
Bachelorarbeit

Herr
Marcus Engelmann

**Die Versorgung mobiler Ein-
heiten durch Wasserstoff-
technologie und regenerative
Energietechnik**

Mittweida, 2022

BACHELORARBEIT

Die Versorgung mobiler Einheiten durch Wasserstofftechnologie und regenerative Energietechnik

Autor:

Herr

Marcus Engelmann

Studiengang:

Energie und Umweltmanagement

Seminargruppe:

EU19w1-B

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Ralf Hartig

Zweitprüfer:

M.Sc. Clemens Fröhlich

Einreichung:

Mittweida 18.07.2022

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2022

Faculty of industrial engineering

BACHELOR THESIS

Supply of mobile Systems with hydrogen technology and regenerative energy

author:

Mr.

Marcus Engelmann

course of studies:

Energy and environment management

seminar group:

EU19w1-B

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Ralf Hartig

second examiner:

M.Sc. Clemens Fröhlich

submission:

Mittweida 18.07.2022

defence/ evaluation:

Mittweida, 2022

Bibliografische Beschreibung:

Engelmann, Marcus:

Die Versorgung mobiler Einheiten durch Wasserstoff und regenerative Energie -
2022. - 12, 46, 0 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen, Bachelorarbeit, 2022

Abstract:

Der von Menschen geschaffene Treibhauseffekt ist für eine immense Klimaänderung verantwortlich. Die Folgen können gefährliche Ausmaße annehmen. Die Nutzung von regenerativen Energiequellen wird daher immer wichtiger. Eine Möglichkeit, regenerative Energiequellen zu nutzen und Energienetze zu entlasten, ist die Versorgung mobiler Systeme mit regenerativen Energien.

In dieser Arbeit wird sich daher mit der Frage beschäftigt, ob es möglich ist, ein mobiles System in Form eines Wohnmobils bei aktueller Marktlage wirtschaftlich, ökologisch nachhaltig und mit vertretbarem Aufwand mit Energie zu versorgen. Dafür werden Brennstoffzellentechnologie und Photovoltaiktechnologie betrachtet.

Ziel der Bachelorarbeit ist es damit, zu ermitteln, ob sich der Energiebedarf eines Wohnmobils mit erhöhtem Verbrauch durch Brennstofftechnologien, beziehungsweise mit einem Solar-gestützten Speicher realisieren lässt. Dafür werden die Technologien in ihren Funktionsweisen erklärt. Außerdem erfolgt eine Marktbetrachtung, um festzustellen, ob für Endkonsumenten entsprechende Produkte zur Verfügung stehen. Über einen begrenzten Projektzeitraum wird anschließend der Verbrauch eines Medienteams, welches einen Dokumentarfilm entlang des Rheins dreht, erfasst. Dabei wird ein mitgeführter Solargenerator genutzt, um das mediale Equipment zu versorgen. Auf Grundlage der Erfassung der genutzten Solarenergie erfolgt ein Vergleich der tatsächlich genutzten Solarenergie und der theoretisch über den Projektzeitraum zur Verfügung stehenden Solarenergie.

Die Marktbetrachtung macht deutlich, dass der Markt für Solargeneratoren wesentlich größer als der für Brennstoffzellen ist. Somit ist der durchschnittliche Kilowattstundenpreis von Strom aus entsprechenden Geräten sehr unterschiedlich. Die Datenauswertung hat gezeigt, dass es möglich ist, durch Solargeneratoren mit Photovoltaikunterstützung autark zu agieren, wofür jedoch Witterung und Jahreszeit gewisse Voraussetzungen erfüllen sollten. Die Arbeit zeigt auf, dass es möglich ist mobile Systeme, wirtschaftlich, ökologisch und nachhaltig mit vertretbarem Aufwand zu versorgen. Das ist allerdings leichter mit einem Solargenerator und einem Solarpanel. Die Brennstoffzellenlösung erweist sich als für das Projekt als wirtschaftlich mangelhaft.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Formelverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	5
2.1 <i>Photovoltaik</i>	5
2.2 <i>Wasserstoff und Brennstoffzelle</i>	7
2.3 <i>Marktanalyse</i>	12
2.3.1 <i>Angebote für Brennstoffzellen</i>	13
2.3.2 <i>Angebote für Photovoltaik</i>	14
2.3.3 <i>Möglichkeiten der Versorgung durch Solarenergie und Brennstoffzellen</i>	17
3 Swim4science	19
3.1 <i>Projektrelevanz für die Hochschule Mittweida</i>	19
3.2 <i>Ökologische Mindeststandards</i>	20
4 Datenerfassung und -analyse	22
4.1 <i>Mitgeführtes Equipment</i>	22
4.2 <i>Tägliche Verbräuche</i>	24
4.3 <i>Erzeugter Solarstrom</i>	30
4.4 <i>Theoretisch verfügbarer Solarstrom</i>	32
4.5 <i>Vergleich von Verbräuchen, erzeugtem und theoretisch verfügbarem Solarstrom</i>	34
4.6 <i>Preisvergleich</i>	36
5 Alternativszenarien	40

5.1	<i>Theoretische Betrachtung für Autarkie mit Brennstoffzellen</i>	40
5.1.1	Emissionsvergleich zwischen Methanolbrennstoffzelle und Steckdosenstrom	41
5.2	<i>Autarkie mit einem solar gespeisten Speicher</i>	43
6	Zukünftige Anwendung	44
7	Fazit	46
	Literaturverzeichnis	49
	Selbstständigkeitserklärung	56

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Solarzelle (Mertens, 2020: 33)	6
Abbildung 2: Installierte Photovoltaikleistung in Deutschland (vgl. Quaschnig, o. D.)	7
Abbildung 3: Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle (Michalke, o. D.)	10
Abbildung 4: Stoffströmung (vgl. ASUE - Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., o. D.).....	11
Abbildung 5: EcoFlow DELTA Pro Powerstation (eigene Aufnahme)	15
Abbildung 6: BLUETTI EP500 +2*SP350 Sonnenkollektor (vgl. BLUETTI EP500 +2*SP350 Sonnenkollektor, o. D.).....	16
Abbildung 7: Jackery Solargenerator 2000 Pro (vgl. Jackery Solargenerator 2000 Pro (Explorer 2000 Pro + SolarSaga 200W), o. D.).....	17
Abbildung 8: Täglicher Verbrauch (eigene Darstellung).....	30
Abbildung 9: Vergleich zwischen täglichem Verbrauch und täglich theoretisch erzeugbarer Energiemenge (eigene Darstellung)	35
Abbildung 10: Entwicklung der spezifischen Emissionen (Umweltbundesamt, Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen 2022)	43

Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung der Gesamtleistungsaufnahme des EcoFlow Delta Pro über dessen Lebensdauer.....	37
Formel 2: Preis je Kilowattstunde EcoFlow und Solarpanel.....	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Modellüberblick EFOY Brennstoffzellen	14
Tabelle 2: Equipmentliste	22
Tabelle 3: Verbräuche über die Projektdauer	24
Tabelle 4: Täglicher Verbrauch mit Versäumniskompensation	29
Tabelle 5: Ladevorgänge mit Solarstrom	32
Tabelle 6: Tägliche Sonnenstunden	33
Tabelle 7: Gegenüberstellung energetischer Werte.....	34
Tabelle 8: Kostenpunkte nach Quelle	38

Abkürzungsverzeichnis

AFC	Alkaline Fuel Cells
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
kWh	Kilowattstunde
NWS	Nationale Wasserstoffstrategie
PEM	Proton Exchange Membrane
pn-Übergang	positiv-negativ-Übergang
PV	Photovoltaik
W	Watt

1 Einleitung

Der globale Energiehaushalt befindet sich in einer Krise: der anthropogen geschaffene Treibhauseffekt ist für eine immense Klimaänderung verantwortlich. Die Folgen können gefährliche Ausmaße annehmen, sofern nichts dagegen unternommen wird. Der Klimawandel bedroht den Planeten in vielerlei Hinsicht. So treten vermehrt meteorologische Extremwetterereignisse auf. Das grönländische Eisschild schmilzt ab, womit eine Meeresspiegelerhöhung einhergeht. Der Zusammenbruch des Golfstroms oder das Auftauen von Permafrostböden zählen zu globalen Auswirkungen mit nahezu apokalyptischen Ausmaßen (vgl. Umweltbundesamt, Zu erwartende Klimaänderungen bis 2100, 2014).

Seit der industriellen Revolution im 18. Jahrhundert und einem seitdem stetig steigenden Bedarf nach fossilen Energieträgern werden vermehrt zahlreiche Kohlewasserstoffverbindungen in die Atmosphäre abgegeben und somit die Zusammensetzung unserer Atmosphäre verändert. Neben den atmosphärischen Änderungen treten weitere Umweltbelastungen auf. So zieht die Braunkohlegewinnung beispielsweise Grundwasser- und Bodenabsenkungen, Zerstörungen von Biotopen und menschlichen Siedlungen nach sich. Diese Kohlenwasserstoffverbindungen waren zuvor in unterirdischen Vorkommen gebunden. Der Grund für die Ausgabe zahlreicher Kohlewasserstoffverbindungen in die Atmosphäre ist der stetig wachsende Energiebedarf der Menschheit. Die Freisetzung dieser Treibhausgase ändert somit nichts an der Gesamtzahl solcher Verbindungen auf unserem Planeten. Gleichwohl ist das Tempo, in welchem diese Treibhausgase ausgestoßen werden, weitaus schneller, als dies auf natürliche Weise von statten gehen würde. Das Gleichgewicht, welches auf der Erde vorherrscht, droht in diesem Zuge zu kollabieren. Die Reserven von fossilen Energieträgern sind endlich. Ein verbranntes Stück Kohle oder ein verbrauchter Liter Öl werden vom Planeten nicht in absehbaren Zeiten regeneriert (vgl. Geitmann, 2012: 19 ff).

Die Menschheit muss sich im Angesicht dieser Tatsachen neu orientieren, um zukunfts-trächtige Möglichkeiten zur sauberen und regenerativen Energieerzeugung und Energiespeicherung zu entwickeln.

Als Lösung für die zahlreichen energetischen und umwelttechnischen Probleme, die auf die Menschheit zukommen, bieten sich Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien als Lösung an. Wasserstoff lässt sich emissionsfrei generieren, verbrauchen und speichern.

Kombiniert man die Technologie mit regenerativer Energieerzeugung ist es möglich, umweltfreundlichen Strom bei Überschuss zu speichern und ihn bei höherem Bedarf wieder abzugeben (vgl. Geitmann, 2012: 13 ff).

Dabei lässt sich diese Technologie in großer Skalierung unter anderem für Kraftwerke verwenden und es ist zudem möglich, portable Einheiten durch Wasserstoff mit Energie zu versorgen. Die ersten Brennstoffzellen im Miniaturformat lassen sich zum Betreiben von Kameras, Laptops und Werkzeugen nutzen. Durch Verbesserung des Leistungsniveaus ist es heutzutage möglich Brennstoffzellen im den Bereichen Verkehrstechnik, Umweltdatenerfassung, Militär oder Camping zu verwenden (vgl. Geitmann, 2012: 171 ff). Bei diesen Systemen bietet sich eine Ergänzung mit Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) an. Es bleibt die Frage, ob die beschriebene Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in Kombination mit regenerativen Energieerzeugungssystemen auf heutigem Stand bereits nutzbar für die breite Masse ist. Wasserstoff und Brennstoffzellen (oder Kombinationssysteme mit PV-Anlagen) erhalten gegenwärtig viel Aufmerksamkeit, da die Klimakrise und Problematiken mit der Versorgung fossiler Energieträger eine Neuorientierung erzwingen. Deshalb gilt es herauszufinden ob diese Technologien bereits so weit fortgeschritten sind, dass sie für die tägliche Anwendung geeignet sind. Das Projekt swim4science wird hierfür als konkrete Forschungsmöglichkeit wahrgenommen. Bei diesem Projekt fällt ein erhöhter Bedarf an elektrischer Energie über einen Zeitraum von ungefähr vier Wochen für ein Wohnmobil an, der sich durch mitgeführte Technik ergründet.

Während des Projektes swim4Science wird ein Schwimmer von einem Medienteam begleitet, während dieser versucht, den Rhein von Quelle bis Mündung zu schwimmen. Das Team benötigt während dieser Zeit überdurchschnittlich viel Energie, da eine große Zahl technischer Geräte versorgt werden muss.

Es leitet sich folgende Forschungsfrage ab:

Ist es möglich, ein mobiles System bei aktueller Marktlage wirtschaftlich, ökologisch nachhaltig und mit vertretbarem Aufwand mit Energie zu versorgen? Um diese Frage zu beantworten, sollen folgende Unterfragen zur Unterstützung beantwortet werden:

- Welche technischen Möglichkeiten bestehen bei Brennstoffzellen und mobiler regenerativer Versorgung?
- Gibt es brauchbare Lösungen für das gewählte Beispiel auf dem Markt?

- Weshalb ist es sinnvoll mobile Systeme autark versorgen zu können?
- Welche Projekte werden in Zukunft möglicherweise mit Wasserstoff umgesetzt?

Ziel der Bachelorarbeit ist es damit, zu ermitteln, ob sich Energiebedarf mit Wasserstofftechnologien, beziehungsweise mit regenerativen Energiesystemen von mobilen Einheiten realisieren lässt. Dies soll anhand des Beispiels eines mobilen Systems, genauer: eines Wohnmobils mit gesteigertem Verbrauch ermittelt werden.

Zunächst werden in Kapitel zwei die Technologien, welche für die Versorgung in Frage kommen, in ihren Grundsätzen erklärt. Dabei handelt es sich um Wasserstoffsysteme und Photovoltaik-Anlagen. Um einen Ausblick auf andere Anwendungen treffen zu können werden auch Wasserstoffsysteme in kurzer Form betrachtet. Die aktuelle Marktlage wird geprüft, um für Konsumenten anwendbare Technik zu ermitteln. Dabei wird sich auf mobile Systeme fokussiert, welche zur Versorgung von Wohnmobilen eingesetzt werden. Während der Laufzeit des Projektes swim4science wird der Energieumsatz erfasst. Anhand dessen lässt sich ermitteln, wie die autarke Versorgung mit regenerativen Energien und Brennstoffzellen aussehend könnte. Des Weiteren sollen die Sonnenstunden während des Projektes am jeweiligen Standort erfasst werden, um eine möglichst genaue theoretische Betrachtung für die Versorgung dieses Projekts treffen zu können. Um einen Abriss der Möglichkeiten mit Brennstoffzellen oder Solargeneratoren aufzuzeigen, wird ein Solargenerator im Projekt integriert, um einen Teil der Technik zu versorgen. Zuletzt werden theoretische Maßnahmen ermittelt, die eine umweltfreundliche Lösung für das Projekt aufzeigen.

Anschließend wird in zwei theoretischen Modellen betrachtet, wie die Versorgungen des Projektes hätte aussehen können. Dabei wird sich auf das in der Marktbetrachtung analysierte, für Endkonsumenten zur Verfügung stehende, Equipment fokussiert. Eine Betrachtung wird sich auf reine Versorgung mit Wasserstoff fokussieren, die andere auf eine Kombination von Solargenerator und PV-Anlage. Anhand dessen kann abgeschätzt werden, ob die Technologien auf heutigem Stand ausreichend für die Anforderungen des Projekts swim4science sind.

2 Stand der Technik

Wer eine mobile Einheit für einen unbestimmten Zeitraum umweltfreundlich mit Energie versorgen möchte, muss diese Energie entweder während dieses Zeitraums zur Verfügung stellen, sie in gespeicherter Form mitführen oder eine Kombination beider Systeme nutzen. Für die Versorgung mobiler Systeme bieten sich Photovoltaiksysteme an, welche von der Sonne abhängig sind. Diese Form der Erzeugung sorgt für eine gewisse Unzuverlässigkeit. Die Sonnenstrahlung steht nur zu bestimmten Zeiten und günstiger Witterung zur Verfügung. Daher besteht das Risiko, keine Energie zur Verfügung zu haben, wenn diese gebraucht wird. Ähnlich verhält es sich mit einer reinen Speicherlösung. Je nach Art des mobilen Systems besteht die Möglichkeit, die gespeicherte Energie vorzeitig verbraucht zu haben. Theoretisch wäre es zwar möglich, einen großen Batteriespeicher mitzuführen, jedoch dürfte die entsprechende physische Größe logistische Probleme mit sich bringen. Ein Kombinationssystem ist also die beste Lösung. Es gilt zu ergründen, wie diese Technologien funktionieren und welche Angebote auf dem Markt existieren. Anhand des swim4science-Projektes müssen auch die logistischen Möglichkeiten berücksichtigt werden. Es ist ebenfalls interessant zu ergründen, was generell mit dieser Art Kombinationssystemen möglich ist und in naher Zukunft möglich sein könnte.

