

#GIDSresearch 2 / 2024

Simon Struck und David Reim

## Energieautonome Streitkräfte

Wasserstoffherzeugung und die Möglichkeiten nachhaltiger  
Energiesysteme für die Versorgung eines Feldlagers

#GIDSresearch | Nr. 2 / 2024 | August 2024 | ISSN 2699-4380

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie, detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

ISSN 2699-4380

Dieser Beitrag steht unter der Creative Commons Lizenz CC BY-NC-ND 4.0 International (Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitung). Weitere Informationen zur Lizenz finden Sie unter: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>



Dieses #GIDSresearch wird vom German Institute for Defence and Strategic Studies (GIDS) – Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU/UniBw H) herausgegeben.

Die Beiträge sind auf der Website des GIDS kostenfrei abrufbar: [www.gids-hamburg.de](http://www.gids-hamburg.de)

#GIDSresearch gibt die Meinung der AutorInnen wieder und stellt nicht zwangsläufig den Standpunkt des GIDS dar.

Zitiervorschlag:

Simon Struck / David Reim, Energieautonome Streitkräfte. Wasserstoffherzeugung und die Möglichkeiten nachhaltiger Energiesysteme für die Versorgung eines Feldlagers, #GIDSresearch 2/2024, GIDS: Hamburg.

GIDS  
German Institute for Defence and Strategic Studies  
Führungsakademie der Bundeswehr  
Manteuffelstraße 20 · 22587 Hamburg  
Tel.: +49 (0)40 8667 6801  
[bueror@gids-hamburg.de](mailto:bueror@gids-hamburg.de) · [www.gids-hamburg.de](http://www.gids-hamburg.de)

## Inhalt

1	Einleitung .....	1
2	Zivile Anwendungen für Energiesysteme im Inselbetrieb mit Wasserstoffproduktion .....	3
2.1	Centrale Electrique de l'Ouest Guyanais (CEOG).....	3
2.2	Puertollano Green Hydrogen Plant.....	4
2.3	Pilotanlage „Haru Oni“ .....	5
2.4	Kassø (Süd-Dänemark) .....	6
3	Energiesysteme für autonome Feldlager .....	7
3.1	PV-Anlage zur Energieerzeugung.....	8
3.2	Anlagen für die Wasserstofferzeugung und -nutzung .....	8
3.2.1	Elektrolyseanlage .....	9
3.2.2	Wasserstoffspeicher.....	11
3.2.3	Rückverstromung des Wasserstoffes.....	12
3.3	Batteriespeicher.....	13
3.4	Optimierungsprozesse durch Smart Grids.....	14
4	Überblick über Szenarioannahmen und Energiebedarf eines Feldlagers.....	16
4.1	Komponenten eines Feldlagerbetriebes und ihr Energiebedarf .....	16
4.1.1	Unmittelbarer Feldlagerbetrieb .....	16
4.1.2	Einsatzrelevante Infrastruktur .....	19
4.2	Energie- und Wasserbedarf für die Wasserstofferzeugung .....	20
4.3	Energiebedarf von Batterie- und Wasserstoffspeichern .....	21
4.4	Energiebedarf für das Feldlager und Mobilität.....	22
5	Besonderheiten der Auslegung von Photovoltaikanlagen und differenzierte Abstimmung der Energieverbraucher eines Feldlagers.....	26
5.1	Spezifika der Nutzung von Photovoltaikanlagen .....	26
5.2	Differenzierte Betrachtung und Abstimmung des Energiebedarfes von Standorten .....	28
5.3	Möglichkeiten eines teilautonomen Betriebes von Standorten.....	31
6	Dimensionierung der PV-Anlage.....	32

6.1 Auslegung der PV-Anlage für die Ganzjahresversorgung (vollautonome Versorgung) .....	32
6.2 Auslegung der PV-Anlage für das Sommerhalbjahr (teilautonome Versorgung) .....	33
6.3 Auslegung der PV-Anlage auf die fünf sonnenreichsten Monate (teilautonome Versorgung) .....	33
6.4 Auslandseinsatz.....	33
6.5 Bewertung.....	35
7 Logistischer Aufwand.....	36
8 Lokale Erzeugung von E-Fuels.....	38
9 Ausblick: Energieautonomie von Liegenschaften .....	39
10 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse.....	41
Literaturverzeichnis .....	45
Anhang .....	51

Simon Struck und David Reim | GIDS-HSU/UniBw H

# Energieautonome Streitkräfte

## Wasserstoffherzeugung und die Möglichkeiten nachhaltiger Energiesysteme für die Versorgung eines Feldlagers

### 1 Einleitung

Der Energiesektor Europas befindet sich in einem großen Veränderungsprozess. Ziel ist die massive Reduzierung der Treibhausgasemissionen bis 2050. Die künftige Energieversorgung Deutschlands und Europas wird dabei durch regenerative Energiesysteme bestimmt und Wasserstoff als Energieträger spielt für die Zukunft eine besondere Rolle. Die deutsche nationale Wasserstoffstrategie bezieht explizit die Streitkräfte in dieses Thema ein. Beschleunigt wird die Transformation des Energiemarkts durch den Krieg gegen die Ukraine, der die Abhängigkeit der europäischen Energiesicherheit von russischen fossilen Energieträgern offenlegte.

Die Bundeswehr ist mit ihrer Mobilität und Energieversorgung unmittelbar betroffen. Derzeit sehen die Logistikkonzepte der Bundeswehr für die Landesverteidigung den Rückgriff auf zivile Strukturen vor, die bereits jetzt in einem Wandel begriffen sind und sich zukünftig noch verstärkt verändern werden.<sup>1</sup> Die Streitkräfte sind vor die Frage gestellt, inwieweit daraus Herausforderungen für ihre Einsatzfähigkeit und Infrastruktur entstehen.

Das GIDS untersucht seit längerem die Fragestellung der Energieautonomie von Streitkräften, die in den #GIDSstatements 12/2021,<sup>2</sup> 9/2022<sup>3</sup> und 7/2023<sup>4</sup> sowie in dem #GIDSresearch 2/2023<sup>5</sup> bereits näher betrachtet wurde.

Der Mobilitätssektor soll sich entsprechend der Ziele der Europäischen Union bis 2050 erheblich verändern. Die zivile Mobilität in Europa wird durch batterieelektrische und wasserstoffbetriebene Antriebssysteme geprägt sein,<sup>6</sup> was auch mit einem tiefgreifenden Wandel ziviler Strukturen einhergeht. Daraus ergeben sich für diesen Zeithorizont klare Imperative auch für die militärische Mobilität, weswegen die Bundeswehr die Frage zukünftiger Antriebssysteme und ihrer Treibstoffe in den Blick nehmen muss. Die Interoperabilität sowohl mit zivilen Akteuren aber auch zwischen den Streitkräften der NATO muss gewährleistet bleiben.

Reiner Wasserstoff ist Energieträger und lässt sich als Treibstoff direkt nutzen. Er ist auch das Vorprodukt für die Herstellung von synthetischen Fuels/E-Fuels. Die Ergebnisse der bisherigen Studien des GIDS zeigen, dass bereits reiner Wasserstoff als Treibstoff in verschiedene Anwendungen des Heeres integriert werden könnte. Die

- 
- 1 Bruhn 2022.
  - 2 Rappuhn/Struck 2021.
  - 3 Bruhn 2022.
  - 4 Struck 2023b.
  - 5 Struck 2023a.
  - 6 Europäisches Parlament 2022.

Nutzung von reinem Wasserstoff könnte einen relevanten Teil der benötigten flüssigen Kraftstoffe ersetzen. Dies würde auch den Bedarf an Flüssigkraftstoffen substanziell reduzieren. Es zeigen sich klare Anwendungsmöglichkeiten bei LKWs auch für höhere Gewichtsklassen. Bei geländegängigen, geschützten Fahrzeugen ergeben sich ebenfalls Anwendungsmöglichkeiten. Hier ist eine Grenze bei einem Fahrzeuggewicht von rund 15 Tonnen erkennbar. Grund hierfür ist, dass bei größeren gepanzerten Fahrzeugen sowie Spezialfahrzeugen größere Motoren und damit aber vor allem größere Tankvolumina erforderlich werden. Das Tankvolumen würde bei Nutzung von Wasserstoffdrucktanks (700 bar, Faktor 8) zu groß werden. Wesentlich größere Fahrzeuge hätten signifikante militärische Nachteile. Panzer und Spezialfahrzeuge mit höheren Gewichten werden zukünftig mit synthetischen Fuels/E-Fuels betrieben werden müssen. Die Herstellung synthetischer Kraftstoffe aus dem Vorprodukt Wasserstoff ist mit zusätzlichen, aufwendigen verfahrenstechnischen Schritten verbunden. Diese Kraftstoffe ermöglichen aber die Beibehaltung heutiger Tankvolumina, was für energieintensive Anwendungen unerlässlich bleibt.

Bei der direkten Nutzung von reinem Wasserstoff entwickelt sich der Wasserstoffverbrennungsmotor als eine Alternative zum Brennstoffzellensystem. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die zukünftige technische Einsatzfähigkeit von H<sub>2</sub>-Antriebssystemen bereits heute auf Basis der vorhandenen Entwicklungen und Systeme als realistisch eingeschätzt werden kann und in absehbarer Zeit bis spätestens 2050 erreicht werden wird.

Die zentrale Frage ist, ob große Wasserstoffmengen für das Militär verfügbar gemacht werden können. Der geringe volumetrische Energieinhalt macht es erforderlich, erheblich größere Volumina als bisher zur Verfügung zu stellen. Dies erfordert im Bereich der zivilen Infrastruktur beispielsweise wesentlich größere Pipelinedurchmesser, Kompressorstationen und Speicher. Zwar zeigt sich in diesem Feld bereits eine Vielzahl von Projekten und Anstrengungen zum Aufbau entsprechender Strukturen. Dies erscheint allerdings bisher bei weitem nicht ausreichend. Auch der dafür notwendige Kapitalmittelbedarf stellt eine zentrale Herausforderung für den Wasserstoffmarkthochlauf dar.

Auch in der militärischen Logistik würde die Nutzung von Wasserstoff einen erheblich höheren Aufwand bedeuten. Im Vergleich zu Flüssigkraftstoffen wären etwa 8-mal größere H<sub>2</sub>-Volumina zu transportieren. Der Aufwand wäre unverhältnismäßig, auch wenn sich das Militär auf die dann zur Verfügung stehende zivile H<sub>2</sub>-Infrastruktur im Bündnisgebiet stützen könnte. Im Kontext der Landes- und Bündnisverteidigung sehen nichtsdestotrotz auch die amerikanischen National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine für den europäischen Raum den Transport von Wasserstoff aus Kernländern wie Deutschland und Österreich zu östlichen Bündnispartnern als möglich an, auch wenn dies wegen größerer Volumina zu umfangreicheren militärischen Logistikerfordernissen führen würde.

Die logistischen Herausforderungen könnten theoretisch durch die Nutzung einer eigenen Wasserstofferzeugung reduziert werden, wenn diese in Feldlagern und dezentral im Rahmen von Camp Power Supply wirkungsvoll aufgebaut werden könnte. Ein derartiger Grad an Energieautonomie würde den Zugang zu völlig neuen, weniger vulnerablen Logistikkonzepten beim Militär ermöglichen.

Die vorliegende Untersuchung befasst sich mit der Frage, ob eine regenerative Stromerzeugung auf militärischen Standorten die erforderliche elektrische Energie für den lokalen Bedarf inklusive einer Wasserstoffherzeugung liefern kann.

Im Rahmen der Untersuchung für den erforderlichen Camp Power Supply werden die Bedarfsstrukturen am Beispiel von zwei Feldlagern näher untersucht. Dabei werden zwei unterschiedliche Standortgrößen mit entsprechender Truppen- und Fuhrparkstärke zur Abschätzung des Energiebedarfes näher betrachtet. Für die Stromerzeugung werden PV-Anlagen vorgesehen, da bei einem dezentralen Betrieb im Felde die Errichtung und der Einsatz von relevant großen Windkraftanlagen nicht realistisch erscheint.<sup>7</sup> Die Dimensionierung der PV-Anlage ist ein weiterer Bestandteil der Untersuchung. Darüber hinaus werden Herausforderungen für einen sicheren Betrieb betrachtet. Es soll dabei die Frage der technischen Machbarkeit untersucht werden.

In einem abschließenden Schritt sollen die gewonnenen Ergebnisse auch vor dem Hintergrund militärischer Liegenschaften innerhalb Deutschlands diskutiert werden. Die Betrachtung dieser festen Standorte, die bislang durch zivile Energieinfrastruktur versorgt werden, soll an dieser Stelle jedoch nur cursorisch erfolgen. Es bedarf daher weiterer Untersuchungen.

## 2 Zivile Anwendungen für Energiesysteme im Inselbetrieb mit Wasserstoffproduktion

Weltweit werden immer mehr Projekte zur Energieversorgung und Wasserstoffproduktion entwickelt. Die Internationale Energie Agentur (IEA) führt bereits eine Liste mit relevanten Projekten von weltweit etwa 2.000 Wasserstoffprojekten (Stand Dezember 2023).<sup>8</sup> Es sollen hier einige laufende Projekte mit Relevanz für eine potenzielle Anwendung zur Erlangung von Energieautonomie auf militärischen Standorten vorgestellt werden.

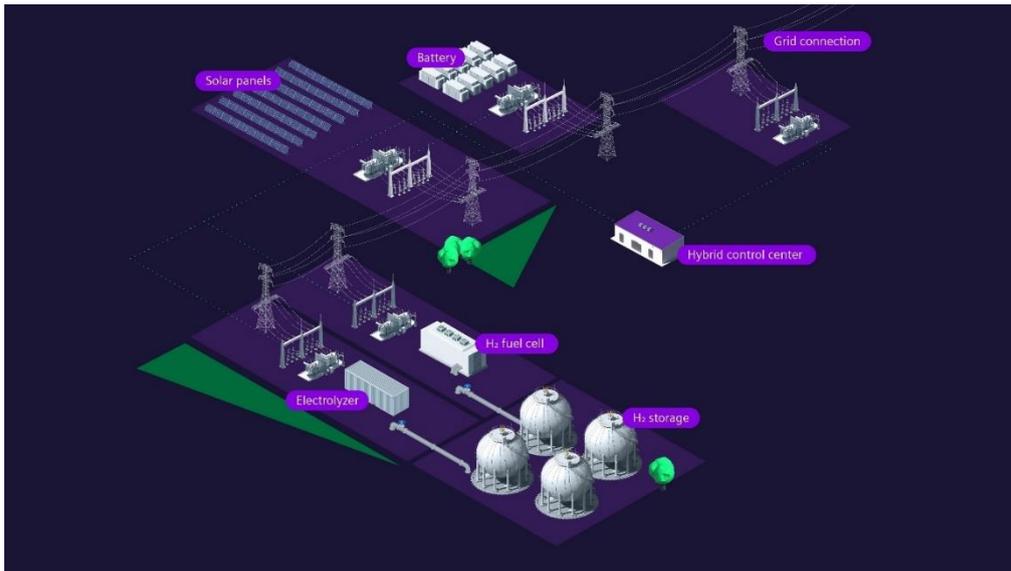
### 2.1 Centrale Electrique de l'Ouest Guyanais (CEOG)

Ein Beispiel für ein Energiesystem im Inselbetrieb mit Wasserstoffproduktion auf Basis regenerativer Stromerzeugung ist das Projekt Centrale Electrique de l'Ouest Guyanais (CEOG) in Französisch-Guyana.

Die geographische Lage von Französisch-Guyana erlaubt die Nutzung von Photovoltaik über einen vergleichsweise langen Zeitraum von 12 Stunden, während in Nord- und Mitteleuropa die tägliche Nutzungsdauer geringer ist. Um einen Inselbetrieb zu realisieren, mussten Lösungen für einen 24-Stunden Betrieb gefunden werden. Die Anlage nutzt im heutigen Zuschnitt neben Batteriespeichersystemen eine Elektrolyseanlage für die Erzeugung von Wasserstoff für die Rückverstromung über ein Brennstoffzellensystem. Dabei handelt es sich um eine PEM (Proton Exchange Membrane) basierte flüssigkeitsgekühlte Brennstoffzellentechnologie. Der Betreiber der Anlage gibt für die gesamte gespeicherte Energie einen Wert von 130 MWh an und bezeichnet die

<sup>7</sup> Soni 2020: 121.

<sup>8</sup> IEA 2023.



**Abb. 1:** Schematischer Aufbau des Projektes Centrale Electrique de l'Ouest Guyanais (CEOG) (aus: Siemens Energy 2021).

Anlage als größtes Kraftwerksprojekt weltweit zur Speicherung intermittierender erneuerbarer Energien auf Basis von Wasserstoff. Zur Erreichung dieser Leistung ist eine 55 MWp PV-Anlage notwendig.

