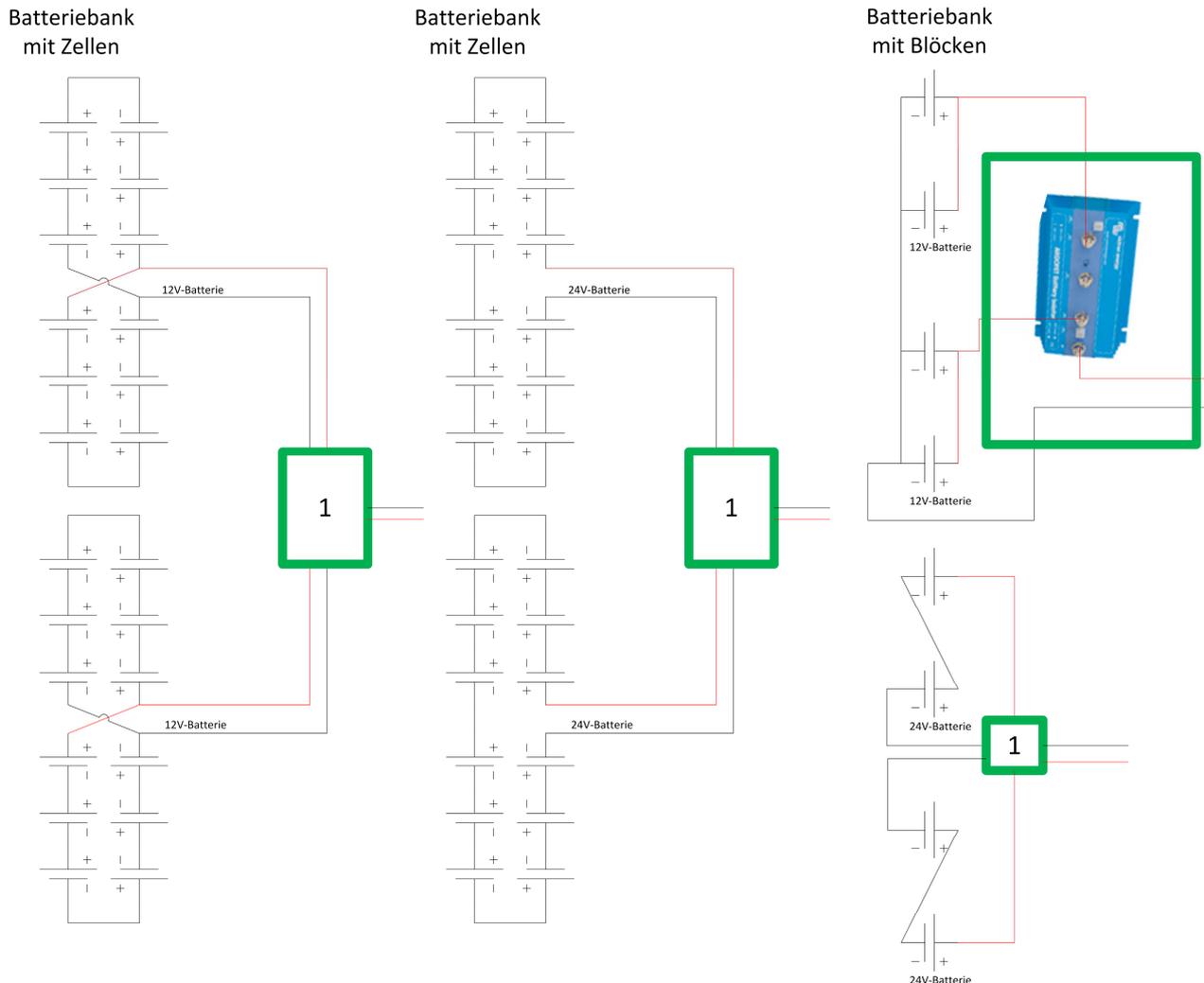


Abbildung 30 - Schema zur Erweiterung der Batteriebank von 12 V auf 24 V und um zusätzliche Batterien

4 Arbeitspaket 3: Angepasstes Monitoring-Konzept

Die Steuerung der Lasten wurde nicht, wie im Projektantrag angedacht, über Funk realisiert, sondern kabelgebunden, wie man in Abschnitt Minimierung der Überschussenergie durch intelligentes Lastmanagement 2.3.5 nachlesen kann. Es wurde ein Monitoring-system implementiert, das alle geforderten Daten zur Wettererfassung und zu den Daten der elektrischen Komponenten erfasst. Einen Auszug der gemessenen Werte, die Position der Sensoren und die Messergeräte kann man Abbildung 31 und Abbildung 32 entnehmen.