2.1 Photovoltaik

Die Sonne ist der größte Energielieferant, welcher der Menschheit zur Verfügung steht. Ohne Unterbrechung liefert das Zentralgestirn der Erde die siebentausendfache Menge dessen, was die Weltbevölkerung täglich verbraucht (vgl. Geitmann, 2012: 56).

Diese gewaltigen Energiemengen versuchen sich Menschen durch PV-Anlagen nutzbar zu machen. Die grundlegende Komponente einer solchen Anlage sind Solarzellen (siehe Abbildung 1).

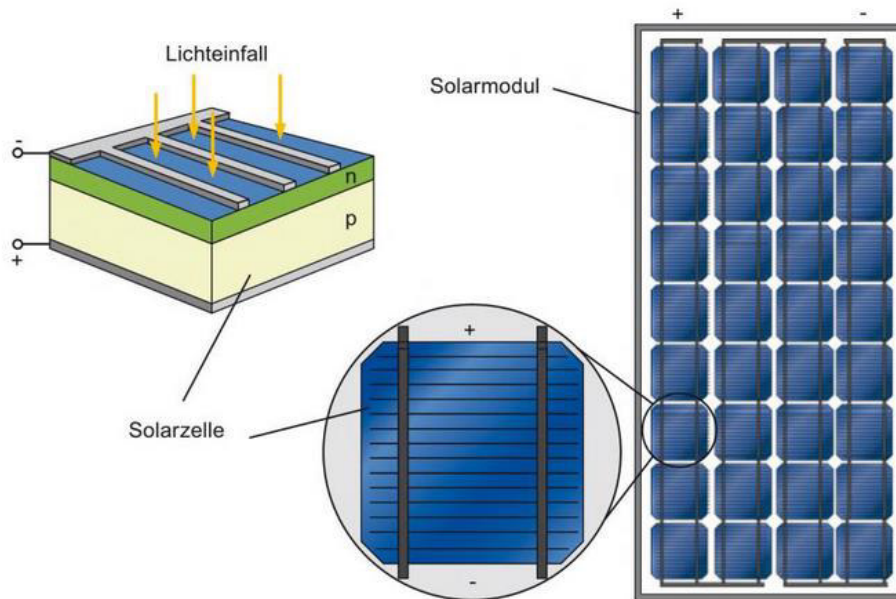


Abbildung 1: Solarzelle (Mertens, 2020: 33)

Solarzellen bestehen meist aus Silizium. Das Silizium wird durch die Einbringung von Fremdatomen, auch Dotierung genannt, in seiner elektrischen Leitfähigkeit verändert. Der damit generierte positiv-negativ-Übergang (pn-Übergang) besitzt damit ein im Kristall eingebautes elektrisches Feld. Wird die Solarzelle mit Licht bestrahlt, werden Ladungsträger aus der Kristallstruktur gelöst und dank des elektrischen Feldes zu den Kontakten befördert. Infolgedessen entsteht eine Spannung in einer Größenordnung von ungefähr 0,5 Volt. Die Höhe des abgegebenen Stroms liegt je nach Einstrahlungswinkel, Intensität und Fläche zwischen 0 und 10 Ampere. Um eine Spannung in nutzbaren Bereichen von 20 bis 50 Volt zu erzeugen ist es notwendig, Solarmodule in Reihe zu schalten (siehe Abbildung 1). Ferner sind die Zellen in einer solchen Modulbauweise von äußeren Einflüssen geschützt (vgl. Mertens, 2020: 33).

Die ersten Hinweise auf die Existenz des für Solarzellen relevanten Photoeffekts tauchen bereits Ende des 19. Jahrhunderts auf. Die Forschung in diese Richtung wurde unter anderem von Albert Einstein vorangetrieben, der für seine Lichtquantentheorie einen Nobelpreis erhielt. Bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts wurden die Wirkungsgrade weiter verbessert und schließlich erfolgreich in der Raumfahrt eingesetzt. Durch diesen Erfolg und die einsetzende Ölkrise 1973 sowie diverse Störfälle in Atomkraftwerken gegen Ende des 20. Jahrhunderts wurde der Druck auf die Regierung erhöht, Solarstrom als energetische Quelle stärker in den Fokus zu rücken. Die Vereinigten Staaten von Amerika, Deutschland

sowie Japan förderten damit einhergehend PV-Anlagen stärker. In Deutschland wurde ab dem Jahr 1990 mit verschiedenen Programmen und Gesetzen Anstrengungen unternommen die Installation von PV-Anlagen zu fördern, was schließlich zu Beginn des neuen Jahrtausends zur Verabschiedung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes führte (vgl. Mertens, 2020: 35 ff).

In nachfolgender Abbildung wird ersichtlich, dass die Menge an produziertem Solarstrom und errichteten PV-Anlagen in den folgenden Jahren stetig anstieg.

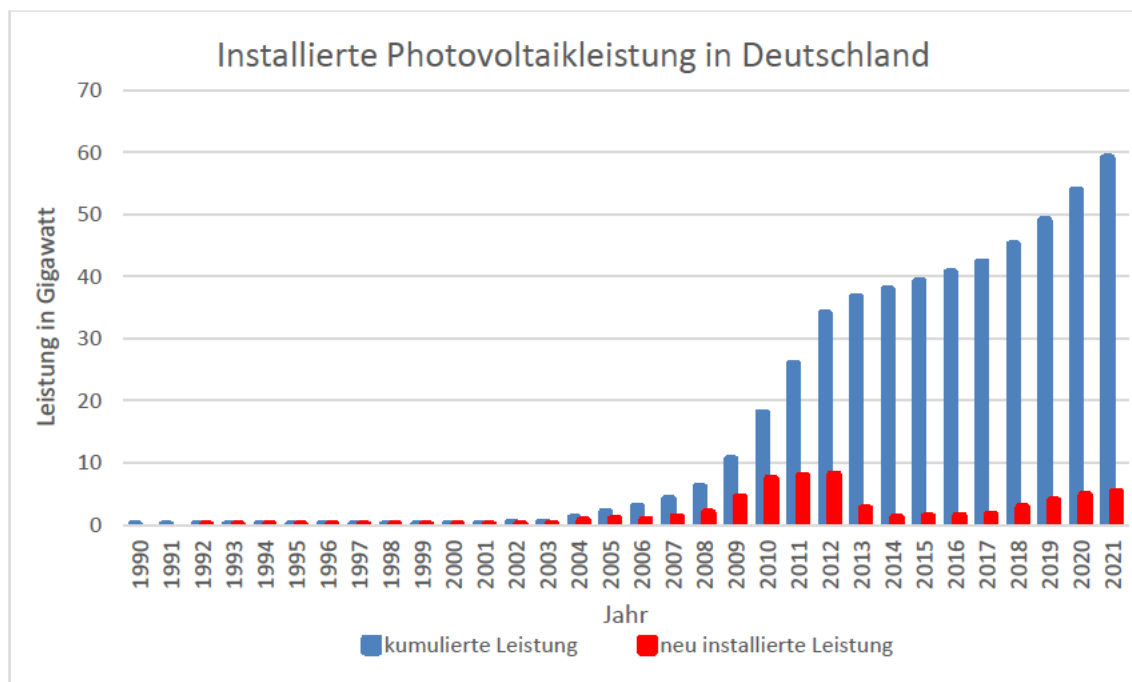


Abbildung 2: Installierte Photovoltaikleistung in Deutschland (vgl. Quaschnig, o. D.)

Dank staatlicher Förderung erhält Photovoltaik seit bereits mehreren Jahrzehnten starke gesellschaftliche Aufmerksamkeit. Auch die Industrie hat sich dank dessen weiter vergrößert. Im Gegenzug dazu stehen Brennstoffzellen und Wasserstofftechnologie, welche zwar vermehrt Aufmerksamkeit erhalten, allerdings erst seit kürzerer Zeit.

2.2 Wasserstoff und Brennstoffzelle

Die Nutzung von Wasserstoff und Brennstoffzellen als Energiespeicher birgt großes Potential für die Energietechnik der Zukunft, bisher wurde es jedoch vorwiegend als Industriegas verwendet. Wasserstoff ist das am häufigsten vertretene Element im Universum, verfügt über einen soliden Heizwert und kombiniert sich bei seiner Verbrennung mit Sauerstoff zu Wasser, ohne dabei umweltbelastende Restprodukte zu hinterlassen. Das Prinzip einer

Brennstoffzelle wurde bereits vor über 150 Jahren entdeckt, aber durch die dominante Stellung von Verbrennungsmotoren nicht intensiv verfolgt. In der Mitte des 20. Jahrhunderts machte die Technologie durch Einsätze im Raumfahrtbereich auf sich aufmerksam und seit den 1980-Jahren wird ernsthaft darüber nachgedacht, Wasserstoff als Brennstoff zu verwenden. Die damals auftauchende gesellschaftliche Diskussion über Umweltschutz sorgte rund zehn Jahre später für erste Pilotprojekte. Da die technische Realisierung jedoch nicht schnell genug erfolgte, ebte das Momentum der Aufmerksamkeit jedoch schnell wieder ab. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit findet die Technologie wieder Aufmerksamkeit (vgl. Geitmann, 2012: 14).

Die Möglichkeiten, Wasserstoff herzustellen sind mannigfaltig und im Umfang dieser Arbeit unmöglich in ihrer Gänze zu betrachten. Es soll jedoch jeweils ein kleiner Einblick in Möglichkeiten zu den Herstellungen gegeben werden.

Die Elektrolyse ist dabei das bekannteste Prinzip. Dabei werden Wassermoleküle durch elektrischen Strom in Wasserstoff und Sauerstoff in gasförmiger Form aufgespalten. Dafür genügt bereits eine geringe Spannung von 1,5 Volt und es ist nötig, das Wasser mit etwas Lauge oder Säure zu versetzen, damit ein Stromfluss entsteht. Um Spannung zuführen zu können, ist die Anwesenheit einer Anode und Kathode mit einem Katalysator, Platin beispielsweise, notwendig. Wird Spannung zugeführt, entsteht an der positiv geladenen Anode Sauerstoff und an der negativ geladenen Kathode Wasserstoff. Der Wirkungsgrad liegt bei ungefähr 80%. Es werden rund 300 Milliliter Wasser benötigt, um Wasserstoff in einer solchen Menge zu produzieren, welche einem Äquivalent von einer Kilowattstunde entspricht. Da der Energieeinsatz dafür jedoch zu hoch ist, wird dieses Verfahren in der Vergangenheit selten für die Erzeugung von Wasserstoff verwendet (vgl. Geitmann, 2012: 73 ff.).

Die biochemische Herstellung stellt einen natürlichen Weg der Wasserstoffherstellung durch Algen zur Verfügung. Dabei werden Mikroalgen verwendet, die durch Photosynthese in einer anaeroben Umgebung Wasserstoff erzeugen. Die Effizienz dieser Methode ist vielversprechend, jedoch hat diese Technologie bisher die experimentelle Phase noch nicht überwunden (vgl. Geitmann, 2012: 82 f.).

Der im deutschen Raum größte Anteil für die Herstellung von Wasserstoff übernimmt, zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit, die Dampfreformierung. Ausgangsstoffe für dieses Verfahren sind jedoch fossile Kraftstoffe mit einem hohen Anteil von Wasserstoffmolekülen, wie beispielsweise Erdgas, Biogas oder Methanol. Unter Wärmezufuhr, Eingabe von Wasserdampf und des jeweiligen Gases wird ein Gasgemisch erzeugt. Dieses Gemisch wird

anschließend durch diverse temperaturintensive Verfahren behandelt, um den Wasserstoff zu isolieren. Mittels eines abschließenden Reinigungsprozesses wird der Wasserstoff von unerwünschten Bestandteilen befreit (vgl. Geitmann, 2012: 76 ff.).

Ebenfalls erwähnenswert als Herstellungsverfahren ist die partielle Oxidation, die in Kombination mit einem Reformier verwendet werden kann. Auch das Norwegische Kværner-Verfahren oder eine Vergasung ermöglichen die Herstellung von Wasserstoff (vgl. Geitmann, 2012: 78 ff.).

Die meisten Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff leiden an einer Abhängigkeit von hohem energetischem Input oder der Tatsache, fossile Gase zum Erzeugen zu benötigen. Um Wasserstoff jedoch umweltfreundlich erzeugen zu können, eignen sich nur die Elektrolyse und die biochemische Herstellung. Bei umweltfreundlichem Wasserstoff spricht man auch von grünem Wasserstoff. Da die biochemische Herstellung noch experimentell ist, bleibt für die gegenwärtige Erzeugung grünen Wasserstoffs lediglich die Elektrolyse übrig.

Ein herausragendes Beispiel für die Nutzung der Elektrolyse zur Erzeugung grünen Wasserstoffs ist die Salzgitter AG mit dem Vorhaben, ein grüner Produzent für Stahl zu werden. Der Hersteller aus Salzgitter verwendet Wasserstoff anstatt Kohlenstoff, um Sauerstoff aus Eisenerz zu entfernen. Der Wasserstoff wird dabei durch Elektrolyse mittels vor Ort befindlicher Anlagen erzeugt, die durch Energie aus Windkraftanlagen gespeist werden (vgl. Budde, 2018).

Die ist jedoch nur ein Anwendungsbeispiel für die Verwendung von grün erzeugtem Wasserstoff. Soll grün erzeugter und gespeicherter Wasserstoff wieder zurückverstromt werden, wird eine Brennstoffzelle verwendet. Ein signifikanter Vorteil von Brennstoffzellen gegenüber konventioneller Stromerzeugung ist die direkte Umwandlung chemisch gespeicherter Energie in Strom. Verwendet man einen Verbrennungsmotor als konkretes Gegenbeispiel, wird deutlich, welchen Vorteil eine direkte Umwandlung mit sich bringt. Bei einem Verbrennungsmotor wird die chemische Energie des Kraftstoffs zunächst in thermische Energie umgewandelt. Diese treibt einen Kolben an, der wiederum eine Welle antreibt. Diese Welle kann beispielsweise ein Auto vorantreiben oder mit einem nachgeschalteten Generator Strom erzeugen. An jedem Punkt, an dem eine energetische Umwandlung stattfindet, treten Verluste auf. Demzufolge erreichen Brennstoffzellen einen besseren Wirkungsgrad. Außerdem beherbergen Brennstoffzellen keine beweglichen Komponenten, weshalb auch keine Reibungsverluste, Verschleiß oder Störgeräusche auftreten (vgl. Geitmann, 2012: 141 f.).

Eine Brennstoffzelle kehrt eine Elektrolyse um und erzeugt so Energie. Da Wasserstoff natürlicherweise eine Bindung mit Sauerstoff anstrebt, ist keine externe Energie notwendig, um diesen Prozess zu fördern. Das Gegenteil ist der Fall, Energie wird abgegeben. Es gibt mehrere verschiedene Typen von Brennstoffzellen, die sich in ihren Funktionsweisen nur wenig unterscheiden, aber Unterschiede in Abwärme und Einsatzgebiet aufweisen. Der häufigste Vertreter von Brennstoffzellen sind die Proton Exchange Membrane – Brennstoffzellen (PEM-Brennstoffzellen). Der Aufbau dieser Brennstoffzelle ist in Abbildung drei dargestellt.

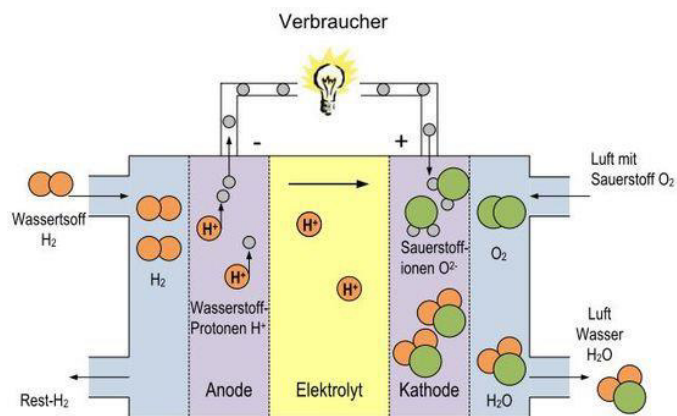


Abbildung 3: Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle (Michalke, o. D.)