Basis für die Wasserstoffherzeugung ist eine 16 MW Alkalihochdruckelektrolyse. Die Anlage besitzt eine Kapazität für die Wasserstoffherzeugung von ca. 860 Tonnen Wasserstoff pro Jahr. Zur Realisierung der für die Elektrolyse erforderlichen Leistung werden Transformator-Gleichrichter-Einheiten eingesetzt, die eine Kapazität von 18,6 MW besitzen. Für die Rückverstromung des Wasserstoffs werden von den Herstellern Hydrogène de France (HDF) und Ballard Power Canada zwei PEM Brennstoffzellensysteme mit je 1,5 MW bereitgestellt.<sup>9</sup>

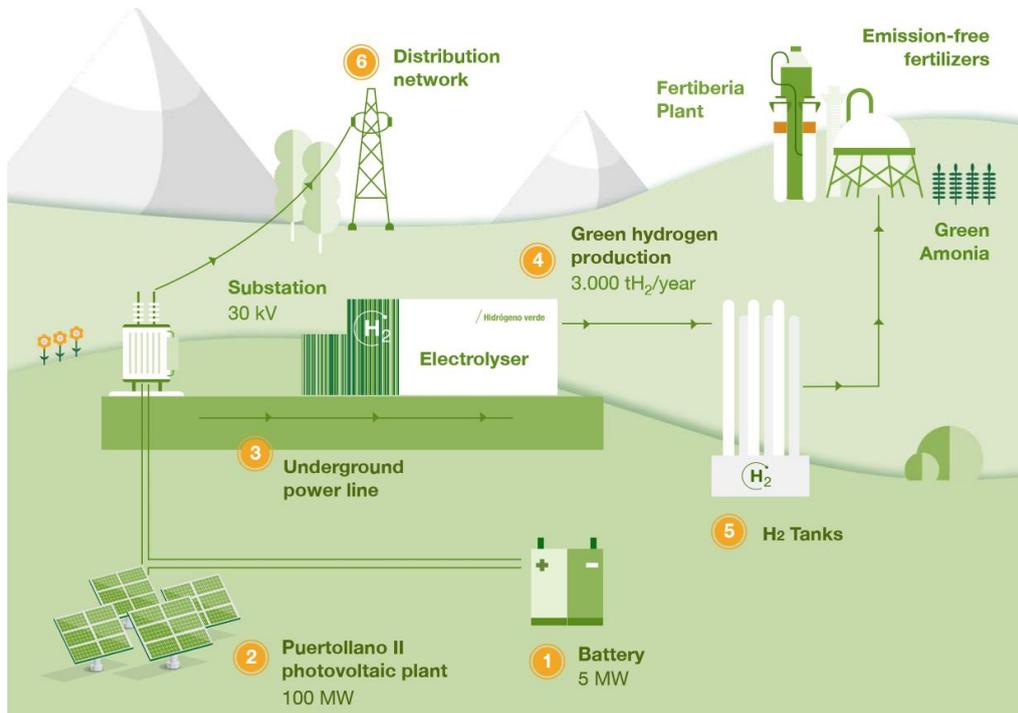
Das Gesamtsystem ist so in der Lage, kontinuierlich 10 MW in einem Zeitrahmen von 12 Stunden von 8 bis 20 Uhr zur Verfügung zu stellen. Für die Nachtphase ist eine Leistung von 3 MW sichergestellt. Das Projekt soll damit bis zu 10.000 französisch-guyanische Haushalte versorgen.<sup>10</sup>

## 2.2 Puertollano Green Hydrogen Plant

Neben der Wasserstoffherzeugung werden im industriellen Maßstab auch Anlagen zur Ammoniak- oder Methanol-Herstellung aufgebaut. Diese nachhaltig erzeugten Energieträger sollen etwa in der Schifffahrt oder im Fall von Ammoniak auch in der Düngemittelproduktion Verwendung finden. Das Projekt Puertollano Green Hydrogen Plant sieht dabei zunächst eine Wasserstoffherzeugung mit einer Leistung von 20 MW und einer erheblich höheren Produktionskapazität von 360 kg/h im Vergleich zu dem Projekt in

<sup>9</sup> AEG Power Solutions 2021; NS Energy 2023; Siemens Energy 2021.

<sup>10</sup> NS Energy 2023; Siemens Energy 2021.



**Abb. 2:** Schematischer Aufbau der Puertollano Green Hydrogen Plant (aus: Iberdrola 2023).

Französisch-Guyana (ca. 98 kg/h) vor. Neben dem bestehenden Stromnetz wird die notwendige Energie durch eine 100 MWp PV-Anlage bereitgestellt, die durch Batteriespeicher mit einer Leistung von 5 MW und einer Kapazität von 20 MWh unterstützt wird, um ein verbessertes Energiemanagement der Anlage zu ermöglichen.<sup>11</sup> Überschüssige Energie wird in das öffentliche Netz eingespeist.

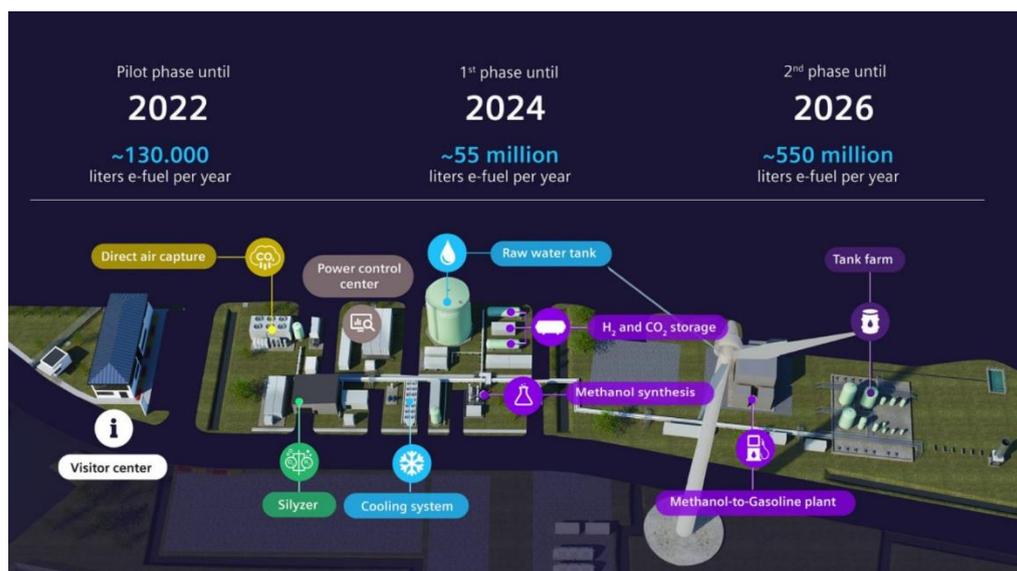
Zur Zwischenspeicherung wird der erzeugte Wasserstoff in 11 Drucktranks (60 bar) mit einem Volumen von jeweils 133 m<sup>3</sup> gelagert. Die 23,5 m hohen Tanks haben einen Durchmesser von 2,8 m und können so insgesamt 6.000 kg Wasserstoff bei 60 bar speichern.

### 2.3 Pilotanlage „Haru Oni“

Das Projekt „Haru Oni“ wird zunächst als Pilotprojekt im Süden Chiles entwickelt. Die Investitionen für das Projekt liegen derzeit bei rund 34 Millionen Euro. Zusätzlich zur Erzeugung grünen Wasserstoffs soll dabei aus dem erzeugten Wasserstoff e-Methanol und synthetischer Kraftstoff (E-Fuel) hergestellt werden.

Aufgrund der geographischen Lage im Süden Chiles wird für die Stromerzeugung keine PV-Anlage, sondern eine Windkraftanlage eingesetzt. Sie besitzt eine Leistung von 3,4 MW. Abbildung 3 gibt einen Überblick über die Anlage. Dabei kommt ein Elektrolyseur mit einer Leistung von 1,25 MW und einer vergleichsweise derzeit noch geringen Produktionskapazität von 20,5 kg H<sub>2</sub> pro Stunde zum Einsatz. Das benötigte

<sup>11</sup> Iberdrola 2023.



**Abb. 3:** Schematischer Aufbau der Anlage in Haru Oni (aus: Siemens Energy 2023).

CO<sub>2</sub> soll auch durch Carbon Air Capture direkt aus der Luft gewonnen werden. Neben einer Methanol-Synthese kommt eine Methanol-to-Gasoline-Anlage zum Einsatz.<sup>12</sup>

In der Pilotphase sollen neben Methanol rund 130.000 l/a E-Fuel produziert werden. In den zwei folgenden Phasen sollen zunächst 55 Mio. l/a und dann 550 Mio. l/a E-Fuels hergestellt werden.

Für die Endausbaustufe wurde bereits ein 240 MW Elektrolyseur durch die Firma ENEL vorgestellt. Dies zeigt die geplante Größendimension dieses Projektes im Vergleich zu den übrigen vorgestellten Projekten.<sup>13</sup> Dennoch sind auch solche Produktionszahlen im Vergleich zu den heutigen Raffineriekapazitäten nur begrenzt. So verarbeitet die Raffinerie in Schwedt z. B. rund 14 Mrd. l Rohöl pro Jahr.<sup>14</sup>

Jüngst ist es zu Schwierigkeiten im Antragsprozess für die erste Ausbauphase gekommen, die den Zeitplan des Projektes verzögern könnten. Dabei handelt es sich um eine Diskussion über mögliche negative Einflüsse auf die Umwelt durch das Projekt.

## 2.4 Kassø (Süd-Dänemark)

Im Süden Dänemarks entsteht mit dem Projekt in Kassø eine der größten Methanol-Erzeugungsanlagen auf Basis von erneuerbaren Energien in Nordeuropa. Mit einer installierten Leistung von mehr als 50 MW aufgeteilt auf drei der Elektrolyseure (je 17,5 MW) erreicht die Anlage eine Wasserstoffherzeugung von 1.000 kg pro Stunde. Genaue Angaben zur Methanolerzeugung sind bislang noch nicht veröffentlicht. Eine Vereinbarung zwischen der Betreibergesellschaft Europe Energy und der Reederei Maersk sieht vor, Teile der Containerschifflotte der Reederei mit nachhaltigen Kraftstoffen zu versorgen.<sup>15</sup> Die für die Wasserstoffherzeugung und die Methanol-Synthese notwendige

<sup>12</sup> Électricité de France/Implementa Sur 2022: 31.

<sup>13</sup> Électricité de France/Implementa Sur 2022: 31.

<sup>14</sup> PCK Raffinerie GmbH 2023.

<sup>15</sup> Haagensen 2022.

Energie wird von einer sehr großen PV-Anlage mit einer Leistung von 300 MWp bereitgestellt. Im Vergleich besitzt die derzeit größte PV-Anlage in Deutschland eine Leistung von 187 MW.<sup>16</sup> Es ist zu betonen, dass in dem Projekt Kassø auch auf einen Netzzugang zurückgegriffen wird, um nicht allein an das Erzeugungsprofil der PV-Anlage gebunden zu sein.

### 3 Energiesysteme für autonome Feldlager

Liegenschaften und Feldlager der Bundeswehr innerhalb sowie außerhalb der Grenzen des Bündnisgebietes sind in ihren Einsatzgebieten derzeit auf die stetige Lieferung von Diesel als Treibstoff für Fahrzeuge und Dieselgeneratoren angewiesen. Darüber hinaus besteht eine Abhängigkeit von öffentlichen Versorgungsnetzen für Strom und Gas. Es soll geprüft werden, ob die Abhängigkeit von Treibstofftransporten unter Verwendung erneuerbarer Energien und neuer Energiespeichersysteme verringert werden könnte.

Eine derartige Möglichkeit erfordert das Umdenken in Bezug auf die Struktur derartiger Standorte.

Neben den einzelnen Elementen zur Energieversorgung ergeben sich massive Veränderungen für die Logistik. Für die Analyse der Möglichkeiten einer Optimierung des Standortbetriebes wurden verschiedene Szenarien für eine alternative Energieversorgung und deren Logistik entwickelt.

Die Energieversorgung soll durch Photovoltaiksysteme gewährleistet werden. Das PV-System wird dabei zur Versorgung aller Verbraucher eines Feldlagers genutzt. Die Nachtversorgung erfolgt durch den Einsatz von Batteriespeichern. Für die Mobilität sollen abhängig von der Größe und dem Leistungsbedarf der Fahrzeuge batterieelektrische Systeme und Wasserstoffverbrennungsmotoren zum Einsatz kommen. In geschützten Fahrzeugen (Dingo, Eagle, Fennek) zwischen 5 und 15 t sowie Lkws ab 5 t sollen wasserstoffbetriebene Systeme genutzt werden. Für Fahrzeuge mit einem Gewicht von bis zu 5 t wird in diesen Szenarien eine Kombination aus Elektromotor und Batteriespeicher (batterieelektrisch) angenommen.<sup>17</sup> Bei besonders energieintensiven Anwendungen (z. B. Schützenpanzer Marder) lassen sich weder batterieelektrische noch wasserstoffbetriebene Systeme nutzen. Hier ist ein Rückgriff auf synthetische Kraftstoffe notwendig. Die mit dem Herstellungsprozess dieser Kraftstoffe verbundene Herausforderung wird in Kapitel 8 näher erörtert.

Der Wasserstoff wird durch eine auf dem Standort eingesetzte Elektrolyse erzeugt. Die Energieversorgung der Elektrolyse erfolgt auf PV-Basis. Reserven für die Energieversorgung werden durch gespeicherten Wasserstoff (700 bar) bereitgestellt. Eine Rückverstromung mit Hilfe von Generatoren und Wasserstoffverbrennungsmotoren oder ggf. auch Brennstoffzellentechnik ermöglicht die Nutzung des produzierten Wasserstoffs als Back-up-Lösung für die Energieversorgung. Durch den Einsatz von Dual-Fuel-Wasserstoffverbrennungsmotoren als Antrieb für die Generatoren wäre die Verwendung von Syn-Fuel als Treibstoff zusätzlich möglich.<sup>18</sup> Damit wäre als Ultima Ratio ein Notstromgeneratorsystem geschaffen, das sowohl mit reinem Wasserstoff als

<sup>16</sup> EnBw AG 2023.

<sup>17</sup> European Commission 2022.

<sup>18</sup> Struck 2023a: 6, 12.

auch mit Syn-Fuel betrieben werden könnte.<sup>19</sup> Inwieweit ein solches System für die Sicherstellung einer Grundlastversorgung unter Einsatz von Syn-Fuels benötigt werden würde, soll in der folgenden Analyse näher untersucht werden. Zunächst werden die wesentlichen Elemente eines solchen energieautonomen Standorts dargestellt.

### 3.1 PV-Anlage zur Energieerzeugung

Im Bereich der Photovoltaiktechnologie gibt es ein umfangreiches Angebot unterschiedlicher Systeme, deren nähere Erläuterung hier nicht im Fokus stehen soll. Für den Einsatz im militärischen Umfeld ist die Auswahl entsprechend robuster und effizienter Technologie von Bedeutung. Für die Auslegung von PV-Anlagen werden in der Industrie verschiedene Kenngrößen genutzt, um das Leistungsvermögen zu berechnen.

Hersteller geben die Leistungsfähigkeit einer PV-Anlage in Kilowatt-Peak (kWp) an, um verschiedene Anlagen miteinander vergleichen zu können. Der kWp Wert wird unter Standard-Testbedingungen ermittelt (25 °C Umgebungstemperatur, 48,2 Grad Einstrahlungswinkel und 1.000 W/m<sup>2</sup> Sonneneinstrahlung) und weicht daher von der tatsächlichen Leistung der PV-Anlage ab. Zum Beispiel wird in Mecklenburg-Vorpommern im Dezember (schwächster Ertrag im Jahr) mit etwa 0,54 kWh/d pro kWp installierter Leistung und im Mai (höchster Ertrag im Jahr) mit 4,44 kWh/d pro kWp installierter Leistung gerechnet.<sup>20</sup> Die von der Weltbank eingesetzten Daten der Firma Solargis verwenden für die Berechnung die Einflussfaktoren Sonneneinstrahlung, Lufttemperatur, Bodenbeschaffenheit und Verschmutzung, welche die Energieeffizienz mindern. Zudem reduzieren notwendig werdende Systembestandteile wie Inverter, Konverter oder Kabel die Leistung der Anlage.<sup>21</sup> Diese Elemente werden in den Kapiteln 5 und 6, sofern relevant, für die Auslegung der PV-Anlagen und die Ermittlung der Logistikerfordernisse berücksichtigt.

### 3.2 Anlagen für die Wasserstoffherzeugung und -nutzung

Im Nachfolgenden werden die für die Wasserstoffherzeugung erforderlichen Verbraucher näher untersucht. Hierzu zählen auch die zur Wasserstoffherzeugung und -speicherung benötigten Anlagen.

Die verfahrenstechnische Anlage für die Erzeugung und Speicherung von Wasserstoff besteht aus verschiedenen Elementen. Für die erforderliche Elektrolyseanlage wurde ein PEM-System angenommen, das die Wasserstoffherzeugung ermöglicht. Das erforderliche Wasser wird über einen zu bohrenden Brunnen durch entsprechende Kreiselpumpen gehoben. Der über die Elektrolyse erzeugte Wasserstoff wird über Kompressoren bis auf 700 bar verdichtet und in entsprechenden Tankcontainern gelagert. Der Wasserstoff wird für die Betankung der Fahrzeuge über eine Tankstelle verfügbar gemacht. Alternativ kann er als Notfalllösung über eine Druckreduzierung über ein Brennstoffzellensystem oder über Wasserstoffverbrennungsmotoren und entsprechende Generatoren rückverstromt werden.

