

Technische Hochschule Ingolstadt

Fakultät Maschinenbau
Studiengang „Technik erneuerbarer Energien“

Studienschwerpunkt „Solarenergie“

**Konzept für die solarautarke
Energieversorgung eines
Wohncontainers in der algerischen
Sahara**

Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering (B. Eng.)

vorgelegt von

Justus Noll

Erstprüfer(in): _____ *Prof. Dr.-Ing. Wilfried Zörner*

Zweitprüfer(in): _____ *Prof. Dr.-Ing. Tobias Schrag*

Ausgabetermin: *07.01.2015*
Abgabetermin: *23.01.2015*

Thema der Bachelorarbeit: Konzept für die solarautarke Energieversorgung eines Wohncontainers in der algerischen Sahara

Verfasser: Justus Noll

Abstract:

Die algerische Sahara ist Lagerstätte reicher Öl- und Gasvorkommen. Um in den abgelegenen Gebieten der Wüste die Rohstoffe fördern zu können, müssen mobile Wohncontainer als Unterkünfte für die Arbeiter aufgebaut werden. Die Container werden über ein temporäres Stromnetz verbunden und mit Energie versorgt. Mit dem Auf- und Abbau dieses Stromnetzes ist ein hoher zeitlicher und finanzieller Aufwand verbunden. Daher wird in der vorliegenden Arbeit ein Konzept für die solarautarke, netzunabhängige Energieversorgung eines Containers für zwei Bewohner entwickelt.

Der Energiebedarf für Warmwasser, Klimatisierung und elektrische Haushaltsgeräte muss gedeckt werden. Dazu werden verschiedene Technologien zur solaren Energiegewinnung beschrieben und auf ihre Tauglichkeit für den Zweck der Arbeit hin eingeschätzt. Aus diesen Technologien werden zwei Endsysteme konzipiert, welche in einer Computersimulation getestet werden.

Die Ergebnisse aus Berechnungen und Simulationen führen zu zwei Endkonzepten. Darin wird die Klimatisierung des Containers durch eine reversible Wärmepumpe gewährleistet. Die elektrische Energie wird durch eine Photovoltaikanlage inklusive eines Lithium Ionen Akkumulators bereitgestellt. Eine Thermosiphonanlage im einen Konzept und ein Elektroboiler im anderen übernehmen die Warmwasserversorgung.

The Algerian Sahara contains abundant deposits of oil and gas reserves. In order to extract these raw materials in the remote desert territories, mobile homes or trailers need to be built to house the workers. The mobile homes are connected to a temporary power grid, which supplies energy. However, the assembly and disassembly of these power grids is very costly and time intensive. Therefore, this bachelor thesis introduces and explains a novel concept for a solar-and power grid-independent energy source for a mobile home, which can house two workers.

To that end, the energy requirement for hot water, air-conditioning and small electrical appliances needs to be covered. Hence, different technologies for solar energy production will be described and evaluated regarding their efficiency and suitability for the proposed project. From all the technologies, two solar energy production systems will be chosen and designed, and subsequently will be tested in a computer simulation program.

The results of the calculations and simulations will serve as the foundation of two final concepts. Those concepts cover and ensure air-conditioning of the mobile home through a reversible heat pump. A photovoltaic system, which includes a lithium ion battery, provides the required electrical power. Finally, one of the employed concepts uses a thermo-syphon system to cover the hot water supply; the other concept uses an electric boiler.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	III
1. Einleitung	1
2. Ausgangssituation	2
2.1 Klimatische Bedingungen Algeriens	3
2.2 Aufbau des Wohncontainers	4
2.3 Verbraucherprofil	4
3. Teilkonzepte zur solarautarken Versorgung	6
3.1 Solare Trinkwasserbereitstellung	7
3.1.1 Solar-thermische Trinkwasserbereitstellung	7
3.1.2 Solar-elektrische Warmwasserbereitstellung	15
3.2 Stromerzeugung mittels Photovoltaik	17
3.2.1 Monokristalline Module	19
3.2.2 Polykristalline Module	20
3.2.3 Dünnschichtmodule	20
3.2.4 Wechselrichter	21
3.2.5 Elektrischer Energiespeicher	22
3.3 Solare Klimatisierung	24
3.3.1 Solare Heizung	25
3.3.2 Solare Kühlung	27
4. Gesamtkonzept zur solar-autarken Versorgung eines Wohncontainers	31
4.1 Vorauswahl	31
4.2 Simulation	32
4.2.1 Modell „nur Photovoltaik“	33
4.2.2 Modell „Photovoltaik und Thermosiphonanlage“	37
4.2.3 Simulationsergebnisse	39
4.3 Verwendete Komponenten	46
4.3.1 Komponenten der Photovoltaikanlage	47
4.3.2 Komponenten zur Warmwasserbereitung	49
4.3.3 Komponenten zur Klimatisierung	51
4.4 Technische Bewertung	53
4.5 Wirtschaftliche Bewertung	54
5. Ausblick und Schlussfolgerungen	57
6. Quellenverzeichnis	60

Selbständigkeitserklärung	x
---------------------------------	---

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: schematische Solaranlage (100000daecher).....	8
Abbildung 2: Schematischer Aufbau Flachkollektor (Hanus, 2009, S. 62)	10
Abbildung 3: schematischer Aufbau einer Thermosiphonanlage (iundm, 2014).....	11
Abbildung 4: Vakuumröhre im Schnitt (Hanus, 2009, S. 80)	13
Abbildung 5: Durchlauferhitzer (Baumarkt, 2014)	15
Abbildung 6: elektrischer Warmwasserspeicher (Baumarkt, 2014).....	17
Abbildung 7: schematischer Aufbau Inselanlage (heyde-windtechnik, 2014).....	21
Abbildung 8: Funktionsprinzip der reversiblen Wärmepumpe (oben Kühlbetrieb, unten Heizbetrieb) (sbz-online, 2014).....	30
Abbildung 9: elektrischer Energiebedarf Klimatisierung mit Nordfenstern	40
Abbildung 10: Umgebungs- und Raumtemperatur über das Jahr	41
Abbildung 11: Akkustand im Konzept „nur Photovoltaik“.....	42
Abbildung 12: Speichertemperaturen, 80 l Volumen, 1,5 kW Leistung	43
Abbildung 13: elektrischer Energiebedarf Klimatisierung mit Ostfenstern	44
Abbildung 14: Akkustand im Konzept „Photovoltaik und Thermosiphon“	45
Abbildung 15: Temperaturen an der Thermosiphonanlage	46
Abbildung 16: 3D Zeichnung für das Konzept "nur Photovoltaik"	47
Abbildung 17: 3D Zeichnung für das Konzept „Photovoltaik und Thermosiphon“	51
Abbildung 18: Innen- und Außeneinheit der Multisplitklimaanlage (mitsubishi-les, 2014).....	53
Abbildung 19: elektrischer Energiebedarf der Gesamtkonzepte	54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Tagesablauf eines Arbeiters der Ölindustrie	5
Tabelle 2: Kostenvergleich Lithium-Ionen Akku/Bleiakku	24
Tabelle 3: Kostenvergleich der Gesamtkonzepte	55
Tabelle 4: Kosten für die Energiebereitstellung mittels Dieselgenerator	56
Tabelle 5: monatlicher elektrischer Energiebedarf der Endkonzepte.....	60

1. Einleitung

Algerien ist das größte Land Afrikas und liegt im Nordwesten des Kontinents. Einen bedeutenden Teil des Landes nimmt mit fast 85 % die Wüste Sahara ein (transafrika, 2014). Nur im Norden an der Mittelmeerküste, geschützt durch das Atlasgebirge herrscht angenehmes, mediterranes Klima. Auf diesem schmalen Streifen lebt auch der Großteil der Bevölkerung. Hier sind die Industriestädte und auch die einzigen nutzbaren Böden für den Ackerbau zu finden. Man könnte meinen, dass deshalb auch die algerische Wirtschaft hauptsächlich in diesem Gebiet vorangetrieben wird. Doch die Basis dafür, dass Algerien zu den wirtschaftsstärksten Staaten der arabischen Welt gehört, befindet sich in der Wüste, größtenteils in der östlichen Sahara: große Ressourcen an Erdöl, Erdgas, Eisenerz, Blei und Kohle. So generiert die Öl- und Gaswirtschaft knapp 98 % der Exporteinnahmen und trägt, je nach Energiepreis, zwischen 30 und 46 % zum Bruttoinlandsprodukt bei. (bmwi, 2014)

Jedoch gibt es in der Nähe der Öl- und Gasquellen keine Städte, in denen die Arbeiter während der Nacht untergebracht werden könnten, welche tagsüber zur Betreuung der Öl- und Gasförderanlagen eingesetzt werden. Deshalb werden an jeder neuen Quelle mobile Wohncontainer aufgebaut. Diese sind unter anderem ausgerüstet mit Küche, Bad, Kühlschrank und Klimatisierung. Dabei erfolgt die Bereitstellung von Warmwasser, Wärme und Kälte üblicherweise durch Umwandlung elektrischer Energie. Die Wohncontainer werden dazu an ein temporäres Stromnetz angeschlossen. Der Aufwand für die elektrische Anbindung ist erheblich. Sie kostet Zeit und Geld, denn so lange die Container nicht angebunden sind, können die Arbeiter nicht einziehen und mit der Förderung beginnen. Im Anhang unter 6 ist ein Containerdorf mit dem Stromnetz zu sehen.

Ziel der Arbeit ist es ein Konzept zur solar-autarken Versorgung der mobilen Wohncontainer mit Strom, Wärme, Kälte und Warmwasser zu entwickeln.

Dadurch entfallen das temporäre Stromnetz und der damit verbundene Aufwand.

Die Vorgehensweise besteht darin, zunächst die Rahmenbedingungen zu analysieren. Dazu gehören die Geometrie und Beschaffenheit der Container, die Verbraucherprofile der Arbeiter, sowie die klimatischen Bedingungen in Algerien. Daraufhin wird untersucht, welche technischen Möglichkeiten sich bieten, um den Energiebedarf für die verschiedenen Bereiche (elektrische Geräte, Warmwasser, Klimatisierung) zu decken. Dabei soll sich zeigen welche Technologien für den Anwendungsfall der Arbeit am besten geeignet sind. Anschließend werden konkrete Komponenten zur Energiebereitstellung ausgewählt und beschrieben. Diese werden zu einem Gesamtkonzept zusammengefügt. Um die Systemkomponenten bezüglich ihrer Größe und Leistungsfähigkeit richtig auslegen zu können, werden im Rahmen der Arbeit verschiedene theoretische Berechnungen durchgeführt. In einer anschließenden Computersimulation wird das Gesamtkonzept in verschiedenen Variationen getestet und optimiert. Zum Schluss folgen technische und wirtschaftliche Bewertungen.

2. Ausgangssituation

Zunächst ist eine Analyse der Rahmenbedingungen notwendig. Dazu gehört zum einen die Recherche des Klimas in den Öl- und Gasförderregionen Algeriens. Daraus lässt sich abschätzen wie viel solare Energie zur Verfügung steht, aber auch wie groß der Bedarf an Energie für die Klimatisierung der Wohncontainer ist.

Danach muss die Beschaffenheit der Wohncontainer analysiert werden. Die Geometrie, die Art der Konstruktion und die Ausstattung bestimmen Energiebedarf und Verluste, sowie bautechnische Möglichkeiten. Als weiterer Faktor für den Energiebedarf werden Verbraucherprofile der Bewohner eines Containers untersucht.

2.1 Klimatische Bedingungen Algeriens

Algerien liegt in der subtropischen Klimazone im Nordwesten Afrikas. Im Norden grenzt es an das Mittelmeer. Dadurch herrscht hier mediterranes Klima mit trockenen, heißen Sommern und milden, feuchten Wintern. Dieses Klima ist jedoch nur auf einem schmalen Streifen anzutreffen, auf dem auch der Großteil der Bevölkerung lebt. Teils in größeren Städten wie Algier, Oran oder Annaba. Im Süden ist dieser Streifen durch das Atlasgebirge abgeschottet. Für die Hochplateaus des Gebirges sind ausgeprägte saisonale Temperaturschwankungen und wenig Niederschlag, meist in Form von Platzregen, charakteristisch. Auf der Südseite des Gebirgszuges beginnt mit dem Wüstenklima der Sahara wieder eine andere Klimazone, welche sich bis an die südliche algerische Grenze und darüber hinaus nach Mali und Niger erstreckt. Diese Klimazone muss genauer untersucht werden, weil sich hier die Öl- und Gasquellen und somit die angrenzenden Containerstädte für die Arbeiter befinden. Ganzjährig ist es hier tagsüber heiß und trocken bei Temperaturen bis über 50 °C. Durch die fehlende Wolkendecke kommt es jedoch zu extremen Tag - Nacht- Schwankungen von 20 °C und mehr. So können die Temperaturen im Winter nachts bis knapp an den Gefrierpunkt sinken. Für die Klimatisierung des Wohncontainers bedeutet dies Heizungsbedarf in kalten Nächten von November bis Februar, als auch hohen Kühlbedarf vor allem in den heißen Sommermonaten. (transafrika, 2014)

Als Referenzstandort für die Klimadaten wurde die zentral gelegene Oasenstadt In Salah ausgewählt. Dort herrscht extremes Wüstenklima mit Höchsttemperaturen über 45 °C. Auch nachts fallen die Temperaturen im Sommer kaum unter 30 °C. Die Bedingungen für den Betrieb von Solaranlagen sind aufgrund der hohen Sonneneinstrahlung von weit über 2000 kWh/(m²a) und der vielen Sonnenstunden sehr günstig. Allerdings liegt die algerische Sahara am nördlichen Wendekreis, wodurch die Sonne im Juli 11,4 h/d scheint, im Dezember nur 8,2 h/d im Schnitt. Über das ganze Jahr fallen gerade einmal 18 mm/m² Niederschlag. (wetterkontor, 2014) Im Sommer regnet es so gut wie gar nicht. Dadurch entfällt jedoch die natürliche Reinigung von Solarmodulen, welche in der Wüste Staub und Sand ausgesetzt sind. Zusätzlich kann das Kollektorglas durch Sandstürme

beschädigt und somit der Absorptionsgrad der Solarkollektoren verringert werden.

2.2 Aufbau des Wohncontainers

Der Wohncontainer, welcher solarautark ausgerüstet werden soll, dient zwei Personen als Unterkunft. Für die betrachteten Containerdörfer werden hauptsächlich Modelle des amerikanischen Herstellers *Telton Buildings* eingesetzt. Wegen der höheren Anzahl verfügbarer Konstruktionsparameter werden im Rahmen der Arbeit jedoch die Daten des deutschen Herstellers *CMS Container Systems GmbH* verwendet. Geometrie und Ausstattung sollen dabei erhalten bleiben. Der Container ist durch eine Trennwand in zwei identisch eingerichtete Bereiche unterteilt. In jedem Bereich befindet sich ein Wohnraum ausgestattet mit Bett, Tisch, Stuhl und Kühlschrank. Daneben für jeden Bereich ein separates Bad mit Dusche, Toilette und Waschbecken. Der Container ist 9 m lang, 3,1m breit und 2,6 m hoch. (cms, 2014) Beide Teilbereiche besitzen je ein Fenster und eine Haustür. Die Außenwände sind von außen nach innen aus Stahlblech, Polyurethanplatten zur Wärmedämmung und Spanplatten als inneren Abschluss aufgebaut. Im Anhang 1 sind weitere Daten zu Konstruktion und Materialien in tabellarischer Form, sowie ein Grundriss des Containers, zu finden.

2.3 Verbraucherprofil

Um den Energiebedarf eines Containers ermitteln zu können und danach die Komponenten zur Energieerzeugung auszulegen, müssen zunächst verschiedene Verbraucherprofile der beiden Personen in einem Wohncontainer erstellt werden. Die folgende Tabelle zeigt den Tagesablauf eines Arbeiters aus der Erdölindustrie, woraus später die Verbrauchsprofile entwickelt werden können. Ein Arbeitstrupp ist an afrikanischen Ölförderstätten meist 14 Tage ohne Unterbrechung im Einsatz bevor er für 14 Tage von einem anderen Trupp abgelöst wird. Dadurch ist der Container über das ganze Jahr bewohnt. Die Verbraucherprofile können ganzjährig konstant angenommen werden.

4:15-4:25	Aufstehen, Waschen/Zähneputzen/Duschen*
4:25-4:27	Fön
4:27-4:33	Ankleiden, Vorbereitung
4:33-4:45	Frühstück, Kaffee
4:45-5:00	Anfahrt zur Ölförderstätte
5:00-17:00	Arbeit (inkl. Pausen)
17:00-17:15	Heimweg
17:15-17:30	Duschen*/Umkleiden/Fön
17:30-18:00	Freizeit(Laptop, Radio, Handy)
18:00-18:30	Abendessen
18:30-20:00	Freizeit(Karten spielen, Laptop, Radio, Handy), Waschen
20:00-20:15	Zähneputzen/Umkleiden
20:15-4:15	Schlafen

*Für jeden Bewohner wird eine Dusche pro Tag entweder morgens oder abends angenommen

Tabelle 1: Tagesablauf eines Arbeiters der Ölindustrie

Dieser Tagesablauf kann je nach dem individuellen Nutzungsverhalten der Bewohner variieren. Er reicht jedoch im Rahmen dieser Arbeit als Grundlage für das elektrische Lastprofil der Haushaltsgeräte und für den Warmwasserverbrauch aus.

Das elektrische Lastprofil ergibt sich aus der Nutzung elektrischer Geräte im Container. Berücksichtigt werden Kühlschrank, Beleuchtung, Laptop, Fön, Handy und Radio. Morgens nach dem Aufstehen gibt es eine kleine Lastspitze. Tagsüber ist der Stromverbrauch der Haushaltsgeräte gering, da die Bewohner des Containers an der Ölförderstätte im Einsatz sind. Von 5 bis 17 Uhr benötigt lediglich der Kühlschrank elektrische Energie zum Betrieb des Kompressors. Dieser läuft abwechselnd 10 Minuten unter Volllast (65 W), danach 80 Minuten im Standbymodus (3 W). Dadurch ergibt sich ein Jahresenergiebedarf von 86 kWh (Sattler, 2014). Abends tritt eine größere Lastspitze auf. Hier sticht besonders der Fön hervor, da er das einzige elektrische Gerät mit einer hohen Leistung von 1 kW ist. Dafür ist die Laufzeit pro Tag gering. Abends und morgens, wenn wenig Tageslicht zur Verfügung steht, kommt der Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung hinzu. Diese wird durch sechs Energiesparlampen mit jeweils 8 W elektrischer Leistung gewährleistet. Die Leistungsaufnahme des Radiogerätes wird mit 9 W angenommen, Handy und Laptop benötigen im Netzbetrieb zusammen 43 W elektrischer Energie (stromverbrauchinfo, 2014). Ein Diagramm mit dem

elektrischen Lastprofil befindet sich in Anhang 3. Insgesamt ergibt sich für die elektrischen Geräte ein Energiebedarf von 400 kWh pro Jahr. Noch nicht berücksichtigt wird hier die eventuell aufzubringende elektrische Energie für Kühlung, Heizung und Warmwasserbereitstellung.

Auch der Warmwasserverbrauch ergibt sich aus dem Tagesablauf. Gezapft werden täglich insgesamt 130 l Warmwasser. Diese Menge setzt sich zusammen aus 3 mal Täglich Waschen mit 5 l Warmwasser pro Person, sowie einmal täglich Duschen mit 50 l pro Person. Um kleine Zapfungen wie etwa zum Zähneputzen vernachlässigen zu können, wurden die Warmwasserbedarfe relativ hoch angesetzt. Die Zapftemperatur für das Händewaschen liegt bei 31 °C, beim Duschen werden 37 °C angenommen (Hadamovsky, 2000). Die Zapftemperatur ergibt sich aus dem Mischungsverhältnis von Kalt- und Heißwasser. Dieses Mischungsverhältnis muss durch ein thermostatisch geregeltes Mischventil an die zur Verfügung gestellte Heißwassertemperatur angepasst werden. Bei 15 °C warmem Frischwasser werden durch die Mischung täglich 66 l Heißwasser (55 °C) verbraucht. Im Anhang unter 3 ist das verwendete Warmwasserprofil in Diagramm- und Tabellenform zu sehen.

3 Teilkonzepte zur solarautarken Versorgung

Nachdem die Ausgangssituation mit klimatischen Bedingungen, Aufbau des Containers und Verbraucherprofilen analysiert worden ist, werden nun verschiedene Teilkonzepte untersucht, um solar Energie bereitzustellen. In Kombination sollen diese Teilkonzepte den Gesamtenergiebedarf zu jeder Zeit decken. Abgedeckt werden müssen der Energieaufwand für Warmwasser und Klimatisierung, sowie für elektrische Geräte und Beleuchtung.

3.1 Solare Trinkwasserbereitstellung

Der Warmwasserbedarf besteht zum einen aus Trinkwasser für Dusche und Waschbecken, zum anderen aus Brauchwasser für die Heizung. Letzterer fällt jedoch nur für den Fall an, dass im Endkonzept eine solarthermische Heizung vorgesehen ist. Für die solare Warmwasserbereitstellung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Unterschieden werden kann zunächst zwischen solarthermischer und solarelektrischer Erwärmung. Dabei wird das Wasser oder eine Wärmeträgerflüssigkeit bei der solarthermischen Variante direkt in einem Kollektor durch die Sonne erwärmt. Bei der solarelektrischen Variante wird zunächst Strom über Photovoltaik gewonnen und damit anschließend das Wasser erwärmt. Einige dieser Möglichkeiten werden im Folgenden herausgegriffen. Dabei wird untersucht, welche Vor- und Nachteile die einzelnen Systeme für den Anwendungsfall der Arbeit bieten.

3.1.1 Solar-thermische Trinkwasserbereitstellung

Die Funktionsweise der beschriebenen solarthermischen Systeme basiert immer auf einem Grundprinzip: Ein Kollektor wird mit Wasser oder einer anderen Wärmeträgerflüssigkeit durchströmt und möglichst im optimalen Winkel zur Sonneneinstrahlung positioniert. Der Kollektor absorbiert die elektromagnetische Strahlung der Sonne und überträgt die darin enthaltene Wärme auf das Wärmeträgermedium. Die bereitgestellte Heißwassertemperatur sollte wegen der Gefahr des Legionellenwachstums in stehendem, warmem Wasser nicht unter 55 °C liegen.

Die Absorptionskollektoren unterscheiden sich in der Komplexität ihrer Bauweise, ihrem Absorptionsvermögen und ihrem Anlagenaufwand. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau einer solarthermischen Anlage. Als Absorber wird dort ein Vakuumröhrenkollektor verwendet, der in einem späteren Kapitel beschrieben wird.