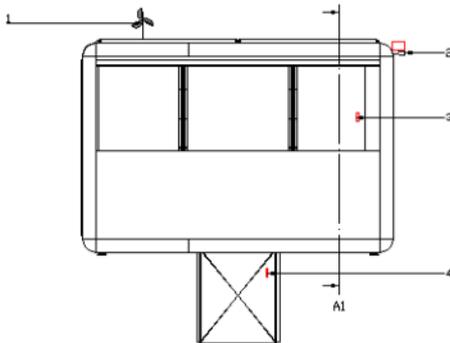


Abbildung 31 – Position der Wettersensoren und Temperaturfühler

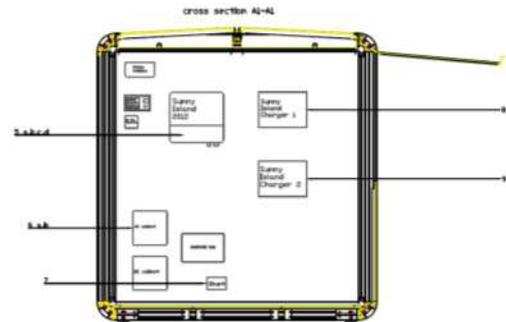


Abbildung 32 - Position der Sensoren in den Geräten des Energiesystems

Tabelle 2 – Messgrößen und Einheiten des Monitorings (Auswahl)

Nr.	Messgröße	Einheit	Nr.	Messgröße	Einheit
1	Windgeschwindigkeit	m/s	5	Batteriekennwerte	-
2	Einstrahlung	W/m ² \int	6	AC Verbrauch	kWh
3	Kioskinnentemperatur	°C	7	Entlade-/Ladestrom der Bat.	A
4	Batterietemperatur	°C	8	Erzeugte Energie SIC 1	kW h
5			9	Erzeugte Energie SIC 1	kWh

Alle Messdaten werden fernausgelesen und sind jederzeit auf einen Webportal abrufbar. Darüber hinaus werden die Daten per FTP-Push an den Server der SOLARKIOSK GmbH geschickt, so dass diese weiterverarbeitet und interpretiert werden können. So kann man zum Beispiel im 5 min Takt die Lade- und Entladeströme der Batterie messen, wie man in Abbildung 33 sehen kann. Die dargestellten Daten wurden von dem Monitoringsystem am Prototypen 1 am Lake Langano in Äthiopien am 06.12.2012 aufgenommen. Der blaue Graph stellt die Stromstärke am Ladereglerausgang dar, während der rote Graph die Lade- und Entladeströme der Batterie darstellt (positive Werte stehen für Entladen und negative für Laden der Batterie).



Abbildung 33 – Tagesverlauf der Lade- und Entladeströme des Prototypen am Lake Langano, Äthiopien

Weiter werden von dem Monitoringsystem Fehlermeldungen und Handlungsempfehlungen per Email verschickt, wenn z.B. der SOC der Batterie einen kritischen Wert annimmt. Die Verfügbarkeit des Gesamtsystems liegt über 99 % und damit ebenfalls über der Anforderung von 95 %. Trotzdem wurde vom RLI ein weiterführendes Monitoring- und Regelkonzept entworfen, das es der SOLARKIOSK GmbH möglich machen soll in Zukunft eine eigene Hardwareentwicklung anzustoßen und das Monitoringsystem noch stärker auf die einen Bedürfnisse anpassen lässt.

5 Verwertung der Ergebnisse der FuE-Kooperation

Die Verwertung der Ergebnisse geschieht unmittelbar in der extra für diesen Zweck gegründeten SOLARKIOSK GmbH [14]. Das Unternehmen muss sich nun erfolgreich am Markt behaupten. Da gerade das Demand Side Management, dessen Entwicklung auf den Ergebnissen des RLI beruht, das Produkt wirtschaftlicher als seine Konkurrenten macht, werden dem Produkt gute Zukunftsaussichten gegeben. Die Zusammenarbeit führte sogar soweit, dass mit Herrn Caspar Wiik nach seinem Ausscheiden aus dem Projekt am 31.10.2012 ein Know-how Träger des Projekts von der RLI gGmbH zur SOALRKIOSK GmbH gewechselt hat und dort für die Implementierung des Produktes zuständig ist. Aus wissenschaftlicher Sicht war das Projekt ebenfalls ein Erfolg: das Projekt wurde auf zwei Konferenzen vorgestellt, nämlich der „7th International Renewable Energy Storage Conference and Exhibition“ [12] und der „5th International Conference on Integration of Renewable and Distributed Energy Resources“ [15] und wird voraussichtlich in zwei weiteren Konferenzen vorgestellt werden. Außerdem wurden im Rahmen des Projekts zwei Abschlussarbeiten von Miro Wolff (Abgabe voraussichtlich März 2013) und von Felix Schnorr (Abgabe Dezember 2012) [6] durchgeführt.