Das Funktionsprinzip wird anhand dieses Brennstoffzellentypen erklärt. Wasserstoff und Sauerstoff sind bei diesem Typ durch einen Elektrolyten voneinander separiert und reagieren lediglich indirekt miteinander. In einer Brennstoffzelle werden Anode und Kathode durch diesen Elektrolyten voneinander getrennt. Dieses verhindert den Gasdurchlass und lässt lediglich Protonen passieren, während Elektronen ebenfalls nicht durchdringen können. Da die Elektrolytmembran diese chemischen Eigenschaften erfüllen muss, kommen nur bestimmte Materialien in Frage, welche den Preis für die Zelle erhöhen. Die Elektroden sind mit Poren durchzogen, um die Oberfläche für elektrochemische Reaktionen zu vergrößern und sie sind mit einem Katalysatormaterial überzogen, da die Elektrolytmembran einen starken Säureanteil besitzt. Auf der Anodenseite wird beim Start der Reaktion Wasserstoff zugeführt, während auf der Kathodenseite Sauerstoff zugeführt und Wasser abgeführt wird. Die dabei entstandene Wärme muss abgeführt werden. Im Idealfall wird diese noch nutzbar gemacht. An der Anode teilen sich durch den Katalysator negative Ladungsträger und positive Wasserstoffionen voneinander ab. Damit entsteht ein Potentialunterschied zwischen Anode und Kathode. Die frei gewordenen Elektroden lassen sich durch einen Stromkreislauf leiten und ermöglichen es, einen Verbraucher mit Strom zu versorgen. Die Protonen diffundieren währenddessen durch den Elektrolyten zur Kathode. Obgleich die Protonen

größer als die Elektronen sind, können die Elektronen nicht durch die Membran diffundieren, da diese einen zu hohen Säuregrad aufweist. Das Abfallprodukt Wasser wird schließlich durch die Bipolarplatten entsorgt (siehe Abbildung 4) (vgl. Geitmann, 2012: 142 ff.).

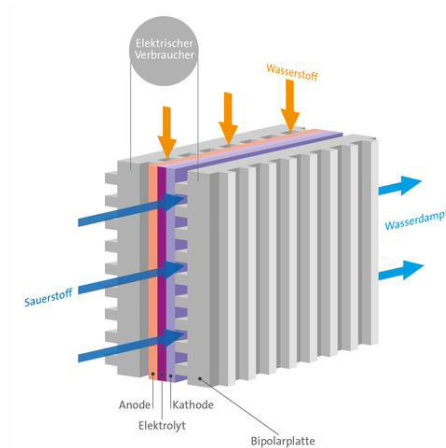


Abbildung 4: Stoffströmung (vgl. ASUE - Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., o. D.)

Die elektrochemische Reaktion innerhalb dieser Brennstoffzelle erzeugt somit die Endprodukte Strom, Wasser und Wärme. Was ihr im Vergleich zu herkömmlichen Stromerzeugungsmöglichkeiten eine hervorragende Umweltverträglichkeit ausweist.

Je nach Brennstoffzellentyp erzeugt jede Zelle durchschnittlich 0,7 Volt bis 1,2 Volt Spannung. Diese Zellen werden in Reihe geschaltet, um eine Leistung in nutzbaren Größenordnungen generieren zu können. Diese gestapelten Reihen bezeichnet man auch als Stacks. Je mehr Zellen sich in einem Stack befinden, umso größer ist die Spannung.

Es stehen jedoch zahlreiche andere Brennstoffzellentypen zur Verfügung. Neben den PEM-Zellen, die sich in Hochtemperatur- und Niedertemperaturlösungen unterteilen, existieren zum Beispiel noch Alkaline Fuel Cells (AFC). Die AFC war die erste Brennstoffzelle für die mobile Anwendung in Raumfahrt und Unterseebooten. Dieser Typ verzichtet auf Platin als Katalysator, was in geringeren Kosten aber auch in geringerer Lebensdauer und einer langsameren chemischen Reaktion resultiert (vgl. Geitmann, 2012: 150 f.).

Die Direkt Methanol-Zelle wiederum arbeitet mit Methanol statt Wasserstoff und bildet eine Unterart von PEM-Brennstoffzellen. Erwähnenswert sind auch Phosphorbrennstoffzellen. Diese arbeiten mit einem Elektrolyten aus Phosphorsäure, haben einen hohen Leistungsbereich, dafür aber einen niedrigeren Wirkungsgrad.

Als letztes sind noch Schmelzcarbonatbrennstoffzellen und Festoxidbrennstoffzellen zu nennen, die sich beide für eine Kraft-Wärme-Kopplung anbieten, da es sich in beiden Fällen um Hochtemperaturbrennstoffzellen handelt (vgl. Geitmann, 2012: 152 ff.).

Die Auflistung bleibt damit unvollständig. Eine weitere Ausführung ist für den Zweck der Arbeit unverhältnismäßig. Verschiedene Brennstoffzellentypen unterscheiden sich im Wirkungsgrad nur geringfügig, sehr wohl aber in den genutzten Kraftstoffen, Elektrolyten und Betriebstemperaturen, was in unterschiedlich gut geeigneten Einsatzgebieten resultiert. Schlussfolgernd lässt sich feststellen, dass Brennstoffzellen nur als umweltverträglich gelten können, wenn ihr Brennstoff nicht fossil gewonnen, sondern durch erneuerbare Energien erzeugt wurde.

Brennstoffzellen mit konventionellen Energiewandlern zu vergleichen, gestaltet sich schwierig, da zu viele Parameter miteinander verglichen werden müssten. Je nach Brennstoffzellenart kommen unterschiedliche Vor- und Nachteile einher.

Allgemein lassen sich folgende Vorteile für Brennstoffzellen zusammenfassen:

- schadstoffarm
- umweltverträglich
- geringe Wartungsansprüche
- modularer Aufbau
- geringe Umwandlungsverluste
- Wirkungsgrad

Die Nachteile umfassen:

- geringe Lebensdauer
- hohe Herstellungskosten
- hohe Materialanforderung
- Anfälligkeit für Verunreinigungen in Brennstoffen, ggf. Anforderung eines vorgeschalteten Reformers

2.3 Marktanalyse

Ein Kombinationssystem aus einer PV-Anlage und einer Brennstoffzelle hat das Potential, eine Autarkie zu erzielen. Ob die vorhandenen Möglichkeiten dafür beim Projekt

swim4science ausreichen, gilt es zu überprüfen. Dabei ist es, auch in Aussicht auf die theoretische Betrachtung, ausreichend, wenn genügend gespeicherte Energie mitgeführt wird, da das Projekt zeitlich begrenzt ist. Die Möglichkeiten der Energiebedarfsdeckung unterliegen den aktuellen Angeboten auf dem Markt. Da Energieversorgung, wenn auch nicht in den Größenordnungen des Projektes swim4science, für mobile Wohneinheiten kein neues Thema ist, gibt es bereits einen existierenden Markt dafür. Demnach müsste es genügend Angebote an mobilen Brennstoffzellen und Solargeneratoren geben. Wie in Kapitel 2.1 erwähnt, wurden Photovoltaiktechnologien im Gegensatz zu Brennstoffzellen gefördert, somit ist zu erwarten, dass das Angebot für Solargeneratoren größer sein dürfte. Es sollen jeweils drei Angebote betrachtet werden, um die Kernessenz der Angebote erfassen zu können. Die Zugänglichkeit der Produkte spielt ebenfalls eine Rolle.

2.3.1 Angebote für Brennstoffzellen

Der in Deutschland erfassbare Markt für Brennstoffzellen hinsichtlich der Anwendung in Wohnmobilen und auch für den sonstigen Endkonsumentenmarkt erweist sich als wesentlich kleiner als erwartet. Lediglich ein Anbieter konnte gefunden werden, der Brennstoffzellen für die Endanwendung produziert und vertreibt. Der Anbieter Enymotion meldete kurz nach der Vorstellung seines Brennstoffzellensystems Enyware L200 Insolvenz an (vgl. Geimann, 2021).

Das nächste theoretisch existierende Konkurrenzprodukt wäre die Brennstoffzelle VeGA von Truma (Falk, 2014). Es finden sich jedoch keinerlei seriöse Kaufoptionen für die Brennstoffzelle. Auch der Hersteller vertreibt das Produkt nicht länger (Truma: Zubehör für Wohnwagen und Wohnmobile, o. D.).

Als einziger Hersteller bleibt damit die SFC Energy AG übrig. Die Firma hat mit ihrer EFOY-Produktreihe eine Auswahl an Brennstoffzellen konzipiert, die sich für Endnutzer in privatem sowie gewerblichem Raum nutzen lassen. Dabei zielt die stationäre EFOY Reihe auf feste Installation ab und arbeitet meist mit reinem Wasserstoff, während die Standardmodelle mit Methanol als Kraftstoff arbeiten und für die mobile Nutzung ausgelegt sind (vgl. EFOY Pro 800/2400, 2021).

Es stehen insgesamt fünf verschiedene Modelle für die theoretische Betrachtung zur Verfügung. Da es sich bei swim4science um einen, im Verhältnis zu einem Campingausflug, hohen Verbrauch handelt, muss dementsprechend eine leistungsstärkere Brennstoffzelle in Betracht gezogen werden. Dabei handelt es sich um die EFOY Pro 1800. Es stehen

ebenfalls leistungsschwächere und eine stärkere Option zur Auswahl (siehe Tabelle 1). Jede einzelne benötigt eine oder mehrere Methanoltankpatronen, um autark agieren zu können. In jedem Fall wird eine solche Brennstoffzelle inklusive deren Brennstoff Raum in Anspruch nehmen, der gegebenenfalls nicht zur Verfügung steht (vgl. EFOY, 2022).

Tabelle 1: Modellüberblick EFOY Brennstoffzellen

Modulüberblick	EFOY 80	EFOY 150	EFOY Pro 900	EFOY Pro 1800	EFOY Pro 2800
Maximal Leistung	40W	75W	42W	82W	125W
Nennspannung	12/24V DC				
Gewicht	6,5kg	6,9kg	6,5kg	7,2kg	7,8kg
Abmessung (Länge x Breite x Höhe)	448 x 198 x 275				
Anschließbare Tankpatrone	1 bis 8 mit Tankpatronenerweiterung				
Betriebstemperatur	-20°C bis +40°C		-20°C bis +50°C		
Betriebsstoff	Methanol				

Quelle: (EFOY Brennstoffzellen von SFC Energy – Produktüberblick, 2022)

Außerdem unterliegen sämtliche Brennstoffzellen Installationsvorgaben. Neben dem verfügbaren Raum muss die Batterie des Fahrzeugs in unmittelbarer Nähe sein. Es ist eine Möglichkeit zur Be- und Ablüftung bereit zu stellen. Die Neigung und der Abstand zu Wänden sind ebenfalls zu berücksichtigen. Vorteilhaft für die Bedingung erweist sich eine für Android- und Apple-Geräte verfügbare App, mit der sich die Zellen überwachen lassen (vgl. SFC Energy, o. D.). Die Brennstoffzellen lassen sich nicht vom Hersteller direkt erwerben und bewegen sich bei den Anbietern in einem Preisspektrum um die 5000€.

2.3.2 Angebote für Photovoltaik

Die Angebote für Solargeneratoren sind umfangreicher. Eine breite Palette an Angeboten zwingt sogar zur Eingrenzung des betrachteten Marktes. Da sich für das Projekt swim4science seitens der Projektleitung für die Verwendung der EcoFlow DELTA Pro Powerstation entschieden wurde, wird versucht ähnliche Objekte mit dem Modell zu vergleichen. Dabei wird sich vorwiegend auf den Speicher und die Ladezeiten an Solarpanelen sowie Steckdosen bezogen, da dies die relevantesten Eigenschaften für das Projekt sind.

Für das Projekt wurde aus Zugänglichkeitsgründen die EcoFlow DELTA Pro Powerstation ausgewählt. Mitgeführt wird eine einzelne Station mit einem dazugehörigen Solarpanel.



Abbildung 5: EcoFlow DELTA Pro Powerstation (eigene Aufnahme)

Das Gerät ist aus dem Vergleich das einzige, welches durch den Autor inspiziert werden konnte und funktionierte nach kurzer Testphase einwandfrei.

Laut Angaben des Herstellers bietet ein einzelnes Gerät einen maximalen Speichervorrat von 3,6 Kilowattstunden (kWh) und kann dabei maximal 3600 Watt (W) Leistung abgeben. Es ist theoretisch möglich, die Station auf mehreren Wegen aufzuladen. Da für das Projekt ökologische und logistische Merkmale am wichtigsten sind, werden lediglich zwei Auflademöglichkeiten näher betrachtet. Um das Gerät vollständig mit Strom aus der Steckdose aufladen zu können, werden laut Herstellerangaben rund 2,7 Stunden benötigt. Mit dem mitgeführten Solarpanel sind bei optimalen Bedingungen neun Stunden Ladezeit nötig. Die Panels haben eine Leistung von 400W. Aufgrund des logistischen Hintergrundes ist zu erwarten, dass während des Projektes kaum Möglichkeiten bestehen, alle Tageslichtstunden am selben Ort zur Aufladung des Gerätes zu nutzen. Die Bedienung ist einfach, verständlich und sehr nutzerfreundlich. Außerdem ist das Gerät schnell aufgebaut und nutzbar, was das Handeln während des Projektes erleichtern dürfte. Die im Projekt mitgeführten Geräte lassen sich an vier Steckdosen aufladen. Das Gewicht beträgt 45 Kilogramm bei Abmaßen in Zentimetern von 63,5 x 28,4 x 42 (vgl. EcoFlow DELTA Pro Powerstation, o. D.) (vgl. EcoFlow 400W Solarpanel, o. D.).

Das erste Konkurrenzprodukt ist der BLUETTI EP500 +2*SP350 Sonnenkollektor. Die Nennleistung beträgt 2kW bei einer Kapazität von 5,1kWh. Die beiden im Angebot enthaltenen Sonnenkollektoren sollen laut Hersteller in der Lage sein, den Speicher bei optimalen Bedingungen in 7,2 Stunden aufzuladen. An einer Steckdose würde der Ladevorgang demnach nach 1,7 Stunden beendet sein. Es stehen drei Steckdosen zur Aufladung von Equipment zur Verfügung, bei Geräte-Abmaßen von 50x30x76 Zentimetern (BLUETTI EP500 +2*SP350 Sonnenkollektor, o. D.).



*Abbildung 6: BLUETTI EP500 +2*SP350 Sonnenkollektor (vgl. BLUETTI EP500 +2*SP350 Sonnenkollektor, o. D.)*

Bei der zuletzt betrachteten Anlage handelt es sich um den Jackery Solargenerator 2000 Pro Explorer 2000 Pro + SolarSaga 200W. Das Modell fällt mit einer Kapazität von 2,16kWh und einer Leistungsabgabe von 2,2kW etwas kleiner aus als die beiden bereits betrachteten Generatoren. Laut Hersteller ist eine Aufladung an der Steckdose in zwei Stunden möglich. Bei vier mitgeführten Solarpanelen beträgt die Zeit bis zur vollständigen Aufladung vier Stunden. Der Generator wiegt lediglich 19,5 Kilogramm und besitzt eine Abmessung von 38,4 x 26,9 x 30,75 Zentimetern. Damit ist er der deutlich kleinste Generator (vgl. Jackery Solargenerator 2000 Pro (Explorer 2000 Pro + SolarSaga 200W), o. D.).



Abbildung 7: Jackery Solargenerator 2000 Pro (vgl. Jackery Solargenerator 2000 Pro (Explorer 2000 Pro + SolarSaga 200W), o. D.)