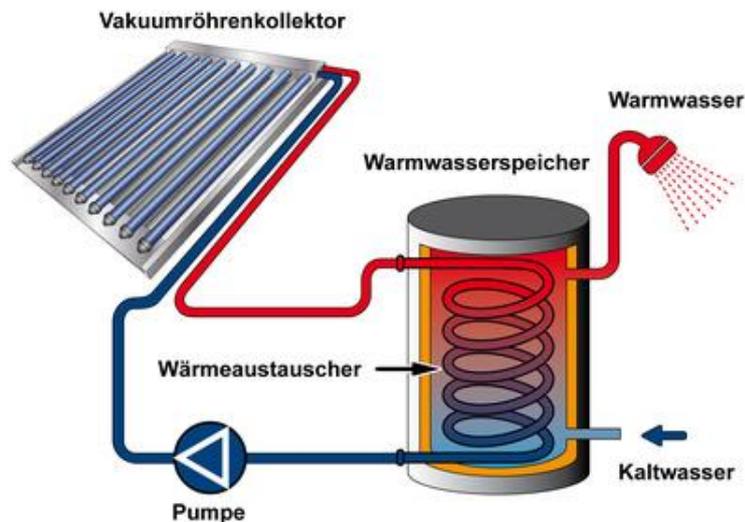


Abbildung 1: schematische Solaranlage (100000daecher)

Neben dem Kollektor gehören zu einer kompletten Anlage der Solarkreislauf, sowie ein Warmwasserspeicher. Der Solarkreis besteht aus Leitungen, Pumpen und Wärmeübertragern und sorgt für den Transport der Sonnenwärme in den Speicher.

Wasser hat eine höhere spezifische Wärmekapazität als die meisten anderen Flüssigkeiten und ist noch dazu günstig. Da in unseren Breiten im Winter häufig Temperaturen unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ auftreten, muss jedoch, statt Wasser, eine Wärmeträgerflüssigkeit mit einem niedrigeren Gefrierpunkt verwendet werden, um eine Zerstörung von Kollektor und Leitungen durch thermisch bedingte Ausdehnung zu verhindern. Dies wird häufig durch die Beimischung von Glykol erreicht. In der Sahara dagegen sinken die Temperaturen sehr selten unter den Gefrierpunkt.

Im Warmwasserspeicher wird die gewonnene Wärme über einen Wärmeübertrager an das Trinkwasser abgegeben und für den Bedarf in ausreichender Menge vorgehalten. Um Wärmeverluste zu minimieren, verfügen Warmwasserspeicher über eine Wärmedämmung. In sehr einfachen Anlagen entfällt der Wärmeübertrager. Das Trinkwasser ist gleichzeitig Wärmeträgermedium und wird durch den Kollektor geführt. Bei anderen Anlagen wird das Trinkwasser über einen weiteren Wärmeübertrager im Durchlaufverfahren erhitzt. Somit entfällt das Legionellen problem.

3.1.1.1 Einfache Absorber

Die einfachste Art von Solarkollektoren sind sogenannte „Schwimmbadabsorber“. Dabei handelt es sich um parallel liegende Kunststoffschläuche oder auch um mit Wasserkanälen durchzogene Kunststoff- und Gummimatten. Der Name weist auf das Hauptanwendungsgebiet dieser Kollektoren in unseren Breiten, nämlich die sommerliche Beheizung von Freibädern, hin. Da bei dieser Anwendung geringe Temperaturdifferenzen zwischen dem Absorber und der Außentemperatur herrschen, müssen im Gegensatz zu anderen Kollektorarten keine Wärmedämmung und keine transparente Abdeckung um den Absorber herum angebracht werden. Dadurch entfallen die optischen Strahlungsverluste durch Reflexion und Transmission. Dafür sind jedoch Abstrahlungs- und Konvektionsverluste besonders bei größeren Windgeschwindigkeiten höher. (Späte, 2007)

„Schwimmbadkollektoren“ werden größtenteils in Systemen angewendet, bei denen es darum geht die Wassertemperatur um höchstens 10 K anzuheben, da sonst die Ausmaße des Kollektors immer größer werden und mit der wachsenden Leitungslänge gleichzeitig die Verluste ansteigen (Späte, 2007). Aus diesen Gründen ist diese Art Kollektor für den Anwendungsfall dieser Arbeit nicht geeignet.

3.1.1.2 Flachkollektor

Leistungsfähiger sind Flachkollektoren. Der Aufbau dieser in Deutschland am häufigsten verwendeten Kollektorart ist in Abbildung 2 dargestellt. Das Herzstück ist ein metallischer Absorber, welcher möglichst viel Sonnenenergie auffangen und an das Wärmeträgermedium abgeben soll. Umgesetzt wird dies meist durch ein Kupferblech, welches für optimiertes Absorptions- und Emissionsverhalten zusätzlich selektiv beschichtet sein kann. Durch eine solche Beschichtung wird erreicht, dass der Absorber das ankommende weiße Licht der Sonne (entspricht einer Strahlungstemperatur von 6000 K) gut absorbiert. Gleichzeitig emittiert er jedoch die gespeicherte Wärme schlecht in Form von langwelliger Wärmestrahlung (entspricht einer Strahlungstemperatur

von ca. 350 K) (Späte, 2007). Dadurch werden die Wärmestrahlungsverluste an die Umgebung verringert.

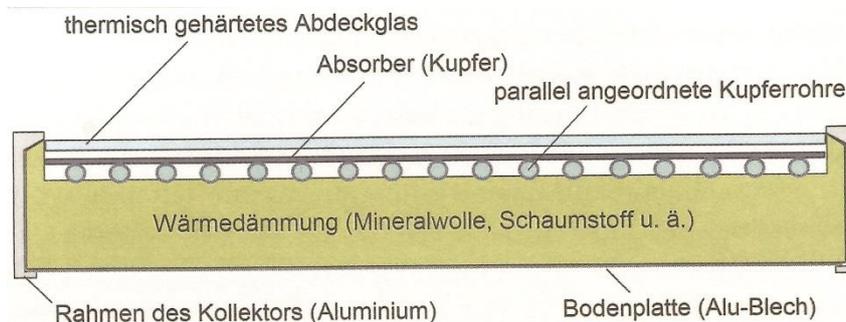


Abbildung 2: Schematischer Aufbau Flachkollektor (Hanus, 2009, S. 62)

Der Absorber befindet sich in einem gut wärmegeämmten Gehäuse. Das Gehäuse ist auf der sonnenzugewandten Seite mit einer transparenten Abdeckung versehen.

Unter dem Absorberblech befinden sich die Kanäle des Wärmeträgermediums. Die Kontaktfläche zwischen dem Absorber und den Kanälen sollte möglichst groß sein, um einen guten Wärmeübergang zu gewährleisten (Hanus, 2009). Ein wichtiger Parameter ist die Strömungsgeschwindigkeit, mit der das Wärmeträgermedium durch die Kanäle gepumpt wird. Ist sie zu hoch, wird das Medium nur wenig erwärmt und die erforderliche elektrische Energie für die Pumpe steigt an. Ist sie zu niedrig, erhitzt sich das Medium so sehr, dass die Wärmeverluste, auf Grund der hohen Temperaturdifferenz nach außen, vor allem im Wärmestrahlungsbereich enorm ansteigen. Viele Anlagen verfügen daher über eine elektronische Steuerung. Diese regelt den Volumenstrom unter Berücksichtigung der Witterungsbedingungen, der Temperatur des Brauchwassers und der Temperatur des Wärmeträgermediums (Hanus, 2009).

Für den Anwendungsfall der Arbeit können Flachkollektoren verwendet werden. Es ist jedoch darauf zu achten, den Anlagenaufbau möglichst einfach und damit den Wartungsaufwand möglichst gering zu halten, da es schwierig

ist in den abgelegenen Gebieten Algeriens fachkundiges Personal zur Anlagenwartung aufzutreiben.

3.1.1.3 Thermosiphonanlage

Eine weitere Möglichkeit zur solaren Trinkwarmwasserbereitung bieten Thermosiphonanlagen. Der Wärmeerzeuger ist hier ein Flachkollektor. Allerdings kommen diese Anlagen ohne Pumpe und somit ohne elektrische Energie aus. Dies wird durch den in Abbildung 3 skizzierten Aufbau ermöglicht.

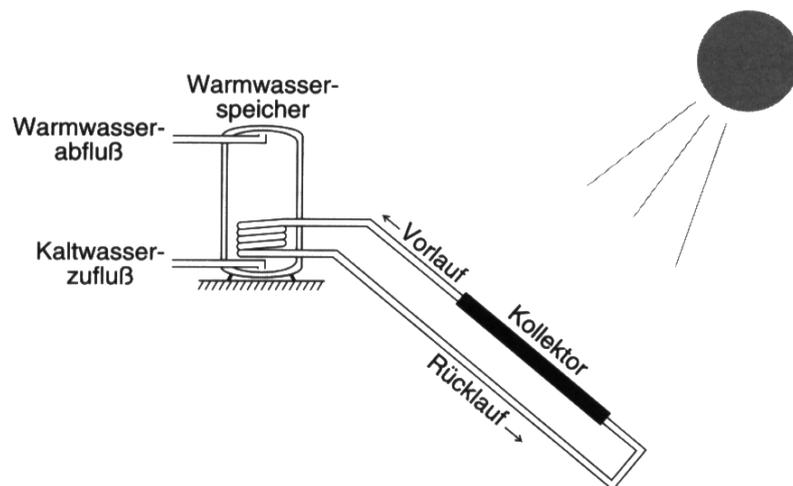


Abbildung 3: schematischer Aufbau einer Thermosiphonanlage (iundm, 2014)

Der Warmwasserspeicher befindet sich oberhalb des Kollektors. Das Wärmeträgermedium wird im Kollektor erwärmt und verliert dabei an Dichte. Daher steigt es ohne weitere Energiezuführung über die Vorlaufleitung nach oben. Im Speicher gibt es seine Wärme über einen Wärmeübertrager an das Trinkwasser ab und fließt anschließend durch die Schwerkraft getrieben wieder zurück in den Kollektor. (Späte, 2007) Vorteile dieses Anlagentyps sind der einfache Aufbau und die Einsparung der elektrischen Antriebsenergie für die Pumpe. Diese beträgt bei typischen Pumpenlaufzeiten von 1500 – 3000 h (Theiß, 2008) für eine effiziente Pumpe mit 10 W Leistung bis zu 30 kWh im Jahr. Das System ist jedoch relativ träge und erfordert möglichst kurze Rohrleitungen mit einem großen Querschnitt, um das Aufsteigen durch den

Dichteunterschied zu ermöglichen und Leitungsverluste gering zu halten. (Späte, 2007)

Außerdem muss der oberhalb angeordnete Wärmespeicher, der sich hier im Gegensatz zu den anderen Systemen im Freien befindet, gut isoliert sein. Nur so können hohe Wärmeverluste bei großen Temperaturdifferenzen zur Außenluft vermieden werden.

Ganz einfache Systemvarianten besitzen nur einen einzigen Fluidkreislauf, wodurch der Wärmetauscher entfällt. Dabei fließt durch den Kollektor dieselbe Flüssigkeit, welche im Speicher vorgehalten wird. Um Verunreinigung des Trinkwassers und Ablagerungen im Kollektor zu vermeiden, ist jedoch ein Zweikreissystem vorzuziehen. Dadurch kann auch der Gefrierpunkt des Wärmeträgermediums durch Beimischung von Glykol auf die klimatischen Bedingungen abgestimmt werden.

Thermosiphonanlagen sind die weltweit am häufigsten verbauten Solaranlagen (presse.wagner-solar, 2012). Besonders oft werden sie in China und der Mittelmeerregion auf den Dächern verbaut, um den Trinkwasserbedarf zu decken. Wegen des einfachen Anlagenaufbaus und des hohen solaren Strahlungsangebots in Algerien ist dieses System sehr gut für den Anwendungsfall der Arbeit geeignet.

3.1.1.4 Vakuumröhrenkollektor

Die leistungsfähigsten solarthermischen Kollektoren sind Vakuumröhrenkollektoren. Bei den Flachkollektoren bestehen die Wärmeverluste zu einem erheblichen Teil aus Konvektionsverlusten des Absorbers an das Gehäuse, bzw. vom Gehäuse an die Umgebung, zu einem kleineren Teil aus Wärmeleitungsverlusten im Glas und in der Wärmedämmung. Diese Verluste lassen sich wesentlich verringern, indem die Luft als Transportmedium aus dem Kollektor entfernt wird.

Es gibt verschiedene Bauformen dieser Kollektorart. Die meisten modernen Kollektoren bestehen aus zwei ineinander liegenden Glasröhren. Der Raum zwischen der Außenwand des inneren Rohres und der Innenwand des äußeren Rohres wird auf bis zu 10^{-5} mbar evakuiert (Hochvakuum). Wie in

Abbildung 4 zu sehen, ist die innere Röhre selektiv beschichtet und stellt somit den Absorber dar.

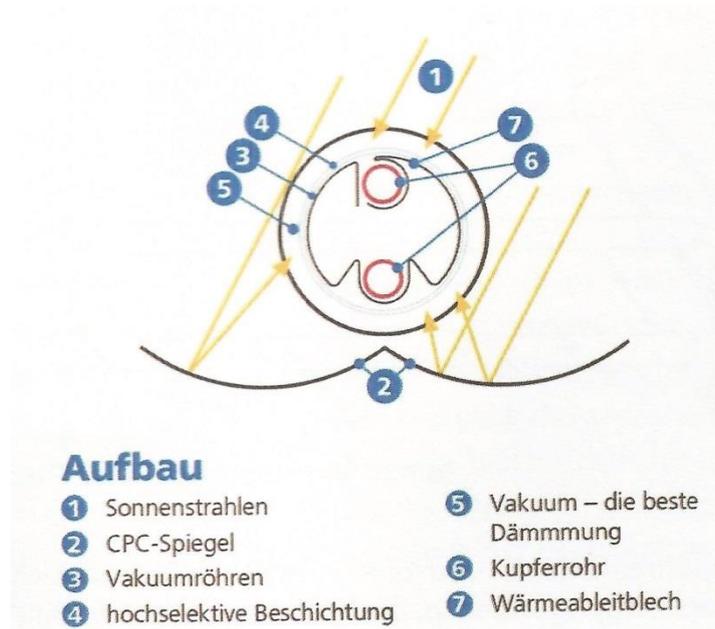


Abbildung 4: Vakuurröhre im Schnitt (Hanus, 2009, S. 80)

Innerhalb dieser Röhre ist ein Wärmeleitblech angebracht. Dieses nimmt die absorbierte Wärme auf und leitet sie über einen gut wärmeleitenden Kontakt an ein U-förmiges Kupferrohr weiter, welches mit dem Wärmeträgermedium durchströmt wird. Statt dem U-Rohr sind auch zwei konzentrische Kupferrohre als Wärmeträgerleitung möglich. Unter den einzelnen Röhren des Kollektors können Spiegel angebracht werden, um Sonnenstrahlen, welche zwischen den Röhren hindurchfallen, auf den Absorber zu reflektieren und somit den Kollektorwirkungsgrad zu erhöhen (Späte, 2007).

Bei allen Vakuumkollektoren sind hohe Wärmeträgertemperaturen von weit über 100 °C möglich, wodurch sie sich auch zur Heizungsunterstützung, für Prozesswärme oder für solare Kühlung eignen (Späte, 2007). Gerne werden sie auch in nördlicheren Breiten eingesetzt, wo der Flachkollektor nicht mehr genügend Energie liefern kann. In Algerien ist das Strahlungsangebot der Sonne jedoch sehr hoch, sodass dieser teure Kollektortyp zur Trinkwassererwärmung nicht benötigt wird.

3.1.1.5 Warmwasserspeicher

Der Warmwasserspeicher ermöglicht es die Wärme, die tagsüber erzeugt worden ist, auch nachts nutzen zu können. Wasser hat mit 4182 J/kgK eine sehr hohe Wärmekapazität und eignet sich daher gut, um eine große Wärmemenge über einen längeren Zeitraum zu speichern. Im Speicher sollen Verwirbelungen möglichst vermieden werden, da mit diesen Wärmeverluste durch Wandlung in Entropie einhergehen. Daher ist es sinnvoll, das warme Wärmeträgermedium, wie in Abbildung 1, im oberen Bereich des Speichers zuzuführen, da sich dort das warme Wasser aufgrund der geringeren Dichte sammelt. Dadurch steht im oberen Bereich des Speichers viel eher warmes Wasser zur Verfügung, als wenn der komplette Speicher gleichmäßig von unten nach oben erwärmt werden würde (Späte, 2007). Andere, komplexere Speicher ermöglichen dieses effiziente Aufwärmen durch Schichtspeicher oder Thermosiphonspeicher noch besser. (Hadamovsky, 2000)

Wichtig ist es den Speicher möglichst ideal zu dimensionieren. Tagsüber soll er nicht zu früh vollgeladen sein, weil sonst die Stagnationstemperatur im Kollektor sehr bald erreicht wird. Dies bedeutet, die Temperaturdifferenz zwischen dem Wasser im Speicher und der Wärmeträgerflüssigkeit im Kollektor wird so klein, dass die Wärmeträgerflüssigkeit keine Wärme mehr abgeben kann. Es kommt zu sehr hohen Temperaturen im Kollektor, was bis zum Verdampfen der Flüssigkeit führen kann. Ist der Speicher jedoch zu groß, wird die benötigte Temperatur nur in seinem oberen Bereich erreicht. Nachts muss er groß genug sein, um den Warmwasserbedarf am frühen Morgen vorhalten zu können. Als Faustregel gilt, dass in solaren Warmwasserspeichern etwa der 1,2- bis 1,5-fache Tagesbedarf bevorratet werden sollte (Späte, 2007).

Häufig wird ein zweiter Wärmeerzeuger an den Warmwasserspeicher angeschlossen, um bei Spitzenlasten, die von der Solaranlage nicht gedeckt werden können, zusätzliche Energie zu liefern.

3.1.2 Solar-elektrische Warmwasserbereitstellung

Nachdem nun verschiedene Möglichkeiten für die Warmwasserbereitstellung über thermische Solarkollektoren dargelegt wurden, wird nun die solar-elektrische Warmwasserbereitstellung untersucht. Hierbei wird zunächst über Photovoltaik Module elektrische Energie erzeugt. Damit wird anschließend das Wasser über unterschiedliche Systeme erhitzt. Um auch bei Nacht warmes Wasser erzeugen zu können, ist entweder ein elektrischer oder ein thermischer Speicher erforderlich.

3.1.2.1 Durchlauferhitzer

Eine Möglichkeit bietet hier der elektrische Durchlauferhitzer. Dieser ist für die dezentrale Versorgung jedes einzelnen Verbrauchers in einem Haushalt geeignet. Das Wasser wird je nach Bedarf ohne Wartezeit erwärmt, es ist also kein Speicher erforderlich. Ermöglicht wird dies durch eine relativ hohe elektrische Anschlussleistung. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 5 dargestellt.

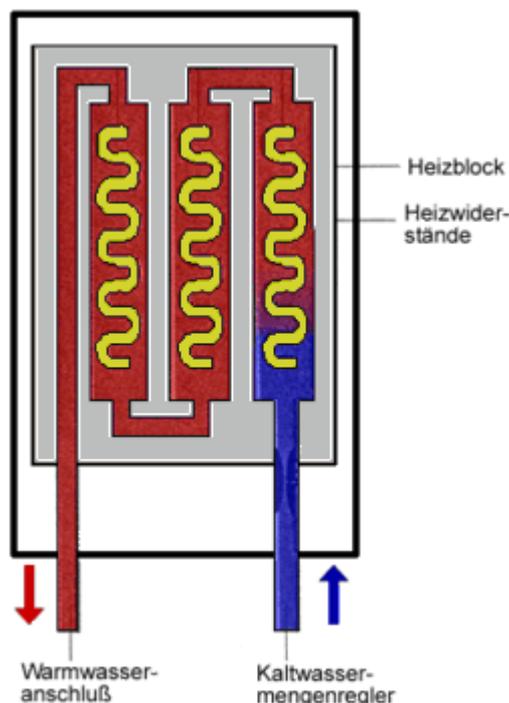


Abbildung 5: Durchlauferhitzer (Baumarkt, 2014)

Sobald eine Zapfung erfolgt, strömt kaltes Wasser in den Heizblock und wird durch die Heizwendel erwärmt. Ein Flügelradanemometer misst die Geschwindigkeit des zuströmenden Wassers, ein Einlaufthermometer die Temperatur. Aus diesen Werten kann die Elektronik die benötigte elektrische Leistung für die Heizwendel errechnen (ikz, 2014). Allerdings gibt es auch viele einfachere Bauweisen ohne elektronische Steuerung, bei denen die Warmwassertemperatur, je nach Massenstrom und Kaltwassertemperatur, schwankt. Bei modernen Durchlauferhitzern sind die Heizwendel meist Blankdrähte, welche direkt vom Wasser umflossen werden. Es können Zapftemperaturen zwischen 30 und 60 °C eingestellt werden (ikz, 2014). Da warmes Wasser hier niemals über längere Zeit steht, tritt kein Legionellen Problem auf.

Für den solarautarken Wohncontainer ist der Durchlauferhitzer aufgrund der hohen elektrischen Leistungsaufnahme nicht geeignet. Die erforderliche Leistung während eines Duschvorgangs lässt sich über Massenstrom und Temperaturen errechnen und liegt bei etwa 16 kW.

3.1.2.2 Elektrowarmwasserspeicher

Im Gegensatz zum Durchlauferhitzer besitzt der Elektrowarmwasserspeicher oder auch Elektroboiler einen Speicher. Dieser kann ein Fassungsvermögen von 5 l - für dezentrale Anwendungen unter dem Waschbecken - bis zu einigen hundert Litern - für zentrale Anwendungen in Kellern von Mehrfamilienhäusern - besitzen. Dadurch lässt sich die erforderliche elektrische Leistung weit reduzieren, da das Wasser über einen längeren Zeitraum hinweg erwärmt werden kann. Wie in Abbildung 6 zu sehen, geschieht die Wärmezufuhr über einen elektrischen Heizstab, der nicht unbedingt spiralförmig ausgeführt werden muss.

Für einen Duschvorgang und Benutzung des Waschbeckens werden etwa 50 l Wasser benötigt. Das warme Wasser aus dem Speicher wird jedoch mit kaltem Wasser gemischt, sodass 40 l Speichervolumen ausreichend sind. Da die Dusche nur ein- bis zweimal am Tag genutzt wird, ist dazwischen sehr viel Zeit, um den Speicher wieder aufzuladen. Bei 5 h Ladezeit auf eine

Wassertemperatur von 60 °C, ergibt sich durch Multiplikation von Massenstrom (40/5 l/h), Wärmekapazität des Wassers und der Temperaturdifferenz zwischen Frischwasser (15 °C) und Warmwasser (60 °C) eine erforderliche Leistung von etwa 0,5 kW. Die hohe Temperatur ist notwendig, um eventuell auftretende Legionellen abzutöten. Allerdings treten überall, wo warmes Wasser gespeichert wird trotz Wärmedämmung Verluste auf. Aus diesem Grund würde sich ein 80 l Speicher, der beide Bäder im Container versorgt anbieten. Das bessere Oberflächen/Volumen-Verhältnis reduziert die Wärmeverluste.

Die meisten Geräte auf dem Markt verfügen über höhere Leistungen ab 1,5 kW, um ein schnelleres Aufheizen zu ermöglichen.