---

<sup>19</sup> Struck 2023a.

<sup>20</sup> E.ON SE 2022.

<sup>21</sup> Neher 2020; Solargis 2023b.

### 3.2.1 Elektrolyseanlage

Die Spaltung von Wasser ( $H_2O$ ) in Wasserstoff ( $H_2$ ) und Sauerstoff ( $O$ ) bedarf eines hohen Energieaufwandes. Wasser beginnt sich beim Erreichen einer Temperatur von  $1.700\text{ }^\circ\text{C}$  in seine Bestandteile aufzuspalten. Wegen des dafür notwendig werdenden Energiebedarfes wäre ein solcher Prozess für industrielle Herstellungsverfahren nicht geeignet.

Ein alternatives Verfahren ist die elektrochemische Zerlegung von Wasser. Dabei wird eine Spaltung des Wassermoleküls durch die Zufuhr von Strom realisiert. Eine Elektrolysezelle bildet ein umgekehrtes galvanisches Element, das mit einer Gleichspannungsquelle beaufschlagt wird, um eine elektrochemische Umwandlung zu betreiben. Eine solches System wird als Elektrolyse bezeichnet.<sup>22</sup>

Elektrolytische und galvanische Zellen weisen einen ähnlichen Aufbau auf. Zwischen zwei Elektronenleitern, den Elektroden, befindet sich ein Ionenleiter, der Elektrolyt. An der Grenzfläche zwischen Elektrode und Elektrolyt laufen prinzipiell umkehrbare stromerzeugende oder stromverbrauchende Reaktionen ab. Bei der Elektrolyse wässriger Lösungen entstehen Sauerstoff und Wasserstoff, wenn an den Elektroden eine gewisse Spannung angelegt wird. Umspülen Sauerstoff und Wasserstoff die Elektroden, wird eine Spannung erzeugt. Bei der Elektrolyse ist die Anode der Pluspol, die Kathode der Minuspol, bei der galvanischen Zelle ist es umgekehrt.<sup>23</sup>

Der Elektrolyt<sup>24</sup> kann je nach System unterschiedlich ausfallen. Während bei der alkalischen Elektrolyse ein flüssiger basischer Elektrolyt zum Einsatz kommt, wird bei einer sauren Elektrolyse ein polymerer Festelektrolyt (Proton-Austausch-Membran-Elektrolyseur (PEM)) genutzt (siehe Abb. 4). Bei einer sogenannten Hochtemperaturelektrolyse kommt ein Festoxid als Elektrolyt zur Anwendung.<sup>25</sup> Die alkalische Elektrolyse erreicht insbesondere bei industriellen Großanlagen einen Wirkungsgrad von bis zu 85 %. Die saure PEM-Elektrolyse erreicht hingegen Wirkungsgrade von 50–80 %. Neue Forschungsansätze durch eine sogenannte Kapillarelektrolyse versprechen zwar einen Wirkungsgrad von 98 %; sie sind bislang jedoch nicht auf einen industriellen Maßstab skaliert worden.<sup>26</sup>

Innerhalb der Industrie werden die Proton-Austausch-Membran-Elektrolyseure vor allem für den unteren und mittleren Leistungsbereich genutzt. Die maximale elektrische

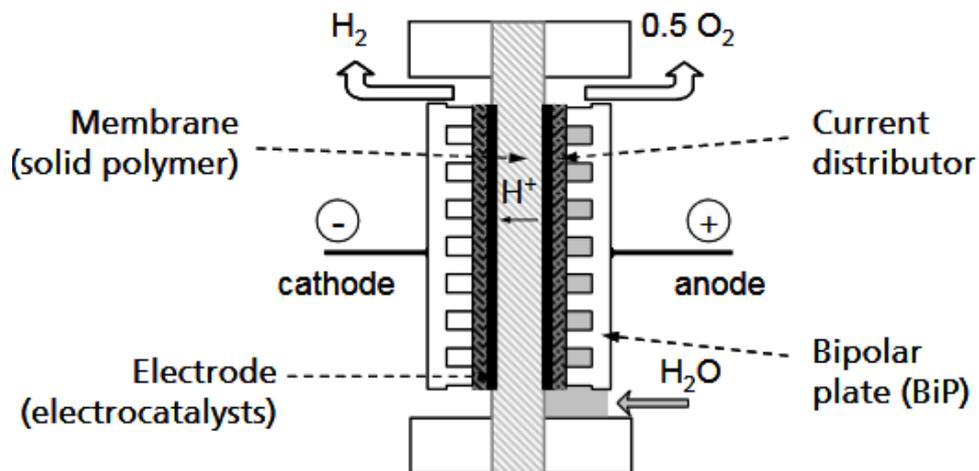
<sup>22</sup> Klell et al. 2018: 83 f.

<sup>23</sup> Klell et al. 2018: 80.

<sup>24</sup> „Die Reaktionsräume von Anode und Kathode müssen räumlich und elektrisch getrennt werden, um die Redoxreaktion kontrolliert durchführen zu können. Dennoch muss für den vollständigen Ablauf der Reaktion eine Ionenbewegung zwischen dem Anoden- und Kathodenraum möglich sein. Diese Ionenleitung erfolgt innerhalb eines Elektrolyten, welcher isolierende Eigenschaften für Elektronen aufweist. Die Elektrolyse von Wasser kann mit drei ionischen Ladungsträgern durchgeführt werden. Diese sind Hydroxidionen, Oxidionen und einfach geladene Protonen [14]. Positiv geladene Ionen (Kationen) bewegen sich von der positiv geladenen zur negativ geladenen Elektrode, während die negativ geladenen Ionen (Anionen) auf entgegengesetztem Weg transportiert werden“ (Tjarks et al. 2017: 5).

<sup>25</sup> Smolinka et al. 2011; Klell et al. 2018: 83 f.

<sup>26</sup> Smolinka et al. 2011: 14; Klell et al. 2018: 81



**Abb. 4:** Schematische Darstellung einer PEM-Elektrolyse (aus: Smolinka et al. 2011: 13).

Leistung einer PEM-Elektrolyse liegt bislang bei etwa 2 MW pro Modul und einer Produktionskapazität von 460 Nm<sup>3</sup>/h H<sub>2</sub>. Im Gegensatz zu Hochtemperatur- oder alkalischen Elektrolyseuren sind die PEM-Elektrolyseure weniger anfällig für Spannungsschwankungen und somit für einen dynamischeren Betrieb geeignet. Auch der Teillastbetrieb ist mit der PEM-Elektrolyse einfach möglich.<sup>27</sup> Sie lässt sich daher besser mit volatiler Energieerzeugung wie Photovoltaik oder Windkraft koppeln. Die PEM-Elektrolyse erzeugt sehr reinen Wasserstoff. Dies ist insbesondere bei der Nutzung von Brennstoffzellen wichtig, da diese Systeme einen hohen Reinheitsgrad von H<sub>2</sub> benötigen. Die höhere Zuverlässigkeit im vorliegenden Anwendungsfall und die größere Reinheit des erzeugten Wasserstoffs sind der Hauptgrund für die Nutzung der PEM-Elektrolyse für die in dieser Arbeit vorliegenden Szenarien.<sup>28</sup>

Obgleich höhere Temperaturen vorteilhaft für den Elektrolyseprozess sind, ist die Betriebstemperatur der PEM-Elektrolyse aufgrund der verwendeten Werkstoffe für die Membran auf 80 °C beschränkt. Damit kann sie als eine Niedrigtemperaturelektrolyse charakterisiert werden. Wesentliche Vorteile eines solchen Verfahrens liegen in der kürzeren Zeit, in der sich das System aus dem Stillstand aktivieren lässt. PEM-Elektrolyseure lassen sich in unter 10 Minuten hochfahren, was für den betrachteten Einsatzzweck mit der Nutzung regenerativer Energie wie PV von großer Bedeutung ist.<sup>29</sup>

Die spezifischen Stromverbräuche schwanken je nach System zwischen 3,75 kWh (80 % Wirkungsgrad) bis 6 kWh (50 % Wirkungsgrad) pro Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>. Der dafür notwendig werdende Wasserverbrauch liegt bei 0,8 l Wasser pro Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>.<sup>30</sup>

Ein Nachteil der PEM-Elektrolyse ist der Anspruch an eine hohe Reinheit des zugeführten Wassers, da kleinere Schadstoffmengen die Leitfähigkeit der Membran reduzieren und den Katalysator „vergiften“.<sup>31</sup> Insbesondere die Katalysatoren stellen für die Lebensdauer und Kosten des Systems kritische Bauteile dar. Im Vergleich zur alkalischen Elektrolyse, die eine basische Flüssigkeit als Elektrolyt nutzt, besteht die PEM-

<sup>27</sup> Milanzi et al. 2018: 6–8; Smolinka et al. 2018: 37 f.

<sup>28</sup> Smolinka et al. 2011: 28.

<sup>29</sup> Klell et al. 2018: 87.

<sup>30</sup> Smolinka et al. 2011: 14; Klell et al. 2018: 81.

<sup>31</sup> Klell et al. 2018: 83 f.

Zelle aus verschiedenen Feststoffen, darunter auch seltene Erden wie Platin oder Iridium. Grund hierfür ist der hohe Anspruch an die verwendeten Werkstoffe, der sich aus dem PEM-Elektrolyseprozess ergibt. Damit sind PEM-Elektrolyseure auch aufgrund ihrer geringeren Stückzahl bislang teurer als alkalische Elektrolyseure.<sup>32</sup> Der besondere Anspruch der PEM-Elektrolyse an die Werkstoffe schlägt sich auch in der geringeren Lebensdauer nieder. Sie ist mit einer Lebensdauer von mehr als 30.000 Betriebsstunden in einem akzeptablen Bereich.<sup>33</sup>

### 3.2.2 Wasserstoffspeicher

Wie einleitend dargestellt, sollen in dieser Arbeit die Möglichkeiten für ein autonomes Energiesystem analysiert werden, das neben der Versorgung der Infrastruktur auch ausreichend Wasserstoff erzeugt, um einen Fahrzeugpark zu betreiben. Daher nehmen Wasserstoffspeicher in dem hier zu betrachtenden Energiesystem eine wichtige Rolle ein, um ausreichend H<sub>2</sub> als Treibstoff vorzuhalten.

Der gespeicherte Wasserstoff kann darüber hinaus durch Brennstoffzellensysteme oder Wasserstoffverbrennungsmotoren und entsprechende Generatoren rückverstromt werden, um den Standort bei Bedarf als Back-up-System mit Energie zu versorgen.

Aufgrund des geringen volumetrischen Energieinhaltes von Wasserstoff ist seine effiziente Speicherung eine zentrale Herausforderung. Für die Wasserstoffspeicherung werden in der Industrie unterschiedliche Systeme verwendet. So lässt sich Wasserstoff durch eine kryogene Speicherung bei -253 °C flüssig speichern. Mit dieser Methode werden rund 70 g pro Liter (1 bar) erreicht. Im gasförmigen Zustand kann durch Kompression in Drucktanks der spezifische volumetrische Energieinhalt des Speichersystems ebenfalls erhöht werden. Dennoch sind die Speicherdichten von 25 g pro Liter (350 bar) und 40 g pro Liter geringer als bei der kryogenen Speicherung. Im Vergleich zu Diesel wird bei einer Druckspeicherung (700 bar) somit ein 8-faches und bei einer kryogenen Speicherung ein etwa 6-faches Volumen für das gesamte Tanksystem (Reinstoff und Tank) notwendig. Insbesondere das kryogene Speichersystem weist jedoch auch technische Herausforderungen auf. Der Energiebedarf für eine tiefkalte Speicherung des Wasserstoffes ist sehr hoch. Die Verflüssigungsprozess verbraucht rechnerisch 28 % bis 46 % des gespeicherten Energieinhaltes (etwa 9,3–15,3 kWh/kg). Druckspeicher benötigen hingegen nur rund 12 % (etwa 4 kWh).<sup>34</sup> Bei der kryogenen Speicherung stellt der sogenannte Boil-off-Effekt eine weitere Herausforderung dar:

Er entsteht in Tanks, die mit kryogenem Wasserstoff gefüllt sind. Auch in unter Druck stehenden Tanks kann dieser Effekt entstehen, allerdings in geringerem Ausmaß. Ursache ist die Erwärmung in den Tanks. Insbesondere bei der kryogenen Speicherung entwickelt sich mit Temperaturerhöhung durch entstehenden gasförmigen Wasserstoff ein höherer Druck im Tank. Abhängig von den Außentemperaturen, der Qualität der Dämmung und dem Flächen- zu

<sup>32</sup> Klell et al. 2018: 87.

<sup>33</sup> Smolinka et al. 2018: 41; Zhao et al. 2020.

<sup>34</sup> Kurzweil/Dietlmeier 2016: 476–478.

Volumenverhältnis des Tanks wurden etwa 0,4 % Boil-off-Gas pro Tag für einen 50 m<sup>3</sup> LH<sub>2</sub>-Tank gemessen.<sup>35</sup>

Auch die Nutzung von Speichermedien etwa in sogenannten Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC) oder Metallhydriden ist möglich. Diese Systeme versprechen eine höhere spezifische Energiedichte pro Volumeneinheit. Sie sind jedoch aufgrund der notwendigen verfahrenstechnischen Schritte aufwendig und verbrauchen zusätzlich Energie, um den Wasserstoff in die jeweiligen Trägerstoffe einzubringen und bei Bedarf wieder zu extrahieren.

Daher ist der bisherige Industriestandard die Druckspeicherung bis 700 bar, die auch für das in dieser Arbeit zu konzipierende Energiesystem genutzt werden soll. Wesentliche Verbraucher eines solchen Systems sind die Kompressoren, um den Wasserstoff aus der Elektrolyse auf die hohe Druckstufe von 700 bar zu bringen.

### 3.2.3 Rückverstromung des Wasserstoffes

#### *Brennstoffzelle*

Zur Rückverstromung des Wasserstoffes können Brennstoffzellensysteme genutzt werden. Die generelle Funktionsweise der Brennstoffzellen wurde bereits in #GIDSresearch 2/2023 näher dargestellt:

Die Brennstoffzellentechnologie ist ein elektrochemischer Energiewandler. Die elektrische Energie wird direkt durch die chemische Reaktionsenergie zwischen einem Brennstoff (z. B. H<sub>2</sub>) und einem Oxidationsmittel (Sauerstoff) erzeugt. Dabei setzen die Brennstoffzellen chemische Energie mittels einer Redoxreaktion eines Brennstoffes und Sauerstoff in elektrische Energie um und versorgen damit einen Elektroantrieb oder laden eine Batterie. Je nach Ausgestaltung der Brennstoffzelle können dabei verschiedene Brennstoffe bzw. Energieträger wie etwa Wasserstoff Verwendung finden.<sup>36</sup>

Als Referenz wurden für diese Arbeit die Systeme der Firmen Ballard Power Systems<sup>37</sup> und MAN Energy Solutions<sup>38</sup> betrachtet. Bei diesen Systemen kann gegebenenfalls auch die Abwärme weiter genutzt werden. Diese Lösung lässt sich individuell hochskalieren und ermöglicht eine effiziente und schadstofffreie Energieerzeugung. Der Platzbedarf für die Brennstoffzellen im Feldlager wäre mit 1 MW installierte Leistung je Container im Vergleich zu der PV-Anlage, der Elektrolyseanlage und den Wasserstoffspeichertanks gering. Die Brennstoffzellen könnten als Back-up in Phasen geringer Sonneneinstrahlung zusätzlich zum Einsatz kommen, um das Lager unter Verwendung des vorgehaltenen Wasserstoffs mit Energie zu versorgen.

---

<sup>35</sup> Struck 2023a: 16.

<sup>36</sup> Struck 2023a: 3 f.

<sup>37</sup> Ballard Power Systems 2023.

<sup>38</sup> Friedrich et al. 2022.

### Wasserstoffverbrennungsmotor

Neben einem Brennstoffzellensystem können auch Wasserstoffverbrennungsmotoren in Verbindung mit Generatorentechnik eingesetzt werden, um Wasserstoff für die Notstromversorgung oder als grundlastfähiges Energiesystem zu nutzen. Wesentliche Vorteile dieser Aggregate sind ihre Robustheit und Mehrstofftauglichkeit. Als Dual-Fuel-Motoren konzipiert, können diese Motoren Wasserstoff wie auch Diesel bzw. synthetischen Kraftstoff nutzen. Eine solche Kraftstoffflexibilität stellt einen wesentlichen Vorteil für eine Notstromversorgung dar, die somit auch auf konventionelle Kraftstoffe und ihre Lieferketten zurückgreifen könnte. Dennoch sind Verbrennungsmotoren ineffizienter als Brennstoffzellen, da der Wirkungsgrad der Motoren zwischen 35–40 % liegt. Bei Brennstoffzellen liegt dieser bei rund 70 %.<sup>39</sup> Betrachtet man das Gesamtsystem (z. B. auch die Kühlung), nähern sich die Wirkungsgrade von Brennstoffzellen und Wasserstoffverbrennungsmotoren besonders für mobile Anwendungen jedoch wieder an. Für einen genaueren Vergleich zwischen Brennstoffzellen und Wasserstoffverbrennungsmotoren sei auf #GIDSresearch 2/2023.<sup>40</sup> Aus den genannten Gründen wird für den Fall der Durchführung eines Pilotprojektes eine nähere Betrachtung der Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoffverbrennungsmotoren empfohlen.