6 Form der gemeinsamen zukünftigen Verwertung

Wir sind mit allen Projektpartnern, insbesondere der Graft GmbH und der SOLARKIOSK GmbH auch weiterhin in regem Kontakt, um das Produkt weiter zu verbessern und technische Unterstützung zu leisten. Wir gehen davon aus, dass die SOLARKIOSK GmbH das RLI für Marktanalysen beauftragt, da wir als Forschungsinstitut über Wetterdatenbanken und Know-how in der Modellierung des SOLARKIOSKs zum Beispiel in der Programmiersprache INSEL und MATLAB verfügen die sich nicht einfach ersetzen lassen. Darüber hinaus können weitere Abschlussarbeiten zu einzelnen Teilbereichen des SOLARKIOSKs betreut werden. Konkret wäre zum Beispiel eine intelligente Ansteuerung der verwendeten Kühltruhe von großem Interesse, um die Kostensenkungspotenziale des Energiesystems auszuschöpfen.

7 Quellen

- [1] A.-K. Gerlach, D. Stetter, J. Schmid, and C. Breyer, “PV and Wind Power - Complementary Technologies,” *Proc. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. 2011.
- [2] J. Schumacher, “Integrated Simulation Environment Language, INSEL 8.1.” doppelintegral GmbH.
- [3] J. Schumacher, “Digitale Simulation regenerativer elektrischer Energieversorgungssysteme,” PhD Thesis, Oldenburg, 1991.
- [4] V. Quaschnig, *Understanding Renewable Energy Systems*, 1st ed. Earthscan London, 2005, p. 290.
- [5] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V., *Leitfaden Photovoltaische Anlagen*. Deutsche Gesellschaft für Solarenergie e.V., 2010.
- [6] F. Schnorr, “Beschreibung eines Solarkiosks durch eine modulare Simulationsumgebung,” HTW Berlin, 2012.
- [7] A. Wagner, *Photovoltaik Engineering – Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung*, 3. Auflage. Springer-Verlag, 2010.
- [8] S. R. Wenham, M. A. Green, M. E. Watt, and R. Corkish, *applied photovoltaics*, Second edi. Earthscan London, 2010.
- [9] R. E. Cabanillas and H. Munguía, “Dust accumulation effect on efficiency of Si photovoltaic modules,” *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 3, no. 4, p. 043114, 2011.
- [10] M. Hankins, *Stand-alone solar electric systems*, First edit. Earthscan London, 2010.
- [11] P. Otter and F. Benz, “Sun meets Water,” *Sonnenenergie*, vol. 4, pp. 37–39, 2011.
- [12] M. Resch, M. Wolff, C. Wiik, F. Schnorr, and C. Breyer, “Demand Side and Battery Management in Solarkiosks – Simulation and Operating Experience,” in *7th International Renewable Energy Storage Conference and Exhibition*, 2012, pp. 1–7.
- [13] C. Breyer, E. Gaudchau, A.-K. Gerlach, M. Hlusiak, C. Cader, P. Bertheau, and V. Wasgindt, “PV-based Mini-Grids for Electrification in Developing Countries,” 2012.
- [14] “SOLARKIOSK GmbH.” [Online]. Available: www.solarkiosk.eu.
- [15] M. Resch, M. Wolff, C. Wiik, F. Schnorr, and C. Breyer, “Demand side and Battery management in SOLARKIOSKS – simulation and operating experience,” in *5th International Conference on Integration of Renewable and Distributed Energy Resources*, 2012, pp. 1–7.

8 Anhang

Tabelle 3 – Verbraucher des Prototypen 1 und 2; wichtigste Parameter

Art	Verbraucher	n	Leistung in W	Ein- bzw. Ausschaltbedingung	Dauer in h	benötigte Energie
intern	LED-Streifen	4	12	Einstrahlung > 20 W/m ² und SOC	var.	var.
	LED-Strahler	2	2,5	Einstrahlung > 20 W/m ² und SOC	var.	var.
	Radio	1	40	SOC	während Öffnungszeit	680 Wh/d
	Netbook	1	40	Einstrahlung > 0 W/m ² und SOC	var.	var.
			2	SOC und Einstrahlung = 0 W/m ²	var.	var.
Kühltruhe	1	siehe Kapitel 2.2				
extern	(Auto) Batterie	/	16	Einstrahlung > 0 W/m ² und SOC	5	65 Wh/Ladung
	Sandaya Ultimium 200	/	4,6	Einstrahlung > 0 W/m ² und SOC	5	28 Wh/Ladung
	Fosera PSHS4200	/	7	Einstrahlung > 0 W/m ² und SOC	6	38,1 Wh/ Ladung
	Phocos Pico	/	10	Einstrahlung > 0 W/m ² und SOC	1,7-3,0	15 Wh/ Ladung
	Handys	/	3,6	Einstrahlung > 0 W/m ² und SOC	2	10 Wh/ Ladung