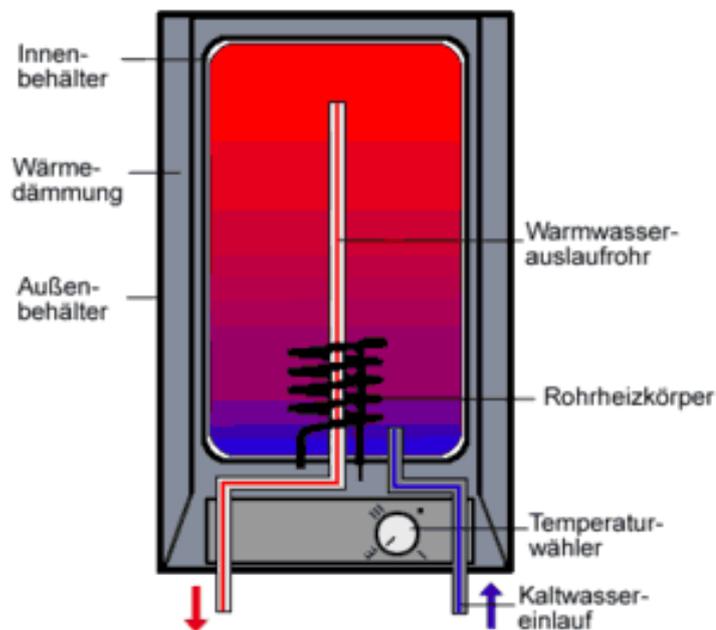


Abbildung 6: elektrischer Warmwasserspeicher (Baumarkt, 2014)

3.2 Stromerzeugung mittels Photovoltaik

Die zweite große Sparte der solaren Energiegewinnung ist neben der Solarthermie die Photovoltaik. Hier wird die Sonnenstrahlung nicht genutzt, um im Kollektor ein Wärmeträgermedium zu erwärmen. Stattdessen wird sie über den photoelektrischen Effekt in elektrische Energie in Form von Gleichstrom umgewandelt. Der Prozess erfolgt in einem Halbleiter, der sowohl

negative Ladungsträger (Elektronen) als auch positive freie Plätze (Löcher) enthält. Wird Licht von dem Halbleiter absorbiert, so werden Elektronen durch die Energiezufuhr frei und hinterlassen neue Löcher. Um die entstandenen freien Ladungsträger vom Grundmaterial zu trennen und eine dauerhafte elektrische Spannung aufrecht zu erhalten ist der pn-Übergang notwendig. Das heißt ein Bereich, in dem ein Gebiet mit Elektronenüberschuss an eine Zone mit Löcherüberschuss angrenzt. In der Siliziumhalbleiterstruktur werden Atome mit Elektronenüberschuss durch eine n-Dotierung mit Phosphor erreicht, ein Löcherüberschuss durch eine p-Dotierung mit Bor. (Theiß, 2008)

Wird eine solche Struktur mit Licht bestrahlt, besetzen in der Übergangszone freie Elektronen aus dem n-dotierten Bereich die Löcher des p-dotierten Bereiches. Dadurch entsteht ein internes elektrisches Feld, die Raumladungszone. Durch die Photonen werden auch im n- und p-dotierten Bereich Elektronen aus dem Atomverband herausgerissen. Um das Ladungsgleichgewicht wieder herzustellen, diffundieren so erzeugte freie Elektronen aus dem p-Gebiet in die n-Zone und hinterlassen Löcher. Somit bildet sich im n-Gebiet ein Überschuss von Elektronen, im p-Bereich ein solcher von Löchern. An den Metallkontakten, die sich an der Ober- und Unterseite der Struktur befinden, entsteht eine Spannung, welche dem internen elektrischen Feld entgegengesetzt ist. Das interne elektrische Feld verhindert, dass die Elektronen wieder zurück auf ihre Plätze diffundieren. Werden die äußeren Kontakte durch einen Stromkreis verbunden, fließt ein Gleichstrom. Die Elektronen fließen über den Leiter zurück und vereinigen sich wieder mit den Löchern. Durch Lichteinstrahlung werden erneut Elektronen abgetrennt und Löcher geschaffen, wodurch ein kontinuierlicher Stromfluss entsteht. (Hadamovsky, 2000)

Für eine autarke Energieversorgung aus Photovoltaik sind neben den Modulen, welche über den photoelektrischen Effekt die elektrische Energie erzeugen, zusätzlich ein Wechselrichter und ein elektrischer Energiespeicher notwendig. Im Folgenden werden diese Komponenten beschrieben.

3.2.1 Monokristalline Module

Bei monokristallinen Photovoltaik (PV) - Modulen bestehen die einzelnen Solarzellen jeweils aus einem Siliciumblock. Monokristalline Solarzellen werden hergestellt, indem Silicium umbruch geschmolzen und daraus anschließend ein zylinderförmiger Einkristall mit etwa 15 cm Durchmesser gezogen wird. Dieser Zylinder wird in 0,2 bis 0,4 mm dünne Scheiben - die Wafer - zersägt. Anschließend werden aus den Wafern Quadrate mit 10 cm, 12,5 cm oder 15 cm Kantenlänge geschnitten. Je nach Hersteller gibt es auch runde oder rechteckige Zellen. (Theiß, 2008) Die rohen Zellen werden weiterbearbeitet. Unter anderem erfolgen die im vorigen Kapitel beschriebene p- und n-Dotierungen. Die fertigen Zellen werden in Strings aneinandergereiht und zu einem Modul verbunden.

In Reihe erzeugen die Solarzellen die Nennleistung des Moduls. Diese wird in Watt Peak (Wp) angegeben. Diese Einheit ist mit Vorsicht zu genießen, da sie die Nennleistung des Moduls bei 1000 W/m² globaler Sonneneinstrahlung und einer Modultemperatur von 25 °C angibt (ecostream, 2014). In der Realität steigt die Modultemperatur bei starker Sonneneinstrahlung weit höher, sodass weniger Energie in Form von elektrischer Energie abgegeben werden kann. Allerdings ermöglicht die Einheit Wp den wetterunabhängigen Vergleich verschiedener Module.

Bei allen Modultypen bietet sich die Möglichkeit der Aufständigung. Werden die Module im optimalen Winkel zur Sonne aufgestellt, kann sich ein deutlicher Mehrertrag im Gegensatz zu flach liegenden Modulen ergeben. Zu beachten sind die Kosten für die Aufständigung, sowie die Eigenverschattung, falls mehrere Reihen hintereinander aufgeständert werden.

Der Wirkungsgrad eines monokristallinen Moduls liegt bei bis zu 17 % (solaranlagen-portal, 2014). Da auf dem Dach des Containers der Platz begrenzt ist, wird ein hoher Wirkungsgrad zu einem wichtigen Auswahlkriterium. Er ergibt sich aus dem Quotienten der eingestrahlt Solarstrahlung auf die Kollektorfläche und der erzeugten elektrischen Energie eines Moduls.

3.2.2 Polykristalline Module

Zur Herstellung polykristalliner Solarzellen wird Siliziumumbruch eingeschmolzen und in Gießformen gegeben, wo die Schmelze zu einem rechteckigen Kristallblock erstarrt. Nach dem Erkalten wird dieser ebenfalls zu Wafern verarbeitet. Der Kristallblock besteht aus vielen Einzelkristallen, die an den Korngrenzen aneinanderstoßen. An den Korngrenzen kann es zu Elektronenlochpaarrekombinationen kommen, das heißt es fließen weniger Elektronen und der Modulwirkungsgrad sinkt. (Hadamovsky, 2000) Der Modulwirkungsgrad liegt zwischen 13 und 15 % (Theiß, 2008).

Daher sind polykristalline Module für den Wohncontainer etwas schlechter geeignet, falls der Strombedarf mit der zur Verfügung stehenden Dachfläche nur knapp gedeckt werden kann. Ansonsten bieten sie einen Preisvorteil gegenüber den monokristallinen Modulen.

3.2.3 Dünnschichtmodule

Zur Herstellung von Dünnschichtmodulen werden verschiedene Ausgangsmaterialien verwendet. Beispielsweise werden Einzelzellen durch Abscheidung dünner Schichten von gasförmigem, amorphem Silicium direkt auf ein Trägermaterial wie Glas oder Metallfolie aufgebracht. Auch organische Materialien können verwendet werden. Durch den geringen Silicium Bedarf sind die Module pro Stück viel günstiger. Auch ist der Leistungsabfall bei diffusem Licht oder hohen Temperaturen geringer als bei poly- und monokristallinen Modulen und die Module können formflexibel an die Geometrie des Gebäudes angepasst werden. (Theiß, 2008)

Allerdings beträgt der Wirkungsgrad nur 6 bis 10 Prozent (solaranlagen-portal, 2014). Dadurch sind für den gleichen Ertrag eine viel größere Fläche und somit auch mehr Material für Unterkonstruktion und Befestigung notwendig. Daher sind die Dünnschichtmodule nicht für den Anwendungsfall der Arbeit geeignet.

3.2.4 Wechselrichter

Jede PV-Anlage, die den Strom für wechselstrombetriebene Verbraucher liefern soll, beinhaltet einen Wechselrichter. Der Wechselrichter besteht aus miteinander verschalteten Spulen und Kondensatoren. Durch die richtige Ansteuerung verschiedener Schalter wandelt der Wechselrichter den von den Modulen erzeugten Gleichstrom in Wechselstrom um und passt den Phasenverlauf an das angeschlossene Stromnetz an. (Theiß, 2008) Falls es sich wie bei dem Wohncontainer um ein Inselssystem handelt ist ein Inselwechselrichter notwendig. Bei Energiebedarf wandelt der Inselwechselrichter den Gleichstrom aus dem Speicher und versorgt die angeschlossenen Verbraucher (50 Hz, 230 V) mit Wechselstrom. Ein Laderegler erkennt den Ladezustand des Energiespeichers und verhindert eine Überladung oder eine extreme Tiefenentladung (Theiß, 2008). Der Laderegler belädt den Energiespeicher mit Gleichstrom. Je nach Hersteller kann der Laderegler entweder in den Inselwechselrichter integriert sein oder wie in Abbildung 7 als einzelnes Bauteil ausgeführt werden.

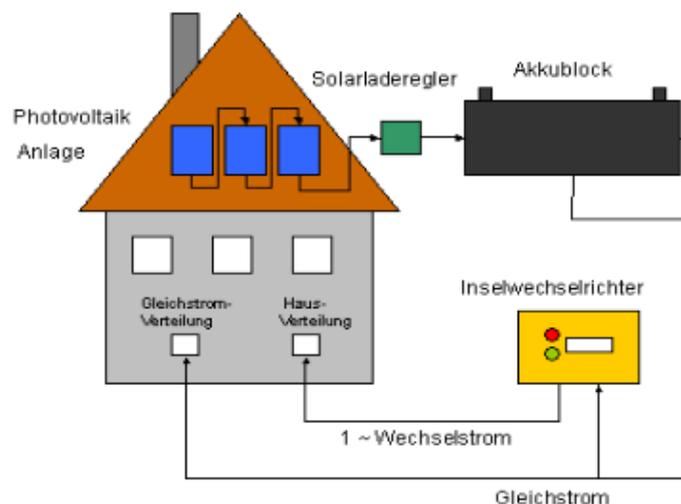


Abbildung 7: schematischer Aufbau Inselanlage (heyde-windtechnik, 2014)

Zusätzlich beinhaltet der Wechselrichter einen Maximum Power Point (MPP)-Tracker. Dieser passt je nach Sonneneinstrahlung seinen inneren Lastwiderstand so an, dass zu jeder Zeit die maximale Leistung geliefert wird.

Wechselrichter und Modulfeld müssen aneinander angepasst und richtig dimensioniert wird.

3.2.5 Elektrischer Energiespeicher

Ein elektrischer Energiespeicher ist in einem solarautarken Inselsystem unumgänglich, um tagsüber erzeugte überschüssige elektrische Energie nachts, wenn keine Erzeugung mehr stattfinden kann, nutzen zu können. Der Laderegler gewährleistet eine gleichmäßige Ladung des Akkumulators. Er verhindert sowohl Überladung als auch Tiefentladung. Dadurch wird die Lebensdauer von vielen Akkumulatoren erhöht.

Folgende Anforderungen sollte ein Solarakku erfüllen: Hohe Zyklusfestigkeit, hohe Lebensdauer, niedrige Selbstentladung, Wiederaufladbarkeit mit geringen Verlusten. In diesem Kapitel sollen zwei Typen von Akkumulatoren beschrieben werden. Zuerst der Blei Akkumulator, danach der Lithium-Ionen Akkumulator.

3.2.5.1 Blei Akkumulator

Bislang werden für die Speicherung von solar erzeugtem Strom am häufigsten Blei Akkus eingesetzt. Es handelt sich hierbei nicht um einen gewöhnlichen Blei Akku, wie er als Starterbatterie in Kraftfahrzeugen verwendet wird. Denn dieser ist nur darauf ausgelegt für kurze Zeit einen hohen Strom für den Anlasser zu liefern. Bei tieferer Entladung lösen sich die Elektroden irreversibel auf. Eher eignen sich modifizierte Bleisäure Akkus mit dickeren Elektrodenplatten oder Blei-Gel Akkus. (solaranlagen-portal, 2014) Die Elektroden bestehen aus Blei bzw. einer Bleilegierung. Sie lösen sich beim Entladevorgang auf und scheiden sich beim Beladevorgang wieder ab. Dennoch sollten Bleiakkumulatoren nicht weiter als bis auf 50 % der Nennkapazität entladen werden, um eine Leistungsreduzierung zu vermeiden. Die Lebensdauer liegt bei etwa 1000 Zyklen. Bei schonender Behandlung (Entladetiefe 20 %) lassen sich über 5000 Zyklen fahren. (solaranlagen-portal, 2014) Dadurch wird jedoch eine größere Gesamtkapazität erforderlich.

Die größten Vorteile der Blei Akkumulatoren sind die langjährigen Erfahrungen, die Wartungsfreundlichkeit und der günstige Erwerbspreis. Allerdings sind sie den Lithium-Ionen Akkus in vielen anderen Belangen unterlegen. (energieheld, 2014)

3.2.5.2 Lithium-Ionen Akkumulator

Da die Preise für diese Technologie langsam fallen, werden mittlerweile auch Lithium-Ionen Akkus als Solarspeicher eingesetzt. Hier besteht die positive Elektrode aus Lithiummetalloxid, die negative aus in Graphit eingelagertem Lithium. Während des Beladevorgangs nimmt das Lithium Elektronen auf. Die negativen Lithium Ionen wandern über den Elektrolyt zur positiven Elektrode. Dadurch bildet sich eine Spannung.

Lithium-Ionen Akkus können bis auf 20 % Restkapazität entladen werden ohne Schaden zu nehmen, weshalb sie nicht so sehr überdimensioniert werden müssen. Auch Zyklenfestigkeit und Lebensdauer sind höher als beim Bleiakku. Bei 80 % Entladung lassen sich über 5000 Zyklen fahren. (Märtel, 2014)

Allerdings kann durch Überhitzung irreversible Kristallbildung herbeigeführt werden. Die Akkus besitzen deshalb ein Kühlsystem. Dadurch erhöhen sich zusätzlich die Kosten. Die Kosten für Lithium-Ionen Akkus liegen mit 1000 € pro kWh Speicherkapazität etwa 75 % höher als die von Bleiakkus. Durch die höhere Zyklenfestigkeit und die tiefere Entladung können die höheren Investitionskosten bei einwandfreiem Betrieb jedoch wieder ausgeglichen werden. (Märtel, 2014)

Der elektrische Speicher für das Energiekonzept des Wohncontainers ist besonders hohen Ansprüchen an die Zyklenfestigkeit ausgesetzt, da er täglich nachts, je nach Energiebedarf für die Klimatisierung, auf ein bestimmtes Niveau entladen wird und tagsüber durch die Photovoltaik Anlage wieder aufgeladen wird.

Die folgende überschlägige Rechnung zeigt, dass sich dadurch ein Lithium Ionen Akku dann rentiert, wenn er über die von den Herstellern angegebene Lebensdauer von mindestens 20 Jahren seine Leistungsfähigkeit behält. Es

wird dabei von einer Entladetiefe von 80 % bzw. 50 % beim Bleiakku ausgegangen. Die Vollzyklen/Jahr lassen sich in etwa aus der Computersimulation abschätzen und liegen beim Bleiakku aufgrund der geringeren Entladetiefe, unter den Vollzyklen/Jahr des Lithiumionenakkus.

	Bleiakku	Lithiumionenakku
Zyklenzahl	1000	5000
Vollzyklen/Jahr	170	250
Lebensdauer	5,8	20
Kosten €/kWh	200	1000
Nutzkapazität [kWh]	6	6
Gesamtkapazität [kWh]	12	8
Invest. Kosten [€]	2400	8000
Kosten nach 20 Jahren [€]	9600	8000

Tabelle 2: Kostenvergleich Lithium-Ionen Akku/Bleiakku

Ein weiterer Vorteil der Lithium-Ionen Akkus gegenüber den Bleiakkus ist die bis zu sechsmal höhere Energiedichte (Märtel, 2014). Dadurch lässt sich die gleiche Energiemenge auf engerem Raum und mit weniger Gewicht speichern.

3.3 Solare Klimatisierung

Die Klimatisierung umfasst Heizung und Kühlung des Wohncontainers, wobei der Kühlbedarf in der Sahara eindeutig überwiegt. Je nach Klimaanlage Typ kann die Raumluft auch be- und entfeuchtet werden. Anforderung an das System für die Klimatisierung ist die Bereitstellung der Heiz- und Kühllasten zu jeder Zeit. Darüber hinaus sollten die eingesetzten Komponenten möglichst zuverlässig und wartungsfrei funktionieren.

3.3.1 Solare Heizung

Von November bis Februar können die Temperaturen in der algerischen Sahara bis nahe dem Gefrierpunkt sinken. Herrscht zwischen der Lufttemperatur im Container und der Umgebungstemperatur ein negative Gefälle, so treten Wärmeverluste auf. Diese bestehen hauptsächlich aus Wärmeleitung und Konvektion. Die Wärmeleitungsverluste bestehen aus den Transmissionsverlusten durch Außenwände und Fenster und sind abhängig von Materialien und Dicke der Isolierung. Konvektionsverluste werden über die Luft transportiert. Sie werden durch Undichtigkeiten der Containeraußenhülle und über geöffnete Fenster und Lüftungssysteme hervorgerufen. Zusätzlich treten Wärmestrahlungsverluste auf, welche kein Medium zur Wärmeübertragung benötigen.

In Summe müssen diese Wärmeverluste durch die Heizung ausgeglichen werden, um ein behagliches Temperaturniveau im Inneren des Containers zu halten. Ein wenig gemindert wird die erforderliche Heizleistung durch innere Gewinne im Container. Diese setzen sich aus Abwärme von Haushaltsgeräten und Personen zusammen. Auch solare Gewinne durch die Fenster können die Heizung entlasten. Diese werden jedoch in der Berechnung der Heizleistung vernachlässigt, da die größte Heizleistung anfällt, wenn keine Sonne scheint (DIN EN 12831, 2008).

Zur Bestimmung der maximalen Heizlast muss zunächst der Transmissionsbeiwert des Gebäudes berechnet werden. Dieser beinhaltet die U-Werte von Außenwänden, Fenstern, Decke und Boden und spiegelt die Wärmeverluste durch Wärmeleitung wieder.

Dazu kommen die Lüftungsverluste, welche sich aus dem Luftwechsel und den Stoffeigenschaften von Luft ergeben. Daraufhin werden die inneren Gewinne abgezogen. Bei 0 °C Außentemperatur ergibt sich eine maximale Heizlast von 960 W. Die vollständige Berechnung befindet sich im Anhang 4.

3.3.1.1 Solarthermische Heizung

Eine Möglichkeit zur Deckung der Heizlast bietet ein solarthermisches System. Dieses basiert auf denselben Komponenten wie das System zur solaren

Trinkwassererwärmung (Kap. 3.1.1). Ein Wärmeträgermedium wird im Kollektor erwärmt und überträgt seine Wärme auf das Heizmedium im Speicher. Bei Bedarf durchströmt das Heizmedium das Heizungssystem und gibt seine Wärme an den Raum ab. Je nach Wärmeübergabesystem müssen verschiedene Temperaturniveaus für den Heizkreislauf erreicht werden. So arbeiten Radiatorheizungen mit Vorlauf- /Rücklauftemperaturen von beispielsweise 60/40 °C, Flächenheizungen (z.B. Fußbodenheizung) dagegen kommen mit maximal 35 °C Vorlauftemperatur aus. (Theiß, 2008)

Das solarthermische Heizungssystem bietet den Vorteil, dass nur eine Energiewandlung vollzogen werden muss. Im Kollektor wird die Strahlung der Sonne in Wärme umgewandelt. Diese wird über den Speicher und das Verteilungssystem an den Raum weitergeleitet. Dadurch werden Wandlungsverluste vermieden.

Der Nachteil eines rein solarthermischen Heizungssystems liegt darin, dass Bedarf und Angebot der Wärme oft weit auseinander liegen, wodurch große Pufferspeicher erforderlich werden. Häufig dienen solarthermische Systeme daher nur der Heizungsunterstützung eines konventionellen Heizungssystems. So liegt auch in der algerischen Sahara der meiste Heizbedarf dann vor, wenn von der Sonne keine Wärme geliefert wird. Hauptsächlich in den Nächten von November bis Februar. Auch ist der Anlagenaufwand für die Wärmeverteilung über Rohre und Pumpen, sowie für die Wärmeübergabe durch Radiatoren und Flächenheizungen hoch.

3.3.1.2 Solarelektrische Heizung

Ähnlich wie bei der Trinkwassererwärmung bietet ein solarelektrisches System eine Alternative. Es gibt verschiedenste Varianten der solarelektrischen Heizung, welche sich hauptsächlich in der Wärmeverteilung unterscheiden. Immer wird durch elektrische Energie Wärme erzeugt und an ein Wärmeträgermedium weitergegeben, welches die Wärme an die Raumluft weitergibt.

Zu nennen sind elektrische Heizlüfter, Heizstrahler und Konvektoren. Für den Wohnraum empfiehlt sich besonders die Wärmeverteilung durch natürliche Konvektion, wobei die Wärme gleichmäßig im Raum verteilt wird, jedoch

weder ein unangenehm starker Luftstrom, noch ein hoher Geräuschpegel durch Ventilatoren erzeugt werden. Die Wärmeverteiler werden über ein Kabel an das Stromnetz angeschlossen. Es entfällt der finanzielle und anlagentechnische Aufwand, welcher für die Realisierung einer solarthermischen Heizung betrieben werden muss. (heizungsfinder, 2014)

Wegen des hohen Primärenergiefaktors von elektrischer Energie sollte die elektrische Wärmeerzeugung unter normalen Bedingungen nach Möglichkeit vermieden werden. Die elektrische Energie für solarautarke Objekte wie den Wohncontainer wird aus Photovoltaik und somit mit niedrigem Primärenergiefaktor erzeugt. Falls eine elektrische Kompressionskältemaschine zur Kühlung eingesetzt wird, spricht ein weiteres Argument für eine solarelektrische Heizung. Im Winter wird kaum elektrische Energie für die Raumlüftkühlung benötigt. Dadurch entsteht ein Produktionsüberschuss der Photovoltaik Anlage, der durch ein elektrisches Heizsystem getilgt werden kann.