Alle drei betrachteten Generatoren haben Schwestermodelle, deren Eigenschaften variieren. Auch die übrige Suche nach Vergleichsmodellen hat ergeben, dass der Markt für Solargeneratoren für den mobilen Gebrauch wesentlich größer ist als der für Brennstoffzellen. Die zugehörigen Solarpanels sind sich in ihren Eigenschaften ebenfalls sehr ähnlich. Die für das Ecoflow und Bluetti-Gerät vorgesehenen Panels haben beide ähnliche Abmessungen im Bereich von 2,4 Metern mal einem Meter und haben eine Nennleistung von 400W beziehungsweise 350 W. Die von Jackery gestellten Solarpanels sind mit 200W leistungärmer und nur halb so groß. Ausschlaggebende Punkte dafür, ob es realistisch möglich ist, die gesamte Medienproduktion des Projektes mit selbst erzeugtem Strom zu bewältigen, sind Gewicht und Abmaße der Generatoren sowie der Solarpanels. Da nur sehr begrenzter Raum zum Transport zur Verfügung steht, ist zu erwarten, dass mehrere Generatoren und Solarpanels zu viel Stauraum einnehmen würden.

2.3.3 Möglichkeiten der Versorgung durch Solarenergie und Brennstoffzellen

Es gibt viele Möglichkeiten, Kombinationssysteme aus Solarenergie und Brennstoffzellen nutzbar zu machen. Auch in einer größeren Skalierung gab es bereits Projekte, die sich damit beschäftigt haben, Gebäudekomplexe oder Kommunen autark versorgen zu können. Das Phoebus-Projekt und die Inselösung Utsira sind zwei Projekte, welche mit solchen Konzepten experimentiert haben. Bei ersterem Projekt handelt es sich um ein autark arbeitendes Energieversorgungssystem, welches Wasserstoff zur Speicherung von Solarstrom nutzte und über mehrere Jahre eine vollständig netzunabhängige, zeitunbegrenzte und emissionsfreie Stromversorgung der Bibliothek im Forschungszentrum Jülich in Deutschland betrieb. Bei der Inselösung Utsira handelt es sich um ein ähnliches Projekt vor der Küste Norwegens. Eine kleine Kommune wurde dort mit einem Kombinationssystem,

bestehend aus Windrädern und Brennstoffzellen, versorgt. Dort konnte Windkraft nutzbar gemacht werden, ohne dass der Wind zum gegenwärtigen Zeitpunkt wehte (vgl. Geitmann, 2012:60f).

Die Einsatzgebiete beschränken sich jedoch nicht auf groß skalierende Kraftwerkskomplexe. Es ist außerdem möglich, Hausenergieversorgung mit Brennstoffzellen zu realisieren. Diese Möglichkeit steht jedoch in starker Konkurrenz zu der üblichen Strom- und Gasversorgung mit den bereits etablierten Netzen. Ferner wird die Brennstoffzellentechnologie aus der Automobilbranche stark gefördert. Durch die hohen Sicherheitsstandards und Anforderungen übernehmen die Automobilhersteller eine Pionierrolle. Die Technologie ist dabei keineswegs neu. Die ersten Wasserstofffahrzeuge wurden in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt. Die heutige Infrastruktur in Deutschland würde keinen schnellen Umstieg von Verbrennungsmotoren zu Personenkraftwagen mit Brennstoffzellenversorgung erlauben. Bei Bussen würde dies schneller funktionieren. Linienbusse kehren regelmäßig zu festen Ausgangspunkten zurück, wodurch einzelne Tankstellen an entsprechenden Orten sehr effizient wären. Flugzeuge und Schiffe könnten ebenfalls mit Wasserstoff versorgt werden. Allerdings ist diese Technologie bisher kaum erschlossen.

Länger etabliert hat sich Wasserstoff in der Raumfahrt. Neben der Nutzung als Treibstoff für Raketen, Satelliten oder Raumschiffe, wird Wasserstoff bereits seit über 60 Jahren auch als Bordeversorgung verwendet. Es ist zudem möglich, portable Einheiten durch Wasserstoff mit Energie zu versorgen.

Die ersten Brennstoffzellen im Miniaturformat lassen sich zum Betreiben von Kameras, Laptops und Werkzeugen nutzen. Durch Verbesserung des Leistungsniveaus ist es heutzutage möglich, Brennstoffzellen in den Bereichen Verkehrstechnik, Umweltdatenerfassung, Militär oder Camping zu verwenden (vgl. Geitmann, 2012: 171 ff.).

3 Swim4science

Bei dem Projekt swim4science handelt es sich um ein Kooperationsprojekt von mehreren Hochschulen. Der promovierte Berliner Dr. Joseph Heß unternimmt den Rekordversuch, den Rhein in 25 Tagen oder weniger von der Quelle bis zur Mündung zu schwimmen. Begleitet wird er dabei von einem Team sowie verschiedenen Experten von entsprechenden Forschungseinrichtungen. Die während der Reise gemachten wissenschaftlichen Untersuchungen werden anschließend in einem Dokumentarfilm veröffentlicht. Die Technische Universität Chemnitz übernimmt dabei den Bereich der Sportphysiologie, die Hochschule Furtwangen University überprüft die Verschmutzung des Rheins und die Universität Leipzig betrachtet die sportpsychologischen Perspektiven. Der Schwimmer wird aus Sicherheitsgründen von einem Kanuten und einem Begleitboot begleitet, die Ausschau nach eventuellen Gefahren halten.

Ziel des Projektes ist somit neben dem Rekordbruch durch Herrn Dr. Heß auch die Sammlung von wissenschaftlichen Daten.

3.1 Projektrelevanz für die Hochschule Mittweida

Das Medienmanagementteam der Hochschule Mittweida begleitet den Schwimmer mit zwei Wohnmobilen und circa zehn Personen dauerhaft. Dabei wechseln sich die Teammitglieder ab. Das Team führt einen Fuhrpark an medialem Equipment mit sich, um die Dokumentation produzieren zu können. Dieser Fuhrpark benötigt Energie. Die energetischen Verbräuche des medialen Equipments werden erfasst. Dabei führen die Teammitglieder Protokoll über Zeitpunkt und Dauer der Ladung bestimmter Geräte. Somit kann ermittelt werden, wie hoch der energetische Verbrauch über den Zeitraum des Projektes ist. Der mitgeführte Solargenerator wird dabei so häufig verwendet, wie es möglich ist. Auch wird der Solargenerator so häufig wie möglich durch das mitgeführte Solarpanel aufgeladen. Dies setzt, wie bereits erwähnt, jedoch entsprechendes Wetter und geeignete Tageszeit voraus. Außerdem ist von einem hohen Arbeitsaufwand für sämtliche Teammitglieder auszugehen. Das könnte eine genaue Datenerfassung gegebenenfalls beeinträchtigen.

3.2 Ökologische Mindeststandards

Das Team verfolgt das Ziel, die ökologischen Mindeststandards für deutsche Kino-, TV- und Online-/ VOD-Produktionen zu erfüllen. Die Medien- und Filmgesellschaft Baden-Württemberg hat das Projekt green Shooting ins Leben gerufen. Dieses hat das Bestreben, ressourcensparende Filmproduktionen anzuregen. Somit sollen Filmproduktionen, wie es auch bei dem Dokumentarfilm rund um das Projekt swim4science der Fall ist, möglichst ökologisch und kohlenstoffdioxidfrei umgesetzt werden. Die in Kapitel 2.3 betrachteten Produkten lassen sich beispielsweise für diesen Zweck verwenden (2022 MFG Medien- und Filmgesellschaft Baden-Württemberg mbH, o. D.).

Ein Label zeichnet entsprechende Produktionen aus, welche die ökologischen Mindeststandards erfüllen. Ein Arbeitskreis aus Nachhaltigkeitsexperten, Klimaforschern und Umweltwissenschaftlern sowie Vertretern der Medienbranche, haben entsprechende Standards festgelegt. Die Mindeststandards bestehen aus Soll- und Mussvorgaben. Die Sollvorgaben dienen eher als Appell an Produzenten und gelten nicht als strikte Vorschrift für das Label. Sie dienen lediglich als Richtlinie. Die Mussvorgaben sind jedoch zwingend einzuhalten, wenn die Produktion das green shooting- Label erhalten möchte. Insgesamt gibt es von diesen Mussvorgaben 21 Stück. Davon müssen mindestens 18 strikt eingehalten werden. Im Zuge dieser Bachelorarbeit sind nicht alle Vorgaben relevant. Daher werden nur jene aufgeführt, die für die Betrachtung der Arbeit als sinnvoll erachtet werden. Fokussiert wird sich auf Punkte, die bei der Bereitstellung von Energie eine Rolle spielen. Somit wird bereits teilweise überprüft, ob swim4science einige Vorgaben erfüllt (Arbeitskreis »Green Shooting«, 2021).

Punkt vier der Mindeststandards behandelt Ökostrom und enthält die Mussvorgabe, dass in allen Betriebsstätten zertifizierter Ökostrom verwendet werden muss. Unterstützt wird der Punkt durch die Sollvorgabe, dass bei temporär genutzten Räumlichkeiten zertifizierter Ökostrom genutzt werden soll, wo immer es umsetzbar ist. Da es sich um eine vollständig mobile Produktion handelt, ist diese Mussvorgabe recht unklar bei der Bewertung.

In Punkt fünf werden Generatoren behandelt. Da swim4science vollständig mobil agiert, ist die Verwendung eines Dieselgenerators weitestgehend erlaubt. Tatsächlich wird auch ein Dieselgenerator im Projekt mitgeführt, um den Solargenerator zu unterstützen. Beide Generatoren, insbesondere der Dieselgenerator, werden nur dann verwendet, wenn es auch notwendig ist. Es gibt in diesem Punkt keine Mussvorgaben, die nicht erfüllt sind.

Punkt sechs behandelt aufladbare Akkus. Dieser Punkt enthält lediglich die Mussvorgabe, dass keine Einwegbatterien verwendet werden dürfen. Da sämtliches Equipment am mitgeführten Solargenerator aufgeladen werden kann, ist das Mitführen solcher Batterien obsolet und erfolgt nicht. Damit ist die Vorgabe erfüllt. Alle übrigen Punkte behandeln Aspekte, welche für die Produktion selbst energetisch irrelevant sind (Arbeitskreis »Green Shooting«, 2021, 4 f.).

4 Datenerfassung und -analyse

4.1 Mitgeführtes Equipment

Das mitgeführte Equipment, das von energietechnischer Bedeutung ist, wird in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 2: Equipmentliste

Equipment	Kategorie	Maximaler Speicher in Wh	Leistung in W
Powerbank	Akku	11,1	5
Handy	Akku	40	15
Tablet	Akku	40,88	20
Laptop	Akku	41,4	29
V155Rm-Cine	Kameraakku	155,5	0
V90 RM Cine Akku	Akku	88,8	0
4x V-Mount Ladege- rät	Ladegerät	0	50,4
DJII TB50 Akkus	Drohnenakku	97,58	0
DJII TB50 Charger	Drohnenladegerät	0	65,05
Funkgerät	Batterien	2,5	1,25
Mikrofone	Batterie	2	1,25

Quelle: eigene Darstellung

Für die Produktion wurden diverse Laptops, Smartphones, Powerbanks und Tablets verwendet. Die Diversifikation der Art dieser Geräte ist sehr groß. Eine Einzelbetrachtung wäre für die Auswertung nicht relevant. Da Durchschnittswerte aus dem Netz oftmals von monetarisierten Webseiten angegeben werden, kann hier keine realistische mittlere Leistungsaufnahme ermittelt werden. Somit wird entschieden, ein Gerät aus dem Produktionspool zu betrachten und alle anderen Geräte der gleichen Kategorie, dessen Leistungsaufnahme und Energiespeicher gleichzusetzen. Während des Projektes bestand keine Zeit, Ladevorgänge zu überwachen. Daher ist es unmöglich zu bestimmen, wie lange manche Geräte ihren Akku bereits voll aufgeladen hatten, bevor der Ladevorgang haptisch beendet wurde. Deshalb ist anzunehmen, dass manche Geräte länger aufgeladen wurden. Dieser Fehler wird vermieden, indem berechnet wird, ob das Gerät in dieser Zeit voll aufgeladen wurde (siehe Tabelle 3). Außerdem wird davon ausgegangen, dass Geräte nicht erst bei 0% Ladestand erneut geladen werden. Dies ist unrealistisch. Es wird somit festgelegt, dass Geräte bei 20% Akkuladestand angeschlossen werden.

Für Smartphones wurde das iPhone 11 als Referenz ausgewählt. Dieses hat eine Leistungsaufnahme von 15W und einen Energiespeicher von 10Wh (Apple, o. D. iPhone11). Für Laptops wurde ein MacBook-Modell als Referenz ausgewählt. Dieses hat eine Leistungsaufnahme von 29W und einen Energiespeicher von 41,4Wh (Apple, o. D. MacBook (Retina, 12 Zoll, 2017) - Technische Daten (CH)).

Für Tablets wurde ein 12.9 iPad-Pro-Modell als Referenz ausgewählt. Dieses hat eine Leistungsaufnahme von 20W und einen Energiespeicher von 40,88Wh (Apple, o. D. iPadPro).

Für Powerbanks wurde die kleine Variante der Marke Fresh 'n Rebel als Referenz ausgewählt. Diese hat eine Leistungsaufnahme von 5W und einen Energiespeicher von 11,1Wh (Fresh 'n Rebel, 2021).

Für Kameraakkus wurde ein Vierfach-Ladegerät vom Modell V-Mount der Firma Bundelstar verwendet. Zeitgleich können maximal vier Akkus geladen werden. Dabei wird jeder Akku mit 50,4W versorgt (vgl. marcotec-shop, o. D.). Die Akkus für die Kameras tragen den Namen V155RM-Cine und V90- RM-Cine-Akku und haben jeweils eine Kapazität von 155,5Wh und 88,8Wh (vgl. Video Data - Bebob V155RM-CINE, o. D.) und (vgl. Video Data - Bebob V90RM-CINE, o. D.).

Die mitgeführten Drohnen sind mit einem internen Akku mit einer Größe von 97,58Wh ausgestattet (Video Data - DJI Inspire 2 TB50 Intelligent Flight Battery (4300mAh), o. D.). Das Ladegerät ermöglicht das Laden von acht Drohnenakkus simultan mit 65,05W (DJI Official - DJI Battery Station - Product Information, o. D.).

Die Funkgeräte sind vom Typ T82 Extreme und vom Hersteller Motorola. Diese funktionieren mit herkömmlichen AAA-Akkus des Typs R03. Da verschiedene Akkus mitgeführt werden, werden Schätzwerte angenommen. Ein Energiespeicher von 2,5Wh und eine Leistung von 1,25W angenommen. Es wurde auch angenommen, dass es möglich ist, mehrere dieser Akkus gleichzeitig zu laden.

Das mitgeführte Mikrofon wurde nicht korrekt protokolliert weshalb hier ein Speicher von 2Wh und eine Leistung von 1,25W angenommen wird.

4.2 Tägliche Verbräuche

Die nachfolgende Tabelle führt den gesamten Stromverbrauch über das Projekt hinweg auf (siehe Tabelle 3).

Wie in Kapitel 4.1 festgelegt, werden die Geräte bei einem Ladestand von 20% ihrer Maximalkapazität zum Laden angeschlossen. Zwei verschiedenen Fälle können somit beim Ladevorgang aufgetreten sein. Entweder die Geräte wurden länger geladen als nötig oder nicht. In ersterem Fall wird davon ausgegangen, dass nur so viel Energie aufgeladen wurde, wie physikalisch möglich. Bei zweitem Fall wurde das Gerät nicht vollständig geladen und die entnommene Leistung entspricht der Leistungsaufnahme des Gerätes multipliziert mit der Ladedauer und je nach Lademöglichkeit der Anzahl. Außerdem wird angenommen das beim Aufladen ein Wirkungsgrad von 1 vorherrscht.