Tabelle 4 – Leitungslängen und Leitungsverlust

Bauteil zu Bauteil	Strom	geschätzte Länge	Leitungsquerschnitt	Leitungsverlust in Addis Abeba
Solarmodul - Laderegler	8,4 A	4 m	4,0 mm ²	0,3 %
BatFuse - Laderegler	21,2 A	3 m	16,0 mm ²	0,4 %
BatFuse - Batterie	42,5 A	3 m	35,0 mm ²	0,3 %
BatFuse - DC-Verteilung	41,7 A	1 m	16,0 mm ²	0,2 %
BatFuse - Komm-Verteilung	10,0 A	2 m	16,0 mm ²	0,2 %
Kühlschrank - Komm-Verteilung	4,2 A	4 m	4,0 mm ²	0,3 %
Kommunikation - Komm-Verteilung	5,0 A	2 m	2,5 mm ²	0,4 %
24/12V-DC/DC - DC-Verteilung	5,0 A	2 m	2,5 mm ²	0,4 %
24/12V-DC/DC - Verbraucher	10,0 A	1 m	4,0 mm ²	0,5 %
24/5V-DC/DC - DC-Verteilung	5,0 A	2 m	2,5 mm ²	0,4 %
24/5V-DC/DC - Verbraucher	20,0 A	0,5 m	4,0 mm ²	1,2 %
Gesamtverluste (arithmetisches Mittel)				0,32 %

Tabelle 5 – Übersicht der LCOE der verschiedenen Varianten (werden in Abschnitt 2.3.6 beschrieben) der standortbezogenen Varianten der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Auszug).

Variante 1		Variante 2		Variante 4		Variante 5		Variante 6	
Standort	Cent/ kWh	Standort	Cent/ kWh	Standort	Cent/ kWh	Standort	Cent/ kWh	Standort	Cent/ kWh
Kedougou	27,14	Garissa	30,56	Kedougou	29,57	Kedougou	29,89	Kedougou	26,34
Garissa	27,53	Lake Langano	33,08	Viljoenshof	31,17	Garissa	30,18	Garissa	26,42
Viljoenshof	30,03	Owe	35,04	Garissa	31,18	Viljoenshof	31,52	Lake Langano	26,86
Lake Langano	30,29	Kedougou	37,63	Owe	32,71	Owe	33,07	Viljoenshof	27,67
Owe	32,85	Viljoenshof	57,13	Lake Langano	33,80	Lake Langano	34,18	Owe	32,33
Owe Wind	109,31	Owe Wind	98,81	Viljoenshof Wind	71,02	Garissa Wind	68,76	Viljoenshof Wind	86,49

Tabelle 6 – Auszug des Bauteilkatalogs des Prototypen 2

No°	Baugruppe	Bauteil	Bauteilname	Hersteller	Chargen	Anzahl	Einheit	Einheit
1	DC-Solar	PV-Module	Suntech STP 245-20/Wd (lxbxh=1640×992×35 mm, 18,2 kg)	Suntech	2x2	4	Stk/Kiosk	Stk.
2	DC-Solar	PV-Stecker	PV Stecker	Hager	4x1	4	Stk/Kiosk	Stk.
3	DC-Solar	4mm ² -PV-Kabel	Solarkabel	Flex-Sol-XL; Kabelwerke Villinge; Soling	4x3	12	m/Kiosk	m
4	DC-Solar	4mm ² -Aderendhülsen	Klauke Aderendhülse 4mm ² / 10mm lang grau (100 Stück Packung)	Klauke	4x1	4	Stk/Kiosk	Stk.
5	DC-Solar	Laderegler	MPPT 100/30 (185 x 150 x 115 mm, 1,6 kg)	PHOCOS	2x1	2	Stk/Kiosk	Stk.
6	DC-Solar	16mm ² -Leitung	Aderleitung 16mm ² gelb – 100m	RS	4x1	4	m/Kiosk	m
7	DC-Solar	16mm ² -Aderendhülsen	Klauke Aderendhülse 16mm ² / 12mm lang	Klauke	2x2	4	Stk/Kiosk	Stk.
8	DC-Solar	Lasttrenner 2-Polig	5SG7133	Siemens	2x1	2	Stk/Kiosk	Stk.
9	DC-Solar	Neo-Zed-Sicherungen *(2 x 10 Stück Pack)	Siemens 5SE2316	Siemens	2x2	4	Stk/Kiosk	Stk.
10	DC-Solar	16mm ² -Aderendhülsen			2x2	4	Stk/Kiosk	Stk.
11	DC-Solar	16mm ² -Leitung			4x0,5	2	m/Kiosk	m