3.3.2 Solare Kühlung

Im Sommer erreichen die Temperaturen in der algerischen Sahara vereinzelt bis über 50 °C. Von April bis Oktober geht das Temperaturgefälle zwischen Umgebungstemperatur und Innenraumtemperatur meist von außen nach innen. Im Gegensatz zu den Wärmeverlusten im Winter wird dem Container nun eine große Wärmemenge von außen zugeführt. Diese besteht wieder aus Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung. Die Wärmestrahlung tritt hauptsächlich über die Fenster ein und wächst nach dem Stefan Boltzmann Gesetz in der vierten Potenz der Temperaturdifferenz zwischen außen und innen. (wikipedia, 2014) Daher ist unbedingt darauf zu achten, den Container entweder mit der Fensterseite gen Norden auszurichten oder die Rollläden tagsüber herabzulassen.

Die Wärme die von außen zugeführt wird, muss von der Kältemaschine wieder so weit abgeführt werden, dass ein angenehmes Temperaturniveau gehalten werden kann. Die Berechnung der maximalen Kühlleistung erfolgt analog der Heizleistung. Allerdings wirken hier innere und solare Gewinne als zusätzliche Lasten, die abzuführen sind. Ohne solare Gewinne ergibt sich bei

55 °C Außentemperatur eine maximale Kühllast von knapp über 2 kW. Werden die Fenster ungeschützt zur tiefstehenden Sonne hin ausgerichtet kann durch die solaren Gewinne eine zusätzliche Heizlast von über 900 W erforderlich werden. Die Berechnung zu Kühllast und solaren Gewinnen ist im Anhang unter 4 einzusehen.

3.3.2.1 Adsorptions-/Absorptionskühlung

Es gibt verschiedene Konzepte, um Kälte zu erzeugen, bzw. Wärme aus dem zu kühlenden Gebäude abzuführen. Dazu gehören die Ad- und Absorptionskältesysteme. Im Folgenden werden die Funktionsprinzipien dieser Systeme kurz geschildert.

Bei der Absorptionskältemaschine wird mit der Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit zweier Stoffe ineinander gearbeitet. Oftmals wird Lithiumbromid/Wasser als Stoffpaar eingesetzt, wobei das Wasser als Kühlmittel dient. Mittels eines Wärmeübertragers wird dem Gemisch im Austreiber Wärme aus solarthermischen Kollektoren zugeführt. Das Wasser aus dem Gemisch verdampft als erstes und löst sich aus der Verbindung. Der Wasserdampf wird in den Kondensator abgeführt und wieder verflüssigt. Das Wasser und die zurückgebliebene Lithiumbromid-reiche Lösung werden nun getrennt in den Verdampfer gepumpt. Das Lithiumbromid hat eine sehr starke Aufnahmebereitschaft für Wasser. Durch die hohe Wasserdampfaufnahme durch das Salz entsteht ein hoher Unterdruck. Dadurch verdampft das zugeführte Wasser und entzieht dem Kühlwasserkreislauf, der ebenfalls durch den Verdampfer geleitet wird, Wärme. Die gesättigte Lithiumbromid/Wasser-Lösung wird zurück in den Austreiber geführt, wo der Prozess von neuem beginnt. Es entsteht ein kontinuierlicher Kreislauf, wobei das Kühlwasser zur Kühlung des Raumes verwendet wird. (Theiß, 2008)

Die Adsorptionskältemaschine beruht auf einem ähnlichen Prinzip. Sie besteht aus zwei mit einem Feststoff, z.B. Zeolith, gefüllten Kammern. Abwechselnd wird in einer Kammer Wasser von dem Zeolith desorbiert. In der anderen Kammer wird das Wasser adsorbiert. Durch die Adsorption entsteht wiederum ein Unterdruck. Bei diesem Unterdruck verdampft Wasser und entzieht dem Kühlwasser für die Klimatisierung Wärme. (Theiß, 2008)

Die Vorteile von Ab- und Adsorptionskältemaschinen sind der geringe Verbrauch elektrischer Energie, sowie die geringe Anzahl beweglicher Teile, welche für eine hohe Zuverlässigkeit sorgt. Die meisten Systeme benötigen nur wenig elektrische Energie für den Betrieb der Pumpen. Allerdings ist für den kontinuierlichen Einsatz ein großer Pufferspeicher notwendig, um die Wärme für den Austreiber auch nachts, wenn keine Sonne scheint, bereitstellen zu können. (absorptionsmaschine)

Üblicherweise werden Ab- und Adsorptionskälteanlagen erst ab 15kW Kühlleistung angeboten. Da dies den Bedarf des Containers weit übersteigt, kommen diese Technologien für das Endkonzept nicht in Frage.

3.3.2.2 Kompressionskühlung

Eine weitere Möglichkeit zur solaren Kältegewinnung bieten Kompressionskältemaschinen. Diese können in kompakter Bauweise als Monoblock- oder Splitgeräte ausgeführt werden. Das Funktionsprinzip beruht auf einem rechtsläufigen Kreisprozess, welcher mit einem Kältemittel durchlaufen wird. Das Kältemittel weist einen niedrigen Siedepunkt auf und verdampft schon bei Raumtemperatur im Verdampfer. Dabei wird der Umgebungsluft die Verdampfungsenthalpie entzogen. Die gekühlte Luft wird über ein Gebläse in den Raum zurückgeführt. Das Kältemittel wird nach dem Verdampfer von einem Kompressor möglichst isentrop verdichtet. Sobald der Kondensationsdruck erreicht ist, verflüssigt sich das Kältemittel unter Abgabe der Kondensationswärme im Kondensator. Über Ventilatoren wird die Wärme nach außen abgeführt. Anschließend wird das Kältemittel durch ein Expansionsventil entspannt und in den Verdampfer zurückgeführt, wo der Prozess von neuem beginnt. (Theiß, 2008) Die Leistungszahl der Anlage ergibt sich aus dem Quotient aus erzeugter Kälteleistung und eingesetzter elektrischer Energie zum Betrieb des Kompressors und der Ventilatoren. Moderne Splitgeräte können bei günstigen Betriebsbedingungen Leistungszahlen bis zu 5,0 erreichen (rauschenbach, 2014).

Werden bei einer Kompressionskältemaschine Wärmequelle und Wärmesenke vertauscht, so kann mit dem System geheizt werden. Systeme, die je nach Bedarf kühlen und heizen können, werden reversible

Wärmepumpen genannt. In Abbildung 8 ist dieses System in seinen zwei Betriebszuständen zu sehen. Verdampfer und Kondensator vertauschen beim Wechsel von Kühlen auf Heizen ihre Funktion. Unter Beachtung des energetischen Aspekts sollte eine reversible Wärmepumpe mit so niedrigen Vorlauftemperaturen wie tatsächlich nötig im Heizbetrieb und mit so hohen Vorlauftemperaturen wie möglich im Kühlbetrieb betrieben werden. (dimplex, 2014) Dadurch steigt die Leistungszahl, der elektrische Energiebedarf wird reduziert.

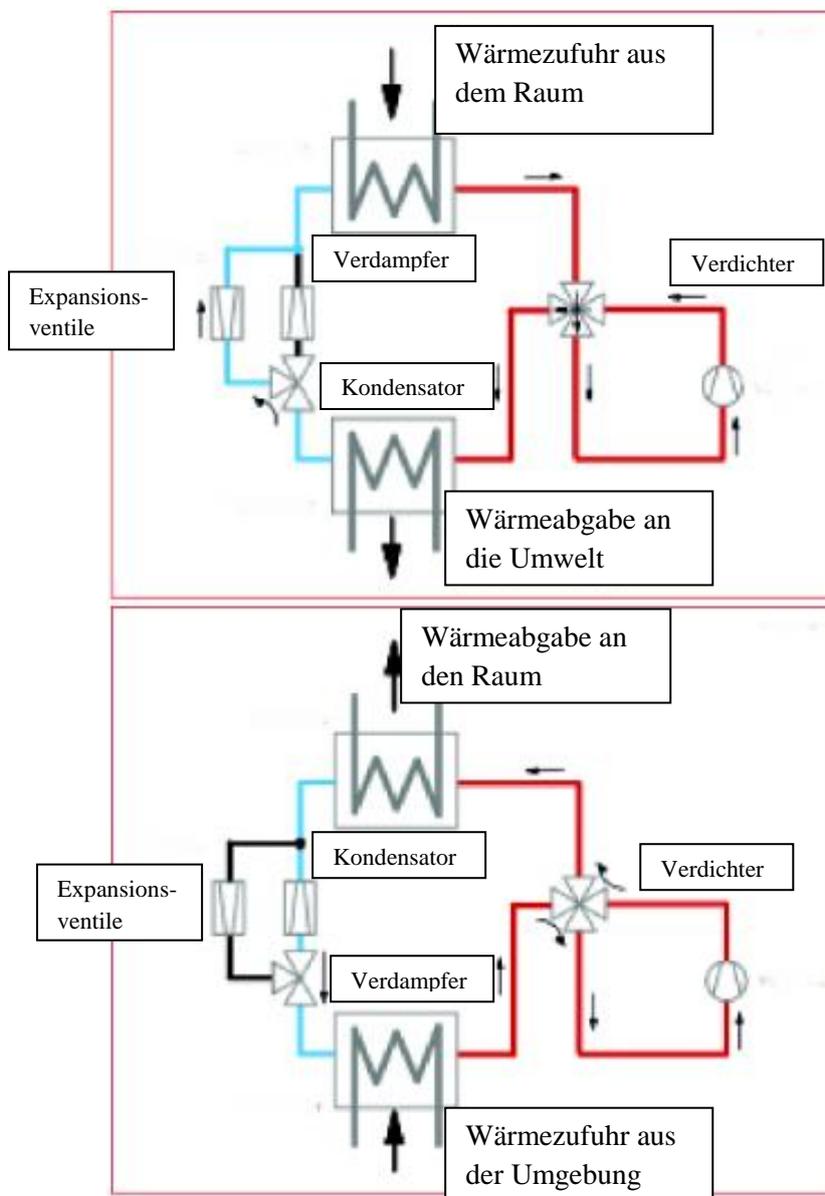


Abbildung 8: Funktionsprinzip der reversiblen Wärmepumpe (oben Kühlbetrieb, unten Heizbetrieb) (sbz-online, 2014)

4 Gesamtkonzept zur solar-autarken Versorgung eines Wohncontainers

Nachdem vorher verschiedene Möglichkeiten für die Deckung des Energiebedarfs der einzelnen Bereiche beschrieben worden sind, werden nun in einer Vorauswahl einzelne Systeme ausgesucht und zu mehreren Gesamtkonzepten zusammengesetzt. Anschließend werden Computersimulationen der einzelnen Konzepte durchgeführt. Dabei werden Kenndaten von realen Komponenten verwendet. Die Ergebnisse aus der Simulation werden genutzt, um Optimierungspotenzial zu finden. Darauf basierend folgt die technische und wirtschaftliche Bewertung des Gesamtkonzepts.

4.1 Vorauswahl

In Kapitel 3 wurden die Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme beschrieben. Daraus ergibt sich eine Vorauswahl an Systemen, welche nun im Gesamtkonzept verwendet werden können.

Für die solarthermische Trinkwassererwärmung wird die Thermosiphonanlage ausgewählt, da sie keine elektrische Energie benötigt und genügend Wärme für den Warmwasserbedarf zur Verfügung stellen kann.

Auch die solarelektrische Trinkwassererwärmung mittels eines Elektroboilers wird in der Simulation getestet. Ein Durchlauferhitzer wird wegen seiner zu hohen Leistungsaufnahme nicht weiter betrachtet.

Für die Erzeugung der elektrischen Energie werden aufgrund des hohen Wirkungsgrades und des begrenzten Platzes auf dem Dach des Containers monokristalline Photovoltaik-Module verwendet. Als Energiespeicher dient wegen der hohen Energiedichte ein Lithium-Ionen Akkumulator.

Für die thermische Konditionierung wird eine Kompressionskältemaschine eingesetzt, da Ad- und Absorptionskältemaschinen nur für größere Leistungsbereiche verwendet werden. Für die Heizung bietet sich auch eine solarelektrische Variante in Form eines elektrischen Heizkonvektors oder einer

reversiblen Wärmepumpe an, da in den Heizperioden die elektrische Energie zur Verfügung steht, mit welcher sonst die Kältemaschine betrieben wird.

4.2 Simulation

Mit Hilfe der Toolbox Carnot lassen sich unter Matlab/Simulink unterschiedlichste Systeme zur Gebäude- und Heizungstechnik simulieren. Aus der Carnot Bibliothek lassen sich verschiedene vorgefertigte Blöcke auswählen und zu einem Simulationsmodell zusammenfügen. Durch einen Doppelklick auf die einzelnen Module lassen sich die Modulparameter individuell einstellen. Alle Blöcke sind über verschiedene Leitungen miteinander verbunden. Leitungen, die Module wie Speicher, Kollektor und Pumpen miteinander verbinden, übertragen einen Vektor, der alle notwendigen Zustandsgrößen des Mediums (Art des Mediums, Temperatur, Druck usw.) enthält. Dieser Vektor heißt *Thermo-Hydraulic-Vector*, kurz *THV*. Andere Leitungen übertragen nur einen einzelnen Wert, z.B. gibt es Regler, welche nur „0“ oder „1“ ausgeben. An den gewünschten Stellen im Modell werden Ausgabeblöcke für die Ergebnisse platziert. Matlab führt während der Simulation die in den einzelnen Blöcken hinterlegten Berechnungen durch und legt die Ergebnisse im Workspace ab. Die *sample time* legt den zeitlichen Abstand zwischen zwei Ergebniswerten fest. Für diese Arbeit werden hauptsächlich Jahressimulationen mit einer *sample time* von 300 Sekunden (fünf Minuten) durchgeführt. Die Ergebniswerte können anschließend in Matlab betrachtet oder in Microsoft Excel weiterverarbeitet werden.

Im folgenden Abschnitt werden die verwendeten Simulationsmodelle beschrieben. Diese stellen verschiedene Energiekonzepte dar. Anschließend werden die Ergebnisse ausgewertet.

Für die Simulationen wird vernachlässigt, dass der Wohncontainer in der Mitte durch eine Wand geteilt ist. Dies muss später bei der Auswahl der Komponenten zur Klimatisierung und Warmwasserverteilung beachtet werden.

4.2.1 Modell „nur Photovoltaik“

Bei diesem Energiekonzept wird versucht alle Bereiche der Energieversorgung des Containers über elektrische Energie abzudecken. Dadurch werden eine große Photovoltaikanlage und ein großer elektrischer Speicher notwendig. Die Warmwasserbereitung geschieht in einem Elektroboiler. Wärmepumpe und Kompressionskälteanlage werden zur Klimatisierung des Containers eingesetzt.

4.2.1.1 Photovoltaik-Anlage

Die Photovoltaik-Anlage besteht aus dem Photovoltaik-Generator, einem Wechselrichter und dem elektrischen Energiespeicher.

Der Photovoltaik-Generator (PV-Generator) lässt sich als vorgefertigter Block aus der Carnot-Bibliothek auswählen und stellt die Photovoltaikmodule dar. Dieser Block besitzt einen Eingang und einen Ausgang. Über den Eingang werden die Wetterdaten und die Ausrichtung der Module eingelesen. Die Wetterdaten für die Wüstenstadt In Salah wurden vorher aus einem anderen Programm extrahiert und für die Verwendung in Matlab aufbereitet. Sie beinhalten verschiedenste Wetterparameter wie Lufttemperatur, Niederschlag, Sonnenstand, direkte und diffuse Sonneneinstrahlung.

Der Wetterdatenblock wird durch einen Positionsblock ergänzt. Über diesen lassen sich Azimutwinkel (Himmelsrichtung) und Aufständigung der Module einstellen. Für den Sonnenwinkel (Winkel zwischen Sonnenmittelpunkt und Horizontale) liegen in der nördlichen Sahara spezielle Bedingungen vor. Da dieses Gebiet auf dem nördlichen Wendekreis liegt, beträgt der optimale Aufstellungswinkel für die Photovoltaikmodule zur Sommersonnwende 0° , zur Wintersonnwende jedoch 60° . Da der Bedarf an elektrischer Energie für die Kühlung im Sommer viel höher ist als für die Heizung im Winter, bewirkt ein Aufstellungswinkel von 0° die beste Auslastung der Anlage. Zusätzlich entfallen die Kosten für eine Aufständigung.

Im PV-Generatorblock werden die Anzahl und die Parameter der Module eingestellt. Es wurden monokristalline Module mit einer Leistung von 200 Wp

ausgesucht. Der Wirkungsgrad liegt bei 15,7 %, der spannungsbezogene Temperaturkoeffizient beträgt -0,34 %/K.

Der Ausgang des PV-Generators überträgt die erzeugte Leistung in Watt an den Wechselrichterblock. Im Wechselrichterblock geschieht nur eine Einrechnung des Wirkungsgrades. Dieser wird auf 0,95 eingestellt. Über einen Ausgabeblock kann anschließend die erzeugte Leistung und die aufsummierte Energiemenge der Photovoltaikanlage ausgegeben werden.

Die Leistung aus dem Wechselrichter wird über einen Übertragungspfeil in den Akkumulatorblock eingelesen. Weil dieser nicht in der Carnot-Bibliothek verfügbar ist, musste er selbst konstruiert werden. Er besitzt drei weitere Eingänge, welche die Stromverbräuche aus elektrischen Geräten, Klimatisierung und Elektroboiler übertragen. Im Akkumulatorblock werden zunächst die Verbräuche addiert und mit der Erzeugung verrechnet. Je nach dem Vorzeichen dieser Verrechnung wird das Ergebnis in einen Entlade- oder Beladestrang geleitet. Der Beladestrang enthält einen Überladungsschutz. Hier wird das weitergeleitete Ergebnis mit dem Akkustand verglichen. Außerdem wird hier die Kapazität des Akkus eingestellt. Ist der Akku voll wird der Wert in einem Ausgabeblock als Überladung ausgegeben. Ansonsten wird der Wert zum aktuellen Akkustand addiert und dort ausgegeben. Analog gibt es im Entladestrang einen Tiefenentladungsschutz. Dieser gibt bei einem Akkustand kleiner gleich null eine Tiefenentladung aus. Ansonsten wird der übertragene Wert vom aktuellen Akkustand subtrahiert. Zudem wird hier die Anfangsbeladung des Akkus eingestellt, da die Jahressimulationen nachts beginnen und somit zuerst eine Entladung stattfindet. Beide Stränge berücksichtigen einen Be- bzw. Entladewirkungsgrad von 0,9.

4.2.1.2 Elektrische Geräte

Die elektrischen Haushaltsgeräte werden in einem Block mit einem Eingang und einem Ausgang zusammengefasst. Als Eingang dient ein Lastprofil. Als Eingangsdaten müssen die Werte des Lastprofils aus Kapitel 2.3 eingegeben werden. Der Block beinhaltet Ausgabeblocke für elektrische Leistung und Energiemenge der elektrischen Geräte und gibt diese an den Akkumulator weiter.

4.2.1.3 Elektroboiler

Für den Elektroboiler wird ein Block der Carnotbibliothek aus der Kategorie *storage* übernommen. In diesem Block können verschiedene Parameter wie Volumen und Wärmeverlustkoeffizienten angegeben werden. Die Speichertemperatur soll zu Beginn der Simulation bei 50 °C liegen. Der Block besitzt fünf Eingänge, von denen jedoch nur drei benötigt werden. Zum einen das Warmwasserprofil, welches analog zum Lastprofil der elektrischen Geräte eingegeben werden muss. Es gibt den Massenstrom des nachfließenden 15 °C kalten Frischwassers in den Speicher an. Zum anderen geht die Umgebungstemperatur des Speichers mit konstant 20 °C ein.

Zusätzlich muss die elektrische Leistung des Heizstabs übermittelt werden. Dazu bedarf es eines Reglungsblockes. Diesem dient als Eingang die Temperatur im oberen Bereich des Speichers. Sie wird mit einer konstanten Solltemperatur verglichen. Über einen Hystereseblock werden Einschalt- und Ausschalttemperatur festgelegt und ein zu häufiges Takten des Heizstabes vermieden. Der Heizstab beginnt bei 51 °C Wassertemperatur mit 1,5 kW Leistung zu heizen und schaltet sich bei Erreichen von 60 °C ab. Der elektrische Energieverbrauch wird über einen Ausgabeblock ausgegeben und an den Akkumulator weitergeleitet. Als Ausgangsdaten des Speichers werden außerdem Temperaturen auf beliebiger Höhe und die Zapftemperatur für die angeschlossenen Verbraucher ausgegeben.

4.2.1.4 Klimatisierung

Die Klimatisierung des Containers erfolgt über den Block *electric heating* der Carnotbibliothek aus der Kategorie *heat sources*. Dieser prägt einem *THV* eine elektrische Leistung ohne Wandlungsverluste als Wärme oder Kälte auf. Es sind zwei Eingänge und ein Ausgang vorhanden. An einen Eingang wird der *THV* aus dem Container angeschlossen. Der andere Eingang ist für die Regelung der Leistung bestimmt. Dafür ist ein weiterer Regelungsblock notwendig. Diesem dient die Raumtemperatur des Containers als Eingangswert. Zunächst wird verglichen, ob die Raumtemperatur über oder

unter 22 °C liegt. Liegt sie darunter, so wird der Wert der Temperatur in den Heizungsstrang geleitet. Dort wird kontrolliert, ob der Wert unter 16 °C liegt. Ist dies der Fall gibt der Regler eine Eingangsleistung von 1000 W an den *electric heating* Block, solange bis die Raumtemperatur 21 °C erreicht hat. Ist es nicht der Fall, so wird der Wert 0 ausgegeben. Wird für das Konzept ein elektrischer Heizkonvektor verwendet, so wird die Eingangsleistung direkt ausgegeben und an den Akkumulator weitergeleitet. Falls alternativ eine Wärmepumpe eingesetzt wird, wird der Wert zunächst durch die Leistungszahl geteilt und anschließend als elektrische Leistung an den Akkumulator weitergegeben. Als Wert für die Leistungszahl wurde 3,5 ausgewählt. Dieser Wert entspricht der Jahresarbeitszahl (Durchschnittswert der erzielten Leistungszahlen über das Jahr) von Luft/Luftwärmepumpen. (Biffar, 2010) Eine Luft/Luftwärmepumpe zieht die Wärme aus der Außenluft und gibt sie an die Raumluft ab. Es ist zu beachten, dass die Leistungszahl in der Realität nicht konstant ist, sondern je nach Temperaturniveau von Eingang und Ausgang schwankt.

Liegt die Raumtemperatur über 22 °C, so wird ihr Wert in den Kühlungsstrang geleitet. Hier wird ab Erreichen von 24 °C eine Eingangsleistung von -2000 W an den *electric heating* Block übermittelt, solange bis die Raumtemperatur auf 22 °C abgekühlt ist. Der Wert wird durch die Leistungszahl 3,5 geteilt und an den Akkumulator weitergeleitet.