Tabelle 3: Verbräuche über die Projektdauer

Datum	Ladedauer in Stunden	Gerät	Anzahl	Max. Kapa. In Wh	Restenergie	Leistung in W	entnommene Wh
07.06.2022	2	Powerbank	1	11,1	2,22	5	8,88
07.06.2022	2	V155Rm-Cine	2	311	62,2	50,4	201,6
08.06.2022	2	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
08.06.2022	1,5	Drohnenakkus	6	585,48	117,096	65,05	468,38
08.06.2022	2	V155Rm-Cine	4	622	124,4	50,4	403,2
09.06.2022	1,5	Tablet	1	40,88	8,176	20	30
09.06.2022	1,5	Handy	1	40	8	15	22,5
09.06.2022	1	Funkgeräte	6	15	3	1,25	7,5
10.06.2022	1	Powerbank	1	11,1	2,22	5	5
10.06.2022	1,5	Handy	1	40	8	15	22,5
10.06.2022	3	Tablet	1	40,88	8,176	20	32,7
10.06.2022	2	Handy	1	40	8	15	30
10.06.2022	4	Drohnenakkus	8	780,64	156,128	65,05	624,51
11.06.2022	4	Drohnenakkus	4	390,32	78,064	65,05	312,25
11.06.2022	1	Mikrofon	1	2	0,4	1,25	1,25
11.06.2022	3	V90 RM Cine Akku	2	176	35,2	50,4	140,8
11.06.2022	2	Funkgeräte	1	2,5	0,5	1,25	2,5
12.06.2022	3	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
12.06.2022	2	Handy	1	40	8	15	30
12.06.2022	2	Handy	1	40	8	15	30
12.06.2022	2,5	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
12.06.2022	2	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
12.06.2022	1,5	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
12.06.2022	2	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12

12.06.2022	2	Handy	1	40	8	15	30
12.06.2022	1	Tablet	1	40,88	8,176	20	20
13.06.2022	2	V155Rm-Cine	4	622	124,4	50,4	403,2
13.06.2022	4	Drohnenakkus	4	390,32	78,064	65,05	312,25
13.06.2022	3	V155Rm-Cine	3	466,5	93,3	50,4	373,2
13.06.2022	2	Handy	1	40	8	15	30
14.06.2022	2	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
14.06.2022	3	V155Rm-Cine	2	311	62,2	50,4	302,4
14.06.2022	2	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
15.06.2022	3	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
15.06.2022	2,5	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
15.06.2022	3	V90 RM Cine Akku	1	88	17,6	50,4	70,4
15.06.2022	2	V90 RM Cine Akku	3	264	52,8	50,4	211,2
15.06.2022	2	Funkgeräte	2	5	1	1,25	4
16.06.2022	1,5	Handy	1	40	8	15	22,5
16.06.2022	2	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
16.06.2022	2	V90 RM Cine Akku	2	176	35,2	50,4	140,8
16.06.2022	3	V90 RM Cine Akku	1	88	17,6	50,4	70,4
16.06.2022	3	V155Rm-Cine	1	155,5	31,1	50,4	124,4
16.06.2022	4	Drohnenakkus	2	195,16	39,032	65,05	156,12
16.06.2022	1,5	Mikrofon	1	2	0,4	1,25	1,6
16.06.2022	2	Tablet	1	40,88	8,176	20	32,7
16.06.2022	1,5	Handy	1	40	8	15	22,5
17.06.2022	1,5	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
17.06.2022	2	V155Rm-Cine	1	155,5	31,1	50,4	100,8
17.06.2022	2	V90 RM Cine Akku	2	176	35,2	50,4	140,8
17.06.2022	1,5	Mikrofon	1	2	0,4	1,25	1,6
17.06.2022	2	Tablet	1	40,88	8,176	20	32,7
17.06.2022	2	Tablet	1	40,88	8,176	20	32,7
18.06.2022	1,5	Handy	1	40	8	15	22,5
18.06.2022	2	Tablet	1	40,88	8,176	20	32,7
18.06.2022	2	Tablet	1	40,88	8,176	20	32,7
18.06.2022	3	V90 RM Cine Akku	2	176	35,2	50,4	140,8
18.06.2022	3	V155Rm-Cine	1	155,5	31,1	50,4	124,4
18.06.2022	2	V155Rm-Cine	2	311	62,2	50,4	201,6
18.06.2022	2	Funkgeräte	2	5	1	1,25	4
19.06.2022	1,5	Handy	1	40	8	15	22,5
19.06.2022	2	Handy	1	40	8	15	30
19.06.2022	3	Drohnenakkus	3	292,74	58,548	65,05	234,19
20.06.2022	1,5	Handy	1	40	8	15	22,5
20.06.2022	3	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12

20.06.2022	1,5	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
21.06.2022	5	Drohnenakkus	4	390,32	78,064	65,05	312,25
21.06.2022	5	V90 RM Cine Akku	2	176	35,2	50,4	140,8
21.06.2022	5	V155Rm-Cine	2	311	62,2	50,4	248,8
22.06.2022	5	V90 RM Cine Akku	2	176	35,2	50,4	140,8
22.06.2022	1,5	Handy	1	40	8	15	22,5
22.06.2022	2	Tablet	1	40,88	8,176	20	32,7
22.06.2022	2,5	Tablet	1	40,88	8,176	20	32,7
22.06.2022	3	V155Rm-Cine	2	311	62,2	50,4	248,8
22.06.2022	5	Drohnenakkus	3	292,74	58,548	65,05	234,19
22.06.2022	5	V90 RM Cine Akku	2	176	35,2	50,4	140,8
22.06.2022	1	Mikrofon	1	2	0,4	1,25	1,25
23.06.2022	5	V155Rm-Cine	2	311	62,2	50,4	248,8
23.06.2022	5	V90 RM Cine Akku	2	176	35,2	50,4	140,8
24.06.2022	2	V155Rm-Cine	1	155,5	31,1	50,4	100,8
24.06.2022	3	Drohnenakkus	3	292,74	58,548	65,05	234,19
24.06.2022	1	Mikrofon	1	2	0,4	1,25	1,25
24.06.2022	2,5	Tablet	1	40,88	8,176	20	32,7
24.06.2022	2	V155Rm-Cine	1	155,5	31,1	50,4	100,8
24.06.2022	2	V90 RM Cine Akku	2	176	35,2	50,4	140,8
24.06.2022	2	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
24.06.2022	2	V155Rm-Cine	2	311	62,2	50,4	201,6
25.06.2022	2,5	Tablet	1	40,88	8,176	20	32,7
25.06.2022	2	Handy	1	40	8	15	30
25.06.2022	2	Funkgeräte	4	10	2	1,25	8
25.06.2022	5	Drohnenakkus	3	292,74	58,548	65,05	234,19
25.06.2022	1,5	Handy	1	40	8	15	22,5
25.06.2022	2	V155Rm-Cine	1	155,5	31,1	50,4	100,8
26.06.2022	3	V90 RM Cine Akku	2	176	35,2	50,4	140,8
26.06.2022	2	V155Rm-Cine	1	155,5	31,1	50,4	100,8
26.06.2022	3	V90 RM Cine Akku	4	352	70,4	50,4	281,6
26.06.2022	2,5	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
26.06.2022	2	Tablet	1	40,88	8,176	20	32,7
26.06.2022	1,5	Handy	1	40	8	15	22,5
27.06.2022	3	V155Rm-Cine	2	311	62,2	50,4	248,8
27.06.2022	4	Drohnenakkus	4	390,32	78,064	65,05	312,25
28.06.2022	3	V90 RM Cine Akku	1	88	17,6	50,4	70,4
28.06.2022	3	V155Rm-Cine	1	155,5	31,1	50,4	124,4
28.06.2022	4	Drohnenakkus	4	390,32	78,064	65,05	312,25

28.06.2022	3	V90 RM Cine Akku	2	176	35,2	50,4	140,8
28.06.2022	3	V90 RM Cine Akku	1	88	17,6	50,4	70,4
28.06.2022	3	V155Rm-Cine	1	155,5	31,1	50,4	124,4
28.06.2022	2	V155Rm-Cine	1	155,5	31,1	50,4	100,8
29.06.2022	4	Drohnenakkus	6	585,48	117,096	65,05	468,34
29.06.2022	2	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
29.06.2022	1,5	Handy	1	40	8	15	22,5
29.06.2022	3	V155Rm-Cine	2	311	62,2	50,4	248,8
01.07.2022	4	Drohnenakkus	6	585,48	117,096	65,05	468,38
01.07.2022	2	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
01.07.2022	1,5	Handy	1	40	8	15	22,5
01.07.2022	1,5	Tablet	1	40,88	8,176	20	30
01.07.2022	2	V90 RM Cine Akku	2	176	35,2	50,4	140,8
01.07.2022	2	V90 RM Cine Akku	1	88	17,6	50,4	70,4
01.07.2022	1,5	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
01.07.2022	1	Mikrofon	1	2	0,4	1,25	1,25
02.07.2022	2	V90 RM Cine Akku	1	88	17,6	50,4	70,4
02.07.2022	4	V155Rm-Cine	1	155,5	31,1	50,4	124,4
02.07.2022	2,5	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
02.07.2022	2	V155Rm-Cine	1	311	62,2	50,4	248,8
03.07.2022	4	V90 RM Cine Akku	2	176	35,2	50,4	140,8
03.07.2022	4	V90 RM Cine Akku	4	352	70,4	50,4	281,6
03.07.2022	2	Tablet	1	40,88	8,176	20	32,704
04.07.2022	5	V155Rm-Cine	2	311	62,2	50,4	248,8
04.07.2022	4	V155Rm-Cine	1	155,5	31,1	50,4	124,4
04.07.2022	4	V90 RM Cine Akku	4	352	70,4	50,4	281,6
04.07.2022	5	Drohnenakkus	6	585,48	117,096	65,05	468,38
04.07.2022	2,5	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
04.07.2022	2	Tablet	1	40,88	8,176	20	32,704
04.07.2022	1,5	Handy	1	40	8	15	22,5
04.07.2022	1	Mikrofon	1	2	0,4	1,25	1,25
04.07.2022	2	V155Rm-Cine	2	311	62,2	50,4	201,6
04.07.2022	4	Funkgeräte	8	20	4	1,25	16
04.07.2022	1,5	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
04.07.2022	3	V155Rm-Cine	2	311	62,2	50,4	248,8
06.07.2022	2,5	Laptop	1	41,4	8,28	29	33,12
06.07.2022	2	Tablet	1	40,88	8,176	20	32,704
06.07.2022	1,5	Handy	1	40	8	15	22,5
06.07.2022	1,5	V90 RM Cine Akku	1	88	17,6	50,4	70,4

Quelle: eigene Darstellung

Mit diesen von Projekt swim4science erfassten Daten lässt sich ein täglicher Verbrauch über den Zeitraum des Projekts hinweg darstellen (siehe Tabelle 4). Da eine umfassende Protokollierung aufgrund der Natur des Projektes nicht möglich war und die tatsächlichen Verbräuche stark von unvorhersehbaren Umständen abhängig sind, muss von deutlichen Unschärfen ausgegangen werden. Um die fehlende Erfassung von Daten zu kompensieren, wird festgelegt, dass 20% mehr Energie pro Tag benötigt wurden, als beim Projekt tatsächlich erfasst wurden. Damit errechnet sich in Tabelle 4 ein täglicher Verbrauch, der für weitere Berechnungen verwendet wird.

Tabelle 4: Täglicher Verbrauch mit Versäumniskompensation

Tag	entnommene Wh	20% Versäumnis	Verbrauch Wh
07.06.2022	210,48	42,10	252,58
08.06.2022	904,70	180,94	1085,64
09.06.2022	60,00	12,00	72,00
10.06.2022	714,71	142,94	857,65
11.06.2022	456,80	91,36	548,16
12.06.2022	275,60	55,12	330,72
13.06.2022	1118,65	223,73	1342,38
14.06.2022	368,64	73,73	442,37
15.06.2022	351,84	70,37	422,21
16.06.2022	604,14	120,83	724,97
17.06.2022	341,72	68,34	410,06
18.06.2022	558,70	111,74	670,44
19.06.2022	286,69	57,34	344,03
20.06.2022	88,74	17,75	106,49
21.06.2022	701,85	140,37	842,22
22.06.2022	853,74	170,75	1024,49
23.06.2022	389,60	77,92	467,52
24.06.2022	845,26	169,05	1014,31
25.06.2022	428,19	85,64	513,83
26.06.2022	611,52	122,30	733,82
27.06.2022	561,05	112,21	673,26
28.06.2022	507,05	101,41	608,46
29.06.2022	772,76	154,55	927,31
30.06.2022	0,00	0,00	0,00
01.07.2022	799,57	159,91	959,48
02.07.2022	476,72	95,34	572,06
03.07.2022	455,10	91,02	546,12
04.07.2022	1712,27	342,45	2054,73
05.07.2022	0,00	0,00	0,00
06.07.2022	158,72	31,74	190,47
Durchschnittlicher Verbrauch			624,59
Gesamtverbrauch			18737,79

Quelle: eigene Darstellung

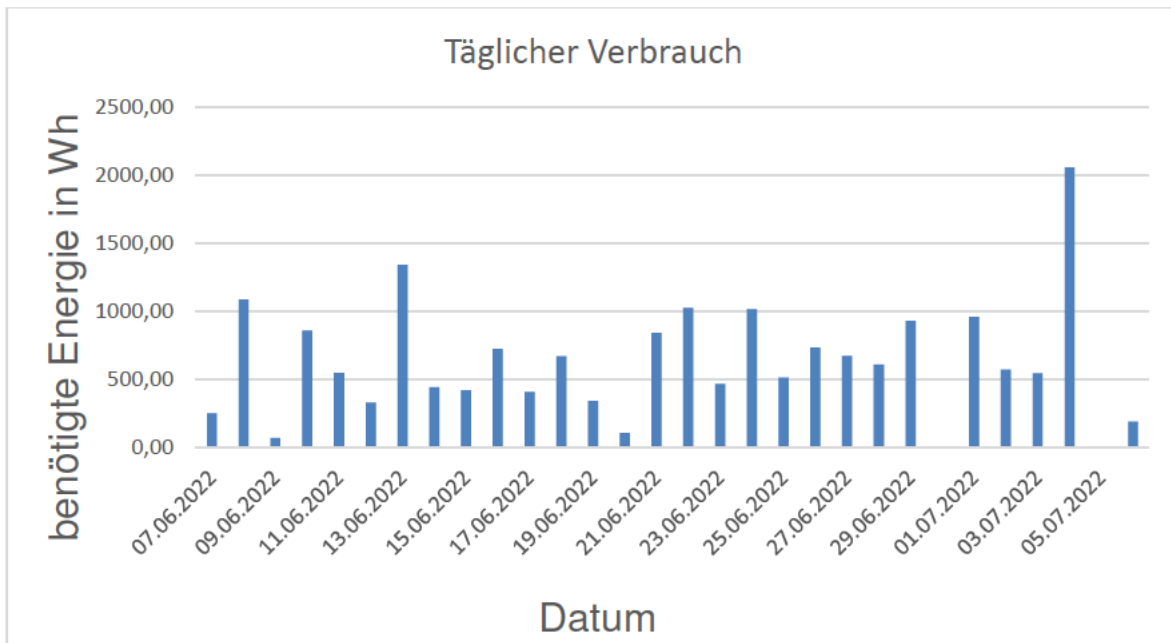


Abbildung 8: Täglicher Verbrauch (eigene Darstellung)

Anhand dieser Daten errechnet sich ein täglicher durchschnittlicher Verbrauch von 624,59 Wh. Somit wurde während des Projektes insgesamt 18,74 kWh für die Produktion benötigt. Auch liegt kein einzelner Tag vor, an dem so viel Strom benötigt wurde, dass die Maximalkapazität des EcoFlow-Speichers erschöpft gewesen wäre. An zwei Tagen wurden keine Leistungswerte erfasst. Am 30.06.2022 lag beim EcoFlow eine unbekannte Störung vor, die das Laden nicht zuließ. Der Fehler lag am Folgetag nicht mehr vor. Der Ursprung des Fehlers ist unbekannt. Der 04.07.2022 war der Tag mit dem größten Verbrauch. Es lässt sich daher darauf schließen, dass sämtliche Geräte am 05.07.2022 noch über genügend Energie verfügten und daher nicht geladen werden mussten. Diese starke Anomalie wird in Abbildung 8 deutlich und markiert den Tag, an dem am meisten verbraucht wurde. Diese Daten ermöglichen es zu erkennen, wie viel Energie hätte erzeugt oder mitgeführt werden müssen, um autark agieren zu können.