### 3.3 Batteriespeicher

Auch Batteriespeicher nehmen in einem autonomen Energiesystem aufgrund ihrer hohen Wirkungsgrade eine zentrale Rolle ein. So können sie die Volatilität von Windkraft und Solarenergie bis zu einem gewissen Grad effizient ausgleichen, indem sie Energie über Tag einspeichern und in der Nacht wieder in das Netz einspeisen. Die elektrochemische Speicherung von Energie in Batterien ist daher ein wesentlicher Baustein für die Integration erneuerbarer Energien für einen Inselbetrieb.

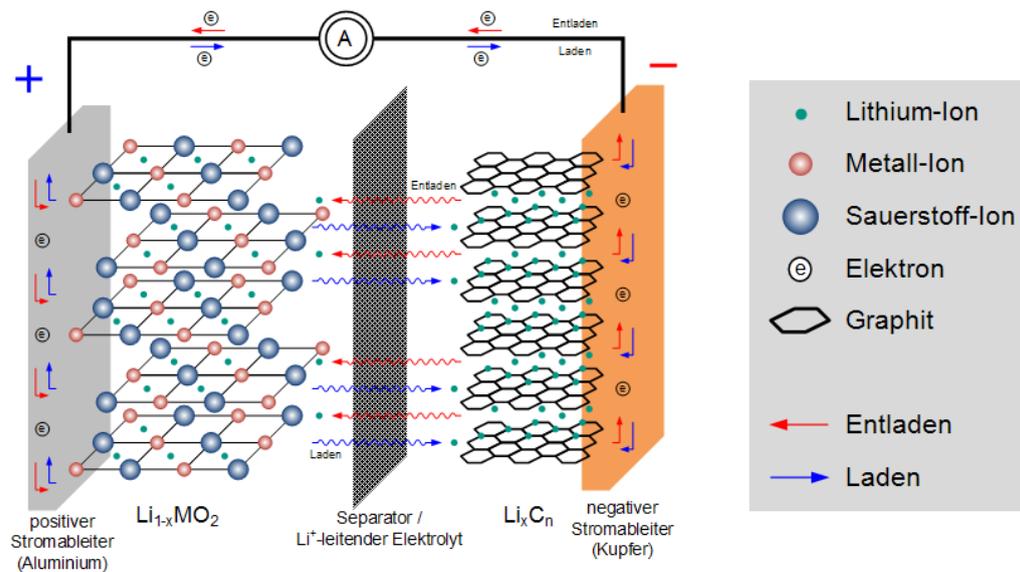
Batterien bilden dabei ein wiederaufladbares galvanisches Element, das die chemische Energie durch die elektrochemische Redoxreaktion in elektrische Energie umwandelt. Wie in Abbildung 5 anhand einer Lithium-Ionen-Zelle verdeutlicht werden kann, gibt die Interkalationsverbindung<sup>41</sup> ( $\text{Li}_x\text{C}_n$ ) beim Entladen der Zelle Elektronen ab, die über den externen Stromkreis zur positiven Elektrode fließen. Gleichzeitig wandert eine gleiche Menge an  $\text{Li}^+$ -Ionen aus der Interkalationsverbindung ( $\text{Li}_x\text{C}_n$ ) durch den Elektrolyten ebenfalls zur positiven Elektrode. An der positiven Elektrode nehmen nicht die Lithium-Ionen die Elektronen auf, sondern die dort vorhandenen Strukturen der Übergangsmetallverbindungen ( $\text{Li}_{1-x}\text{MO}_2$ ). Beim Beladen der Zelle kehrt sich dieser Prozess um.<sup>42</sup>

<sup>39</sup> Klell et al. 2018: 149.

<sup>40</sup> Struck 2023a: 9–12.

<sup>41</sup> „Unter Interkalation im chemischen Sinn versteht man die Einlagerung von Molekülen, Ionen (selten auch Atomen) in chemische Verbindungen, wobei diese ihre Struktur während des Einlagerungsprozesses nicht wesentlich verändern.“ (siehe Chemie.de 2023).

<sup>42</sup> Kohler 2014: 2–5.



**Abb. 5:** Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle (aus: Loges 2023).

Die Lithium-Ionen-Batterie hat sich innerhalb mobiler Anwendung aber zunehmend auch für stationäre (Groß-)Speicher durchgesetzt, da sie über eine längere Lebensdauer und eine bessere Zyklisierbarkeit<sup>43</sup> als z. B. Blei-Säure-Batterien verfügt. Dennoch sind die Kosten dieser Batteriespeicher deutlich höher.<sup>44</sup> Grundsätzlich zeichnen sich solche elektrochemischen Speicher durch ihre hohe Effizienz aus. Großspeicher etwa auf Basis von Lithium-Ionen-Zellen erreichen einen Wirkungsgrad von 95 %.

### 3.4 Optimierungsprozesse durch Smart Grids

Smart Grids sind bereits seit mehreren Jahren im Einsatz. Das originäre Ziel dieser Technologie ist die bessere Integration erneuerbarer Energien in die bestehenden Stromnetze. Kern ist die Kommunikation zwischen Energieerzeugern und -verbrauchern, aber auch Energiespeichern. Schlüsseltechnologie für die Kommunikationstechnik sind Smart Meter, die über die zusätzlich installierten Datenleitungen ihre Verbrauchsdaten dem Betreiber eines Netzes liefern. Derartige Energienetze werden auch als intelligente Stromnetze bezeichnet. Auf diese Art und Weise kann sichergestellt werden, dass überschüssig gewonnene Energie z. B. in Energiespeichern wie Batteriespeichersystemen gespeichert und damit eine optimierte Nutzung regenerativer Stromerzeugung realisiert werden kann. Denn gerade auch PV-Anlagen liefern eine stark fluktuierende Stromerzeugung. „Es besteht die Notwendigkeit einer bedarfs- und verbrauchsorientierten Verknüpfung von Erzeugung und Nachfrage.“<sup>45</sup>

Für das Design derartiger intelligenter Systeme stehen von verschiedenen Anbietern Programme zur Verfügung, die unter Einbeziehung der Spezifika aller technischen

<sup>43</sup> Die Zyklisierbarkeit beschreibt, in welchem Umfang die zur Verfügung stehende Kapazität mit der steigenden Anzahl der Lade- und Entladezyklen abnimmt (Kohler 2014: 6).

<sup>44</sup> Riegel 2013: 418 f.

<sup>45</sup> Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2023.

Komponenten und Verbraucher eine Optimierung für das gesamte System im Sinne der effizienten Nutzung erneuerbarer Energien ermöglichen.

Da z. B. ein Feldlager autark und damit losgelöst von der örtlichen Stromversorgung agieren können sollte, sind bestimmte Besonderheiten bei der Errichtung der gesamten Anlage zu beachten. Durch die Stromversorgung mit erneuerbaren Energieerzeugern stellt die Grundlast des Stromnetzes eine besondere Herausforderung dar. Da die erneuerbaren Energien nicht über 24 Stunden mit der gleichen Intensität zur Verfügung stehen, müssen Inverter und Converter im Micro Grid (autarkes Stromnetz) mit einem Maximum Power Point Tracking System installiert werden, welches Lastspitzen und Energieüberschüsse erkennt und ausgleicht. Dieses System steuert das Zusammenspiel aus Energieerzeuger und Energiekonsument und kann beim Auftreten von Lastspitzen Batteriespeicher schnell zu- und wieder wegschalten und so das Ent- bzw. Beladen der Batterien gezielt ermöglichen. Ein Beispiel für ein solches System ist der AEG Convertsc FLEX Storage Converter.<sup>46</sup> Dieses System kann das Laden und Entladen der Batterien überwachen, schnell auf Lastspitzen reagieren und dadurch die Instabilität der Erzeugungsanlagen von erneuerbaren Energien bis zu einem gewissen Grad ausgleichen.

Um die Herausforderungen eines Micro Grids besser zu verstehen, muss der Prozess der gesamten Anlage mit geeigneter Software (bspw. HOMER von HOMER Energy oder ESD von Siemens) simuliert werden.<sup>47</sup> Nur so kann Energieverlusten in einem solch dynamischen System entgegengewirkt werden. Ein weiterer wichtiger Faktor in einem Micro Grid ist das Peak Shifting, also die Möglichkeit, auf der Verbraucherseite einzugreifen und die Nutzung energieintensiver Anwendungen in Zeiten mit einem hohen Stromangebot zu legen. So sollen zum Beispiel die Elektrolyseanlage und das Laden der Batterien bei besonders hohem PV-Ertrag intensiviert werden. Auch Einsparmöglichkeiten auf Seiten der Energieverbraucher müssen diskutiert werden (effiziente Nutzung von Tageslicht, Dämmung der Unterkünfte, Nutzung von Abwärme).<sup>48</sup>

Die Verwendung von derartiger Software schafft die Möglichkeit der Optimierung des Einsatzes regenerativer Energieerzeuger, kann aber eine Substitution klassischer Energieerzeuger zur Bereitstellung der Grundlast nicht völlig ersetzen. So konnten beispielhaft Žigman et al.<sup>49</sup> in ihrer Studie zur Optimierung der Energieversorgung durch ein hybrides System aus konventionellen und erneuerbaren Energiesystemen aufzeigen, dass der maximale Prozentsatz erneuerbarer Energieerzeugung in Bezug auf das Stromnetz 143 % betrug, und damit kurzfristig mehr Energie bereitstellt, als das Netz transportieren kann. Der Anteil der erneuerbaren Energiequellen an der erzeugten Energie insgesamt machte jedoch lediglich 65,3 % aus.

---

<sup>46</sup> AEG Power Solutions GmbH 2023.

<sup>47</sup> Feng et al. 2018.

<sup>48</sup> Ergin Şahin 2020; Berardi et al. 2020; Shayeghi et al. 2019; Möller/Krauter 2022; Fathima/Palanisamy 2015; Khoramdel et al. 2015.

<sup>49</sup> Žigman et al. 2023.

## 4 Überblick über Szenarioannahmen und Energiebedarf eines Feldlagers

Für die Versorgung eines Feldlagers mit erneuerbarem Strom und Wasserstoff werden verschiedene Anlagenelemente benötigt. Neben einer PV-Anlage sind für die Wasserstoffherzeugung eine Elektrolyseanlage, Kompressoren, Tanks und eine Tankstelle erforderlich.

Für die Sicherstellung der Stromversorgung in einem 24/7 Betrieb sind darüber hinaus verschiedene Elemente wie Inverter sowie Converter und vor allem Batteriespeicher ebenfalls notwendig. Als Back-up-Systeme sind neben einer Rückverstromung des produzierten und gespeicherten Wasserstoffs über Brennstoffzellen auch Dieselgeneratoren bzw. Wasserstoffverbrennungsmotoren im Dual-Fuel-Betrieb empfehlenswert, die im Notfall auch fossile oder synthetische Flüssigkraftstoffe nutzen können. Ein solches Back-up-System kann auch für die Grundlastsicherung zum Einsatz kommen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden zunächst die Verbräuche der einzelnen Anlagenelemente ermittelt und dann in zwei Standortscenarien betrachtet. Dabei werden zwei Truppenstärken unterschieden.

Szenario 1 trifft Annahmen für den Energiebedarf von zwei Bataillonen, Szenario 2 von einer Brigade. Im Folgenden werden die einzelnen Energieverbraucher dieser beiden Fälle näher betrachtet. Ziel ist die Abschätzung des Energiebedarfes dieser Einheiten, sowie die Ermittlung der erforderlichen Leistung für Energieerzeugungsanlage (Photovoltaik) und Batteriespeichersystem. Die Annahmen lassen sich bei Bedarf entsprechend skalieren und sind hier als exemplarische Fälle angelegt.

### 4.1. Komponenten eines Feldlagerbetriebes und ihr Energiebedarf

#### 4.1.1 Unmittelbarer Feldlagerbetrieb

Seit 2019 hat die Bundeswehr mit ihrem Projekt „Modulsystem Feldlager“ den Standortbetrieb im Einsatz überarbeitet. Dabei wird grundsätzlich zwischen zwei Feldlagertypen unterschieden. Typ I befähigt die Streitkräfte, eine schnelle und kompakte Verlegung von Feldlagerkomponenten durchzuführen, die eine kurzfristige Unterbringung der Verbände ermöglicht. Typ II hingegen ist eine containerbasierte Lösung, die bei einer mittelfristigen Einsatzdauer genutzt und bis 2028 beschafft werden soll. Die jeweiligen Module sind für 500 Soldaten und Soldatinnen ausgelegt und werden entsprechend der Truppengröße durch die Bereitstellung mehrerer Module skaliert. Bei längerfristigen Einsätzen ist das Feldlager Typ II durch weitere Einsatzinfrastruktur abzulösen. Dennoch zeigt das Konzept die zentralen Komponenten eines mittel- und längerfristigen Standortbetriebes im Einsatz (siehe Abb. 6) und dient als Basis für die Betrachtung.<sup>50</sup>

---

<sup>50</sup> Nitschke/Autorenteam BAUIDBw 2018.

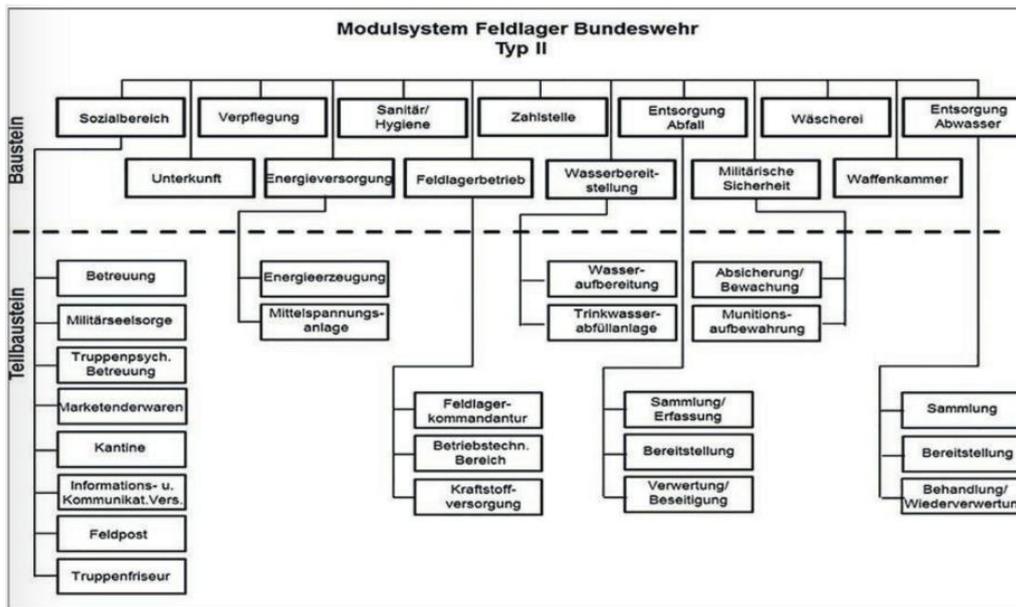


Abb. 6: Komponenten eines Feldlagers Typs II (aus: Nitschke/Autorenteam BAUIDBw 2018: 93).

„Im Gegensatz zum Teilprojekt Modulsystem Typ I ist beim Modulsystem II eine überwiegende Neueinführung von – größtenteils marktverfügbaren – Produkten unumgänglich.“<sup>51</sup> Im Nachfolgenden soll daher auch der Energiebedarf der einzelnen Komponenten entlang marktverfügbarer Produkte näherungsweise bestimmt werden. Es handelt sich dabei um Referenzwerte, die von den tatsächlichen Werten des zu beschaffenden Feldlagermodulsystems abweichen können.

Insbesondere die Unterkünfte haben einen wesentlichen Anteil an dem Energieverbrauch eines Lagers. Je nach geographischer Lage und Jahreszeit wird neben der Beleuchtung und dem Betreiben von elektronischen Endgeräten vor allem Energie für die Heizung und die Klimaanlage notwendig. Das Verbrauchsprofil variiert daher stark. Containerisierte Lösungen, wie es der Lagertyp vorsieht, sollen in dieser Arbeit mit einer Nennleistung von 7,5 kW pro Container berechnet werden.<sup>52</sup> Bei einer Belegung eines Containers mit durchschnittlich 3 Personen werden für ein Feldlagermodul mit je 500 Personen 167 Container mit einer installierten Leistung von insgesamt etwa 1.250 kW nötig. Die assoziierten Sanitäreanlagen werden mit einem Energieverbrauch von insgesamt 200 kW einbezogen.<sup>53</sup>

Auch die Wäscherei ist ein wichtiger Verbraucher von Energie und Wasser. Eine containerbasierte Lösung für ein Feldlager mit 500 Soldaten und Soldatinnen soll mit einer Nennleistung von 50 kW angesetzt werden.<sup>54</sup>

<sup>51</sup> Nitschke/Autorenteam BAUIDBw 2018: 92.