Der Ausgang des *electric heating* Blocks beinhaltet den *THV*, welcher nun zum Container zurückgeleitet wird. Dort wird die Wärme bzw. Kälte über einen Konvektor abgegeben. Zum Betrieb dieses Kreislaufes ist in der Simulation eine konstant laufende Pumpe notwendig, die aber nicht in die Energiebilanz mit eingeht.

4.2.1.5 Container

Der Container wird durch den Block *simple house* aus der Kategorie *loads* dargestellt. In diesem Block werden zunächst alle Parameter und Eigenschaften angegeben. Dazu gehören Raummaße, Wärmedurchgangskoeffizienten, Wärmekapazität, Ausrichtung und Transmissionsbeiwerte der Fenster und die Luftwechselrate. Die Fenster

werden zunächst nach Norden ausgerichtet und haben einen Transmissionsbeiwert von 0,7. Die gewählte Luftwechselrate beträgt 0,8 1/h. Diese ergibt sich aus dem Containervolumen von 61 m³ und einem Richtwert für ein behagliches Klima von 25 – 30 m³ Luftbedarf pro Person innerhalb einer Stunde. (baunetzwissen, 2014) In der Realität schwankt dieser Wert, abhängig von der Anzahl geöffneter Fenster, der Windgeschwindigkeit und der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen.

Eingänge in das *simple house* sind die internen Gewinne (konstant 3 W), die Bodentemperatur (konstant 20 °C), der Wettervektor, sowie der *THV* aus der Klimatisierung. In diesem Block werden die Wetterdaten mit den Konstruktionsdaten des Gebäudes und der übertragenen Leistung aus der Klimatisierung verrechnet. Als Ausgang werden die mittlere Raumtemperatur und der *THV* ausgegeben, welcher zurück zum *electric heating* Block geführt wird.

Weitere Ausgabeblöcke stellen die Daten für Energieverbräuche in kWh, Sonneneinstrahlung, Umgebungstemperatur und die verbrauchte Wassermenge im workspace bereit. Damit ist das gesamte Modell „nur Photovoltaik“ beschrieben. Im Anhang befindet sich der grafische Aufbau des Modells in simulink.

4.2.2 Modell „Photovoltaik und Thermosiphonanlage“

Dieses Energiekonzept stimmt mit dem vorherigen bis auf die Warmwasserbereitung überein. Das Warmwasser wird hier über eine Thermosiphonanlage bereit. Dadurch entfällt die elektrische Energie zum Betrieb des Heizstabs. Die Photovoltaikanlage und der elektrische Speicher kleiner dimensioniert werden.

4.2.2.1 Solarkollektor

Der Kollektor wird aus der Carnotbibliothek übernommen. In diesen Block werden die Abmaße, die optische Effizienz und die Wärmeverlustkoeffizienten des Kollektors eingegeben. Als Eingänge dienen die Wetterdaten, der

Aufstellungswinkel, sowie ein *THV* mit Wasser als Medium. Da der Warmwasserbedarf über das ganze Jahr gleich bleibt wird ein Aufstellungswinkel von 30° gewählt. Im Kollektor wird der *THV* unter Berücksichtigung der Wärmeverluste mit der Wärme aus der Sonneneinstrahlung beaufschlagt. Danach wird der *THV* ausgegeben und an den Warmwasserspeicher weitergeleitet.

4.2.2.2 Warmwasserspeicher

Für den Warmwasserspeicher wird dasselbe Modell wie für den Elektroboiler verwendet. Der Speicher hat jedoch mit 150 l ein größeres Volumen und beinhaltet, statt dem Heizstab, einen Wärmetauscher, welcher die Wärme aus dem Solarkollektor auf das Trinkwasser im Speicher überträgt. Für den Wärmetauscher werden eine Übertragungsfähigkeit von 750 W/K, eine Vorlaufhöhe von 90 % der Speicherhöhe und eine Rücklaufhöhe von 10 % eingestellt. Zu Beginn der Simulation soll eine Anfangstemperatur von 40 °C im Speicher vorliegen. Da die Thermosiphonanlage auf dem Dach des Containers aufgestellt wird, geht die Außentemperatur als Eingangswert für die Umgebungstemperatur ein. Unter Berücksichtigung der Speicherverluste, abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Umgebungsluft und Warmwasser im Speicher, der Sonneneinstrahlung und der Wärmedämmung wird die Warmwassertemperatur berechnet. Da der Speicher eine Polyurethandämmung besitzt, wird der Wärmedurchgangskoeffizient auf 0,4 W/m²K gesetzt. (solkonzept, 2014) Als Ausgangsdaten werden Temperaturen auf beliebiger Höhe des Speichers, die Vorlauftemperatur aus dem Kollektor, die Zapftemperatur für die angeschlossenen Verbraucher und die Rücklauftemperatur zum Kollektor an den workspace übermittelt. Aus dem Speicher wird der *THV* zurück zum Kollektor geführt, nachdem die Wärme abgegeben wurde.

4.2.2.3 Hydraulische Bauteile

Wie alle THV-Kreisläufe in Carnot benötigt auch die Thermosiphonanlage einen hydraulischen Antrieb. Dazu wird aus der Carnotbibliothek unter *hydraulics* der Block *thermosyphon* ausgewählt und in den Kreislauf eingefügt. Dieser Block berechnet den Massenstrom, welcher abhängig von den Temperaturunterschieden zwischen Kollektor und Speicher durch das Thermosiphonprinzip möglich ist und prägt diesen dem *THV* auf. Der Kreislauf beginnt, sobald die Kollektortemperatur die Speichertemperatur überschritten hat, und das erwärmte Wasser aufgrund der geringeren Dichte im Kollektor aufsteigt. Des Weiteren befindet sich eine Rohrleitung von 2,1 m Länge mit ihren Wärmeverlustkoeffizienten im Kollektorrücklauf. Auch hierfür gibt es einen Block unter der Kategorie *hydraulics*. Damit ist das Modell Photovoltaik und Thermosiphonanlage vollständig beschrieben.

4.2.3 Simulationsergebnisse

Schon vor den Simulationen lassen sich einige energetische Parameter wie maximale Heizlast und Kühllast theoretisch berechnen. Auf diesen theoretischen Ergebnissen basierend werden die Modelle aufgebaut. Doch erst in der Simulation wird klar, ob die technische Gebäudeausrüstung wirklich ausreicht, um den Energiebedarf des Containers solarautark zu decken. Während der Simulation werden die einzelnen Parameter so oft verändert, bis die Modelle zufriedenstellende Ergebnisse ausgeben.

Als erstes werden hier die Ergebnisse für das Konzept „nur Photovoltaik“ dargestellt, anschließend die Ergebnisse für das Konzept „Photovoltaik und Thermosiphon“.

4.2.3.1 Ergebnisse des Konzepts „nur Photovoltaik“

Zunächst wird der Energieverbrauch für die Klimatisierung im Konzept „nur Photovoltaik“ dargestellt. Die entscheidenden Ergebnisse der Klimatisierung sind der Energieverbrauch von Heizung und Kühlung und die Raumtemperatur. Das folgende Diagramm zeigt den elektrischen

Energieverbrauch von Heizung und Kühlung für jeden Monat. Es ist zu erkennen, dass der Einsatz einer Wärmepumpe, statt eines elektrischen Heizkonvektors, den elektrischen Energiebedarf in den Wintermonaten extrem senkt. Statt 303 kWh werden nur mehr 56 kWh elektrischer Energie im Jahr für die Raumheizung benötigt. Diese Reduzierung entspricht dem Faktor der Jahresarbeitszahl. Die Simulation zeigt, dass dadurch eine Aufständigung der Photovoltaikmodule für einen höheren Ertrag im Winter nicht mehr notwendig ist. Außerdem kann die Akkukapazität um bis zu 4 kWh reduziert werden, da der Energiebedarf in den kühlen Winternächten nicht mehr so hoch ist. Der höchste Energiebedarf liegt im Juli und August vor. Zu dieser Zeit steigt die Umgebungstemperatur tagsüber oft weit über 40 °C und sinkt auch nachts nur selten unter 30 °C. Dadurch ist die Kompressionskältemaschine sehr häufig im Betrieb. Allerdings ergibt sich in diesen Monaten durch die Montage der Photovoltaikmodule ohne Aufständigung auch ein hoher Ertrag.

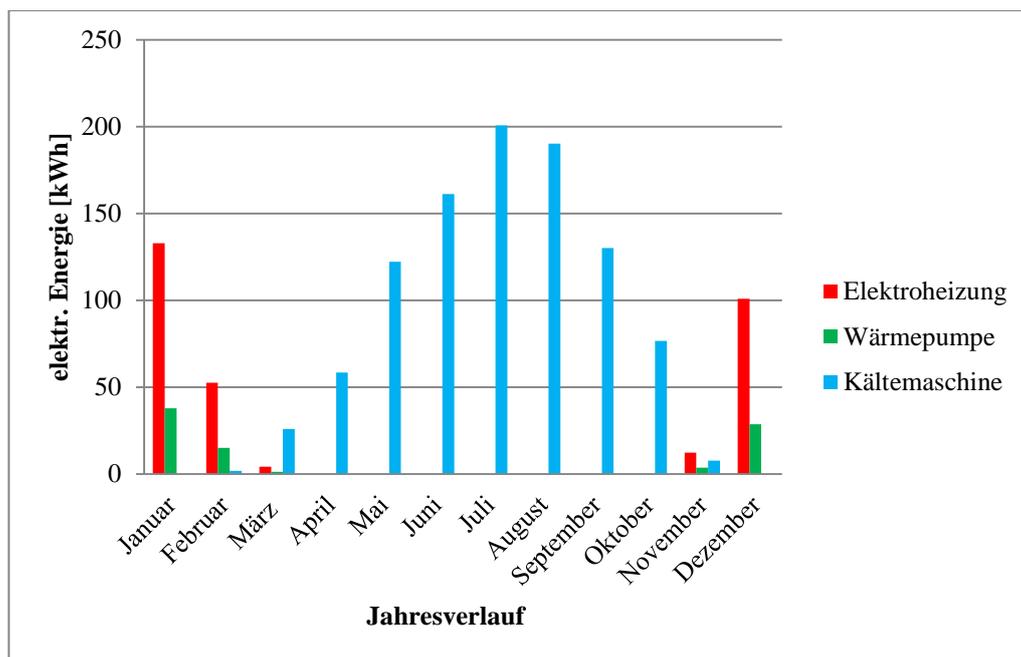


Abbildung 9: elektrischer Energiebedarf Klimatisierung mit Nordfenstern

Abbildung 10 zeigt die Raumtemperatur und die Umgebungstemperatur über das Jahr. Im Winter reicht 1 kW Wärmeleistung aus, um den Container auch bei 4 °C Außentemperatur innerhalb von vier Stunden von 17 auf 21 °C aufzuheizen. Im Sommer reichen 2 kW Kühlleistung meist, um den Container

innerhalb von zwei Stunden von 24 auf 22 °C herunter zu kühlen. An 30 Tagen, die meisten davon im August, steigt die Raumtemperatur jedoch über 24,5 °C. Das Maximum wird am 19. August mit 25,97°C erreicht und liegt immer noch im normierten Toleranzbereich für sommerlichen Wärmeschutz (bis 26 °C) (DIN 4108-2, 2013). Eine genauere Analyse dieser Temperaturspitzen hat ergeben, dass sie immer erst abends auftreten, wenn die Umgebungstemperatur schon gesunken ist. Allerdings strahlt dann die tiefstehende Sonne in die nach Norden ausgerichteten Fenster und sorgt für hohen solaren Wärmeeintrag. Wird der Energiedurchlassgrad der Fenster von 0,7 auf 0,245 herabgesetzt (Reduzierung um 35 % für $\frac{3}{4}$ geschlossenen Rollläden) (DIN 4108-2, 2013), so verschwinden die Temperaturspitzen. Die Raumtemperatur steigt dann maximal auf 24,4 °C.

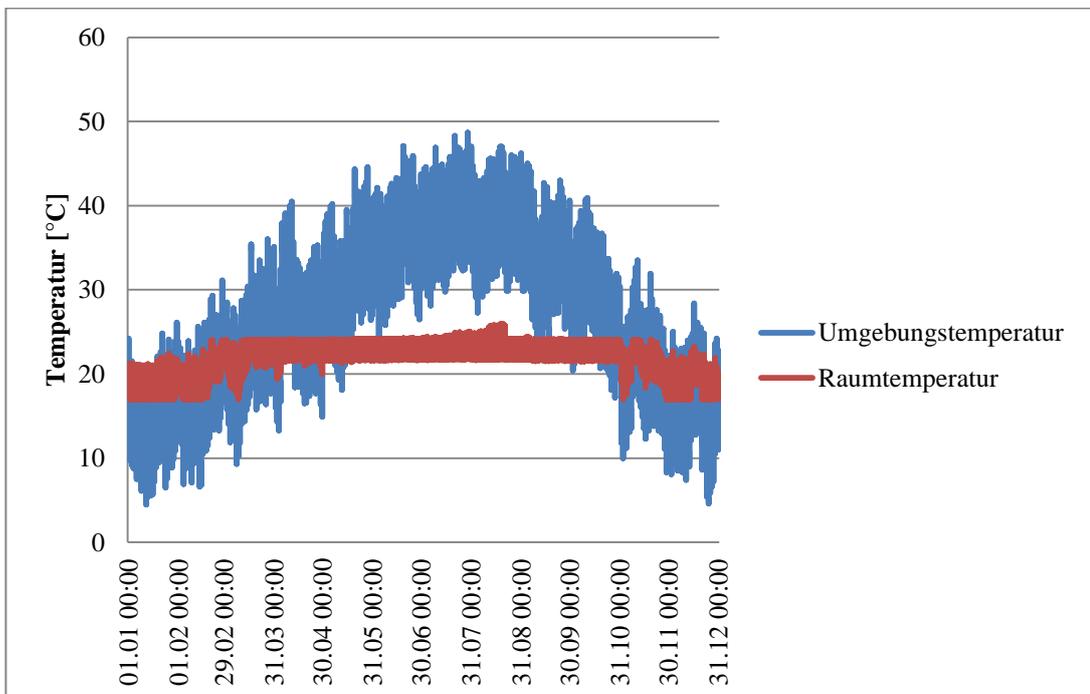


Abbildung 10: Umgebungs- und Raumtemperatur über das Jahr

Insgesamt liegt der elektrische Energiebedarf für die Kältemaschine bei 975 kWh im Jahr. Für die Wärmepumpe werden 86 kWh benötigt.

Für das Konzept nur Photovoltaik wird ein elektrischer Speicher mit 6 kWh nutzbarer Akkukapazität benötigt. Das Diagramm in Abbildung 11 zeigt den Akkustand in der Jahressimulation. Dabei ist zu sehen, dass jeden Tag ein Teilzyklus gefahren wird. In den Sommer- und Wintermonaten wird die

nutzbare Akkukapazität durch den hohen Energiebedarf nachts, wenn die Photovoltaikanlage keinen Ertrag liefert, fast komplett ausgeschöpft. In der Übergangszeit wird nur die Hälfte der Kapazität benötigt. Um den Akku tagsüber wieder schnell genug aufladen zu können sind 14 Photovoltaikmodule mit 200 Wp Nennleistung ohne Aufständerung erforderlich. Diese liefern nach den Abzügen der Wechselrichterverluste 4273 kWh elektrische Energie im Jahr. Der Gesamtverbrauch durch elektrische Geräte, Klimatisierung und Warmwasserbereitung liegt bei 2589 kWh im Jahr. Dadurch ergibt sich eine Übererzeugung von 1684 kWh, welche nicht genutzt werden können und hauptsächlich durch den geringen Energiebedarf in der Übergangszeit zu Stande kommen.

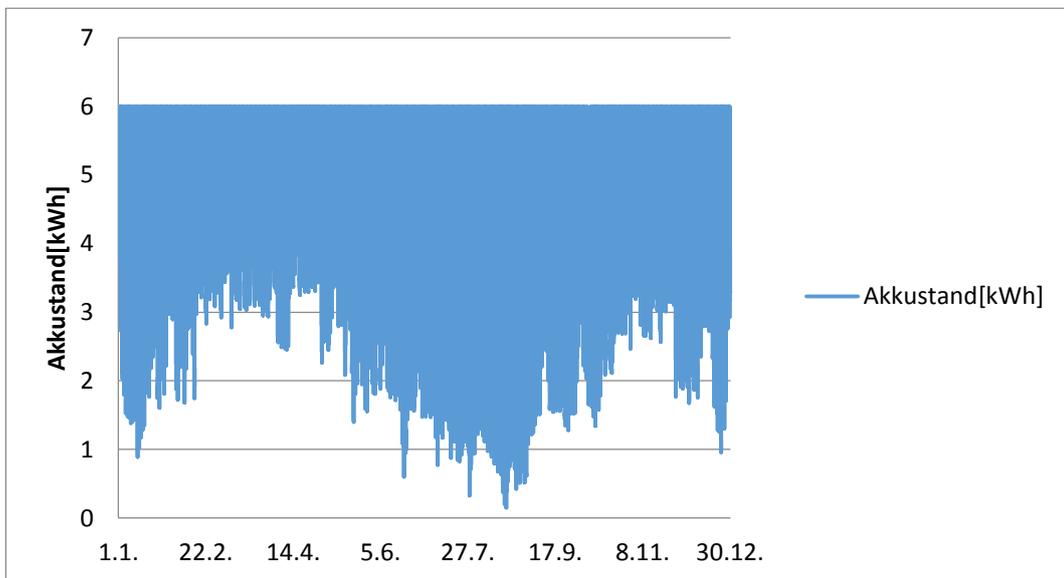


Abbildung 11: Akkustand im Konzept „nur Photovoltaik“

Für die Warmwasserbereitung wird ein elektrischer Heizstab mit 1,5 kW Leistung in einem 80 l fassenden Speicher verwendet, um den Trinkwasserbedarf von zwei Personen zu decken. Der Heizstab ermöglicht nach einer großen Zapfung (54 l) die Aufheizung des Wassers im oberen Speicherbereich innerhalb von 105 min von 37 auf 60 °C. Somit stehen immer ausreichend hohe Temperaturen zur Verfügung. Das Diagramm in Abbildung 12 zeigt die Temperaturverläufe im oberen, mittleren und unteren Bereich des Speichers über den Zeitraum von drei Tagen. Pro Tag werden für die

Warmwasserbereitung 3,3 kWh elektrische Energie benötigt, wodurch sich eine Energiemenge von 1213 kWh im Jahr ergibt.

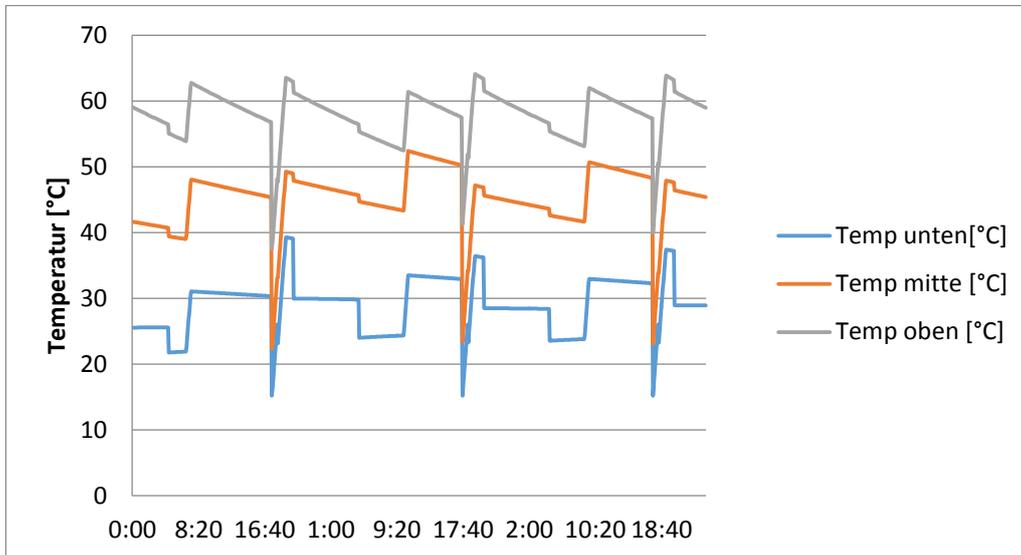


Abbildung 12: Speichertemperaturen, 80 l Volumen, 1,5 kW Leistung

4.2.3.2 Ergebnisse des Konzepts „Photovoltaik und Thermosiphon“

Auch hier soll wieder mit den Ergebnissen für die Klimatisierung begonnen werden. Werden die Fenster wie im vorherigen Konzept nach Norden ausgerichtet, so ändert sich nichts an den Ergebnissen, da das gleiche Datenmodell verwendet wird. Allerdings bietet sich durch die Verwendung der Thermosiphonanlage eine Ausrichtung der Fenster nach Osten an. Dadurch sind die kurzen Seiten des Containers nach Norden und Süden ausgerichtet. Die Thermosiphonanlage, welche aufgeständert werden muss, kann an der nördlichen Dachkante aufgestellt werden. Der Flachkollektor wird nach Süden ausgerichtet. Südlich davon werden die Photovoltaikmodule flach angebracht (Abbildung 17). Dadurch wird, anders als bei einer Ausrichtung der Fenster nach Norden, die Verschattung der Photovoltaikmodule durch die Thermosiphonanlage vermieden. Durch die Änderung der Fensterausrichtung ergibt sich in der Jahressimulation ein um 6 % höherer Energiebedarf für die Kühlung des Containers. Der Container heizt sich in den Wintermonaten durch den flachen Sonnenstand über die Ostfenster so stark auf, dass wie in Abbildung 13 zu sehen ist selbst im Dezember und Februar ein wenig gekühlt

werden muss. Dafür fallen im August die Raumtemperaturspitzen Abendspitzen weg, da die Sonne nicht mehr durch die Nordfenster einfallen kann. Die Sonne tritt zwar morgens durch die Ostfenster ein, allerdings sind um diese Zeit die Umgebungstemperaturen noch weit unter 40 °C, sodass 2 kW Kühlleistung ausreichen, um die Raumtemperatur auf höchstens 24,5 °C ansteigen zu lassen. Insgesamt steigt der elektrische Energiebedarf zur Kühlung im Jahr von 975 auf 1034 kWh. Die Heizlast beim Einsatz einer Wärmepumpe wird durch den solaren Eintrag über die Ostfenster von 86,4 auf 56,1 kWh gesenkt. Es ergibt sich ein 3 % höherer Energiebedarf für die Klimatisierung, welcher durch die günstige Verteilung über das Jahr jedoch keinen negativen Einfluss auf die erforderliche Akkukapazität hat.