4.3 Erzeugter Solarstrom

Wie anfänglich in Kapitel 3.1 erwähnt, ist von einem hohen Arbeitspensum für das Team auszugehen. Es erfolgte, aufgrund Zeitermangelung, keine Protokollierung über die Effizienz der Ausrichtung der Solarpanels. Weiterhin ist es je nach Umgebungsbedingungen und fehlenden Stützen für die Panels fast unmöglich, zu jedem Zeitpunkt die optimale Leistungsaufnahme zu erzielen. Die Standzeiten des Teams, in denen es theoretisch möglich gewesen wäre, mit Solarstrom zu laden, beschränkten sich in den meisten Fällen auf die Morgen-

und Abendstunden. In dieser Zeit strahlt die Sonne nicht so stark wie zur Mittagszeit, wenn sie im Zenit steht. Deshalb muss davon ausgegangen werden, dass die Solarpanels nur in den seltensten Fällen ihre vollen 400W aufgenommen haben. Es wird daher angenommen, dass die Solarpanels während ihrer Nutzung durchschnittlich 320W aufgenommen haben. Dies entspricht einem Verlust in Höhe von 20% der optimalen Effizienz. Der mitgeführte Dieselgenerator wurde zwei Mal in Anspruch genommen. Anhand mangelhafter Erfassung aller Verbräuche lässt sich ebenfalls nicht abschätzen, wann der mitgeführte Solargenerator vollgeladen war oder wie viel Restenergie sich noch im Speicher befand. Es wird daher angenommen, dass zu jedem Ladevorgang mit den Solarpanels die volle Menge an Energie aufgenommen wurde, die mit 320W über den entsprechenden Zeitraum hinweg möglich war. Daraus lässt sich gegenüberstellen, welche die tägliche mittlere Leistungsaufnahme und die Gesamtleistungsaufnahme abbilden (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Ladevorgänge mit Solarstrom

Datum	Ladedauer in Stunden	Leistung in W	aufgenommene Energie in Wh
07.06.2022	0	0	0
08.06.2022	0	0	0
09.06.2022	0	0	0
10.06.2022	2	320	640
11.06.2022	0	0	0
12.06.2022	5,5	320	1760
13.06.2022	4	320	1280
14.06.2022	4	320	1280
15.06.2022	0	0	0
16.06.2022	1,5	320	480
17.06.2022	3	320	960
18.06.2022	0	0	0
19.06.2022	0	0	0
20.06.2022	0	0	0
21.06.2022	0	0	0
22.06.2022	0	0	0
23.06.2022	0	0	0
24.06.2022	1	320	320
25.06.2022	0,5	320	160
26.06.2022	0	0	0
28.06.2022	0	0	0
Durchschnittliche tägliche aufgenommene Energie			327,62
Gesamt aufgenommene Energie			6880

Quelle: eigene Darstellung

4.4 Theoretisch verfügbarer Solarstrom

Die folgende Tabelle führt die Örtlichkeit des jeweiligen Tages, die täglich verfügbaren Sonnenstunden und wie viel Energie man täglich mit einem Solarpanel hätte aufladen können, auf. Dabei wird davon ausgegangen, dass das jeweilige Solarpanel mit 320W lädt. In Anbetracht der Tatsache, dass die Sonne zu verschiedenen Tageszeiten unterschiedlich stark strahlt, werden somit 20% weniger als die vollen 400W Leistungsaufnahme angenommen. Das entspricht der Annahme aus Kapitel 4.3. An beinahe jedem Tag hat das swim4science-Team eine kleine Wegstrecke zurückgelegt. An jedem Tag wurde die jeweilige Lagerstätte protokolliert. Da nicht jeder Standort eine eigene Wetterstation oder Klimastation besitzt, war es nötig, die am nächsten gelegene für die Abrufung der Sonnenstunden zu verwenden. Dabei wurden die Sonnenstunden entweder vom Deutschen Wetterdienst (Deutscher

Wetterdienst, o. D.) oder vom Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie-MeteoSchweiz (MeteoSchweiz, o. D.) aus der Schweiz abgerufen. Obgleich das Team stellenweise in Frankreich campierte, war es nicht nötig, Wetterdaten aus Frankreich zu erfassen. Der Rhein fungiert streckenweise als Grenzfluss zu Deutschland und somit konnten die Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes mit der nahegelegenen Station verwendet werden. Schwieriger verhält es sich mit Wetterdaten aus den Niederlanden. Das Niederländische Klimainstitut - Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut stellt leider keine verfügbaren Daten in Englisch oder Deutsch bereit. Europaweit erfasste Daten vom Deutschen Wetterdienst odervon anderen Anbietern sind zu ungenau oder erfassen nicht die täglichen Sonnenstunden. Daher wurden für die Erfassung der Sonnenstunden niederländischer Orte, Klimadaten der nächstgelegenen deutschen Stadt herangezogen. Diese Daten sind aufgrund des großen Abstandes ungenau.

Tabelle 6: Tägliche Sonnenstunden

Datum	Ort	Sonnenstunden in Stunden	Laden mit 320W Panel in W
07.06.2022	Mittweida, Deutschland	2,7	864
08.06.2022	Rueras, Schweiz	6,1	1952
09.06.2022	Rueras, Schweiz	4	1280
10.06.2022	Rueras, Schweiz	11,3	3616
11.06.2022	Camp Au Chur, Schweiz	12,3	3936
12.06.2022	Camp Au Chur, Schweiz	12	3840
13.06.2022	Meiningen, Schweiz	3,25	1040
14.06.2022	Altenrhein, Schweiz	14	4480
15.06.2022	Konstanz, Deutschland	9,8	3136
16.06.2022	Schaffhausen, Schweiz	11	3520
17.06.2022	Neuhausen am Rheinfal, Deutschland	14,4	4608
18.06.2022	Waldshut-Tiengen, Deutschland	13,7	4384
19.06.2022	Basel, Schweiz	13,6	4352
20.06.2022	Ortenau, Deutschland	6,1	1952
21.06.2022	Geiswasser, Frankreich	10,8	3456
22.06.2022	Meißenheim, Deutschland	0,2	64
23.06.2022	Fort-Louise, Frankreich	13,8	4416
24.06.2022	Rußheim, Deutschland	6,5	2080
25.06.2022	Mannheim, Deutschland	10,7	3424
26.06.2022	Ginsheim, Deutschland	8,2	2624
27.06.2022	Kaub, Deutschland	4,6	1472
28.06.2022	Bonn, Deutschland	14,4	4608

29.06.2022	Hitdorf, Deutschland	7,2	2304
30.06.2022	Duisburg, Deutschland	11,4	3648
01.07.2022	Wesel, Deutschland	7,5	2400
02.07.2022	Pietershoek, Niederlande	13,9	4448
03.07.2022	Varik, Niederlande	12,4	3968
04.07.2022	Zwijndrecht, Niederlande	12,5	4000
05.07.2022	Hoek van Holland, Niederlande	9,1	2912
06.07.2022	Rheinmündung bei Rotterdam, Niederlande	5,7	1824
Durchschnittlich theoretisch am Tag verfügbare Energie			3020,27
theoretisch verfügbare Gesamtenergie			90608

Quelle: eigene Darstellung

4.5 Vergleich von Verbräuchen, erzeugtem und theoretisch verfügbarem Solarstrom

Um ein Urteil über den Verlauf des Projektes fällen zu können, ist es nötig, die Werte zu vergleichen (siehe Tabelle 7). Dafür werden Daten aus Tabelle 4, Tabelle 5 und Tabelle 6 für eine Gegenüberstellung verwendet.

Tabelle 7: Gegenüberstellung energetischer Werte

Durchschnittlicher Verbrauch	624,59Wh
Gesamtverbrauch	18737,79Wh
Durchschnittliche tägliche aufgenommene Energie	327,62Wh
Gesamt aufgenommene Energie	6880Wh
Durchschnittlich theoretisch am Tag verfügbare Energie	3020,27Wh
theoretisch verfügbare Gesamtenergie	90608Wh

Quelle: eigene Darstellung

In Tabelle 7 ist zu erkennen, dass es möglich gewesen wäre, das Projekt ausschließlich mit Solarstrom zu versorgen. Der Fokus lag jedoch durch die Natur des Projektes auf den Zeitplänen für den Rheinschwimmer, die sich an dessen Fortschritt in der Distanz orientierten (siehe Kapitel 3). Unter der Prämisse, dass sich die Annahmen in Kapitel 4.3 der Realität annähern, wurde mehr als ein Drittel der benötigten Energie durch Solarstrom bereitgestellt und täglich durchschnittlich mehr als die Hälfte an benötigter Energie erzeugt. Auch gab es

im Tagesvergleich lediglich zwei Tage, an denen nicht genügend Energie abgreifbar gewesen wäre, um die Tagesproduktion bewältigen zu können (siehe Abbildung 9). Das ist allerdings keine Problematik, da die nicht direkt genutzte Leistung zur Ladung des EcoFlows genutzt werden kann und die Kapazität des EcoFlows bei voller Ladung zwei durchschnittliche Tage puffern könnte. Die durchschnittlich am Tag verfügbare Solarenergie übersteigt die täglich aufgenommene um das zehnfache, womit deutlich wird, dass in der Zeit genügend Sonnenenergie zur Verfügung stand.

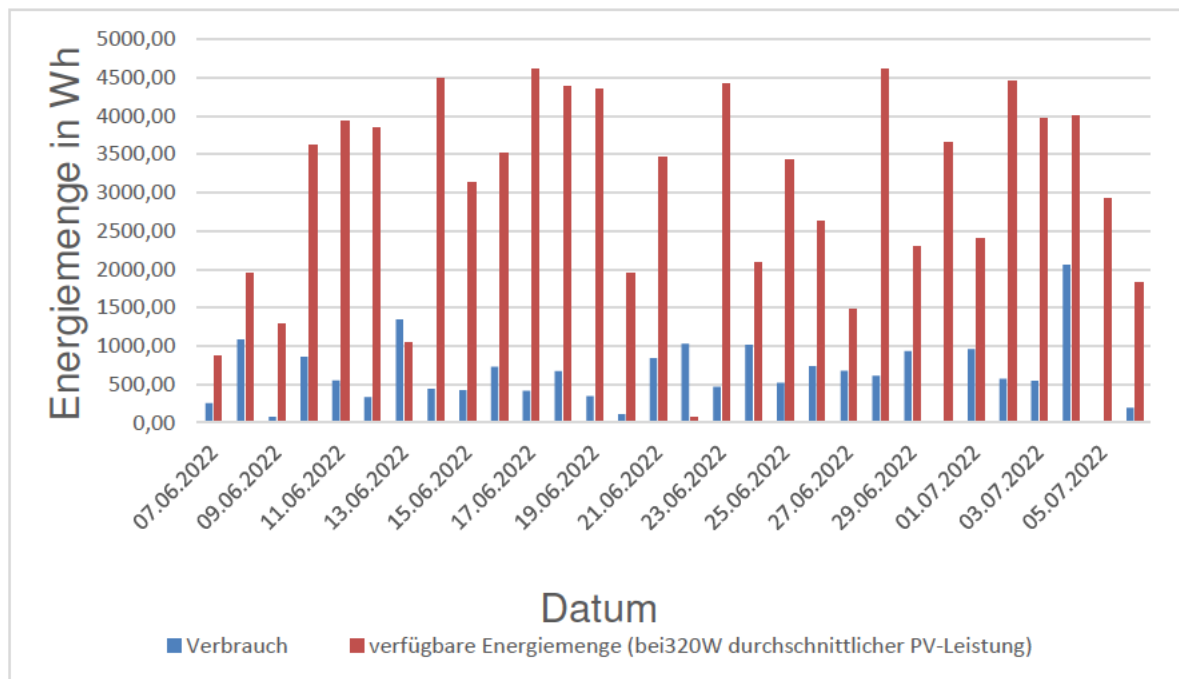


Abbildung 9: Vergleich zwischen täglichem Verbrauch und täglich theoretisch erzeugbarer Energiemenge (eigene Darstellung)

Diese theoretische Betrachtung leidet jedoch an der Umsetzung in der Realität. Zunächst einmal muss betrachtet werden, dass der tatsächliche Verlauf des Projektes nicht so stattfand, dass eine Umsetzung mit reinem Solarstrom möglich gewesen wäre. Von rund 90kWh verfügbarer Solarenergie wurden nur rund 6,8kWh tatsächlich aufgenommen. Das liegt an den in Kapitel 4.3 betrachteten Faktoren. Ein weiterer einschlägiger Faktor dürfte die längere Ladezeit des EcoFlow durch Solarstrom sein (siehe Kapitel 2.3.2). Es ist davon auszugehen, dass die Panels stellenweise nicht verwendet wurden, weil es weniger zeitintensiv ist, den Speicher des EcoFlow an einer Steckdose zu laden, anstatt dafür extra die schweren Solarpanels aufzubauen, auszurichten und zu betreuen.

Im Sinne des Rheinschwimmers war es naheliegend, das Projekt im Sommer umzusetzen, da in anderen Jahreszeiten die Wassertemperatur zu stark sinken. Dem geschuldet waren

die Sonnenstunden zahlreich (siehe Kapitel 4.4). Ein anderer Zeitraum hätte starken Einfluss auf die täglichen Sonnenstunden gehabt. Daher ist davon auszugehen, dass zu anderen Jahreszeiten gegebenenfalls nicht genügend Sonnenstunden verfügbar gewesen wären, um das Projekt theoretisch autark mit Solarstrom zu versorgen.

4.6 Preisvergleich

Auch die Preisgestaltung muss berücksichtigt werden, um eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit treffen zu können. Es ist irrelevant, wie viel Steckdosenstrom kostet, wenn überprüft werden soll, wie man mobile Einheiten autark versorgen kann. Allerdings hilft der Vergleich dabei abschätzen zu können, wie weit unterschiedliche Technologien in der Masse verfügbar und demnach kostengünstiger sind. In den Kapiteln 2.3.1 und 2.3.2 wurde festgestellt, dass das Angebot an Solargeneratoren wesentlich größer als das Angebot von Brennstoffzellen ist. Dieser Logik folgend dürfte sich der deutsche Strommix und der EcoFlow DELTA Pro in ihren Kosten pro Kilowattstunde als deutlich kostengünstiger erweisen als der Kostenpunkt der Brennstoffzelle.

Laut des statistischen Bundesamtes kostete eine Kilowattstunde Strom aus der Steckdose im Jahr 2021 durchschnittlich 32,87 Cent (vgl. Statistisches Bundesamt, o. D.).

Um den Preis für eine kWh bei mobilen Systemen abschätzen zu können, bedarf es einiger Berechnungen, wobei Angaben der jeweiligen Hersteller gearbeitet wird.

Die im Projekt mitgeführte EcoFlow DELTA Pro Powerstation kostet beim Hersteller 3.999,00€. Das mitgeführte 400W-Solarpanel hat einen Kostenpunkt von 1.099,00€. Unter der Annahme, dass beide Geräte bis zum Ende ihrer technischen Lebensdauer fehlerfrei funktionieren und keine zu bezahlende Reparatur benötigen, ergibt das einen Gesamtkostenpunkt von 5098,00€. Da der Anschaffungspreis bei diesem Gerät der einzige Kostenpunkt ist, kann der kWh-Preis nur anhand dessen bestimmt werden. Um eine Abschätzung für den kWh-Preis abgeben zu können, ist es nötig, die Lebensdauer dieses Equipments zu kennen. Für das 400W Solarpanel gibt es dazu keine Angaben. Daher wird davon ausgegangen, dass das Panel für die gleiche Zeit funktioniert wie der EcoFlow DELTA Pro. Laut Angaben des Herstellers beträgt die Kapazität 3,6kWh und es vergehen 3500 Ladezyklen bis der Akku 80% Kapazität erreicht und insgesamt 6500 Ladezyklen bis er nur noch 50% der ursprünglichen Kapazität erreicht. Es wird angenommen, dass der Akku noch weitere 1500 Ladezyklen bei 50% genutzt wird, bevor er ausgetauscht wird und dass der Akku bis zum Erreichen entsprechender Durchbruchanzahl der Zyklen auf dem vorherigen

Niveau arbeitet. Diese Annahmen bilden somit kein genaues Bild, aber zumindest eine Orientierung in Ermangelung an fehlenden Herstellerangaben (vgl. EcoFlow DELTA Pro Powerstation, o. D.) (vgl. EcoFlow 400W Solarpanel, o. D.).

Formel 1: Berechnung der Gesamtleistungsaufnahme des EcoFlow Delta Pro über dessen Lebensdauer

$$E_G = E_M * Z_1 + 80\% * \frac{E_M}{100} \% * Z_2 + 50\% * \frac{E_M}{100} \% * Z_3$$

$$E_G = 3,6kWh * 3500 + 80\% * \frac{3,6kWh}{100} \% * 3000 + 50\% * \frac{3,6kWh}{100} \% * 1500 = 23.940kWh$$

- E_G - Gesamtleistungsaufnahme über die Lebensdauer
- Z_1 - Anzahl der Ladezyklen bis zum Erreichen von 80%
- Z_2 - Anzahl der Ladezyklen bis zum Erreichen von 50%
- Z_3 - Anzahl der Ladezyklen bis zur Entsorgung
- E_M - Maximale Kapazität

Mit den getroffenen Annahmen nimmt der EcoFlow DELTA Pro über seine Lebensdauer hinweg 23.940kWh an Energie auf.