<sup>52</sup> Klimageräte und Heizungen für containerisierte Unterkünfte werden mit einer Leistung von jeweils 2,5 kW angegeben (siehe Agecon GmbH 2023b, 2023a).

<sup>53</sup> Folgende Annahmen wurden getroffen: 60 kW für die Heizung, 135 kW für die Warmwasserversorgung und weitere 5 kW für die Beleuchtung und sonstige Geräte.

<sup>54</sup> Es werden zwei Wäschereicontainer mit jeweils 6 Trocknern und Waschmaschinen in die Berechnung einbezogen. Für jedes Gerät wird eine Leistung von 2 kW bereitgestellt. Für die Beleuchtung der beiden Container und sonstiger Geräte werden weitere 2 kW angenommen. Siehe für ein Beispielsystem: Futuretech Kärcher Group 2023b.

Für die Versorgung und Verpflegung der Soldaten werden neben den eigentlichen Zubereitungs- und Küchencontainern auch Kühlcontainer zur Lagerung von verderblichen Lebensmitteln sowie ein Spülcontainer benötigt. Ein solches Kantinencontainersystem hat eine gesamte Nennleistung von 270 kW.<sup>55</sup>

Um den Wasserbedarf der Soldaten aber auch der Wäscherei und der Kantine sicherzustellen, ist daher ebenfalls eine umfassende Wasserversorgung und -entsorgung zu installieren, die einen weiteren wichtigen Großverbraucher des Lagerbetriebs darstellt. Aufgrund der hier näher zu betrachtenden Wasserstofferzeugung, steigt auch der Bedarf an Wasser, der in Kapitel 4.2 noch einmal gesondert dargestellt werden soll. Dennoch erfordert die Nutzung des gehobenen und aufbereiteten Wassers einer Trinkwasserabfüllanlage, die mit einer Leistung von 55 kW in die hier getroffene Berechnung des Feldlagerbetriebs mit einbezogen wird.<sup>56</sup>

Die Entsorgung von Müll kann durch eine Verbrennungsanlage im Feld gewährleistet werden. Das hier verwendete Beispielsystem einer mobilen Anlage verfügt über eine Verbrennungsrate von bis zu 220 kg pro Stunde. Es benötigt dabei etwa 25–30 Liter Heizöl pro Stunde bzw. eine äquivalente Menge an Erdgas.<sup>57</sup> Eine Umrüstung des Systems für eine Wasserstoffnutzung wäre zu prüfen. Umgerechnet würden auf diese Weise 7,5 bis 10,5 kg/h (250–350 kWh) an Wasserstoff zusätzlich anfallen.

Neben den Großverbrauchern sind, wie der Tabelle 1 zu entnehmen ist, eine Vielzahl kleinerer Verbraucher an das Lagernetz angeschlossen; zum Beispiel der Sozialbereich, die militärische Sicherheit und die Zahlstelle. Da sich insbesondere für den Baustein der militärischen Sicherheit kaum ein vergleichbares System am zivilen Markt vorfinden lässt, wird jeder (Teil-)Baustein mit einer durchschnittlichen Leistung von jeweils 20 kW in der Berechnung berücksichtigt. Tabelle 1 zeigt die getroffenen Annahmen.

Für die Planung und Auslegung von Elektroanlagen werden sogenannte Gleichzeitigkeitsfaktoren angewandt, um die Leistung der Anlage zu ermitteln:

Der Gleichzeitigkeitsfaktor oder Bedarfsfaktor gibt an, wie viele Verbraucher gleichzeitig im Betrieb sind [...]. Grundsätzlich handelt es sich um Erfahrungswerte oder Messungen, die man durch verschiedene Anlagenkonzepte und Verbraucherarten gewinnen kann. Er ist ein wichtiger Faktor zur Bestimmung von Einspeisungen. Mit der zeitlichen Lastentnahme eines Netzes oder Netzbereiches kann der Faktor durch mehrere Abnahmestellen, abhängig von der Benutzungsdauer  $T$  der höchsten in Anspruch genommenen Netzkapazität, angegeben werden.<sup>58</sup>

**55** Zwei Küchencontainersysteme mit je 60 kW können rund 600 (Haupt-)Mahlzeiten zubereiten. Darüber hinaus bedarf es eines Vorbereitungscontainers (15 kW) und Zubereitungscontainer (15 kW) sowie eines Spülcontainers (etwa 70 kW). Zudem werden für die Lagerung der Lebensmittel zwei Kühlcontainer mit je 15 kW berücksichtigt. Siehe für die verwendeten Referenzsysteme: Losberger de Boer/Bachmann RDS 2023; CHV Container 2023; Seete Großkücheneinrichtungen 2023; Futuretech Kärcher Group 2023a, 2023c.

**56** Siehe für Referenzanlage: Plast Engineering Knauff e. K. 2023.

**57** Siehe für Referenzanlage: Inciener8 2023.

**58** Kasikci 2018: 335.

**Tab. 1:** Geschätzter Energiebedarf Modulsystem Feldlager Bundeswehr Typ II (500 Soldaten).

Verbraucher	Nennleistung in kW
Unterkünfte	1250
Sanitär/Hygiene	200
Verpflegung	270
Wäscherei	50
Entsorgung	n.a. (Wasserstoffnutzung)
Sozialbereich	160 <sup>59</sup>
Feldlagerbetrieb	20
Militärische Sicherheit	20
Waffenkammer	20
Trinkwasserabfüllanlage	55
Zahlstelle	20
Energieversorgung	20
<b>Gesamt</b>	<b>2085</b>
<b>Gesamt (Gleichzeitigkeitsfaktor 0,8)</b>	<b>1668</b>

Um eine erste Abschätzung des Energieverbrauches dieser Feldlagerkomponenten zu treffen, soll auf Basis von Kasikci<sup>60</sup> ein Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,8 angenommen werden. Obgleich der Faktor für die Auslegung eines Wohnkomplexes verwendet wird, ist er als Referenz ausreichend, um eine erste Bewertung energieautonomer Feldlagerkonzepte zu treffen. Für eine konkrete Überführung der hier zu diskutierenden Konzepte z. B. in Pilotprojekte bedarf es jedoch einer differenzierteren Betrachtung der einzelnen Anlagenkomponenten und ihrer Nutzung, die hier nicht geleistet werden kann.

#### 4.1.2 Einsatzrelevante Infrastruktur

Neben dem unmittelbaren Feldlagerbetrieb, wie ihn das Modulsystem II vorsieht, werden zusätzliche Systeme notwendig, um die Einsatzfähigkeit der Streitkräfte zu gewährleisten. Zunächst muss eine medizinische Versorgung der Soldaten und Soldatinnen durch ein Feldlazarett gewährleistet werden. Das Feldlager ist zudem durch Verteidigungssysteme im Bereich Flug- und Drohnenabwehr zu schützen. Die mit diesen Verteidigungssystemen einhergehende Sensorik sowie die Notwendigkeit, Echtzeitinformationen auch während des Einsatzes effizient zu verarbeiten, machen es erforderlich, IT-Systeme und Rechenzentren bereitzustellen.

Containerbasierte Daten- und Rechenzentren weisen je nach Kapazität und Leistung zwischen 60 kW und 440 kW auf. Orientiert an der hohen Anforderung einer militärischen Nutzung und dem Einsatzzweck, wird daher ein besonders leistungsfähiges System

<sup>59</sup> Wie Abb. 6 aufzeigt, besteht der Sozialbereich aus 8 verschiedenen Teilbausteinen. Jeder dieser Teilbausteine soll mit einer Leistung von 20 kW in der Auslegung der Anlage berücksichtigt werden.

<sup>60</sup> Kasikci 2018: 314.

mit 440 kW als Berechnungsgrundlage für den Feldlagerbetrieb mit einbezogen. Für weitere IT-Systeme werden weitere 60 kW berücksichtigt.<sup>61</sup>

Für die Auslegung von Rechenzentren ist ein Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,9 anzuwenden.<sup>62</sup>

Der Energieverbrauch eines Feldlazarets variiert je nach Umfang des bereitzustellenden medizinischen Leistungsspektrums. Ein vergleichbares mobiles Lazarett im Bereich Katastrophen- und Zivilschutz verfügt über einen Leistungsbedarf von rund 300 kW.<sup>63</sup> Dieses Referenzsystem soll auch für den hier zu modellierenden Energiebedarf eines militärischen Feldlazarets angenommen werden. Das Lazarett wird mit einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,6 in der Auslegung des Energiesystems berücksichtigt.<sup>64</sup>

Zum Schutz des Feldlagers sind Flug- und Drohnenabwehrsysteme sowie assoziierte Radaranlagen bereitzustellen. Um sie in der Energiebilanz eines Feldlagers berücksichtigen zu können, wird hier ein allgemeiner Wert von 400 kW für die Flugabwehrsysteme angenommen, die kurzfristig in das Netz des Lagers zugeschaltet werden. Das Radar als kontinuierlicher Verbraucher ist mit einer Leistung von 100 kW zu berücksichtigen. Da ähnliche Systeme am zivilen Markt nur bedingt oder gar nicht vorhanden sind, entsprechen diese Leistungsangaben Schätzwerten, die von einzelnen Systemen der Streitkräfte abweichen können. Verteidigungsanlagen als kritisches System militärischer Sicherheit sollen mit einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 1 vollständig in die Auslegung des Energiesystems eines Feldlagers einkalkuliert werden. Für eine Übersicht der getroffenen Annahmen des Feldlagermoduls Typ II siehe auch Tabelle I im Anhang.

## 4.2 Energie- und Wasserbedarf für die Wasserstofferzeugung

Wasserstoff wird in der Elektrolyseanlage innerhalb des Feldlagers erzeugt. Wasser muss dabei aus einem ebenfalls im Feldlagerbereich errichteten Brunnen gepumpt, aufbereitet und der Elektrolyse zugeführt werden. In der vorliegenden Arbeit wird beispielhaft eine kompakte Anlage von H-Tech Systems als Referenz verwendet. Das in drei Outdoor-Containern<sup>65</sup> untergebrachte System hat eine installierte Leistung von 2 MW und produziert so 900 kg Wasserstoff pro Tag (37,75 kg/h). Das System ist bedarfsgerecht hochskalierbar. Der Elektrolyseur ist mit 18 PEM-Stacks S450 sowie einer integrierten Prozesswasseraufbereitung ausgestattet und stellt den größten Einzelverbraucher des Feldlagers dar.

Die Treibstoffversorgung der Fahrzeuge mit H<sub>2</sub> soll auf diese Weise sichergestellt werden. Zusätzlich kann die Anlage bei Bedarf durch eine Frischwasser- und Wasserstoffaufbereitungsanlage erweitert werden.<sup>66</sup> Um den Wasserstoff in ausreichender Menge zur Verfügung zu stellen, muss der Standort über einen angemessen dimensionierten Brunnen verfügen. Ein derartiger Tagesverbrauch an Wasser kann durch die Brunnen der Bundeswehr in den Standorten gedeckt werden. So verfügt beispielweise der Brunnen des Bundeswehrlagers Camp Castor in Mali über eine tägliche

<sup>61</sup> Huawei 2023.

<sup>62</sup> Siemens AG 2018: 18.

<sup>63</sup> Siehe Role/Echelon-3 in U-Project 2017: 17 f.

<sup>64</sup> Siemens AG 2018: S. 18; U-Project 2017.

<sup>65</sup> Abmessungen des Systems: 3 Outdoor Container / Indoor Skids je 6,8 x 2,7 x 3,2 m (siehe H-TEC Systems 2023).

<sup>66</sup> H-TEC Systems 2023.

Fördermenge von 96 m<sup>3</sup>/d.<sup>67</sup> Gegebenenfalls wären je nach Truppengröße zusätzliche Brunnen zu bohren. Für die Förderung des Wassers wird eine Leistung von 60 kW notwendig.

Um das Wasser jedoch für die Elektrolyse nutzbar zu machen, benötigt das Referenzsystem H-Tec Systems Wasser in Trinkwasserqualität. Zur Aufbereitung ist daher ein weiterer verfahrenstechnischer Schritt notwendig. Aufgrund des hohen Wasserbedarfs, der mit einer Elektrolyse einhergeht, sind Systeme zur Wasseraufbereitung, wie sie das Modulsystem Feldlager II vorsieht, sicherlich kaum ausreichend. Daher sind hier umfassendere Aufbereitungsanlagen notwendig. Das verwendete Referenzsystem hat eine Nennleistung von 20 kW und eine Produktionsrate von bis zu 6 m<sup>3</sup>/h. Um innerhalb von 6 Stunden 96 m<sup>3</sup> zu fördern, werden drei dieser Systeme mit einer Gesamtleistung von 60 kW erforderlich.<sup>68</sup>

Der produzierte Wasserstoff muss aufgrund seiner geringen volumetrischen Energiedichte, wie in Kapitel 3.2.2 dargestellt, in Drucktanks (700 bar) gespeichert werden. Die für diese Speichermethode notwendige Kompression benötigt etwa 12 % des Energieinhaltes des Wasserstoffs (4 kWh/kg).<sup>69</sup> Dieser zusätzliche Energieaufwand ist somit ebenfalls in der Berechnungsgrundlage zu berücksichtigen. Die Wasserförderung und -aufbereitung zur Bereitstellung im Elektrolyseprozess sowie der Energieaufwand für die Kompression des hergestellten Wasserstoffes sollen im weiteren Verlauf der Arbeit mit dem Energieaufwand für die Elektrolyse in dem Wert „Wasserstoffherzeugung“ zusammengeführt werden. Für eine differenzierte Betrachtung siehe Tabelle II im Anhang.

### 4.3 Energiebedarf von Batterie- und Wasserstoffspeichern

Für den Betrieb der Standorte sind zwei unterschiedliche Energiespeichersysteme vorgesehen. Zum einen stellt ein Batteriesystem für den Nachtbetrieb und für wetterbedingte Erzeugungsausfälle der PV-Anlage die Energieversorgung des Feldlagers sicher. Zum anderen werden Drucktanks für die Speicherung des Wasserstoffes zur Nutzung als Treibstoff notwendig.

Als Nachtbetrieb ist der Zeitraum zu sehen, in dem die Photovoltaikanlage keinen oder nahezu keinen Strom erzeugt. In Kapitel 5 werden die Herausforderungen der PV-Technologie näher erläutert. Für den Einsatz in Nord- oder Mitteleuropa wird hier ebenfalls eine Einsatzdauer der PV-Anlage von 6 h/d angenommen. In dieser Zeit muss die PV-Anlage auch durch Beladen der Batteriespeicher den reibungslosen Nachtbetrieb sicherstellen. Der Batteriespeicher stellt demnach die erforderliche elektrische Energie für den Betrieb des Standortes für bis zu 18 Stunden zur Verfügung. Batteriespeichersysteme haben in den vergangenen Jahren eine ganz erhebliche Verbesserung bei Effizienz und Ladekapazität erfahren. Substantielle Kapazitäten können bereits in 40 Fuß Container untergebracht werden. Dabei sind Speicherkapazitäten von mehr als 4 MWh pro Container möglich. Wie dargestellt, liegt der Wirkungsgrad dieser Speicher bei 95 %.<sup>70</sup> Tabelle II im Anhang zeigt die angenommenen Verbräuche des Feldlagers für

<sup>67</sup> Bundeswehr/Radio Andernach 2022.

<sup>68</sup> Wananchi 2022.

<sup>69</sup> Kurzweil/Dietlmeier 2016: 487.

<sup>70</sup> Weniger et al. 2020.

Tag und Nacht, denen ein Zeitraum von 6 bzw. 18 h zugeordnet wurde. Diese Betrachtung wurde gewählt, auch wenn die Photovoltaikanlage etwas länger als 6 Stunden genutzt werden kann. Mit dem Batteriespeichersystem wird nicht nur die Stromversorgung des Lagers in der Nacht sichergestellt, sondern es können auch Lastspitzen am Tag abgedeckt werden.

Grundsätzlich stellt sich darüber hinaus die Frage, welche weitere Reserveenergie für den Betrieb des Lagers erforderlich ist und ob diese Energie in zusätzlichen Batteriespeichersystemen oder Drucktanks (700 bar) vorgehalten werden muss. Bei der Fragestellung für das geeignete System standen vor allem Platzbedarf und logistischer Aufwand im Fokus. Bei Betrachtung beider Systeme wird ein erheblicher Unterschied im Platzbedarf und damit für die Logistik deutlich. So können in einem 40 Fuß Drucktankcontainer 25 m<sup>3</sup> Wasserstoff unter 700 bar (1.000 kg Wasserstoff) gespeichert werden.<sup>71</sup> Der somit gespeicherte Wasserstoff hat einen Energieinhalt von rund 33,33 MWh. Obgleich die Rückverstromung des Wasserstoffs durch Wasserstoffverbrennungsmotoren nur mit einem Wirkungsgrad von rund 40 % erfolgen könnte, stellt ein Wasserstoffdrucktankcontainer trotzdem noch rund 13,3 MWh an elektrischer Energie für das System bereit. Bei nahezu gleichem Platzbedarf lässt sich somit etwa 3-mal mehr elektrische Energie zur Verfügung stellen im Vergleich zu Batteriespeichersystemen, auch wenn zusätzliche Flächenbedarfe für die Brennstoffzellen/Wasserstoffverbrennungsmotoren entstehen und auch für die Kompression des zu speichernden Wasserstoffs zusätzliche Energie aufgewandt werden muss.