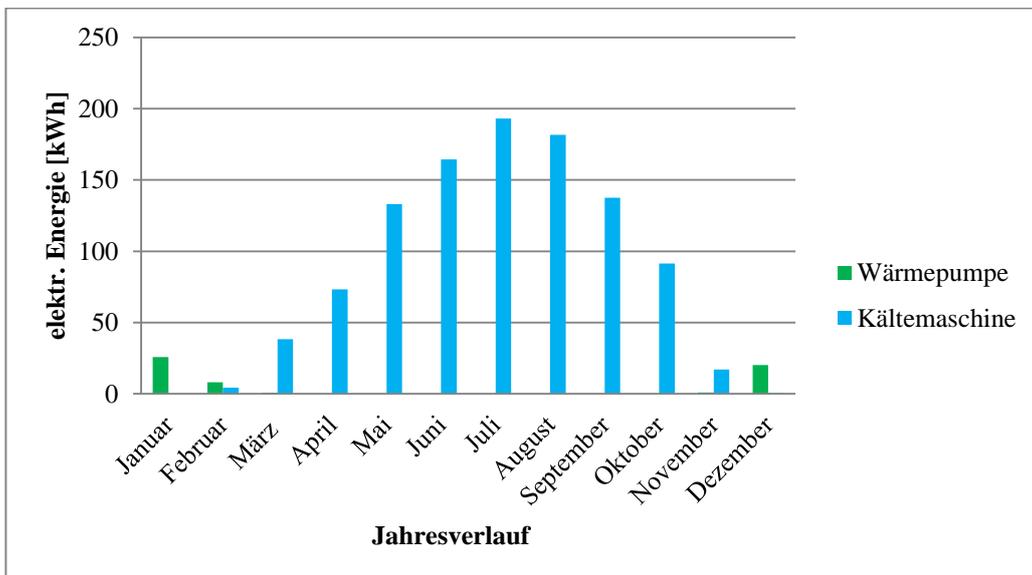


Abbildung 13: elektrischer Energiebedarf Klimatisierung mit Ostfenstern

Die Warmwasserbereitung wird bei diesem Konzept durch die Thermosiphonanlage übernommen. Der elektrische Energiebedarf wird nur noch durch elektrische Geräte und Klimatisierung verursacht. Der elektrische Energiespeicher kann etwas kleiner ausgeführt werden. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass 4 kWh nutzbare Speicherkapazität ausreichen, um die Lastspitzen im Sommer und im Winter abzudecken. In Abbildung 14 ist der Akkustand in der Jahressimulation zu sehen. Der Warmwasserbedarf ist über das ganze Jahr konstant. Die Lastspitzen sind viel

mehr abhängig von dem Energiebedarf der Klimatisierung. Daher ähnelt das Akkuprofil dem aus dem vorherigen Konzept, nur die Grundlast ist niedriger. In der Übergangszeit gibt es sehr wenig Energiebedarf. Tagsüber kann der Akku durch acht horizontal liegende Photovoltaikmodule aufgeladen werden.

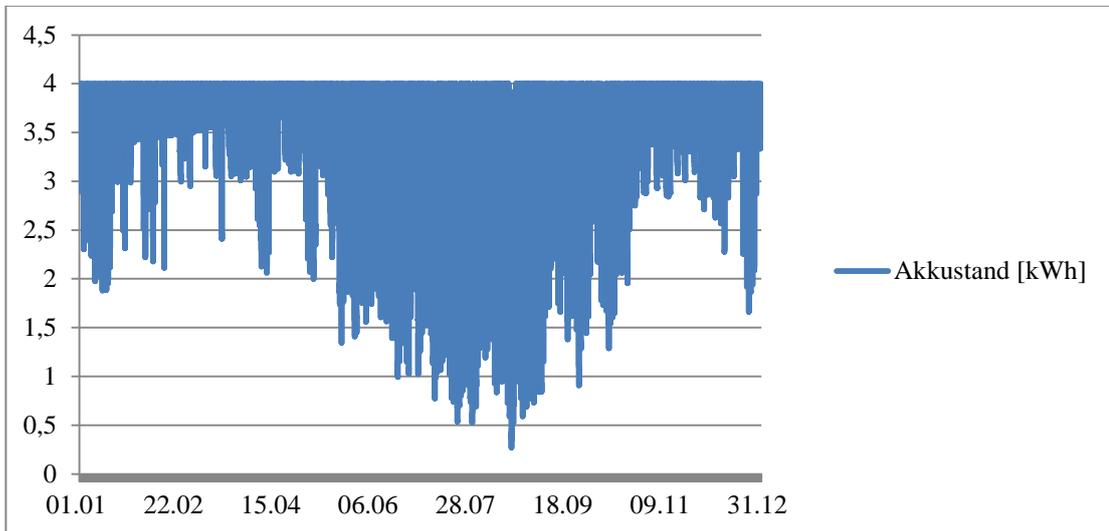


Abbildung 14: Akkustand im Konzept „Photovoltaik und Thermosiphon“

Insgesamt stehen durch die Photovoltaikanlage jährlich 2442 kWh elektrische Energie zur Verfügung. Der Energieverbrauch liegt bei 1406 kWh im Jahr. 946 kWh werden in Zeiten mit wenig Energiebedarf überproduziert und können nicht genutzt werden.

Die Thermosiphonanlage besteht aus einem Speicher mit 150 l Fassungsvermögen und einem Kollektor mit 1,82 m² Aperturfläche, welcher auf 30° aufgeständert wird. Wegen der hohen Sonneneinstrahlung geht das System vor allem im Sommer oftmals in Stagnation. Wie in Abbildung 15 zu sehen, erreichen die Temperaturen im Kollektor dann über 120 °C, der Speicher wird auf knapp 100 °C aufgeladen. Da moderne Thermosiphonanlagen einen thermostatischen Abschaltmechanismus besitzen, welcher ab 80 °C ein weiteres Aufheizen des Speichers verhindert, ist dies weiter kein Problem. (solkonzept, 2014) Es muss jedoch unbedingt ein thermostatisch geregeltes Mischventil vor den Verbrauchern verbaut werden, um angenehme Temperaturen zu gewährleisten und Verbrühungen vorzubeugen. Das Modell wurde zusätzlich mit einem

modifizierten Warmwasser-Verbrauchsprofil getestet. Falls abends nur ein Bewohner des Containers duschen sollte, so steht auch morgens noch genügend Wärme für den anderen Bewohner zur Verfügung, um heiß zu duschen. Da die Temperaturen im Warmwasserspeicher der Thermosiphonanlage höher sind als im Elektroboiler, werden außerdem geringere Wassermengen entnommen und mit Frischwasser gemischt. Maximal kühlt der Speicher im oberen Bereich auf 30 °C aus. Die Kollektortemperatur sinkt nachts auf Umgebungstemperatur. Zu dieser Zeit steht der Kreislauf, da die Speichertemperatur höher als die Kollektortemperatur ist.

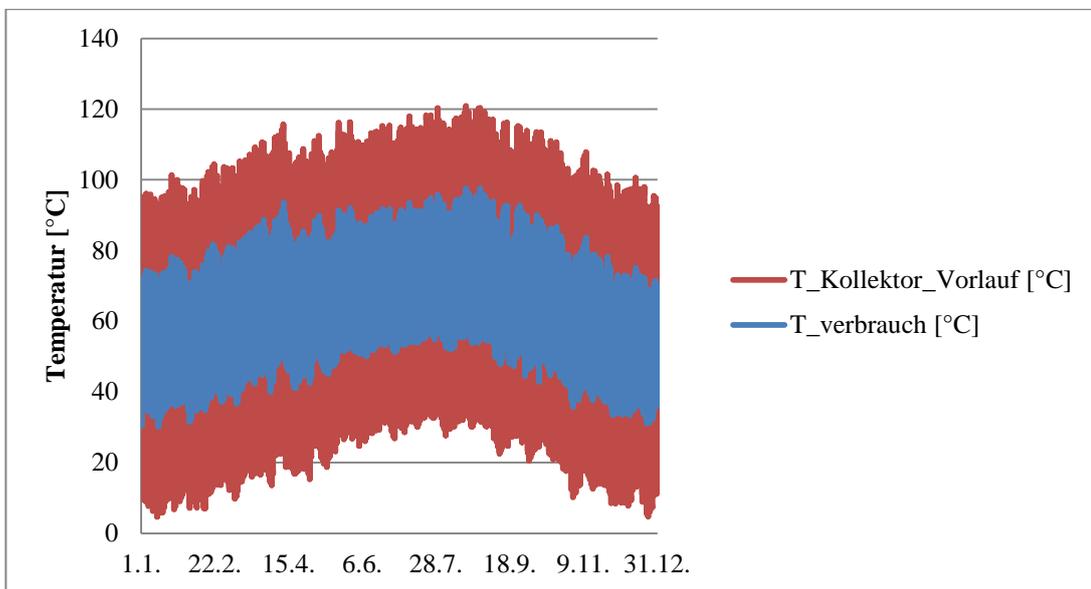


Abbildung 15: Temperaturen an der Thermosiphonanlage

4.3 Verwendete Komponenten

Die Simulation hat Ergebnisse für die benötigten Energiemengen zur Klimatisierung, Warmwasserbereitung und Stromversorgung geliefert und theoretische Berechnungen bestätigt. In diesem Kapitel werden nun reale Komponenten beschrieben, die benötigt werden, um die Energie zur Verfügung zu stellen.

4.3.1 Komponenten der Photovoltaikanlage

Für die Photovoltaikanlage eignen sich monokristalline Module der Fima Solarfabrik vom Typ pro Mono M3. Diese bieten eine Nennleistung von 200 Wp bei einem Wirkungsgrad von 15,7 %. Die Abmaße eines Moduls betragen 808 x 1580 mm. (solarfabrik, 2014) Dabei handelt es sich um eine Standardgröße für Photovoltaikmodule. Darin liegt der Vorteil dieses Typs, weil bei horizontaler Dachbelegung und einer Klemmenbreite von 2 cm bis zu 16 Module auf dem Containerdach montiert werden können. Als Unterkonstruktion dienen Querstreben, welche mit dem Dach verschraubt werden. Die Querstreben ermöglichen eine Hinterlüftung der Module, wodurch der Aufheizvorgang verlangsamt und die Wirkungsgradverluste verringert werden. Abbildung 16 zeigt eine mögliche Dachbelegung in einer 3D-Zeichnung. Rechts ist die Außeneinheit der Klimaanlage zu sehen.

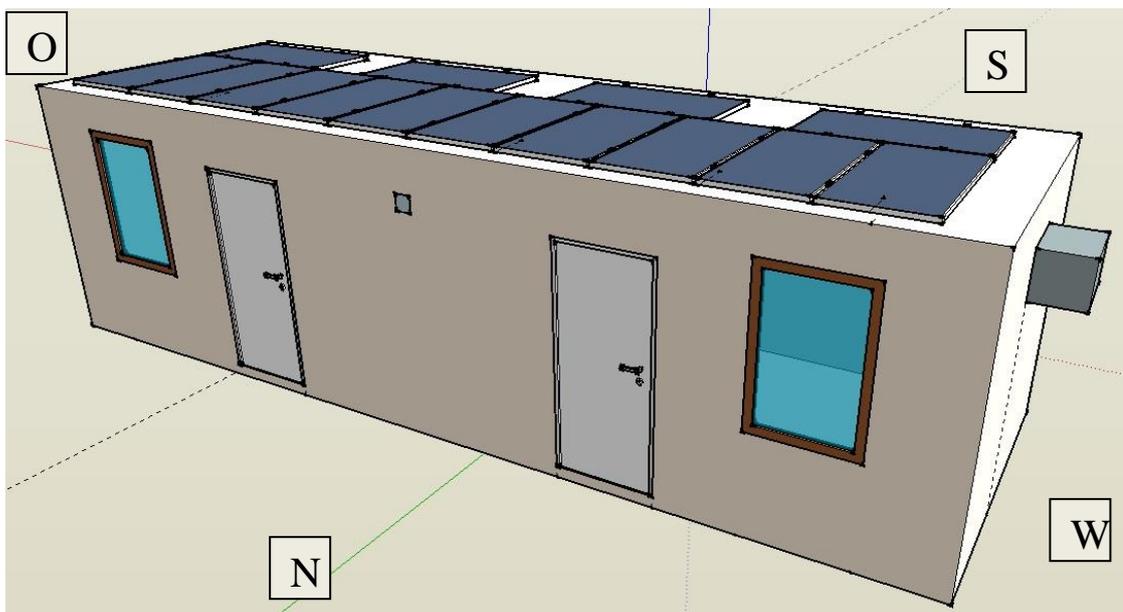


Abbildung 16: 3D Zeichnung für das Konzept "nur Photovoltaik"

Die Streben können über Blechschrauben mit dem Containerdach verbunden werden. Um ein Eindringen von Feuchtigkeit in die Isolierung des Containers zu vermeiden, sollten die Verschraubungen zumindest mit O-Ringen abgedichtet werden. Aufgrund der geringen Niederschlagsmenge in der Sahara sollte diese Abdichtung genügen. Mittels Klemmen werden die Module an ihrer

langen Seite an den Streben befestigt. Über ein Kabel wird die elektrische Energie an den Wechselrichter weitergeleitet, welcher im Inneren des Containers untergebracht werden sollte, um die Kondensatoren vor frühzeitiger Alterung durch Temperaturschwankungen zu schützen. Bei der Durchdringung der Wand ist wiederum darauf zu achten, die Isolierung des Containers nicht zu gefährden. Vorzugsweise kann der vorhandene Durchgang für das Stromkabel verwendet werden, der auch für die bisherige konventionelle Stromversorgung benötigt wurde.

Für die Auswahl des Wechselrichters muss eine Wechselrichterauslegung durchgeführt werden. Dabei muss zunächst die Leerlaufspannung des Modulfelds bei 10 °C Modultemperatur berechnet werden. Dazu wird die im Datenblatt angegebene Leerlaufspannung bei 25 °C (37,26 V) mit dem spannungsbezogenen Temperaturkoeffizienten (0,0034 V/K) verrechnet. Es ergibt sich eine maximale Leerlaufspannung von 638,68 V bei 14 Modulen, 364,96 V bei acht Modulen. Diese maximale Leerlaufspannung tritt bei tiefen Temperaturen und plötzlich aufklarendem Himmel auf und darf die Leerlaufspannung des Wechselrichters nicht überschreiten, da er sonst beschädigt wird. Als zweites Kriterium wird die Spannung der Module im MPP bei 70 °C Modultemperatur über den Temperaturkoeffizienten berechnet. Da die Spannung mit steigender Modultemperatur sinkt gibt dieser Wert die minimale MPP-Spannung wieder. Er muss über der minimalen MPP-Eingangsspannung des Wechselrichters liegen, da er sonst nicht verarbeitet werden kann. Bei 14 Modulen ergeben sich 441,84 V, bei acht Modulen 252,48 V. Ebenso wird die MPP-Spannung der Module bei 25 °C berechnet. Dieser Wert muss unter der maximalen Eingangsspannung des Wechselrichters liegen. Für 14 Module ergeben sich 521,64 V, für acht Module 308,24 V. Als letztes Kriterium sollte die gelieferte Leistung der Module die Leistung des Wechselrichters nicht überschreiten, um die komplette Leistung ausnutzen zu können. 14 Module liefern 2800 Wp, acht Module liefern 1600 Wp. Die Kriterien werden für die kleine Photovoltaikanlage beispielsweise von dem Inselwechselrichter *WT-HYS-3000* der Westech Solar OHG erfüllt. (wetech-pv, 2014) Der *sunny island 3.0* der Firma SMA genügt den Anforderungen der großen Photovoltaikanlage. (sma, 2014) Diese

Inselwechselrichter übernehmen das Beladen der Batterie und die Umwandlung des gelieferten Gleichstroms in Wechselstrom.

Als nächste Komponente folgen die eingesetzten Lithium Ionen Akkus. Hier ist wichtig, dass die Systemspannung mit der der Wechselrichter übereinstimmt. Außerdem muss die Akkukapazität etwas überdimensioniert werden, damit der Akku niemals komplett entladen wird, wodurch die Lebensdauer reduziert werden würde. So gibt der Hersteller *ASD* für seine Akkumulatoren mit Lithium Polymer Technik eine Zyklenzahl von über 5000 an, solange der Akku nicht tiefer als auf 20 % Restkapazität entladen wird. Die angegebene Zyklenzahl bezieht sich immer auf gefahrene Vollzyklen. Das heißt zwei halbe Zyklen ergeben einen Vollzyklus. Eine Abschätzung aus dem Akkuprofil der Simulation ergibt etwa 250 Vollzyklen im Jahr. Danach liegt die Lebensdauer des Akkus bei 20 Jahren. Bei 20 % geforderter Restkapazität ergibt sich für 6 kWh nutzbare Akkukapazität eine notwendige Nennkapazität von 7,5 kWh. Für 4 kWh nutzbare Akkukapazität werden 5 kWh Nennkapazität benötigt. *ASD* bietet für diesen Energiebedarf den *future one 300* mit 5,12 kWh Nennkapazität und den *future one 600* mit 7,48 kWh Nennkapazität. Die Firma stellt auch Sets inklusive Wechselrichter zusammen. Die Ausgangsleistung beträgt 2 bis 3,5 kW, der Gesamtwirkungsgrad 88 %. Es gibt keine Wartungsvorschriften für den Speicher, der Raum in dem er installiert wird muss nicht gelüftet werden. Allerdings nimmt das Gesamtsystem inklusive Regelung einen Teil des begrenzten Wohnraums im Container in Anspruch. Die Abmaße betragen (L/B/H) 513/600/1053 mm, bzw. 613/600/1413 mm für den größeren Akku. (asd-sonnenspeicher, 2014)

4.3.2 Komponenten zur Warmwasserbereitung

Im Konzept „nur Photovoltaik“ werden 80 l Speichervolumen zur elektrischen Warmwasserbereitung benötigt. Aufgrund des besseren Verhältnisses der wärmeabgebenden Oberfläche zum Speichervolumen, ist es sinnvoll, einen 80 l Boiler für beide Bäder zu verwenden, statt zwei 40 l Boiler einzusetzen. Allerdings ist dazu eine Wasserleitung durch die Trennwand in der Mitte des

Containers zu verlegen. Auf dem Markt ist beispielsweise der Typ *SG-Neptun-80* mit einem 1,5 kW leistenden Heizstab erhältlich. Dieser Elektroboiler hat einen Durchmesser von 460 mm und ist 920 mm hoch. (heizung-solar24, 2014) Um den Wohnraum im Container möglichst konstant aufzuteilen, sollten der Boiler und der Akku nicht in derselben Containerhälfte installiert werden.

Im Konzept „Photovoltaik und Thermosiphon“ wird für die Warmwasserbereitung eine Thermosiphonanlage eingesetzt. Die Firma *Eldom* bietet eine passende Anlage mit 150 l Speichervolumen und 1,82 m² Aperturfläche des Kollektors. Der Speicher besitzt eine 50 mm dicke Wärmedämmung aus Polyurethan. Im Lieferumfang enthalten ist die Unterkonstruktion für die Aufständigung des Kollektors. Die Anlage wird auf dem Containerdach verschraubt und muss aufgrund des hohen Gewichts des Warmwasserspeichers nicht weiter gegen Windlasten gesichert werden. Die maximale Traglast des Containerdaches beträgt 125 kg/m². Um diese nicht zu überschreiten, muss die Unterkonstruktion eine gleichmäßige Gewichtsverteilung gewährleisten. Es handelt sich um eine Anlage mit zwei Kreisläufen. Über einen internen Wärmetauscher wird die im Kollektor gesammelte Wärme auf das Wasser im Speicher übertragen. Die Anlage wird bis auf 200 °C Kollektortemperatur getestet und verträgt daher die häufige Stagnation des Systems im Sommer. Ein 5 l Membranausdehnungsgefäß sorgt für den Druckausgleich bei hohen Temperaturen. Steigt der Druck im Kollektorkreislauf dennoch zu hoch, öffnet das Sicherheitsventil. In diesem Falle müsste der Kreislauf, nachdem er abgekühlt ist wieder aufgefüllt werden. (eldominvest, 2014) Vom Containerdach muss eine Warmwasserleitung ins Innere des Containers zu den Verbrauchern verlegt werden. Um dem Eindringen von Feuchtigkeit in die Isolierung vorzubeugen, sollte die Wasserleitung nicht durch das Dach, sondern durch eine Seitenwand geführt werden. Die folgende 3D-Zeichnung zeigt eine mögliche Verteilung der PV-Module und der Thermosiphonanlage auf dem Containerdach unter Berücksichtigung der Himmelsrichtungen.