Formel 2: Preis je Kilowattstunde EcoFlow und Solarpanel

$$P_{kWh} = \frac{P_{ES}}{E_G} = \frac{5098\text{€}}{23940kWh} = 0,21 \left(\frac{\text{€}}{kWh} \right)$$

- P_{kWh} - Preis je Kilowattstunde
- P_{ES} - Gesamtpreis von EcoFlow Delta Pro und dem 400W Solarpanel
- E_G - Gesamtleistungsaufnahme über die Lebensdauer

Diese Berechnung ergibt somit, dass eine Kilowattstunde mit dem mitgeführten Solargenerator rund 21 Cent kosten müsste. Der Preis dürfte realistisch betrachtet höher sein, da Leistungsverluste kontinuierlich auftreten und nicht erst nach einer bestimmten Anzahl an Ladezyklen.

Zuletzt gilt es eine Brennstoffzelle zu betrachten. Dafür wird die EFOY Pro 1800 vom Hersteller SFC gewählt. Da die Brennstoffzelle mit einer Methanoltankpatrone operiert, ist es bei dieser möglich, den Preis anhand des Treibstoffes zu ermitteln. Die Anschaffungskosten werden damit bei dieser Betrachtung außer Acht gelassen. Bei einer konstanten Abgabe von 50W ist es einer M28-Tankpatrone vom Hersteller SFC möglich, 622 Stunden lang autonom Energie zu erzeugen. Die Tankpatrone fasst laut Herstellerangaben 28 Liter Methanol und weist mit dieser Menge eine elektrische Nennkapazität von 31,1 kWh auf. Der Hersteller vertreibt die Tankpatrone nicht selbst, weshalb er auf seiner Webseite auf Händler verweist. Der einzige Händler mit einer entsprechenden M28-Tankpatrone im Portfolio bietet diese zum Preis von 149,94€ an (vgl. EFOY, 2022 und vgl. Methanol Tankpatronen für EFOY Brennstoffzellen, 2021) (vgl. Webshop Team @ cvs.de, o. D.).

$$P_{kWh} = \frac{P_{TP}}{E_{TP}} = \frac{149,94\text{€}}{31,1\text{kWh}} = 4,82\left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}}\right)$$

P_{kWh} - Preis je Kilowattstunde

P_{TP} - Preis pro M28-Tankpatrone

E_{TP} - Nennleistungskapazität der M28-Tankpatrone

Damit ergibt sich ein Gesamtpreis von 4,82€ pro Kilowattstunde. Würde man die Anschaffungskosten mit einberechnen, wäre der Preis dementsprechend höher. Dabei ist erwähnenswert, dass der Kaufpreis von Händler zu Händler variiert und eine Betrachtung auf Basis des Treibstoffes für diese Zwecke ausreicht.

Tabelle 8: Kostenpunkte nach Quelle

Stromquelle	Preis pro kWh in €
Steckdose	0,32
EcoFlow	0,21
EFOY 1800	4,82

Quelle: eigene Darstellung

Die errechneten Werte dürften aufgrund der getroffenen Annahmen eine mangelnde Genauigkeit aufweisen, bilden aber einen nutzbaren Orientierungswert ab. Die Erwartung der Preisgestaltung hat sich demnach erfüllt. Der Preis pro Kilowattstunde der Brennstoffzelle übertrifft den des EcoFlow um rund das 22-fache. Somit spiegelt diese Tatsache die

gesellschaftlich/ technologischen Bestreben zum Ausbau von Photovoltaiktechnologie wider, während die fehlende Förderung im Brennstoffzellenbereich deutlich wird.

5 Alternativszenarien

Im Folgenden soll aufgeschlüsselt werden, wie der vom Projekt ermittelte Energiebedarf vollständig mit Brennstoffzellen beziehungsweise mit einem Solargenerator hätte realisiert werden können.

5.1 Theoretische Betrachtung für Autarkie mit Brennstoffzellen

Für diese theoretische Betrachtung werden die bereits in der Arbeit behandelten DMFC-Brennstoffzellen inklusive der M28 Tankpatrone von SFC verwendet.

Da die Methanoltankpatrone M28 eine elektrische Nennkapazität von 31,1 kWh besitzt und sich der Gesamtverbrauch des Projektes auf 18,72kWh beläuft, ließe sich das Projekt nur auf die Gesamtkapazität betrachtet durchführen. Somit würde eine einzelne Brennstoffzelle und eine einzelne Tankpatrone ausreichen.

Die EFOY Pro 1800 und auch deren Schwestermodelle lassen sich jedoch nicht ohne Umwege direkt im Projekt swim4science nutzen. Die Brennstoffzelle hat keine Anschlüsse, an denen man im Projekt verwendete Geräte laden könnte. Die Brennstoffzelle ist dafür gebaut, die Fahrzeugelektronik beziehungsweise die Batterie des Wohnmobils zu unterstützen, nicht um externe Geräte direkt zu versorgen. Die Brennstoffzelle muss außerdem an einem sicheren Standort im Wohnmobil installiert werden, was die Mitführung von mehreren solcher Zellen erschwert. Außerdem würde das Laden von mehreren Kameraakkus sowie Drohnenakkus einen größeren Output erfordern als eine EFOX Pro 1800 bereitstellen könnte. Somit wären mehrere Brennstoffzellen nötig. Demnach würden mehrere Tankpatronen benötigt, die wiederum Platz beanspruchen und die Umsetzung logistisch erschweren (EFOY Bedienungsanleitung 80/150 & EFOY Pro 900/1800/2800, 2020.).

Somit ist die direkte Anwendung für die Zwecke des Projektes mit Brennstoffzellen nicht möglich. Da keine anderen Anbieter für diese Form der Versorgung für Endkonsumenten existieren, müsste eigens dafür ein neues Modell vom Hersteller geschaffen werden oder sämtliche Geräte per Bordelektronik des Wohnmobils geladen werden. Auch wäre es

theoretisch denkbar, in privater Motivation eine technische Ergänzung zu den Brennstoffzellen herzustellen oder diese zu modifizieren.

Die einfachste Variante wäre es, der Brennstoffzelle einen einfachen Energiespeicher ähnlich des EcoFlows nachzuschalten. Unter der Bedingung, dass an diesem Speicher alle projektrelevanten Geräte geladen werden können und dieser genügend Kapazität besitzt. Dieser Speicher könnte ganztägig von der Brennstoffzelle aufgeladen werden. Bei der Brennstoffzelle EFOY Pro 1800 würde das bedeuten, dass sie einen Speicher 24 Stunden mit 82W versorgen könnte. Damit würden täglich insgesamt 1968Wh zur Verfügung stehen. Unter diesen Umständen wäre bei dem erfassten täglichen Durchschnittsverbrauch von 624,59Wh möglich gewesen, das Projekt autark zu versorgen. Diese Variante birgt außerdem den Vorteil vollkommen unabhängig von der Sonne zu sein und erhöht somit die Flexibilität (EFOY Brennstoffzellen von SFC Energy – Produktüberblick, 2022).

5.1.1 Emissionsvergleich zwischen Methanolbrennstoffzelle und Steckdosenstrom

Die Brennstoffzelle vom Hersteller EFOY arbeiten mit Methanol. Diese Tatsache sorgt dafür, dass die Brennstoffzelle, die für die theoretische Betrachtung ausgewählt wurde, ihren Beitrag zur Autarkie leisten kann. Allerdings erzeugt die Brennstoffzelle auch Kohlenstoffdioxid. Für die theoretische Betrachtung wurde die EFOY-Pro-1800 ausgewählt. Dabei handelt es sich um eine Direkt-Methanol-Brennstoffzelle oder auch Direct Methanol Fuel Cell (DMFC). Diese Form der Brennstoffzelle wandelt Methanol ohne Zwischenprozesse oder Reformierung in nutzbare Energie, Wasser und Kohlenstoffdioxid um (vgl. Geitmann, 2012: 152).

Wie in der Marktanalyse festgestellt, sind Brennstoffzellen für mobile Lösungen noch ein unerschlossener Markt, weshalb sich bei Brennstoffzellen somit für ein DMFC-Model entschieden werden muss. Demnach erzeugt der Anwender bei der Verwendung Treibhausgase, was im Sinne des Umwelt- und Klimaschutzes unerwünscht ist. Es wäre daher wissenswert, wie viel Gramm Kohlenstoffdioxid eine DMFC vom Hersteller EFOY pro kWh bei ihrem Betrieb erzeugt. Dieser Wert kann dann mit der Treibhausgaserzeugung pro kWh-Stunde vom deutschen Strommix verglichen werden, um abschätzen zu können, ob die Stromerzeugung mit einer DMFC klimaverträglicher ist. Dabei wird davon ausgegangen, dass jenes Methanol, welches für den Betrieb der Brennstoffzelle benötigt wird, nicht klimafreundlich hergestellt wurde. Theoretisch ist es auch denkbar Methanol aus Wasserstoff

und aus der Luft gewonnenen Kohlenstoffdioxid herzustellen. Damit würde der Atmosphäre zuvor entnommenes Kohlenstoffdioxid wieder zugeführt.

Laut Herstellerangaben von SCF-Energy ergibt sich ein Input von:

Mathanol: 0,9 Liter oder 0,71 Kilogramm pro kWh

Sauerstoff: 1,07 Kilogramm pro kWh

Folgender Output wird erzeugt:

Wasser: 0,8 Kilogramm pro kWh

Kohlenstoffdioxid: 0,98 Kilogramm pro kWh

(vgl. SFC-Energy DMFC Emissions, 2020)

Dem gegenüber stehen laut Umweltbundesamt 0,42 Kilogramm Kohlenstoffdioxid pro kWh im Jahr 2021 für Steckdosenstrom, wobei lediglich die Kohlenstoffdioxidemission ohne andere Treibhausgase betrachtet wird (vgl. Umweltbundesamt, Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen, 2022).

Somit ist festzustellen, dass der deutsche Strommix nur halb so viel Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre entlässt, wie es bei der Brennstoffzelle der Fall ist. Es wäre klimaverträglicher Strom aus einer Steckdose zu entnehmen als die DMFC zu nutzen. Erwähnenswert ist außerdem, dass die atmosphärische Belastung durch den deutschen Strommix in den letzten Jahren stark gesunken ist, zu erkennen in Abbildung 10.

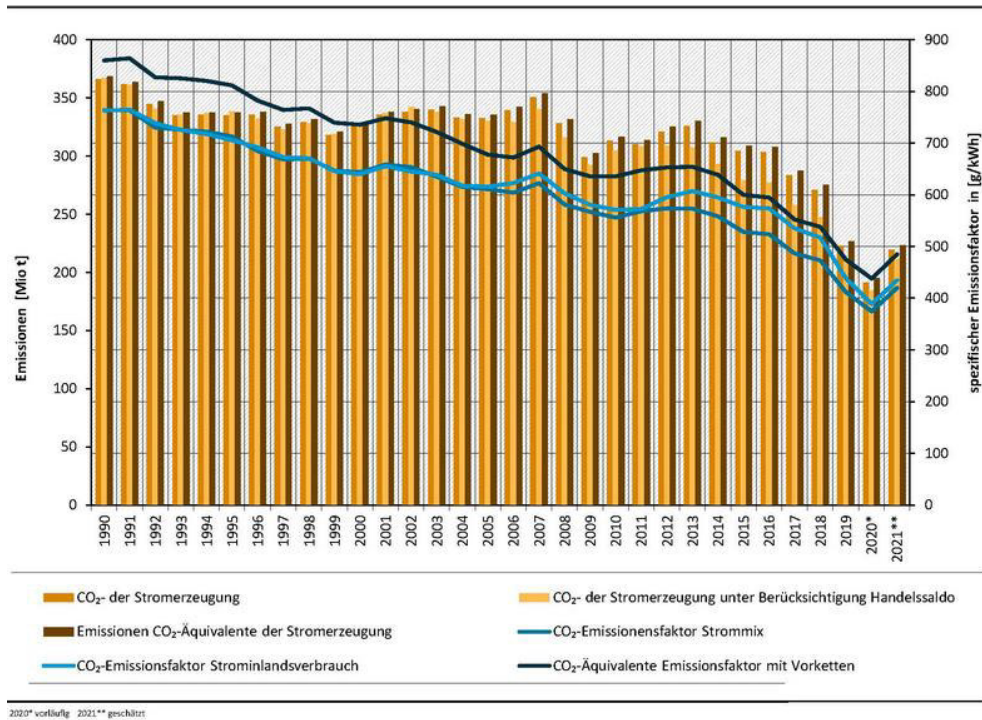


Abbildung 10: Entwicklung der spezifischen Emissionen (Umweltbundesamt, Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen 2022)

5.2 Autarkie mit einem solar gespeisten Speicher

In Kapitel 4.4 wurde bereits festgestellt, dass über den Projektzeitraum hinweg genügend Energie zur Verfügung stand, um theoretisch autark agieren zu können. Die Autarkie hätte mit einem EcoFlow DELTA Pro und einem 400W Solarpanel umgesetzt werden können. Das Gerät verfügt über genügend Ausgänge zum Laden und es kann genügend Leistung abgeben, um das gleichzeitige Laden der anspruchsvollsten Projektgeräte zu erlauben. Für das Projekt wäre es wahrscheinlich nötig gewesen, eine Person als Energieverantwortlichen zu bestellen, welcher sich ausschließlich um die Betreuung des EcoFlows und der zu ladenden Geräte kümmert. Ferner hätten Reisezeiten und Standzeiten des Wohnmobils angepasst werden müssen, um genügend Solarstrom aufnehmen zu können.

Der mitgeführte EcoFlow DELTA Pro und das 400W Solarpanel wären mit etwas Anpassung im Zeitplan des Projektes völlig ausreichend für die autarke Versorgung des Produktionsequipments gewesen.

6 Zukünftige Anwendung

Die in Kapitel 2.1 und 2.2 betrachteten Technologien beherbergen ein großes Potential, wie in dieser Bachelorarbeit aufgezeigt wurde. Um einen Ausblick über künftige Projekte oder Umsetzungen geben zu können, werden hier einige vielversprechende Ideen und Bestrebungen vorgestellt.

Die Firma Bosch möchte laut eigenen Angaben bereits im Jahr 2024 mit der Serienfertigung dezentraler Kraftwerke auf Basis von Festoxidbrennstoffzellen beginnen. Für diese Initiative schloss sich Bosch mit dem britischen Unternehmen Ceres Power zusammen und investierte einen dreistelligen Millionenbetrag. Ziel ist es, vernetzte Kraftwerke in kleinerer Skalierung, in Städten, Fabriken, Handelsgewerbe und Rechenzentren zu etablieren (vgl. Bosch, 2020).

Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, Deutschland zum Vorreiter und Technologieführer in Sachen Wasserstoff zu positionieren. Dafür wurde am 10. Juni 2020 die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) verabschiedet. Bund und Länder fördern insgesamt 62 Wasserstoffgroßprojekte mit acht Milliarden Euro. Dabei soll sich überwiegend auf Mobilität und Industrie, insbesondere Stahlindustrie fokussiert werden. Die Kosten für die Herstellungen von grünem Wasserstoff sollen langfristig gesenkt werden. Zudem werden mehrere Energieforschungsprojekte gefördert. Die NWS sieht weiterhin vor, ausländische Projekte zu fördern, um später grünen Wasserstoff zu importieren (vgl. Bundesregierung, 2021).