Neben geringerem Platzbedarf und damit logistischen Erfordernissen entsteht beim Einsatz von Wasserstoff als Reserve eine höhere Flexibilität, da er sowohl als Fuel für die Fahrzeuge als auch nach Rückverstromung für die Energieversorgung des Feldlagers genutzt werden kann. Aus diesem Grund ist in dem vorliegenden technischen Konzept eine Wasserstoffreserve für den Verbrauch des Camps von einer Woche sowie für den Betrieb der Fahrzeuge eine zusätzliche Tankfüllung vorgesehen. Zur Absicherung einer weiteren Beladung der batterieelektrischen Fahrzeuge ist nichtsdestotrotz eine zusätzliche Batteriekapazität eingeplant. Sie könnte auch zur Abdeckung von Lastspitzen im System eingesetzt werden. Ihre Wiederaufladung könnte bei Auftreten von Überkapazitäten der Photovoltaikanlage erfolgen.

#### 4.4 Energiebedarf für das Feldlager und Mobilität

In der hier vorliegenden Arbeit werden zwei unterschiedliche Szenarien betrachtet. Szenario 1 stellt den Energiebedarf zweier Bataillone dar, während Szenario 2 den Energiebedarf einer Brigade aufzeigt. Die genaue Stärke eines heute typischen Bataillons oder einer Brigade festzulegen und somit die Szenarien vergleichbar zu machen, bereitet einige Schwierigkeiten. Die Umstrukturierung des Heeres seit 2014, mit ihrem tieferen Fokus auf die Landes- und Bündnisverteidigung, sieht eine auftragsbezogene Aufstellung der Einheiten vor. Dadurch werden die einzelnen Verbände weniger starr als noch im kalten Krieg aufgestellt und können an Ausrüstung und Anzahl der Soldaten stark variieren. Die heutigen Bataillone der Bundeswehr verfügen etwa über 300–1.200 Soldaten, während eine Brigade etwa über 4.500–5.400 Soldaten verfügt. Auch die Anzahl und Art der Fahrzeuge kann je nach Auftrag der Einheit stark variieren. Im Folgenden

<sup>71</sup> FORVIA-Gruppe 2023.

werden zwei Beispielbataillone und eine Beispielbrigade und ihr jeweiliger Energieverbrauch vorgestellt.<sup>72</sup>

### Szenario 1

Für Szenario 1 werden zwei Bataillone mit zusammen 1.500 Soldaten, 100 geschützten Fahrzeugen und 80 LKW angenommen. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Betrachtung. Die Herleitung des Energiebedarfs der Fahrzeuge ist dem Anhang (Tabelle III) zu entnehmen.

Wie einleitend dargestellt, sollen für den Fahrzeugpark mehrstofftaugliche Wasserstoffverbrennungsmotoren in Fahrzeugen mittlerer Größe und mittleren Gewichts (5–15 t) eingesetzt werden. Neben den 40 geschützten Fahrzeugen vom Typ Dingo und den 10 Fahrzeugen vom Typ Eagle sind auch 20 Lkws (10-Tonner) und 20 Transporter mit Wasserstoffverbrennungsmotoren zu betreiben.<sup>73</sup> Bei einem durchschnittlichen Verbrauch von einer Tankfüllung je Fahrzeug pro Woche wird ein Dieselbedarf von 3.657 Litern pro Tag notwendig. Dies entspricht einer täglich anfallenden Wasserstoffmenge von 1.075 kg/d Wasserstoff.

Um die Produktion dieser Wasserstoffmengen innerhalb der wesentlichen Ertragsstunden der PV-Anlage zu erzeugen, soll die Elektrolyseanlage so ausgelegt werden, dass sie die geforderten Wasserstoffmengen in 6 Stunden bereitstellen kann. Damit werden 5 Referenzsysteme von H-Tec Systems mit einer Gesamtleistung von 10 MW notwendig.<sup>74</sup> Der damit verbundene Wasserbedarf liegt bei rund 17 m<sup>3</sup>. Eine Wasserförderung, -aufbereitung und -entsorgung, die neben der Wassernutzung des Feldlagers auch die Elektrolyse versorgt, ist mit weiteren 120 kW zu berücksichtigen.

Um in der gegebenen Produktionszeit von 6 Stunden den Wasserstoff auf eine Druckstufe von 700 bar zu bringen, sind Kompressoren mit einer Leistung von etwa 755 kW zu installieren. Für die Wasserstofferzeugung wird damit eine Gesamtleistung von 10.875 kW notwendig.

Fahrzeuge mit einem Gewicht von bis zu 5 t (40 Wölfe und 40 5-Tonnen-Lkws) können als Antriebssystem eine Kombination aus Elektromotor und Batteriespeicher (batterieelektrisch) nutzen. Bei einem durchschnittlichen Verbrauch einer Tankfüllung je Fahrzeug pro Woche wird ein Dieselbedarf von etwa 2.090 Litern pro Tag notwendig. Aufgrund des deutlich höheren Wirkungsgrades (70 %) im Vergleich zu Dieselmotoren (45 %) liegt der Bedarf für die batterieelektrischen Fahrzeuge bei etwa 13.170 kWh pro Tag. Das Beladen der Fahrzeuge muss in rund 6 Stunden pro Tag über die PV-Anlage realisiert werden. Daraus ergibt sich eine zu installierende Leistung von 2.195 kW.

Neben den batterieelektrischen und wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen verfügt ein solcher Verband ebenfalls über gepanzerte Fahrzeuge. Je nach Art des Bataillons werden so Kampfpanzer des Typs Leopard 2 oder Schützenpanzer des Typs Marder oder Puma genutzt. Diese Systeme wurden in der Bedarfsbetrachtung des Fuhrparks nicht berücksichtigt, da solche energieintensiven Systeme weiterhin auf Flüssigkraftstoffe angewiesen sind. Für diese Fahrzeuge sind Flüssigkraftstoffe weiterhin auf dem Standort

<sup>72</sup> Bundeswehr 2023a, 2023b.

<sup>73</sup> BMVg 2021.

<sup>74</sup> Das System von H-Tec Systems hat eine Produktionskapazität pro System von 900 kg/d (Vollbetrieb). Es bedarf daher 5 Anlagen, die damit 1.125 kg Wasserstoff in 6 Stunden erzeugen können. Der Energiebedarf beträgt rund 53 kWh/kg H<sub>2</sub>.

vorzuhalten. Somit muss das Feldlager dauerhaft, wenn auch in deutlich geringerem Maße, mit diesen Kraftstoffen weiterhin konventionell über Treibstofftransporte versorgt werden.

Bei dem hier angenommenen Fahrzeugpark würden so rund 5.733 Liter Diesel pro Tag bzw. rund 40.130 Liter Kraftstoff pro Woche eingespart werden. Für zwei vollausgestattete Panzergrenadierbataillonen mit 88 Schützenpanzer des Typs Marder müssten etwa 8.150 Liter Diesel pro Tag weiterhin durch synthetische Kraftstoffe gedeckt werden, wenn auch für diese Systeme eine Tankfüllung pro Woche angenommen wird. Damit reduziert sich der Treibstoffbedarf für den Fuhrpark um etwa 41 %, wenn für die geschützten Fahrzeuge und den Logistikfuhrpark batterieelektrische und wasserstoffbetriebene Systeme genutzt werden.

Der Energiebedarf der militärischen Infrastruktur eines Feldlagers wird hier entlang des Modulsystems Typ II skaliert. Für das Szenario 1 (2 Bataillone) sind somit 3 Feldlagermodule zu installieren. Bei einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,8 % ergibt sich eine Leistung von etwa 5.000 kW für den unmittelbaren Feldlagerbetrieb.

Daneben werden, wie aufgezeigt, Verbraucher betrachtet, die mit der direkten Einsatzfähigkeit der Streitkräfte zusammenhängen. Das Lazarett, die Verteidigungs- und IT-Systeme verfügen unter Berücksichtigung der ihnen zugeordneten Gleichzeitigkeitsfaktoren über eine Gesamtleistung von 1.130 kW.

Um die Volatilität der Photovoltaikanlage auszugleichen, werden Batteriespeichersysteme notwendig, um die Infrastruktur über die Nacht und bei unzureichender Sonnenstrahlung weiter zu versorgen. Die Batteriespeicherverluste werden mit 5 % berücksichtigt. Damit betragen die Verluste pro Tag rund 1.640 kWh, was eine zusätzlich zu installierende Leistung von rund 70 kW zur Folge hat.

**Tab. 2:** Erforderliche Erzeugungskapazität für den Standort im Szenario 1.

Verbraucher	Leistung (kW)
Feldlagerbetrieb (3 Feldlagermodule Typ II)	5.005
Weitere Infrastruktur	1.130
Wasserstoffherzeugung	10.875
Batterieelektrische Ladekapazität	2.195
Batteriespeicherverluste	70
<b>Gesamt</b>	<b>19.270</b>

Um den dauerhaften Betrieb des Lagers sicherzustellen, ist die Bereitstellung von Generatoren-Sets mit Wasserstoffverbrennungsmotoren im Dual-Fuel-Betrieb notwendig. Sie übernehmen die Funktion eines grundlastfähigen Energiesystems, das eine Versorgung der Infrastruktur und der batterieelektrischen Fahrzeuge immer gewährleisten kann. Die Kraftstoffflexibilität dieser Dual-Fuel-Motoren ermöglicht es, auch auf Flüssigkraftstoffe zurückzugreifen.

### Szenario 2

Für Szenario 2, die Brigade, wird eine Truppenstärke von 4.500 Soldaten angenommen. Der verbundene Energiebedarf für die Infrastruktur (9 Modulsysteme Feldlager Typ II) steigt damit ebenfalls an. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse der Betrachtung.

Zusätzlich verfügt die Brigade über einen Fuhrpark von 288 geschützten Fahrzeugen und 270 Lkws. Wie auch in Szenario 1 sollen in geschützten Fahrzeugen und Lkws zwischen 5 und 15 Tonnen bivalente Wasserstoffverbrennungsmotoren zum Einsatz kommen (125 Dingo, 25 Eagle, 38 Fennek, 100 10-Tonnen-Lkw und 50 Transporter). Bei einem durchschnittlichen Verbrauch eines Tankvolumens je Fahrzeug pro Woche wird ein Dieselbedarf von 12.157 Litern pro Tag notwendig. Dies entspricht einer täglichen Wasserstoffmenge von 3.574 kg.

Um die Produktion dieser Wasserstoffmenge innerhalb der wesentlichen Ertragsstunden der PV-Anlage zu erzeugen, muss die Elektrolyseanlage, wie in Szenario 1 dargestellt, ebenfalls so ausgelegt sein, dass sie in 6 Betriebsstunden den täglichen Wasserstoffbedarf bereitstellen kann. Damit werden 16 Referenzsysteme von der Firma H-Tec Systems mit einer Gesamtleistung von 32 MW notwendig. Der damit verbundene Wasserbedarf liegt bei rund 58 m<sup>3</sup>. Eine Wasserförderung und -aufbereitung, die neben der Wassernutzung des Feldlagers auch die Elektrolyse versorgt, ist mit weiteren 240 kW zu berücksichtigen. Um in der gegebenen Produktionszeit von 6 Stunden den Wasserstoff auf eine Druckstufe von 700 bar zu bringen, sind Kompressoren mit einer Leistung von etwa 2.415 kW zu installieren. Für die Wasserstoffherzeugung wird damit eine Gesamtleistung von 34.655 kW notwendig.

Für die batterieelektrischen Fahrzeuge des Typs Wolf (100) und die 5-Tonnen-Lkws (100) ist ein täglicher Dieselbedarf von etwa 5.230 Liter zu decken, um eine Batterieladung je Fahrzeug pro Woche zu ermöglichen. Aufgrund des höheren Wirkungsgrades elektrischer Antriebe sinkt der Energiebedarf bei der angenommenen Zahl an Fahrzeugen mit diesem Antrieb auf ca. 32.950 kWh/d. Damit ist eine Leistung von etwa 5.490 kW für diesen Teil des Fahrzeugparks bereitzustellen, um einen Beladungszeitraum innerhalb von 6 Stunden zu realisieren.

Insbesondere eine Brigade verfügt über einen umfassenden Fuhrpark an Kampf- und Schützenpanzern. Diese Fahrzeuge wurden in der Bedarfsbetrachtung des Fuhrparks nicht berücksichtigt, da solche energieintensiven Systeme weiterhin auf Flüssigkraftstoffe angewiesen sind. Für solche Systeme sind Flüssigkraftstoffe also weiterhin auf dem Standort vorzuhalten, weswegen sich die Streitkräfte für diese Fahrzeuge auch künftig auf konventionell Logistikketten zur Treibstoffversorgung stützen müssen.

Durch die Erzeugung von Wasserstoff im Feldlager könnten bei dem hier angenommenen Fuhrpark rund 17.340 Liter Diesel pro Tag eingespart werden. Dennoch gilt es hier zu betonen, dass bei einer Versorgung von zwei vollausgestatteten Panzerbataillonen (88 Leopard 2) und zwei Panzergrenadierbataillonen (88 Marder) im Schnitt ein täglicher Dieselbedarf von 22.690 Litern anfällt, wenn man von einer Tankfüllung pro Woche ausgeht. Damit würden die Treibstoffbedarfe um 43 % reduziert werden, wenn die geschützten Fahrzeuge und der Logistikfuhrpark durch vor Ort erzeugten Wasserstoff bzw. Strom versorgt würden.

Wie bereits zuvor dargestellt, wird das Feldlagermodul Typ II entsprechend der Truppengröße (9 Module) skaliert. Dadurch ergibt sich eine zu installierende Leistung von 15.015 kW für den Feldlagerbetrieb. Für die einsatzrelevante Infrastruktur wird eine leicht höhere zusätzliche Leistung im Vergleich zu Szenario 1 angenommen, da eine umfassendere Kapazität für das Feldlazarett (600 kW) zu erwarten ist. Die Verteidigungssysteme und IT-Systeme werden als gleichbleibend betrachtet. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Gleichzeitigkeitsfaktoren wird so eine Leistung von 1.310 kW für diese Infrastruktur notwendig.

Für die Batteriespeicherverluste werden in Szenario 2 weitere 180 KW erforderlich. Dies entspricht einem durchschnittlichen Energieverlust von 4.200 kWh/d.

Wie auch in Szenario 1 ist hier auf die Notwendigkeit grundlastfähiger Energieerzeugungssysteme zu verweisen, um den Betrieb des Lagers auch im Notfall sicherzustellen. Auch hier sollen Dual-Fuel-Motoren zum Einsatz kommen, die neben Wasserstoff auch auf konventionelle Flüssigkraftstoffe zurückgreifen können.

**Tab. 3:** Erforderliche Erzeugungskapazität für den Standort im Szenario 2.

Verbraucher	Leistung (kW)
Feldlagerbetrieb (9 Feldlagermodule Typ II)	15.015
Weitere Infrastruktur	1.310
Wasserstoffherzeugung	34.655
Batterieelektrische Ladekapazität	5.491
Batteriespeicherverluste	180
<b>Gesamt</b>	<b>56.644</b>

## 5 Besonderheiten der Auslegung von Photovoltaikanlagen und differenzierte Abstimmung der Energieverbraucher eines Feldlagers

Um die Plausibilität eines solch umfassenden Systems in einem eigenen Stromnetz (Micro Grid) näher zu analysieren, wurden Jahres-, Tages- und Stundenbetrachtungen der möglichen Stromerzeugung mittels PV-Anlage vorgenommen.

Neben der Frage der Relevanz für Auslandseinsätze der Bundeswehr ist auch vor dem Hintergrund der aktuellen Lage die Landes- und Bündnisverteidigung ein wesentlicher Fokus. Dazu stützt sich die Arbeit zunächst auf Wetterdaten im Raum Berlin (Prenzlau), um das Potential der erneuerbaren Energieerzeuger in Nord- und Mitteleuropa darzustellen.

Im Nachfolgenden sollen die Bedarfsstrukturen der zwei militärischen Standorte und die dafür notwendigen Erzeugungskapazitäten näher bestimmt und auf die Erfordernisse abgestimmt werden. Es soll dabei nicht nur der Betrieb eines Feldlagers untersucht werden, sondern in den gewählten Szenarien zusätzlich auch ein erheblicher Teil der Fahrzeuge in einem Standort mit aus erneuerbarer Energie erzeugtem Wasserstoff angetrieben werden.

### 5.1 Spezifika der Nutzung von Photovoltaikanlagen

In den hier vorgestellten Szenarien soll für die Standorte eine Photovoltaikanlage als Hauptenergiequelle genutzt werden. Wie Abbildung 7 darstellt, bestehen bei der Leistungsfähigkeit der Photovoltaik jahreszeitliche Herausforderungen. Die Sonneneinstrahlung über den Tag variiert zusätzlich. Nur in der Mittagszeit erzeugt eine PV-Anlage ihren vollen Ertrag, dies wird besonders in den Wintermonaten, hier Dezember, relevant. Die Abbildung verdeutlicht aber auch, dass in Nord- und Mitteleuropa selbst im sonnenreichsten Monat nicht der volle PV-Ertrag entsprechend der kWp Definition einer Photovoltaikzelle von 1 kW erreicht werden kann.