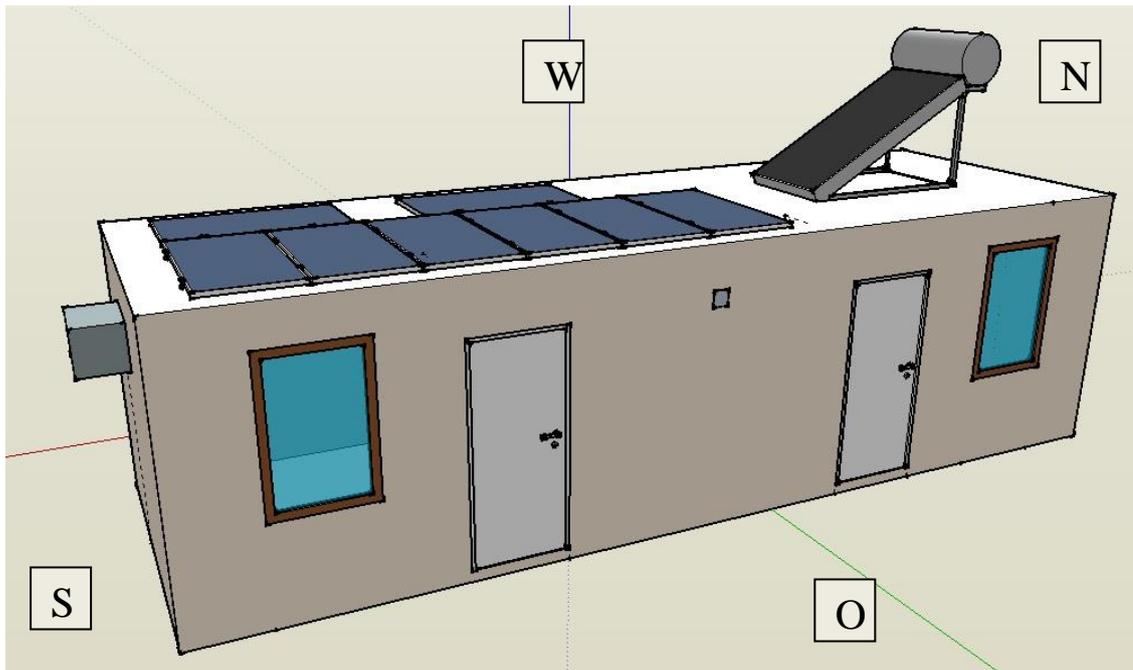


Abbildung 17: 3D Zeichnung für das Konzept „Photovoltaik und Thermosiphon“

4.3.3 Komponenten zur Klimatisierung

Für die Klimatisierung wird eine Multisplitklimaanlage mit reversibler Wärmepumpe eingesetzt. Diese besteht aus einer Außeneinheit, und zwei Inneneinheiten, den Wandkonvektoren, welche die Wärme oder Kälte im Raum verteilen. Da der Container in der Mitte durch eine Trennwand geteilt ist, ist für jedes Abteil ein Wandkonvektor mit der Hälfte der in Kapitel 3 berechneten Heiz- und Kühlleistung notwendig. Somit muss jeder Wandkonvektor 500 W Heizleistung und 1000 W Kälteleistung abgeben können. Die Außeneinheit kann an der Außenwand des Containers aufgehängt werden. Sie beinhaltet im Kühlbetrieb den Rückkühler, in welchem das Kältemittel wieder verflüssigt wird und die aufgenommene Wärme aus dem Raum an die Umgebung abgibt. Durch die Druckabnahme im Entspannungsventil verdampft das Kältemittel im Inneren des Raumes und nimmt Wärme aus der Raumluft auf. Mit Hilfe eines in die Wandkonvektoren integrierten Gebläses wird die abgekühlte Luft durch erzwungene Konvektion im Raum verteilt. Anfallendes Kondensat wird aufgefangen und abgeführt. Im Heizbetrieb wird das Kältemittel in der Außeneinheit verdampft und nimmt

Wärme aus der Umgebung auf. Anschließend wird es unter Aufwendung elektrischer Energie verdichtet und gibt bei der Kondensation im Raum seine Wärme ab, welche über die Konvektoren verteilt wird. Letztendlich wird beim Umschalten von Kühl- auf Heizbetrieb die Flussrichtung des Kältemittels im Kreislauf umgekehrt. Von der Firma *Mitsubishi Electronics* wird beispielsweise die Außeneinheit vom Typ MXZ-2D33VA-E2 angeboten. Dieses Gerät bietet 3,3 kW Kühlleistung und 4 kW Heizleistung für bis zu zwei Inneneinheiten. Allerdings passt eine stufenlose Regelung die Kühl- bzw. Heizleistung exakt an den aktuellen Bedarf an. Dies widerspricht dem taktenden System im Simulationsmodell, reduziert jedoch den Energiebedarf. Der Hersteller gibt für die Effizienz der Geräte im Kühlbetrieb mit dem SEER (seasonal energy efficiency ratio) eine jahreszeitbedingte Leistungszahl von 5,5 (mitsubishi-les, 2014). Dieser Wert ergibt sich aus dem Durchschnitt der Leistungszahlen bei bestimmten Betriebspunkten. Die Messpunkte liegen bei 20, 25, 30 und 35 °C Außentemperatur (klimaprofis, 2014). Da in der Sahara deutlich höhere Temperaturen auftreten, ist mit einer niedrigeren Jahresarbeitszahl im Kühlbetrieb zu rechnen. Im Gegensatz dazu wird der SCOP (seasonal coefficient of performance) für die Effizienz der Geräte im Heizbetrieb mit 4,1 angegeben (mitsubishi-les, 2014). Die Messpunkte liegen hier bei 12, 7, 2 und -7 °C (klimaprofis, 2014). Die Jahresarbeitszahl für den Heizbetrieb sollte aufgrund ausbleibender Frosttemperaturen in der Sahara etwas höher liegen. Die Abmessungen der Außeneinheit betragen 800 x 285 x 550 mm (Breite x Höhe x Tiefe), das Gewicht 32 kg. Als Inneneinheit eignen sich Wandgeräte vom Typ MSZ-SF15VA mit einer maximal übertragbaren Kälteleistung von 1,5 kW bzw. maximal übertragbaren Heizleistung von 1,7 kW. Die Abmessungen betragen 760 x 168 x 250 mm (Breite x Tiefe x Höhe), das Gewicht 7,7 kg. Im Lieferumfang enthalten sind 20 m Leitungslänge für das Kältemittel (mitsubishi-les, 2014). Abbildung 18 zeigt das beschriebene Wandgerät und die Außeneinheit der Multisplitklimaanlage.



Abbildung 18: Innen- und Außeneinheit der Multisplitklimaanlage (mitsubishi-les, 2014)

4.4 Technische Bewertung

Die beiden Konzepte „nur Photovoltaik“ und „Photovoltaik und Thermosiphon“ werden nun aus technischer Sicht bewertet. Im ersten Konzept müssen sechs PV-Module mehr auf dem Dach des Containers installiert werden. Dafür entfällt der Installationsaufwand für die Thermosiphonanlage. Für die Thermosiphonanlage muss eine Warmwasserleitung verlegt werden, welche die Außenwand des Containers durchdringt. Dabei ist darauf zu achten die Isolierung nicht zu beschädigen. Dafür wird der elektrische Energiebedarf, wie in Abbildung 19 zu sehen ist, deutlich gesenkt. Es entfällt mit dem Elektroboiler der größte elektrische Energieverbraucher, welcher im Konzept „nur Photovoltaik“ die große Photovoltaikanlage unumgänglich macht. Durch die Thermosiphonanlage dagegen wird das Warmwasser ohne Einsatz elektrischer Energie gewonnen. Dadurch wird die Klimatisierung zum größten Verbraucher. Sie setzt die untere Grenze für die Kapazität des elektrischen Speichers, da die Klimaanlage im Sommer nachts mit elektrischer Energie versorgt werden muss. Die Klimatisierung über ein Multi-Splitgerät bietet technisch betrachtet eine einfache Möglichkeit zur Temperierung der Raumluft im Container ohne großen Installationsaufwand. Der elektrische Energiebedarf zum Heizen wird durch den Einsatz der Wärmepumpe stark reduziert.

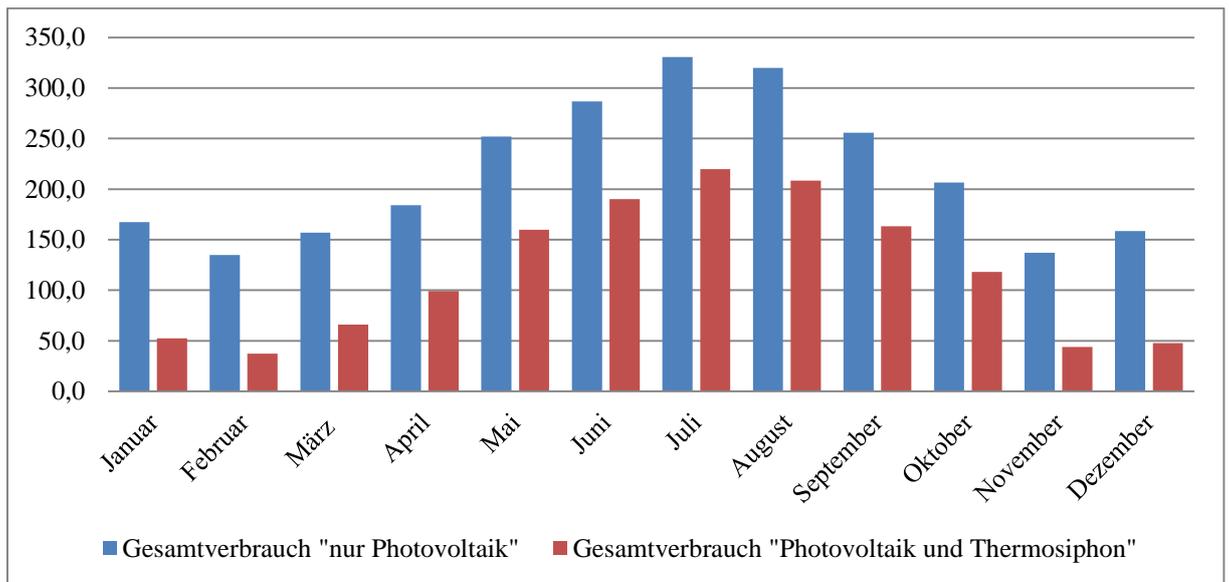


Abbildung 19: elektrischer Energiebedarf der Gesamtkonzepte

Durch den größeren elektrischen Speicher und den Warmwasserboiler im Container wird das Platzangebot für die Bewohner im Konzept „nur Photovoltaik“ reduziert. Das Konzept mit Thermosiphonlage ist auch besser an den Energiebedarf über das Jahr angepasst. Durch die geringere Anzahl an PV-Modulen wird in der Übergangszeit, wenn ein niedriger Energiebedarf herrscht, nicht so viel elektrische Energie erzeugt, die nicht genutzt werden kann. Insgesamt ergibt sich über das Jahr eine 44 % niedrigere Überproduktion an elektrischer Energie. Dadurch ist das Konzept „nur Photovoltaik“ technisch betrachtet zwar einfacher zu installieren und bietet eine höhere Versorgungssicherheit durch den Wegfall der Thermosiphonanlage. Es arbeitet jedoch ineffizienter. Beide Konzepte decken den gesamten Energiebedarf des solarautarken Wohncontainers.

4.5 Wirtschaftliche Bewertung

In der wirtschaftlichen Bewertung wird ein Kostenvergleich der beiden Gesamtkonzepte durchgeführt. Die Kosten bestehen dabei ausschließlich aus Investitionskosten, da die Systeme nahezu wartungsfrei über 20 Jahre funktionieren sollen. In Kapitel 4.3 sind die eingesetzten Komponenten mit technischen Daten und unter Angabe der Hersteller beschrieben. Die Tabelle

3 stellt die Investitionskosten für die beiden Konzepte einander gegenüber. Die Preise sind überwiegend auf den Internetseiten der Hersteller zu finden. Für die Thermosiphonanlage und die Photovoltaikmodule werden Preise von vergleichbaren Modellen auf dem Markt ausgewählt, da die Hersteller der Modelle aus Kapitel 4.3 keine Preisangaben machen. Die höchsten Kosten fallen in beiden Konzepten durch Akku und Wechselrichter an. Im Konzept „Photovoltaik und Thermosiphon“ verursachen diese beiden Komponenten 65 % der Kosten, im Konzept „nur Photovoltaik“ sogar 69 %.

	Kozept "nur Photovoltaik" Invest. Kosten [€]	Konzept "Photovoltaik und Thermosiphon" Invest. Kosten [€]
PV-Module	2800	1600
Lithium-Ionen Akku + Wechselrichter	10710	8990
Multi Splitklimaanlage	1700	1700
Elektroboiler	160	0
Thermosiphonanlage	0	1300
Unterkonstruktion/Verkabelung PV	200	120
Verrohrung Warmwasser	0	150
Gesamt	15570	13860

Tabelle 3: Kostenvergleich der Gesamtkonzepte

Im Konzept „nur Photovoltaik“ müssen mehr Module montiert werden. Dadurch ist auch mehr Material für die Unterkonstruktion und zur Befestigung notwendig. Im Konzept „Photovoltaik und Thermosiphon“ treten höhere Kosten zur Warmwasserbereitung auf. Eine moderne Thermosiphonanlage mit Überhitzungsschutz kostet etwa 1300 € (solkonzept, 2014). Dazu kommen die Kosten für die Rohrleitung und Verlegung. Am Ende bleibt ein Kostenvorteil von etwa 1700 € für das System „Photovoltaik und Thermosiphon“.

Zur besseren Einschätzung der Wirtschaftlichkeit des solarautarken Wohncontainers zeigt Tabelle 4 die Kosten, welche überschlägig bei der Energieversorgung des Wohncontainers mittels eines Dieselgenerators über 20 Jahre entstehen. Der Energiebedarf wird dabei gleich dem Bedarf im Konzept „nur Photovoltaik“ angesetzt. Zu beachten sind hohe Betriebskosten des Dieselgenerators für Wartung und Instandhaltung. Alle 2500 bis 4000

Betriebsstunden müssen Wartungsmaßnahmen wie Öl- und Zündkerzenwechsel durchgeführt werden. Die Kosten betragen inklusive Lohnkosten für die Monteure durchschnittlich 350 € pro Wartung (Ihr-BHKW, 2014). Aufgrund des extrem niedrigen Dieselpreises in Algerien von derzeit 13 ct/l (Benzinpreis, 2014) bleiben die Gesamtkosten nach 20 Jahren dennoch knapp unter den Investitionskosten des solarautarken Konzeptes.

Wirkungsgrad	0,25
Energieinhalt Diesel [kWh/l]	10
Dieselpreis Algerien (28.12.14) [€]	0,13
elektrischer Energiebedarf [kWh]	2589
Dieserverbrauch [l]	1035,6
Investitionskosten Dieselgenerator [€]	2000
Wartungskosten [€/a]	350
Treibstoffkosten [€/a]	134,6
Splitklimaanlage	1700
Elektroboiler	160
Gesamtkosten nach 20 a [€]	13552

Tabelle 4: Kosten für die Energiebereitstellung mittels Dieselgenerator

Bei steigendem Dieselpreis würde das solarautarke Konzept deutliche wirtschaftliche Vorteile gegenüber einem konventionellen Konzept bringen. Wenn alle Container an einer Ölförderquelle solarautark ausgerüstet werden, wird gleichzeitig das Ziel erreicht, dass der Installationsaufwand und der finanzielle Aufwand für ein temporäres Stromverteilungsnetz, welcher noch nicht einberechnet wurde, entfallen.

Berechnet man für das Konzept „Photovoltaik und Thermosiphon“ Wartungskosten von 1 % der Investitionskosten pro Jahr, so fallen zusätzlich 2752 € betriebsgebundene Kosten innerhalb von 20 Jahren an, für das Konzept „nur Photovoltaik“ 3114 €. Daher ist auf eine hohe Qualität und Zuverlässigkeit der Komponenten zu achten.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist für die solarautarke Energieversorgung aufgrund der niedrigeren Investitionskosten das Konzept „Photovoltaik und Thermosiphon“ vorzuziehen.

5 Ausblick und Schlussfolgerungen

Um den einwandfreien Betrieb der solaren Systeme zu gewährleisten, sind die Umwelteinflüsse zu beachten. Im Rahmen der Berechnungen und Simulationen hat sich herausgestellt, wie hoch beispielsweise der Einfluss des solaren Wärmeeintrags durch die Fenster ist. Daher sollten die Fenster nach Norden oder Osten ausgerichtet werden. Das Schließen der Rollläden an heißen Sommerabenden entlastet die Kältemaschine entscheidend. Dafür muss möglicherweise das Kunstlicht eher eingeschaltet werden. Dieses benötigt jedoch weit weniger elektrische Energie, als die Kompressionskältemaschine. Ein weiterer Umweltfaktor sind die Sandstürme in der Sahara. Dabei kann sich der Sand auf den Photovoltaikmodulen ablagern. Durch Verschattung einzelner Zellen wird der Ertrag der Anlage gesenkt und reicht eventuell nicht mehr aus, um den Akku tagsüber aufzuladen. Daher müssen die Module nach Sandstürmen kontrolliert und vom Sand befreit werden. Damit das Glas dabei nicht verkratzt wird, wobei der Absorptionsgrad verringert werden würde, eignet sich für die Reinigung ein Wasserschlauch mit Düse. Bei Wasserknappheit sollte ein feiner Besen eingesetzt werden. Während heftiger Sandstürme kann zudem feiner Sand über die Klimaanlage in den Container gelangen.

Als mögliche Optimierung der Konzepte kann die Isolierung des Containers verbessert werden, indem die verwendete Dämmschicht verbreitert wird. Bei einer Angleichung der Isolierung von Decke und Außenwänden an die des Bodens (U-Wert: $0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$) ergibt sich für die Heizung eine Energieeinsparung von 23 % im Jahr, für die Kältemaschine werden 11 % eingespart. Insgesamt wird der elektrische Energiebedarf für die Klimatisierung um 180 kWh reduziert, wodurch ein PV-Modul weniger erforderlich wird (erzeugt 305 kWh/a). Dafür ist mit einem Kostenaufschlag für die bessere Dämmung des Containers zu rechnen. Um den Wohnraum im Container nicht zu sehr zu verringern, könnte der Lithium Ionen Akku außen, direkt an der Containerwand mit einer Einhausung zum Schutz gegen Witterungseinflüsse aufgestellt werden.

Die Computersimulation im Rahmen dieser Arbeit beruht, aufgrund des begrenzten Zeitraums, teilweise auf einfachen Modellen. Da die Klimatisierung einen großen Teil des Energiebedarfes ausmacht, sollte in einer tieferen Bearbeitung des Themas insbesondere die reversible Wärmepumpe realitätsgetreuer modelliert werden. Dabei sollte die temperaturabhängige Variation der Leistungszahl berücksichtigt werden. Moderne Splitgeräte regeln die Kühl- bzw. Heizleistung außerdem stufenlos je nach Bedarf, statt taktend wie in den Simulationsmodellen. Diese Regelung und eine Jahresarbeitszahl über 3,5 werden in der Realität vermutlich einen geringeren elektrischen Energiebedarf für die Klimatisierung herbeiführen. Zudem wurde in der Computersimulation für das Lastprofil der elektrischen Geräte, statt zwei Kühlschränken, nur einer berücksichtigt. Da der elektrische Energiebedarf für die elektrischen Geräte nicht dominant ist, sind die Auswirkungen eines zweiten Kühlschranks jedoch nicht gravierend. Durch einen weiteren Kühlschrank mit 86 kWh Energiebedarf pro Jahr steigt der elektrische Energiebedarf pro Tag um etwa 0,2 kWh an. Bei beiden Endkonzepten bietet sich für verbraucherabhängige, variierende Nutzungsprofile noch genügend Platz für weitere Photovoltaikmodule auf dem Dach des Containers. Die Simulation zeigt, dass ein Modul selbst im Januar durchschnittlich 0,6 kWh/d bei waagrecht Montage einbringt. Zusätzlich müsste der elektrische Speicher um knapp 0,1 kWh Speicherkapazität erweitert werden, um über die Nacht (10 Stunden) genügend Energie für einen zweiten Kühlschrank bereitzustellen. Zu beachten sind außerdem die Wärmeverluste des Wechselrichters, welche sich bei einer Installation im Inneren des Containers auf die Raumluftkonditionierung auswirken. Bei einem Wechselrichterwirkungsgrad von 95 % betragen sie 5 % der erzeugten elektrischen Leistung. Bei 2 kW Ertrag aus den Photovoltaik Modulen ergeben sich somit 100 W zusätzliche interne Wärmelasten.

Des Weiteren könnten die Verbrauchsprofile durch eine Analyse vor Ort realitätsgetreuer ausgearbeitet werden. Im Zuge einer Vorort Analyse könnten auch die Komponenten des temporären Stromnetzes genauer untersucht werden. Daraus ließe sich der finanzielle und zeitliche Aufwand zur Installation dessen besser einschätzen und mit den Investitionskosten für ein solarautarkes Konzept vergleichen.

Um die Traglast des Containerdaches nicht zu überschreiten, sollte die Gewichtsverteilung der Thermosiphonanlage durch die Unterkonstruktion getestet werden.

Als Fazit lässt sich sagen, dass das Ziel eines Konzeptes zur solarautarken Energieversorgung eines Wohncontainers, aufgrund der hervorragenden Einstrahlungsbedingungen in der Sahara, auf verschiedene Wege erreicht werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei mögliche Konzepte entwickelt. Je nachdem, ob eine niedrige Systemkomplexität, hohe Zuverlässigkeit oder geringe Kosten im Vordergrund stehen, erweist sich das eine oder andere Konzept für die beste Lösung. Zum Abschluss zeigt Tabelle 5 die Zusammensetzung des monatlichen elektrischen Energieverbrauches beider Endkonzepte „nur Photovoltaik“ und „Photovoltaik und Thermosiphon“. Die Werte ergeben sich aus der Jahressimulation.

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	
Heizstab Warmwasser	102,7	93,2	103	99,9	103	99,7	
Haushaltsgeräte	26,7	25,0	26,7	25,9	26,7	25,9	
Kältemaschine	0	1,8	25,9	58,5	122,3	161,1	
Kältemaschine mit Ostfenstern	0	4,2	38,4	73,2	133,1	164,3	
Wärmepumpe	25,9	8,2	0,8	0	0	0	
Wärmepumpe mit Ostfenstern	37,9	15	1,2	0	0	0	
Gesamtverbrauch "nur Photovoltaik"	167,3	135,0	156,8	184,3	252,0	286,7	
Gesamtverbrauch "Photovoltaik und Thermosiphon"	52,6	37,4	65,9	99,1	159,8	190,2	
Sonneneinstrahlung [kWh/m²]	143	144,3	190,5	221,2	236,2	234,9	
PV-Ertrag_14Module_0°	285,8	289,5	383,1	410,5	438	425,7	
PV-Ertrag_8Module_0°	163,3	165,5	218,9	234,6	250,2	243,3	
	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember	gesamt
Heizstab Warmwasser	103,1	103	99,8	103	99,8	103,1	1213,3
Haushaltsgeräte	26,7	26,7	25,9	26,7	25,9	26,7	315,5
Kältemaschine	200,7	190,3	130,2	76,7	7,7	0	975,2
Kältemaschine mit Ostfenstern	193	181,7	137,5	91,3	17,1	0,6	1034,4
Wärmepumpe	0	0	0	0	0,9	20,3	56,1
Wärmepumpe mit Ostfenstern	0	0	0	0	3,6	28,7	86,4
Gesamtverbrauch "nur Photovoltaik"	330,5	320,0	255,9	206,4	137,0	158,5	2590,4
Gesamtverbrauch "Photovoltaik und Thermosiphon"	219,7	208,4	163,4	118,0	43,9	47,6	1406,0
Sonneneinstrahlung [kWh/m²]	242	231,5	191,5	165,5	139,9	128,1	2268,6
PV-Ertrag_14Module_0°	428,9	410	351,3	315,1	278,9	257,1	4273,9
PV-Ertrag_8Module_0°	245,1	234,2	200,8	180	159,4	146,9	2442,2

Tabelle 5: monatlicher elektrischer Energiebedarf der Endkonzepte

6 Quellenverzeichnis

100000daecher. (kein Datum). Abgerufen am 2014 von
<http://www.100000daecher.de/main/solarenergie/solarthermie/>