Im Zuge der NWS steht Marokko als Partner für eine Zusammenarbeit bereit. Das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit schätzt, dass Marokko bis 2030 zwei bis vier Prozent des weltweiten Bedarfs an grünem Wasserstoff decken könnte. Dafür sollen die erneuerbaren Energien im Land stark ausgebaut werden. Um diese Ziele zu erreichen, wird eine Pilotanlage gebaut. Diese soll planmäßig ab dem Jahr 2025 jährlich um die 10.000 Tonnen Wasserstoff produzieren. Wie viel von diesem Wasserstoff Deutschland erreichen soll, steht unter anderem wegen eines noch fehlenden Transportkonzeptes jedoch nicht fest. Der Transport von Wasserstoff kann auf unterschiedlichen Wegen und in unterschiedlichen Formen erfolgen. So ist es denkbar, den Wasserstoff in Reinform, flüssig oder umgewandelt in Form von Ammoniak oder Methan zu transportieren. Laut offiziellen Sprechern des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit ist der Transport eine große Herausforderung. Der langfristige Plan ist es, mit Tankern oder einer Pipeline Wasserstoff

nach Deutschland beziehungsweise Europa zu transportieren. Die dafür benötigte Infrastruktur wird derzeit ausgebaut (vgl. Jerzy, 2021).

Die saudi-arabischen Ölscheiche erkennen ebenfalls eine Trendwende im Energiesektor. So ließ ein Konzernchef des Erdölkonzerns Aramco aus Saudi-Arabien verlauten, dass er fest an die Durchsetzungsfähigkeit von Wasserstoff als künftigen Energieträger glaube. Das saudische Energieministerium glaubt ebenfalls daran und hat das Bestreben bis 2050 der weltweit größte Exporteur für Wasserstoff zu werden. Erste Pilotprojekte existieren bereits und für den Preis von 4,3 Milliarden Euro soll die Fertigstellung der größten Wasserstofffabrik der Welt erfolgen. Eine Absichtserklärung zur gegenseitigen Kooperation wurde ebenfalls mit Deutschland geschlossen. Saudi-Arabien ist jedoch in diesem Bestreben nicht allein. Die Golfländer wie Oman oder die Arabischen Emirate planen die Errichtung großer Solarkraftwerke und Wasserstoffproduktionsstätten. Diese Bestrebungen liegen vor allem darin begründet, dass die Einnahmequelle Öl auf lange Sicht geringer werden dürfte (vgl. Tagesschau: Energieprojekte der Golfstaaten, 2022).

Airbus hat in Sachen Mobilität und Wasserstoff große Bestrebungen. Der Luft-Raumfahrt und Rüstungskonzern hat das Projekt ZEROe ins Leben gerufen. Dieses hat das Ziel, das erste kommerziell genutzte Wasserstoffflugzeug bis 2035 auf den Markt zu bringen. Mit drei verschiedenen Konzepten, von denen zwei mit Strahlantriebwerken und eines mit Propellern funktionieren soll, möchte Airbus emissionsfreie Passagierflüge möglich machen. Laut Angaben des Herstellers sollen die Flugzeuge dabei 100-200 Personen transportieren können (vgl. Airbus, 2021).

All diese Projekte können als Indiz für eine kommende Renaissance für die Wasserstofftechnologie betrachtet werden. Die hier aufgeführten Beispiele müssen erst noch umgesetzt werden. Sie geben jedoch einen Hinweis auf die generelle Bestrebung, die Technologie voranzutreiben.

7 Fazit

Die Arbeit hat aufgezeigt, dass es möglich ist, mobile Systeme bei aktuellem Marktangebot wirtschaftlich, ökologisch und nachhaltig mit vertretbarem Aufwand zu versorgen. Es wird jedoch festgestellt, dass dies leichter mit einem Solargenerator in Verbindung mit einem Solarpaneel umsetzbar ist. Die verfügbaren Brennstoffzellentechnologien erweisen sich für den Zweck des Projektes swim4science als wirtschaftlich mangelhaft. Mit einem nachgelagerten Speicher wäre jedoch eine große Flexibilität möglich. Das wird im Preisvergleich zwischen den Kosten je Kilowattstunde und dem Emissionsvergleich zwischen Methanolbrennstoffzellen und Steckdosenstrom deutlich, zumal der einzige Anbieter für Brennstoffzellen kein Angebot für die Zwecke des Projektes besaß. Die Möglichkeiten, ein mobiles System autark zu versorgen, sind mit solaren Optionen wesentlich umfangreicher als mit Brennstoffzellen. Dies spiegelt die Marktanalyse in Kapitel 2.3 wider.

Die verarbeiteten Daten ermöglichen es, einen Abriss über die Verbräuche abzugeben. Wie in den Kapitel 4.1 und 4.2 bereits erwähnt wurde das Protokoll über die täglichen Verbräuche und Aufladevorgänge des EcoFlow ungenau geführt. Es wurde lediglich erfasst, wann Geräte zum Aufladen angesteckt wurden und wann sie wieder entfernt wurden. Die Tatsache, dass viele Ladevorgänge oder Ladestände zu Beginn des Ladeprozesses vergessen wurden zu notieren, ist der Genauigkeit abträglich. Die Ladestände des EcoFlow wurden zu keinem Zeitpunkt notiert. Die Protokollierung wies Fehler auf. Um die Daten dennoch verarbeiten zu können, wurden zahlreiche Annahmen getroffen. Diese machen die Ergebnisse nutzbar, eine akkurate Analyse allerdings unmöglich. Für weitere Projekte dieser Art empfiehlt der Autor daher, die Begleitung von geschultem Personal, welches sich für den Zeitraum des Projektes ausschließlich der Erfassung dieser Daten widmet.

Die Ermangelung an technischer Nutzbarkeit von Brennstoffzellen für die Zwecke des Projektes, sowie das minimale Angebot auf dem Markt für Endnutzer, sind ein Indiz für den Mangel an Aufmerksamkeit für die Förderung der Brennstoffzellentechnologie. Diese steht im starken Gegensatz zu einer tatsächlich möglichen Autarkie, die mit einem einzelnen Solargenerator und wenigen Änderungen im Projektablauf möglich gewesen wäre.

Dieser Logik folgend ist es zum Zeitpunkt der Erstellung der Bachelorarbeit für Endnutzer sinnvoller, sich mit PV-Anlagen oder Solargeneratoren mobil autark zu versorgen, als dies mit Brennstoffzellen zu versuchen. Künftige Projekte mit Wasserstofftechnologie klingen

zwar vielversprechend, sind aber noch nicht umgesetzt worden. Die PV-Technologie hat diesen Entwicklungsschritt bereits hinter sich.

Es wird somit abschließend festgestellt:

Die Autarkie von mobilen Systemen lässt sich unter gegenwärtigen Umständen mit einem Solargenerator inklusive Solarpanels realisieren. Die Autarkie ausschließlich mit Brennstoffzellen ist für größer skalierende Verbräuche nicht möglich, beziehungsweise logistisch schwer umzusetzen.

Literaturverzeichnis

2022 MFG Medien- und Filmgesellschaft Baden-Württemberg mbH (o. D.): Green Shooting, Green Shooting, [online] <https://greenshooting.mfg.de/> [abgerufen am 21.06.2022].

Airbus (2021): ZEROe, [online] <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe> [abgerufen am 04.07.2022].

Apple (o. D.): iPad Pro - Technische Daten, Apple (Deutschland), [online] <https://www.apple.com/de/ipad-pro/specs/> [abgerufen am 25.06.2022a].

Apple (o. D.): iPhone 11 - Technische Daten, Apple (Deutschland), [online] <https://www.apple.com/de/iphone-11/specs/> [abgerufen am 25.06.2022].

Apple (o. D.): MacBook (Retina, 12 Zoll, 2017) - Technische Daten (CH), [online] https://support.apple.com/kb/SP757?viewlocale=de_CH&locale=de_CH [abgerufen am 25.06.2022].

Arbeitskreis » Green Shooting «: Ökologische Mindeststandards für deutsche Kino-, TV und Online-/VoD-Produktionen Arbeitskreis »Green Shooting« (2021): oekologische-mindeststandards greenmotion.de, [online] https://www.oekologische-mindeststandards-greenmotion.de/files/16_Oekologische_Mindeststandards/Dokumente/Oekologische_Mindeststandards_fuer_deutsche_Kino-__TV-_und_Online-_bzw._VoD-Produktionen.pdf [abgerufen am 04.04.2022]

ASUE - Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (o. D.): www.asue.de, [online] https://asue.de/brennstoffzellen/grafiken/schematische_darstellung_einer_pem-brennstoffzelle [abgerufen am 23.05.2022].

BLUETTI EP500 +2*SP350 Sonnenkollektor (o. D.): Bluettipower-DE, [online] <https://de.bluettipower.eu/products/ep500-2sp350> [abgerufen am 08.06.2022b].

Bosch (2020): Bosch will 2024 mit Serienfertigung starten, Stationäre Brennstoffzelle, Bosch Media Service, [online] <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/stationaere-brennstoffzelle-bosch-will-2024-mit-serienfertigung-starten-221952.html> [abgerufen am 04.07.2022].

Budde (2018): Stahlindustrie - Wasserstoff statt Koks und Kohle, Deutschlandfunk, [online] <https://www.deutschlandfunk.de/stahlindustrie-wasserstoff-statt-koks-und-kohle-100.html> [abgerufen am 20.05.2022].

Bundesregierung (2021): Bericht der Bundesregierung zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie bundesregierung.de, [online], PDF, Seite 1 https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/bericht-der-bundesregierung-zur-umsetzung-der-nationalen-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publication-file&v=18 [abgerufen am 04.07.2022].

Deutscher Wetterdienst (o. D.): Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Leistungen - Klimadaten Deutschland, [online] <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadaten-deutschland/klimadatendeutschland.html#buehneTop> [abgerufen am 08.07.2022].

DJI Official (o. D.): DJI Battery Station - Product Information - DJI, [online] <https://www.dji.com/tb50-battery-station/info#specs> [abgerufen am 28.06.2022b].

EcoFlow 400W Solarpanel (o. D.): EcoFlow Germany, [online] <https://de.ecoflow.com/products/400w-solar-panel> [abgerufen am 08.06.2022].

EcoFlow DELTA Pro Powerstation (o. D.): EcoFlow Germany, [online] <https://de.ecoflow.com/products/delta-pro-portable-power-station> [abgerufen am 08.06.2022].

- EFOY (2022): EFOY Pro, [online] <https://www.efoy-pro.com/efoy/efoy-efoypro/> [abgerufen am 02.06.2022].
- EFOY Bedienungsanleitung 80/150 & EFOY Pro 900/1800/2800 (2020): efoy-pro.com, [online], Seite 13, <https://www.efoy-pro.com/wp-content/uploads/sites/10/user-manual-efoy-pro-all-de.pdf> [abgerufen am 09.07.2022].
- EFOY Brennstoffzellen von SFC Energy - Produktüberblick (2022): EFOY, [online] <https://www.my-efoy.com/efoy-brennstoffzellen/> [abgerufen am 29.06.2022].
- EFOY Pro 800/2400 (2021): EFOY Pro, [online] <https://www.efoy-pro.com/efoy/efoy-pro-800-2400/> [abgerufen am 02.06.2022].
- Falk, Alexander (2014): Brennstoffzelle VeGA: Stromerzeugung mit Flüssiggas im Wohnmobil von Truma, AUTOMativ.de - Das Auto Magazin, [online] <https://www.automativ.de/brennstoffzelle-vega-stromerzeugung-mit-flussiggas-im-wohnmobil-von-truma-id-34542.html> [abgerufen am 02.06.2022].
- Fresh 'n Rebel (2021): 3.000 mAh Powerbank, [online] <https://freshnrebel.com/de/powerbank-3000-mah/2pb3000dp/#nav-vergleichen> [abgerufen am 27.06.2022].
- Geitmann, Sven (2012): *Energiewende 3.0: Mit Wasserstoff und Brennstoffzelle*, 3. Aufl., Oberkrämer, Germany: Hydrogeit Verlag.
- Geitmann, Sven (2021): Enymotion meldet Insolvenz an, HZwei, [online] <https://www.hzwei.info/blog/2012/12/18/enymotion-meldet-insolvenz-an/> [abgerufen am 02.06.2022].
- Jackery Solargenerator 2000 Pro (Explorer 2000 Pro + SolarSaga 200W) (o. D.): Jackery DE, [online] <https://de.jackery.com/products/solar-generator-2000-pro?variant=41395566805189> [abgerufen am 08.06.2022].

- Jerzy, Nina (2021): Grüner Wasserstoff aus Marokko, deutschland.de, [online] <https://www.deutschland.de/de/energiewende-gruener-wasserstoff-aus-marokko-wasserstoffstrategie> [abgerufen am 04.07.2022].
- marcotec-shop.de (o. D.): Swit PC-P430S, 4-Kanal-Ladegerät, V-Mount, [online] <https://www.marcotec-shop.de/de/swit-pc-p430s-4ch-charger-v-mount.html> [abgerufen am 05.07.2022].
- Mertens, Konrad (2020): *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*, 5., aktualisierte, Steinfurt, Deutschland: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- MeteoSchweiz (o. D.): Messwerte - Meteoschweiz, [online] <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/messwerte.html?param=messwerte-sonnenscheindauer-10min&station=HA1&chart=day> [abgerufen am 08.07.2022].
- Methanol Tankpatronen für EFOY Brennstoffzellen (2021): EFOY Pro, [online] <https://www.efoy-pro.com/efoy/tankpatronen/> [abgerufen am 01.07.2022].
- Michalke, Sabrina (o. D.): Wasserstofftechnik BHT Berlin, Berliner Hochschule für Technik, [online] <https://labor.bht-berlin.de/kee/wasserstofftechnik/> [abgerufen am 23.05.2022].
- Quaschning, Volker (o. D.): Installierte Photovoltaikleistung in Deutschland, Volker Quaschning - Erneuerbare Energien und Klimaschutz, [online] <https://www.volker-quaschning.de/datserv/pv-deu/index.php> [abgerufen am 18.05.2022].
- SFC Energy (o. D.): EFOY Montageanleitung, efoy.com, [online] <https://www.my-efoy.com/wp-content/uploads/sites/8/efoy-installation-manual-de.pdf> [abgerufen am 07.06.2022].
- SFC-Energy, 2020, DMFC – Emissions, PDF-Dokument „161020_DMFC_Emissions_100W“ Produktinformation auf Anfrage [abgerufen am 30.06.2022]

Statistisches Bundesamt, (o. D.): Erdgas- und Stromdurchschnittspreise, [online]

<https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Erdgas-StromDurchschnittspreise/inhalt.html;jsessionid=223CE0DC9F54B174522528A3A925A3EE.live721#sprg421254> [abgerufen am 30.06.2022].

Tagesschau (2022): Energieprojekte der Golfstaaten: Vom Ölscheich zum Wasserstoff-

scheich, tagesschau.de, [online] <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/weltwirtschaft/wasserstoff-golfstaaten-101.html> [abgerufen am 04.07.2022].

Truma: Zubehör für Wohnwagen und Wohnmobile (o. D.): truma.com, [online]

<https://www.truma.com/de/de/home> [abgerufen am 02.06.2022].

Umweltbundesamt Zu erwartende Klimaänderungen bis 2100 (2014): [online]

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/zu-erwartende-klimaaenderungen-bis-2100> [abgerufen am 28.04.2022].

- Umweltbundesamt, Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen (2022): [online] <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen?sprungmarke=Strommix#Strommix> [abgerufen am 30.06.2022].
- Video Data - Bebob V155RM-CINE (o. D.): videodata.de, [online] <https://www.videodata.de/shop/products/de/Akkus-Spannungsversorgung/V-Mount-Akkus/101-160-Wh/Bebob-V155RM-CINE.html> [abgerufen am 05.07.2022].
- Video Data - Bebob V90RM-CINE (o. D.): videodata.de, [online] <https://www.videodata.de/shop/products/de/Akkus-Spannungsversorgung/V-Mount-Akkus/40-100-Wh/Bebob-V90RM-CINE.html> [abgerufen am 28.06.2022].
- Video Data - DJI Inspire 2 TB50 Intelligent Flight Battery (4300mAh) (o. D.): videodata.de, [online] <https://www.videodata.de/shop/products/de/Drohnen/Drohnen-Zubeh-246r/Inspire-2-TB50-Intelligent-Flight-Battery.html> [abgerufen am 28.06.2022b].
- Webshop Team @ cvs.de (o. D.): EFOY Pro Tankpatrone M28 [150905040] - Bukh-Bremen GmbH - Technik und Ausrüstung für die Berufs- und Sportschiffahrt, BUKH, [online] <https://www.bukh-bremen.de/hersteller/efoy/efoy-pro/efoy-pro-tankpatronen/efoy-pro-tankpatrone-m28-pm-150905040> [abgerufen am 01.07.2022].

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Chemnitz, den 18.07.2022

Marcus Engelmann