Wie Abbildung 8 zeigt, kann die PV-Anlage in der gewählten geographischen Lage im Mai relevante Energiemengen in einem Zeitraum von 6 Stunden direkt in das Micro Grid des Feldlagers einspeisen. Die restlichen 18 Stunden müsste der Standort durch die tagsüber erzeugte und gespeicherte Energie mittels Batteriespeicher versorgt werden.

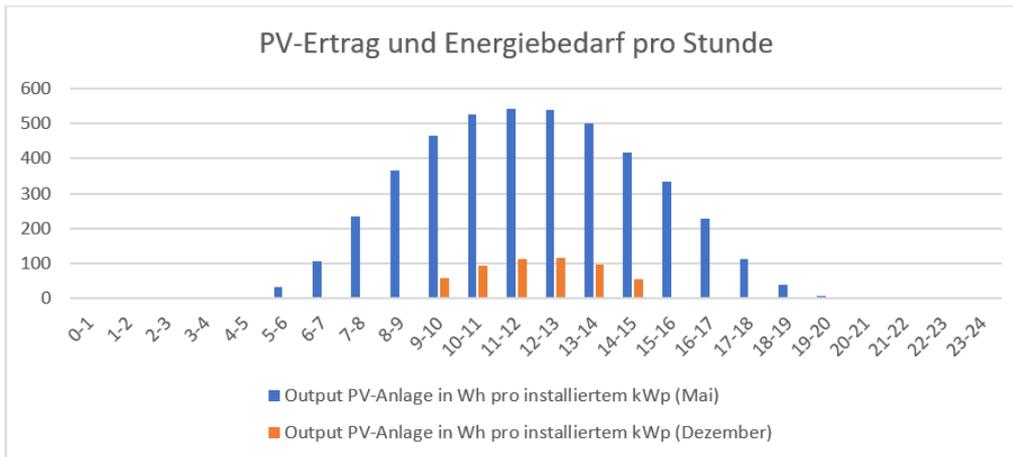
Die Abbildung stellt auch den großen jahreszeitlichen Unterschied der Sonnenenergie dar. Im Monat Dezember steht nur ein Bruchteil der Energie im Vergleich zu Mai zur Verfügung.

Zusätzlich kann auch der Wasserstoff für die Fahrzeuge nur über den Tag erzeugt und für die Betankung gespeichert werden. Die für die sonnenlichtfreie Phase erforderliche Energie für den täglichen Betrieb muss also in Batteriesystemen gespeichert werden.

Darüber hinaus ist als zusätzliche Reserve je eine Batterieladung pro Woche für die batterieelektrischen Fahrzeuge in Batteriespeichern vorgesehen. Weiterhin steht ausreichend Wasserstoff in Drucktanks zur Verfügung, um das Lager eine Woche zu betreiben und eine Tankfüllung für die wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge sicherzustellen. Diese Wasserstoff- und Batteriekapazitäten sollen durch eine einmalige Anlieferung beim Aufbau des Lagers dort für den Notfall vorgehalten werden und sind in der Berechnung zur Auslegung der PV-Anlage nicht berücksichtigt. Die PV-Anlage deckt somit nur den täglichen Bedarf für den Infrastrukturbetrieb sowie den batterieelektrischen und wasserstoffbetriebenen Fahrzeugpark ab.

Als Back-up-Lösung ist die Nutzung des erzeugten Wasserstoffes durch eine Rückverstromung mit einer Brennstoffzelle oder alternativ mit Dual-Fuel-Wasserstoffverbrennungsmotoren vorgesehen.

Abbildung 7 visualisiert die Herausforderung dieser Technologie. Um eine ausreichende Kapazität der PV-Anlage im Sinne einer Energieautonomie eines Standortes für das gesamte Jahr sicherzustellen, müsste der Monat Dezember als Basis für die Auslegung der PV-Anlage dienen. Damit würde aber natürlich eine massive Überkapazität für die Sommermonate bei einer Anwendung in Nord- und Mitteleuropa geschaffen. Trotz dieses Umstandes soll in einem ersten Schritt der Monat Dezember für die beiden gewählten Szenarien näher betrachtet werden, da nur so eine ganzjährige Vollautonomie des Standortes zu gewährleisten wäre. In einem zweiten Schritt wird der Anlagenzuschnitt auf eine vertretbare Größenordnung im Sinne einer Teilautonomie eines Standortes näher untersucht. Wie Abbildung 7 anhand der stündlichen PV-Ertragsprofile pro Monat aufzeigt, ist eine solche Teilautonomie in den Monaten März bis September denkbar, da sich in diesem Zeitraum ein ausreichender Ertrag pro kWp über 6 Stunden realisieren lässt.



**Abb. 7:** Ertrag durch eine PV-Anlage in Nordeuropa für die Monate Mai und Dezember; Beispiel Raum Berlin (Prenzlau) (eigene Darstellung).

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0-1 Uhr												
01 -02 Uhr												
02 - 03 Uhr												
03 - 04 Uhr												
04 -05 Uhr					1.7	11.9	3.9					
05 -06 Uhr				3.2	32.3	40.6	33	10.4				
06 - 07 Uhr			2.9	64.1	106.2	108.9	92.7	69.6	28.2	0.1		
07 - 08 Uhr		0.2	87.8	192.4	234.7	225.9	205.6	185.1	147.1	53.7		
08 -09 Uhr	4.8	69.9	215.3	335.4	365.1	349	324.5	316.3	274.7	191.1	40.4	3.9
09 - 10 Uhr	79.2	192.1	324.4	452	466.9	443.7	419	425.8	381.5	279.2	106.2	58.2
10 -11 Uhr	116.7	257.9	388.9	522.3	526.3	500.8	476.6	484.6	426.7	323.8	156.3	92.8
11 -12 Uhr	146	289.2	428.7	549.3	543.8	517.3	483.4	504.7	455.2	357.8	198.7	112.1
12 -13 Uhr	157.5	311.6	452	550.7	539.2	511.9	489.2	496.4	446.4	367.5	199.3	114.7
13 - 14 Uhr	131.6	302.8	425.4	506.6	500.7	480.5	460.9	456.9	401.2	307.8	142	97.3
14 -15 Uhr	92.5	241.4	343.2	420.8	417.2	412.4	402	380.8	321.3	228.6	83.5	55.8
15 - 16 Uhr	33.5	136.4	251.2	321	333.3	340.6	334.4	300.7	230.2	133.2	22.2	4
16 -17 Uhr		37.1	147.8	208.5	227.4	242.4	239.5	207.6	132.8	23.2		
17 - 18 Uhr		0.2	29.1	85.3	111.6	130.5	131.4	98.7	31.3			
18 - 19 Uhr			12	37.8	50.6	50.3	26.2	0.3				
19 - 20 Uhr				7	19	15.9	1.4					
20 - 21 Uhr					0.5							
21 -22 Uhr												
22 - 23 Uhr												

**Abb. 8:** Ertrag einer PV-Anlage in Wattstunden pro kWp im Großraum Berlin (Prenzlau) (aus: Solargis 2023a).

## 5.2 Differenzierte Betrachtung und Abstimmung des Energiebedarfes von Standorten

### Energiebedarf des Standortbetriebes

Die spezifischen Verbrauchswerte des Feldlagerbetriebes können an dieser Stelle nur bedingt ermittelt werden. Obgleich für den grundlegenden Leistungsbedarf des Feldlagers Gleichzeitigkeitsfaktoren bereits bestimmt worden sind, entspricht dieser Wert

nicht den realen Nutzungsprofilen des Lagers. Er zeigt auf, wie viele Verbraucher gleichzeitig in Betrieb sind und somit auf welche Nennleistung das Energiesystem auszuliegen ist. Der tatsächliche Verbrauch liegt jedoch unter der Nennleistung des ausgelegten Systems. Um den täglichen Energiebedarf (kWh/d) aufzuzeigen, sollen hier verschiedene Nutzungsprofile für die Verbraucher näherungsweise abgeschätzt werden. Die einzelnen Nutzungsprofile sind in Tabelle II im Anhang differenziert dargestellt. Grundsätzlich soll dabei zwischen zwei wesentlichen Profilen unterschieden werden: Zum einen wird, wie in Kapitel 5.1 dargestellt, die Wasserstoffherzeugung innerhalb der 6 ertragreichsten Stunden der PV-Anlage (vormittags – nachmittags) betrieben. In diesem Zeitraum ist das Netz besonders durch einen wesentlichen Großverbraucher, die Elektrolyse, belastet. Innerhalb der restlichen 18 Stunden geht der Ertrag der PV-Anlage zurück. Die Energie wird dann je nach Tageszeit nur noch teilweise oder gar nicht durch die PV-Anlage direkt gedeckt, sondern durch zuvor bereits erzeugte und in Batterien gespeicherte Energie in das Stromnetz des Lagers eingespeist. Innerhalb dieser 18 Stunden sind es die einzelnen Systeme des Feldlagerbetriebes, die das Verbrauchsprofil bestimmen.

Für den Standortbetrieb in Szenario 1 (2 Bataillone) wird, wie in Kapitel 4.3 erläutert, eine installierte Leistung von etwa 5 MW angenommen. Für die einsatzrelevante Infrastruktur (Lazarett, IT und Verteidigungssystem) besteht ein Leistungsbedarf von weiteren 1,1 MW, der jederzeit abrufbar sein muss. Damit ergibt sich eine Leistung von ca. 6,1 MW, die durch die Photovoltaikanlage für die gesamte Infrastruktur zur Verfügung gestellt werden muss. Für den Liegenschaftsbetrieb ohne die Wasserstoffherzeugung werden so 75.785 kWh/d notwendig.

In Szenario 2 ergibt sich eine zur Verfügung zu stellende Kapazität von 15 MW, zuzüglich der 1,3 MW für die weitere einsatzrelevante Infrastruktur. Damit wird eine Erzeugungsleistung für die Infrastruktur von insgesamt etwa 16,3 MW notwendig. Der damit assoziierte Energieverbrauch muss durch die PV-Anlage bereitgestellt werden. Auch hier wird der Energiebedarf in der Nacht oder bei unzureichender Sonneneinstrahlung durch Batteriespeicher bereitgestellt. Es ergibt sich ein Energiebedarf von 195.795 kWh/d für den Standortbetrieb, den es durch die PV-Anlage zu decken gilt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es dennoch eines grundlastfähigen Energiesystems bedarf, das den Betrieb des Lagers dauerhaft gewährleisten kann. Hierfür sollten Generatoren-Sets mit Dual-Fuel-Wasserstoffverbrennungsmotoren vorgehalten werden, die Wasserstoff wie auch Diesel/Syn-Fuels nutzen können.

### *Auswirkungen auf den Energiebedarf für die Mobilität und Energiespeicherung*

Um alle Fahrzeuge, wie in den beiden Szenarien angegeben, zu betanken, ist die Herstellung von 1.075 kg/d Wasserstoff für die beiden Bataillone und 3.565 kg/d für die Brigade nötig.

Um den Wasserstoff für den in Szenario 1 angegebenen Fahrzeugpark in den Betriebsstunden der Photovoltaikanlage (ca. 6 Stunden) zu erzeugen, muss eine Leistung von zusätzlich 10.875 kW installiert werden. Dieser Wert umfasst die gesamte Kette der Wasserförderung, -aufbereitung sowie die Wasserstoffherzeugung und -speicherung. Dafür sind neben dem Energiebedarf von ca. 56.830 kWh/d für die Elektrolyse weitere 5.250 kWh/d für Wasserbereitstellung und Wasserstoffspeicherung notwendig. Somit liegt der gesamte Energiebedarf für die Wasserstoffherzeugung bei 62.080 kWh/d.

**Tab. 4:** Energieverbrauch und Leistung am Tag und in der Nacht für die beiden Szenarien.

Verbraucher	Szenario 1			Szenario 2		
	Leistung (kW)	Energieverbrauch am Tag (6 h) (kWh/d)	Energieverbrauch in der Nacht (18 h) (kWh/d)	Leistung (kW)	Energieverbrauch am Tag (6 h) (kWh/d)	Energieverbrauch in der Nacht (18 h) (kWh/d)
Feldlagerbetrieb	5.005	14.623	44.842	15.015	43.869	135.425
Weitere Infrastruktur	1.130	4.080	12.240	1.300	4.350	13.050
Wasserstoffherzeugung	10.875	62.080	0	34.655	206.425	0
Batterieelektrische Fahrzeuge	2.195	13.170	0	5.491	32.946	0
Batteriespeicherverluste	70	1.680	0	176	4.220	0
Energieverbrauch am Tag und in der Nacht	19724	95.633	57.082	56.645	291.810	145.575
Energieverbrauch gesamt	19.274	152.715		56.645	439.384	

Neben den wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen ist für die batterieelektrischen Fahrzeuge eine zu installierende Leistung von etwa 2.195 kW zu berücksichtigen, um die notwendige Energie von 13.170 kWh innerhalb von 6 Stunden bereitzustellen.

In Szenario 2 ist aufgrund des größeren Fuhrparks auch die zu installierende Leistung für die Wasserstoffherzeugung entsprechend höher. So wird eine Leistung von 34.655 kW erforderlich, um ausreichend Wasserstoff während der Betriebsstunden (ca. 6 Stunden) der PV-Anlage zu erzeugen. Der Energiebedarf beläuft sich damit auf etwa 215.775 kWh, um den Bedarf von Wasserförderung, -aufbereitung sowie Wasserstoffherzeugung und -speicherung zu decken.

Darüber hinaus kommt eine weitere zu installierende Leistung von etwa 5.491 kW hinzu, um die 32.946 kWh/d für die Elektrofahrzeuge der Brigade innerhalb von 6 Stunden bereitzustellen.

### Gesamter Energiebedarf

Die PV-Anlage muss somit für die 2 Bataillone (Szenario 1) so ausgelegt sein, dass sie eine Leistung 19.274 kW und einen maximalen Energiebedarf von etwa 152.860 kWh/d erzeugen kann. Für die Brigade (Szenario 2) wird eine PV-Anlage erforderlich, die eine Leistung von 56.645 kW und einen maximalen Energiebedarf von 448.735 kWh/d bereitstellen kann. Tabelle 4 zeigt deren Zusammensetzung.

### 5.3 Möglichkeiten eines teilautonomen Betriebes von Standorten

Die Bedarfsstrukturen für die volle Autonomie eines Standortes sind erheblich.

Im Sinne der Optimierung von Aufwand und Nutzen wurde in der Studie eine Alternative betrachtet, die eine Teilautonomie des Standortes für den Zeitraum von günstiger Sonneneinstrahlung im Sommerhalbjahr ermöglicht. Dabei wird für die angenommene geographische Lage eines Standortes im Großraum Berlin ein Zeitraum von Mitte März bis Mitte September betrachtet. Die Photovoltaik kann im Winterhalbjahr nur eine zum Sommerhalbjahr erheblich abgestufte Leistung erbringen. Abbildung 7 macht deutlich, dass dabei in den Wintermonaten (November–Januar) nur eine völlig unzureichende Leistung erreicht werden kann. Es zeigt sich, dass eine relevante Leistung nur in den sechs Sommermonaten realisiert werden kann. Dabei wird in den weiteren Betrachtungen von einer Nutzungsdauer von 6 Stunden ausgegangen, in denen die Wasserstoffherzeugung effizient arbeiten kann.

Bei einer Auslegung für das gesamte Jahr muss der Monat Dezember mit der ungünstigsten Sonneneinstrahlung als Basis dienen. Dies führt zu einer sehr großen PV-Anlage mit erheblichem Flächenbedarf, deren Größe im Rest des Jahres nicht benötigt wird. Bei einer Nutzung von 6 Monaten dient der Monat März als Referenz. Die PV-Anlage benötigt erheblich weniger Fläche. Die restlichen 6 Monate des Winterhalbjahres werden nur zu einem geringen Teil über Photovoltaik versorgt.

Zur Sicherstellung der Grundlastfähigkeit des konzipierten Energiesystems und zur bedarfsgerechten Versorgung in den Wintermonaten sind zusätzlich Verbrennungsmotoren erforderlich. Die assoziierten Leistungsbedarfe für diese Aggregate sind Kapitel 5.2 zu entnehmen. Eine erheblich nachhaltigere Lösung ließe sich durch den Einsatz von Wasserstoffverbrennungsmotoren für diese Form der Stromversorgung realisieren. Die Wasserstoffverbrennungsmotoren könnten im Sommerhalbjahr als Notstromversorgung mit selbst erzeugtem Wasserstoff betrieben werden und würden im Winter als Dual-Fuel-Motoren mit synthetischen Fuels oder Diesel betrieben werden können. Sie bilden somit eine grundlastfähige Energieerzeugung, die den Betrieb des Feldlagers sicherstellen. Der Einsatz von Brennstoffzellen für diese Einrichtung wird wegen ihrer geringeren Variabilität nicht empfohlen. Sie benötigen Wasserstoff für den Betrieb, der im Winter aufwändig antransportiert werden müsste.