- absorptionsmaschine. (kein Datum). *absorptionsmaschine*. Abgerufen am 12. 12 2014 von <http://absorptionsmaschine.de/thermisch-angetriebene-verfahren/absorptionsmaschinen/vor-und-nachteile-von-absorptionskaeltemaschinen.html>
- asd-sonnenspeicher*. (2014). Abgerufen am 25. 12 2014 von http://www.asd-sonnenspeicher.de/wp-content/uploads/2014/09/futureon_datenblatt_20140926.pdf
- Baumarkt*. (2014). Abgerufen am 23. 10 2014 von <http://www.baumarkt.de/nxs/943///baumarkt/schablone1/Warmwasserversorgung-alternativ-ueber-das-Stromkabel>
- baunetzwissen*. (2014). Abgerufen am 17. 01 2015 von http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Nachhaltig-Bauen_Raumluftqualitaet_662956.html
- benzinpreis*. (2014). Abgerufen am 28. 12 2014 von <http://benzinpreis.de/international.phtml?land=4>
- Biffar, B. (2010). *CO2-Emissionen und Energiekosten verschiedener Systeme der Kraftwärmekopplung*. Kempten: Hochschule Kempten.
- bmwi*. (2014). Abgerufen am 26. 10 2014 von <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Aussenwirtschaft/laenderinformationen,did=277756.html>
- cms*. (2014). Abgerufen am 02. 10 2014 von <https://www.cms.de/>
- dimplex*. (2014). Abgerufen am 17. 01 2015 von <http://www.dimplex.de/microsites/reversible-waermepumpe/prinzip2.php3>
- DIN 4108-2:2013-02. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz
- DIN EN 12831:2003-08. Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Normheizlast
- ecostream*. (2014). Abgerufen am 11. 03 2014 von <http://www.ecostream.com/about-ecostream/products/solar-faq>
- eldominvest*. (2014). Abgerufen am 27. 12 2014 von <http://www.eldominvest.com/en/product/251.html>
- energieheld*. (2014). Abgerufen am 02. 12 2014 von <http://www.energieheld.de/photovoltaik/stromspeicher/blei-oder-lithium>
- Hadamovsky, H.-F. und Jonas, D. (2000). *solaranlagen*. Würzburg: Vogel.
- Hanus, B. (2009). *Thermische Solaranlagen*. Poing: Franzis Verlag GmbH.
- heizungsfinder*. (2014). Abgerufen am 4. 12 2014 von <http://www.heizungsfinder.de/elektroheizung/ratgeber/kaufentscheidung>
- heizung-solar24*. (2014). Abgerufen am 27. 12 2014 von https://www.heizung-solar24.de/Elektro-Warmwasser-Boiler/80-Liter-Elektro-Boiler/80-Liter-Warmwasser-Elektro-Boiler-Neptun-1500-Watt::550.html?pk_campaign=google_shopping

heyde-windtechnik. (2014). Abgerufen am 10. 11 2014 von <http://www.heyde-windtechnik.de/anwend.htm#Anker2anwend>

ihr-bhkw. (2014). Abgerufen am 02. 12 2014 von <https://ihr-bhkw.de/technik/bhkw-praxis/bhkw-wartung>

ikz. (2014). Abgerufen am 24. 10 2014 von <http://www.ikz.de/1996-2005/1997/06/9706194.php>

iundm. (2014). Abgerufen am 20. 10 2014 von http://www.iundm.de/lars/4_1_Solarthermie.htm

klimaprofis. (2014). Abgerufen am 18. 01 2015 von <http://www.klimaprofis.com/seer-scop-was-ist-das>

Märtel, C. (2014). *photovoltaik-web.* Abgerufen am 14. 12 2014 von <http://www.photovoltaik-web.de/batteriesysteme-akkusysteme-pv/kostenvergleich-akkusystem.html>

mitsubishi-les. (2014). Abgerufen am 18. 01 2015 von <http://innovations.mitsubishi-les.com/de/vrf/pumy-p>

presse.wagner-solar. (2012). Abgerufen am 21. 01 2015 von <http://presse.wagner-solar.com/aktuelles/thermosiphonanlagen-mit-mehr-power/>

rauschenbach. (2014). Abgerufen am 6. 1 2015 von <http://www.rauschenbach.de/klimasanyo.htm>

Sattler, M. (2014). *Kraftwerk Haus - Schnittstellen zum smart grid.* ökozentrum.

sbz-online. (2014). Abgerufen am 17. 01 2015 von http://www.sbz-online.de/Cache/GENTNER/10020/GV-SVG-EXPORT-20080212-175307_MTg5MzM3Wg.GIF

sma. (2014). Abgerufen am 20. 12 2014 von <http://www.sma.de/produkte/batterie-wechselrichter/sunny-island-30m-44m.html>

solaranlagen-portal. (2014). Abgerufen am 23. 11 2014 von <http://www.solaranlagen-portal.com/solarmodule/systeme/vergleich>

solaranlagen-portal. (2014). Von <http://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/stromspeicher/solon-soliberty> abgerufen

solarfabrik. (2014). Abgerufen am 11. 11 2014 von http://www.solarfabrik.de/fileadmin/user_upload/Pro_M3_mono/Pro_M3_mono_monoblack_DE_1303.pdf

solkonzept. (2014). Abgerufen am 15. 12 2014 von <http://www.solkonzept.de/solarthermie/thermosiphonanlagen/thermosiphonanlage-secutherm>

Späte, F. und Ladener, H. (2007). *Solaranlagen.* Staufen bei Freiburg: ökobuch.

stromverbrauchinfo. (2014). Abgerufen am 08. 10 2014 von <http://www.stromverbrauchinfo.de/notebook-als-stromsparender-desktop-ersatz.php>

Theiß, E. (2008). *Regenerative Energietechnologien.* Stuttgart: Fraunhofer IRB.

transafrika. (2014). Abgerufen am 14. 10 2014 von <http://www.transafrika.org/>

Wagner, H.-F. (14. April 2007). *weltderphysik.de*. Von <http://www.weltderphysik.de/index.php?id=142> abgerufen

wetech-pv. (2014). Abgerufen am 20. 12 2014 von <http://westech-pv.com/index.php?a=3167>

wetterkontor. (2014). Abgerufen am 14. 10 2014 von <http://www.wetterkontor.de/de/klima/klima2.asp?land=dz&stat=60630>

wikipedia. (2014). Abgerufen am 07. 12 2014 von <http://de.wikipedia.org/wiki/Stefan-Boltzmann-Gesetz>

Anhang

- 1: Aufbau des Containers
- 2: Warmwasserprofil
- 3: Lastprofil elektrischer Geräte
- 4: Berechnungen zu Klimatisierung und Wärmekapazität
- 5: Modellaufbau in Simulink
- 6: Containerdorf mit temporärem Stromnetz

1: Aufbau des Containers

Innenmaße:

Breite b [m]	2,9
Länge l [m]	9,0
Höhe h [m]	2,4
Grundfläche [m ²]	25,8
Volumen [m ³]	60,9

Außenmaße:

Breite b [m]	3,0
Länge l [m]	9,1
Höhe h [m]	2,6
Grundfläche [m ²]	27,3

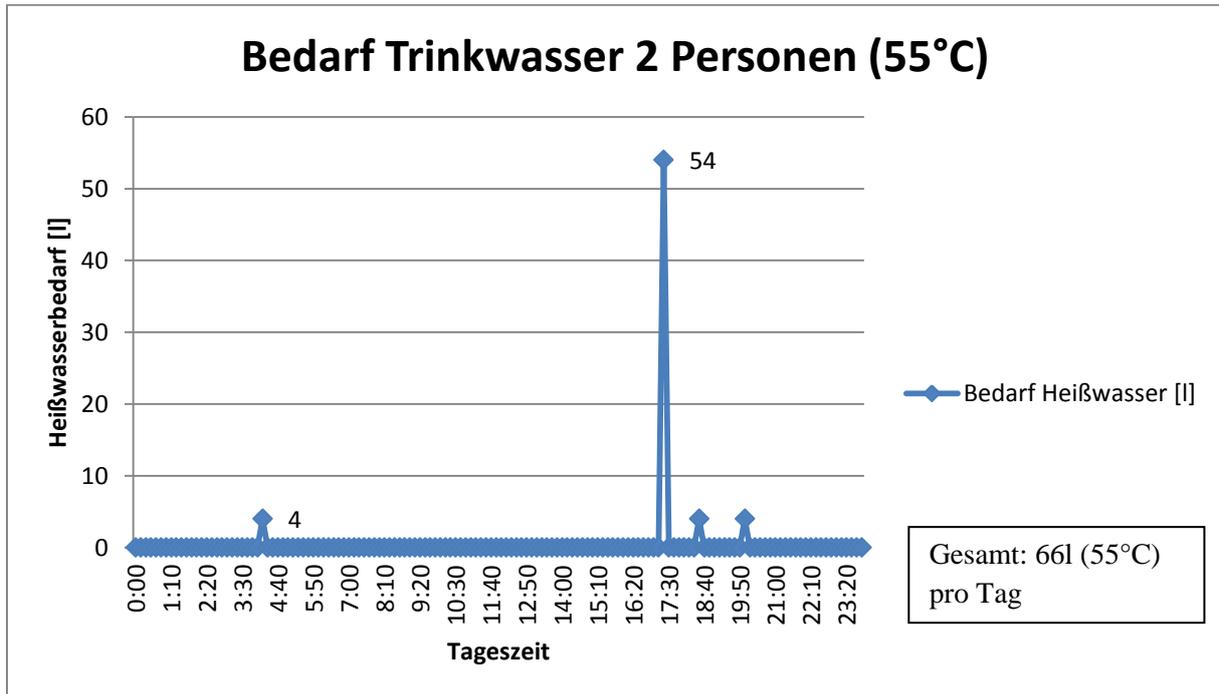
Aufbau der Wärmedämmung:

<u>Dach:</u>		<u>Wand längs (x2):</u>	
Fläche [m ²]	25,83	Fläche [m ²]	21,2
Stahlblech [m]	0,0055	ohne Fenster [m ²]	18,8
Mineralwolle [m]	0,1	Blech [m]	0,005
Spanplatte [m]	0,01	Polyurethanpaneele [m]	0,05
		Blech [m]	0,005
		Spanplatte	0,01
u [W/m ² K]	0,4	u [W/m ² K]	0,43

<u>Wand quer (x2):</u>		<u>Boden:</u>		<u>Fenstern (x2):</u>	
Fläche [m ²]	6,8	Fläche [m ²]	26,1	Höhe [m]	1,345
Blech [m]	0,005	Blech [m]	0,006	Breite [m]	0,88
Polyuretanpaneele [m]	0,05	Mineralwolle [m]	0,1	Fläche [m ²]	1,2
Blech [m]	0,005	Spanplatte [m]	0,022	U _w [W/m ² K]	1,3
Spanplatte [m]	0,01	PVC [m]	0,0015	(zweifach-Verglasung, warme Kante)	
u [W/m ² K]	0,43	u [W/m ² K]	0,33	g (Lichtdurchl.)	0,7

(cms, 2014)

2: Warmwasserprofil



Warm- und Mischwasserbedarf pro Person für Händewaschen und Duschen:

	Händewaschen	Wassertemp. [°C]
Heißwasser [l/(Person)]	3	45
Heißwasser [l/(Person)]	2	55
Kaltwasser [l/(Person)]	3	15
Heißwasser Anteil	0,4	
Kaltwasser Anteil	0,6	
Mischwasser [l/(Person)]	5	31
Dauer [s]	30	
$m_{31^\circ\text{C}}$ [kg/s]	0,167	31
$m_{55^\circ\text{C}}$ [kg/s]	0,067	55
$m_{15^\circ\text{C}}$ [kg/s]	0,1	15

Bedarf: 3x täglich, 2 Personen -> 12 l Heißwasser (55°C)

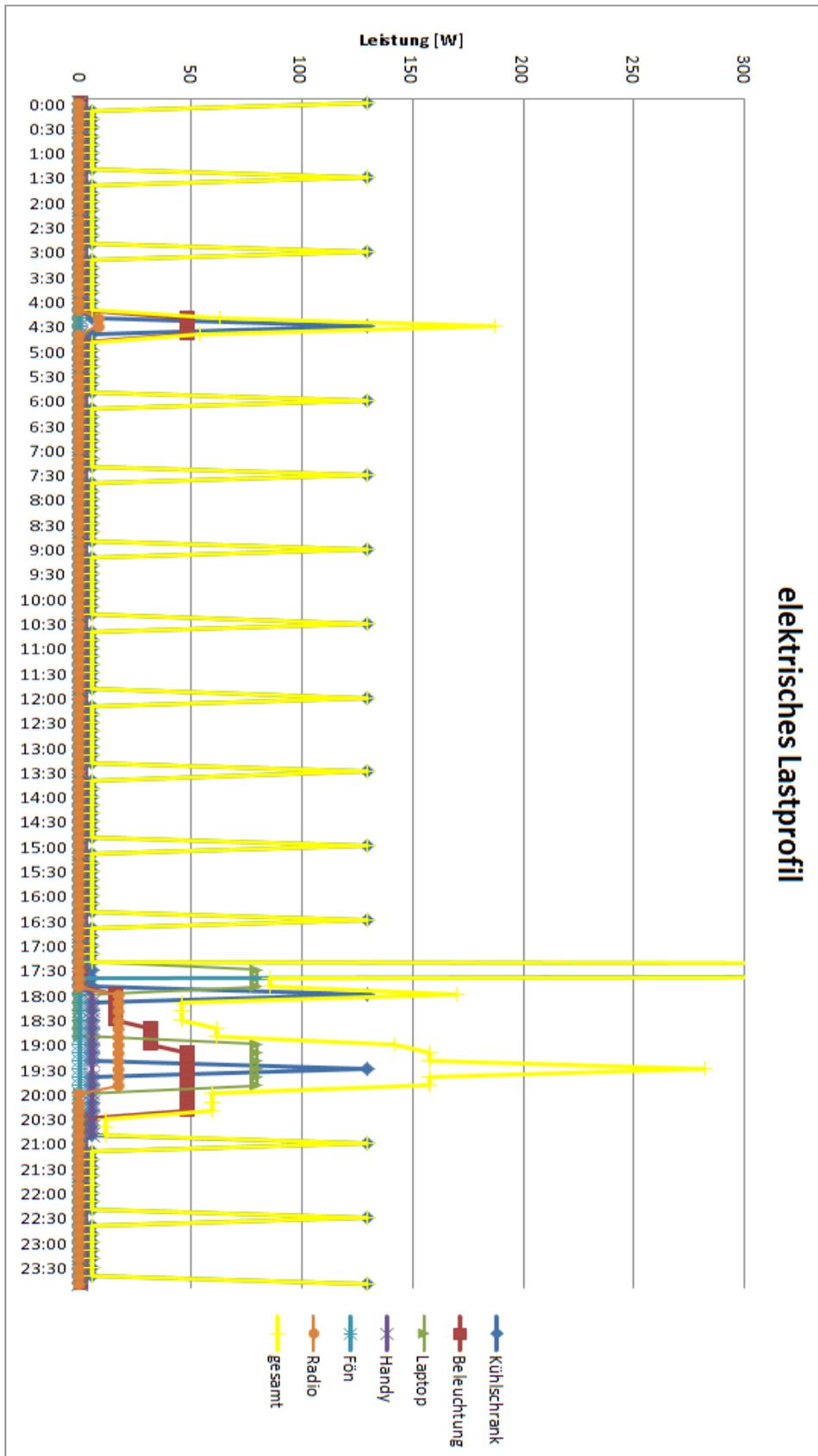
	Duschen	Wassertemp. [°C]
Heißwasser [l/(d*Person)]	35	45
Heißwasser [l/(d*Person)]	27	55
Kaltwasser [l/(d*Person)]	23	15
Heißwasser Anteil	0,54	
Kaltwasser Anteil	0,46	
Mischwasser [l/(d*Person)]	50	36,6
Dauer [s]	300	
$m_{36,6^\circ\text{C}}$ [kg/s]	0,167	36,6
$m_{55^\circ\text{C}}$ [kg/s]	0,090	55
$m_{15^\circ\text{C}}$ [kg/s]	0,077	15

Bedarf: 1x täglich, 2 Personen -> 54 l Heißwassern (55 °C)

(Hadamovsky, 2000, S. 233)

3: Lastprofil der elektrischen Geräte

Maximum 2000W, Minimum 6 W



4: Berechnungen zu Klimatisierung und Wärmekapazität

Heizlast Berechnung nach DIN EN 12831:

Transmissionsverlustbeiwert: $H_T = \sum u_i \cdot A_i$ (Vernachlässigung von Wärmebrücken)
 $H_T = H_T / A$
 Lüftungsverluste: $H_V = c_p \cdot \rho \cdot V_e \cdot n$ (für Luft: $c_p \cdot \rho = 0,34 \text{ Wh/m}^3\text{K}$)
 Heizlast: $Q_h = (H_T + H_V) \cdot (T_i - T_a) - Q_{\text{gewinn}}$ (Vernachlässigung solarer Gewinne)

H_T	0,41	W / K
$A_{\text{thermische Hüllfläche}}$	107,61	m^2
Luftwechsel	0,8	h^{-1}
V_e (Nettovolumen)	60,86	m^3
Innentemperatur	19	$^{\circ}\text{C}$
Außentemperatur	0	$^{\circ}\text{C}$

Heizlast [kW] 1,14
 - innere
 Gewinne: 0,18 (Kühlschrank 40W, pro Person 70W)
 = **0,96**

Kühllast Berechnung analog Heizlast, ohne solare Gewinne:

H_T	0,41	W / K
$A_{\text{thermische Hüllfläche}}$	107,61	m^2
Luftwechsel	0,8	h^{-1}
V_e	60,86	m^3
Innentemperatur	24	$^{\circ}\text{C}$
Außentemperatur	55	$^{\circ}\text{C}$

Kühllast [kW] -1,87
 innere Gewinne: 0,18 (Kühlschrank 40W, pro Person 70W)
 = **-2,05**

Wärmekapazität des Containers:

Formel: $C_{\text{gesamt}} = \sum \rho_i \cdot d_i \cdot c_i$

Stoffparameter	Dichte [kg/m^3]	Wärmekapazität [J/kgK]
Blech	7800	450
Spanplatte	600	1700
PVC	1200	1000

	Boden:	Dach:	Wand längs süd (fensterlos):	Wand längs nord:	Wand quer:	gesamt
Fläche [m ²]	25,8	25,8	21,2	18,8	6,8	
Blech [m]	0,0006	0,001	0,0005	0,0005	0,0005	
Mineralwolle [m]	0,1	0,100	0	0	0	
Blech [m]	0	0,000	0,0005	0,0005	0,0005	
Spanplatte [m]	0,022	0,010	0,010	0,010	0,010	
Polyuretanplatte [m]		0	0,05	0,05	0,05	
PVC [m]	0,0015	0	0	0	0	
Wärmekapazität [J/m ² K]	24.240	11.955	11.955	11.955	11.955	72.060
Wärmekapazität [J/K]	626.119,2	308.797,65	224.754	253.446	81.294	1.494.410,85

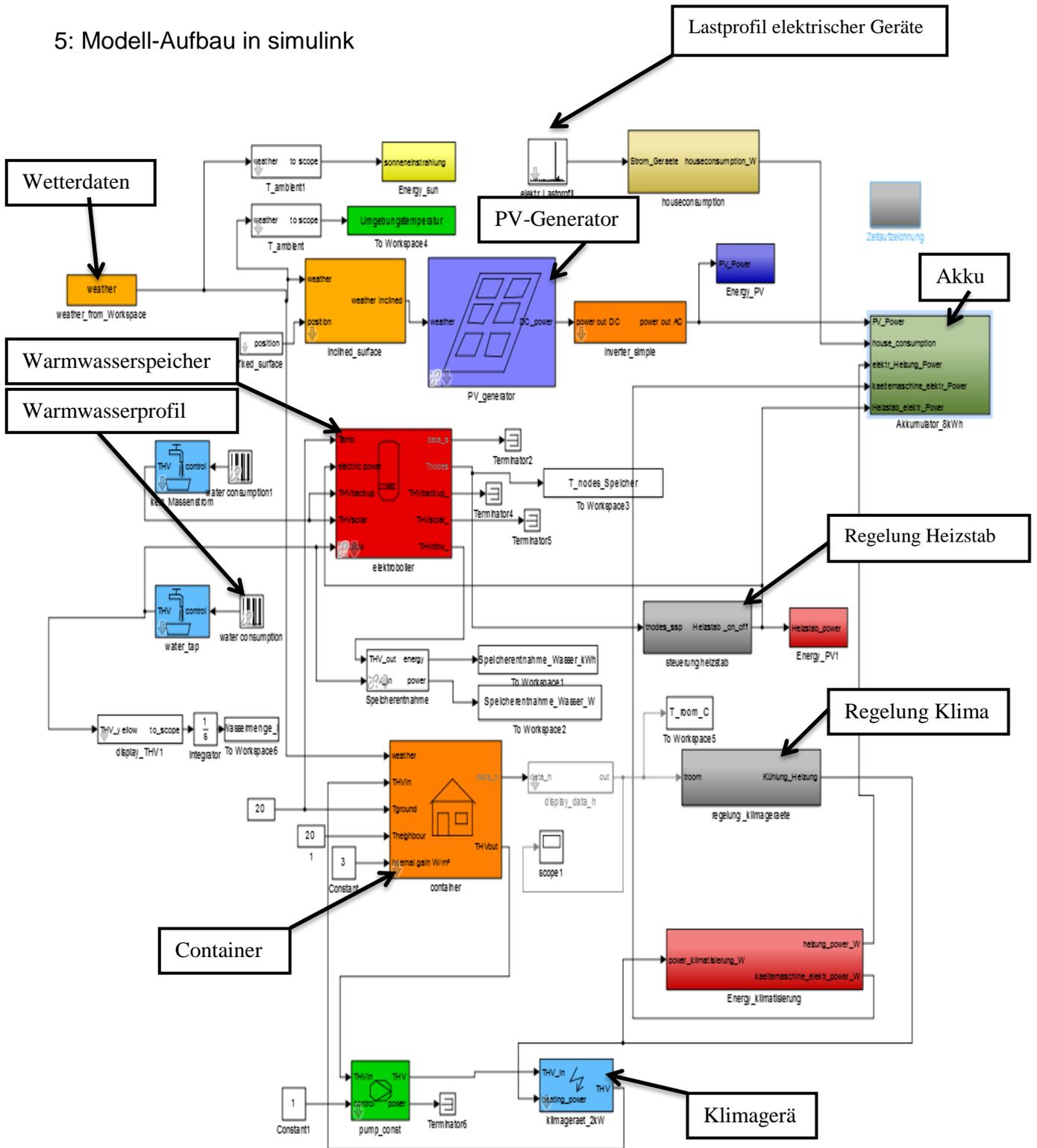
Einfluss solarer Gewinne durch die Fenster:

Formel: $Q = Q_{\text{sonne}} * A_{\text{fenster}} * \text{Durchlassfaktoren}$

A _{fenster} [m ²]	2,4
g	0,7
Rahmenfaktor	0,7
Verschmutzungsfaktor	0,9
Strahlungsleistung (Westausrichtung) [W/m ²]	920
solarer Gewinn [W]	960,4

Bei Kühlbedarf erhöhen solare Gewinne die erforderliche Kühllast, bei Wärmebedarf wird die erforderliche Heizlast um den Betrag der solaren Gewinne reduziert.

5: Modell-Aufbau in simulink



Dargestellt ist das Konzept „nur PV“; im Konzept „PV und Thermosiphon“ wird der Warmwasserspeicher, statt mit dem elektrischen Heizsystem, durch einen Flachkollektor versorgt.

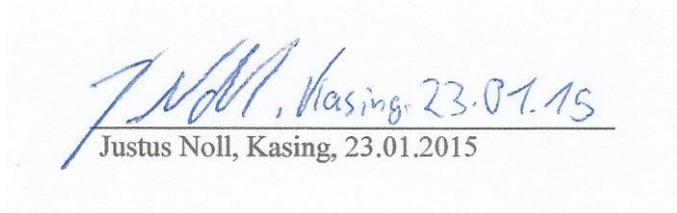
6: Containerdorf mit temporärem Stromnetz



(Foto: W. Zörner)

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.



J. Noll, Kasing, 23.01.15
Justus Noll, Kasing, 23.01.2015