Aufgrund der geringen Zuverlässigkeit der Photovoltaik insbesondere im Winterhalbjahr müsste zur Absicherung der Versorgung die installierte Leistung der Aggregate dem kompletten Leistungsbedarf entsprechen. Wie in Kapitel 5.2 aufgezeigt, bedeutet dies für Szenario 1 (2 Bataillone) einen Energiebedarf von 5 MW plus weiterer 1,1 MW für die einsatzrelevante Infrastruktur. Der gesamte Energiebedarf beträgt 6,1 MW. Für Szenario 2 liegt dieser Wert bei 16,3 MW. Der Betrieb einer Elektrolyse für die Wasserstoffherzeugung im Winterhalbjahr ist für dieses Szenario nicht vorgesehen; sämtliche

Fahrzeuge würden mit Diesel oder synthetischen Fuels betrieben. Die eingesetzten Motoren der Fahrzeuge wären für den bivalenten Betrieb mit Wasserstoff oder synthetischen Fuels auszulegen. Eingesetzte batterieelektrische Fahrzeuge müssten über entsprechende Aggregate geladen werden. Dies ließe sich in Phasen der Nichtnutzung von Einrichtungen der Infrastruktur realisieren.

## 6 Dimensionierung der PV-Anlage

Eine PV-Anlage muss so dimensioniert werden, dass sie in den Stunden mit genug Sonnenenergie tagsüber ausreichend Energie für den Betrieb des Feldlagers und die Herstellung von Wasserstoff, das Laden der batterieelektrischen Fahrzeuge und das Laden der Batteriespeicher für den Betrieb bei reduzierter Leistung oder beim Ausfall der PV-Anlage sicherstellt. Für den Platzbedarf einer Bodenflächen-PV-Anlage werden 10 m<sup>2</sup> pro kWp bzw. 1 ha pro MWp installierter Leistung angenommen.<sup>75</sup> Dabei erfolgt die Betrachtung für Mitteleuropa zunächst am gewählten Beispiel Großraum Berlin.

### 6.1 Auslegung der PV-Anlage für die Ganzjahresversorgung (vollautonome Versorgung)

Zur Auslegung der Photovoltaikanlage sollen die Nennleistung der Infrastruktur und die erforderlichen Kapazitäten für den Fahrzeugpark berechnet werden. Um den gesamten Energiebedarf für Szenario 1 mit den beiden Bataillonen von etwa 153.000 kWh/d (ca. 153 MWh/d) zu decken, nimmt die PV-Anlage eine Fläche von 285 ha (2,85 km<sup>2</sup>) ein und entspricht einer installierten Leistung von knapp 285 MWp. Diese Werte beziehen sich auf die Sonnenenergie im Dezember und würden somit den Bataillonen eine autarke Energieversorgung über das ganze Jahr ermöglichen. Die bislang größte PV-Anlage in Deutschland verfügt über eine installierte Leistung von 187 MWp. Dies zeigt, wie aufwendig ein vollautonomer Betrieb bei Einsatz von Photovoltaik wäre. Der Aufbau einer derartigen Anlage erscheint nicht realistisch.

Die Brigade mit ihrem höheren Energieverbrauch von ca. 440.000 kWh/d braucht eine entsprechend größere PV-Anlage. Ihre Fläche bemisst sich sogar auf 830 ha (8 km<sup>2</sup>) und eine 830 MWp installierte Leistung bei Auslegung auf den Monat Dezember.

Es ist notwendig, noch einmal zu betonen, dass bei allen Szenarien energieintensive Einheiten wie z. B. Schützenpanzer Marder als Treibstoff synthetische Fuels nutzen müssen. Dafür müsste auf bekannte Logistikketten zurückgegriffen werden.

<sup>75</sup> „Die spezifische Flächeninanspruchnahme hängt einerseits von der Entwicklung des Überbauungsgrads der Flächen bis zum Jahr 2030 ab und andererseits von der Entwicklung der Moduleffizienz im gleichen Zeitraum (je effizienter das Modul, desto höher ist die Modulleistung bei gleicher Modulgröße). Es wird angenommen, dass der Überbauungsgrad der Flächen von der heutigen, anhand von mittleren Modulwirkungsgraden und Neigungswinkeln rückgerechneten Grundflächenzahl von 0,43 bis zum Jahr 2030 auf 0,60 ansteigt, wobei der Anstieg in eine Sättigung läuft. Mit dem geringeren Abstand der Modulreihen geht ein geringerer Neigungswinkel der Module einher. Dieser sinkt von rund 25° im Jahr 2021 auf 20° im Jahr 2030. Hinsichtlich der Moduleffizienz wird von einem Anstieg von gut 20 % heute auf knapp 23 % im Jahr 2030 ausgegangen. Der spezifische Flächenbedarf von PV-FFA sinkt somit von 1,05 ha/MW heute auf rd. 0,7 ha/MW im Jahr 2030.“ (Günneweig et al. 2022: 24).

Innerhalb eines Jahres würden in einem solchen vollautonomen Betrieb des Lagers dennoch rund 8,4 Mio. Liter Diesel in Szenario 1 und 18 Mio. Liter Diesel in Szenario 2 eingespart werden.

## 6.2 Auslegung der PV-Anlage für das Sommerhalbjahr (teilautonome Versorgung)

Die PV-Anlage wird in diesem Ansatz auf den März als Monat mit der schwächsten Sonneneinstrahlung im Sommerhalbjahr ausgelegt. Unter diesen Annahmen würde eine PV-Anlage mit einer installierten Leistung von 49 MWp ausreichen, um den Energiebedarf der beiden Bataillone von ca. 153.000 kWh/d (ca. 153 MWh/d) zu decken. Die Fläche einer solchen Anlage bemisst sich auf rund 49 ha (0,49 km<sup>2</sup>). Dies würde den Bataillonen eine autarke Energieversorgung über das Sommerhalbjahr (6 Monate, Mitte März bis Mitte September) ermöglichen.

Die Brigade mit ihrem höheren Energieverbrauch von etwa 440.000 kWh/d braucht eine entsprechend größere PV-Anlage. Ihre Fläche bemisst sich auf 143 ha (1,43 km<sup>2</sup>) und 143 MWp installierte Leistung bei Auslegung auf den Monat März.

Innerhalb eines halben Jahres reduziert sich der Dieselbedarf so um rund 4,2 Mio. Liter Diesel in Szenario 1 und 9 Mio. Liter Diesel in Szenario 2.

## 6.3 Auslegung der PV-Anlage auf die fünf sonnenreichsten Monate (teilautonome Versorgung)

Zusätzlich wurde eine weitere Sensitivität betrachtet. Legt man die Anlage auf die ertragreichsten fünf Monate aus, so kann der Energiebedarf der beiden Bataillone von ca. 153.000 kWh/d (ca. 153 MWh/d) durch eine 39 MWp PV-Anlage gedeckt werden. Die PV-Anlage würde eine Fläche von 39 ha (0,39 km<sup>2</sup>) umfassen. Diese Werte würden den Bataillonen eine autarke Energieversorgung über die Monate April bis August ermöglichen.

Um den Energiebedarf von etwa 440.000 kWh/d für die Brigade durch eine PV-Anlage unter diesen Annahmen zu decken, würde eine 113 MWp PV-Anlage mit einer Fläche von 113 ha (1,13 km<sup>2</sup>) notwendig.

Innerhalb dieser fünf Monate könnten Treibstofftransporte mit einer Kapazität von 3,5 Mio. Liter Diesel in Szenario 1 und 7,5 Mio. Liter Diesel in Szenario 2 eingespart werden.

## 6.4 Auslandseinsatz

In den vorangegangenen Kapiteln wurde aufgezeigt, wie aufwendig eine autonome Energieversorgung durch erneuerbare Energien in Mitteleuropa ist. Dieser Umstand ist vor allem auf die wenigen Sonnenstunden zurückzuführen. Je nach Region ließe sich ein energieautonomes Militärcamp im Auslandseinsatz einfacher realisieren. Um diesem

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0-1 Uhr												
01 -02 Uhr												
02 - 03 Uhr												
03 - 04 Uhr												
04 -05 Uhr												
05 -06 Uhr					2.3	17.7	29.7	16.5	3.6	0.1		
06 - 07 Uhr			10.7	60.5	101.1	111.9	98.8	77	55.4	20	0.2	
07 - 08 Uhr	16.7	51.1	121.1	199.1	251.1	265.2	250.8	242.4	246.2	197.7	85.7	20.2
08 -09 Uhr	176.6	217.7	271	360	414	428.3	416.1	422.8	438.8	389.3	264.8	180.2
09 - 10 Uhr	308.6	349.8	407.2	498.8	546	560	551.9	566.1	592.2	539.6	387.4	317.2
10 -11 Uhr	398	446.9	515.2	598.2	639.7	654.3	652.4	669.2	703.4	645.9	471.3	408
11 -12 Uhr	456.9	513.2	586.7	651.4	692.5	702.4	705.7	728.9	756	698.4	510.1	450
12 -13 Uhr	469.7	558.9	641.7	649.8	682.7	698.2	707.8	730.2	744.5	685.3	500.9	441.1
13 - 14 Uhr	422.4	500.4	572.3	591.8	625.2	648.6	661.4	671.9	675.2	598.6	434.5	387.1
14 -15 Uhr	331	392.2	442.3	487.1	521	554.8	570.7	574.2	560.9	465	317.7	293.9
15 - 16 Uhr	218.5	278.7	310.9	347.1	382.5	423.2	437.2	432.1	397.8	295.6	169.3	141.4
16 -17 Uhr	37.9	127.6	171.9	196.7	228.3	267.2	279.1	263.3	203.9	86.4	13.8	5.5
17 - 18 Uhr		3.2	29.2	63	89	116.3	123.1	97.5	26.6	0.1		
18 - 19 Uhr				1.7	12.5	27.1	23.8	6.7				
19 - 20 Uhr							0.1					
20 - 21 Uhr												
21 - 22 Uhr												
22 - 23 Uhr												
23 - 00 Uhr												
kwh/kWp pro Tag	2836.3	3439.7	4080.2	4707.5	5203.3	5487.2	5495.4	5485.9	5400.9	4621.9	3155.5	2644.6

**Abb. 9:** Ertrag einer PV-Anlage in Watt pro kWp in Masar-e Scharif (aus: Solargis 2023a).

Aspekt innerhalb der Arbeit ebenfalls Rechnung zu tragen, soll die Dimensionierung der PV-Anlage anhand der Ertragswerte für Afghanistan (Masar-e Scharif) verdeutlicht werden. Wie Abbildung 8 zeigt, erreicht eine Photovoltaikanlage in Afghanistan im Dezember aufgrund längerer Sonnenstunden und einer höheren Einstrahlungsintensität einen etwa 5-mal höheren Ertrag als eine vergleichbare Anlage im Großraum Berlin. Im sonnenreichsten Monat in Masar-e Scharif (Juli) erzeugt eine vergleichbare PV-Anlage rund 23 % mehr Strom als im sonnenreichsten Monat (Mai) in Berlin.

Insbesondere die geringeren jahreszeitlichen Unterschiede im Ertrag sind für die Auslegung der PV-Anlage im Kontext eines vollautonomen Betriebes des Militärcamps und der damit assoziierten Wasserstoffproduktion für den Fuhrpark vorteilhaft. So erzeugt eine PV-Anlage in Masar-e Scharif im Dezember pro Tag rund halb so viel Energie wie im sonnenreichsten Monat (Juli). Eine Anlage in Berlin produziert im Dezember lediglich ca. 12 % des eigenen Ertrages des sonnenreichsten Monats Mai.

Dies bedeutet, dass für eine Ganzjahresversorgung des Camps in Afghanistan eine PV-Anlage mit 58 MWp und einer Fläche von 58 ha für die 2 Bataillone (Szenario 1) notwendig werden würde. Um eine Brigade (Szenario 2) zu versorgen, würde eine Anlagenleistung von 167 MWp und einer Fläche von 167 ha nötig werden. Für einen teilautonomen Betrieb über ein halbes Jahr (April bis September) müsste die Anlage über eine Leistung 33 MWp und eine Fläche von 33 ha für die 2 Bataillone verfügen. Die Anlage wäre für einen solchen teilautonomen Betrieb der Brigade entsprechend größer auf etwa 94 MWp und einer Fläche von 94 ha auszulegen. Für die sonnenreichsten fünf Monate (Mai–September) reduziert sich die Anlage jedoch nur geringfügig. So würde für die 2 Bataillone eine installierte Leistung von 30 MWp (30 ha) und für die Brigade eine Anlage mit 85 MWp (85 ha) notwendig.

## 6.5 Bewertung

Tabelle 5 fasst die Ergebnisse aus den gewählten Szenarien zusammen. Dabei zeigt sich, dass der Ansatz einer vollautonomen Einheit von der Größe des gewählten Verbandes abhängt und für das Szenario 1 durchaus als realistisch angesehen werden könnte. Ein Einsatz regenerativer Energien für eine Vollautonomie von Verbänden der Größe einer Brigade (Szenario 2) ist vor dem Hintergrund des erforderlichen Flächenbedarfs für eine PV-Anlage nicht realistisch.

**Tab. 5:** Erforderliche Leistung der PV-Anlage für die verschiedenen gewählten Szenarien.

	Leistung der PV-Anlage in MWp und damit Flächenbedarf in ha	
	Szenario 1 (2 Bataillone)	Szenario 2 (Brigade)
Großraum Berlin (vollautonome Versorgung)	285	830
Großraum Berlin (teilautonome Versorgung; 6 Monate)	49	143
Großraum Berlin (teilautonome Versorgung; 5 Monate)	39	113
Masar-e Scharif (vollautonome Versorgung)	58	167

Die Auswertung in der Tabelle 4 zeigt, dass der Ansatz von teilautonomen Standorten zum Beispiel im Großraum Berlin realistisch ist. Auch eine lokale Wasserstoffherzeugung für kleinere Verbände (Szenario 1) kann sehr wohl ein Ansatz sein. Allerdings wäre in diesen Fällen für das Winterhalbjahr auf eine Erzeugung von Wasserstoff auf der Lokation zu verzichten. Durch den Einsatz von bivalenten Wasserstoffverbrennungsmotoren der ohnehin empfohlenen und in den Szenarien berücksichtigten Anlagen für die Notstromversorgung könnte die Mobilität im Sommer mit Wasserstoff und im Winter mit synthetischen Fuels realisiert werden.

Das gewählte Beispiel von Masar-e Scharif zeigt, wie sehr die Möglichkeit zum Einsatz von PV-Anlagen für den autonomen Betrieb von der geographischen Lage abhängig ist. Für Fall 1 zeigt sich mit einem Flächenbedarf von 58 ha für die vollautonome Versorgung ein durchaus relevanter Ansatz, insbesondere vor dem Hintergrund der seinerzeitigen Campgröße von ca. 375 ha. Aber auch hier zeigen sich klare Grenzen für den Einsatz zur Versorgung größerer Verbände.

## 7 Logistischer Aufwand

Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Logistikerfordernisse für den Aufbau eines Standortes entsprechend der gewählten Szenarien. Dabei zeigt sich für alle gewählten Szenarien ein substantieller zusätzlicher Logistikaufwand für die Errichtung des Standortes mit regenerativer Strom- und Wasserstoffherzeugung. Die Ausrüstung eines Standortes für kurze Zeitperioden erscheint für alle gewählten Szenarien nicht realistisch. Für den Einsatz von beweglichen Verbänden zur Erlangung einer Autonomie ist dieses Konzept damit nicht geeignet.

**Tab. 6:** Zusätzliche Transporterfordernisse für den Einsatz von PV-Anlagen und Wasserstoffherzeugung.

Anlagenelemente des Standortes	Großraum Berlin (vollautonom)		Großraum Berlin (teilautonom; 6 Monate)		Großraum Berlin (teilautonom; 5 Monate)		Masar-e Scharif (vollautonom)	
	40 Fuß Container		40 Fuß Container		40 Fuß Container		40 Fuß Container	
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 1	Szenario 2
Wasserstoffherzeugung	15 <sup>76</sup>	48	15	48	15	48	15	48
Wasseraufbereitung	1 <sup>77</sup>	3	1	3	1	3	1	3
Wasserstoffspeicher	56 <sup>78</sup>	148	56	148	56	148	56	148
Wasserstoffkompression	3 <sup>79</sup>	10	3	10	3	10	3	10
Batteriespeicher	33 <sup>80</sup>	83	33	83	33	83	33	83

**76** H-Tec-Systems gibt für seine 2 MW Elektrolyseur eine Anlagengröße von „3 Outdoor Containern“ an. Das Ladegestell der Anlage hat eine Abmessung von 6,75 x 2,7 x 3,2 m pro Container (siehe H-TEC Systems 2023). Damit lässt sich die Anlage nicht in drei Standardcontainer mit 20 Fuß transportieren. Zur Vereinfachung sollen hier 3 40 Fuß Container für die Anlage angenommen werden.

**77** Als Referenz für eine Trinkwasseraufbereitungsanlage wurde das System von VISION AQUA und GreenOsmo genutzt. In einem Container lassen sich bis zu 144.000 Liter Wasser aufbereiten (siehe Vision Aqua 2023).

**78** Pro Drucktankcontainer lassen sich rund 1.000 kg H<sub>2</sub> speichern (siehe Kapitel 4.2). Die Speicherkapazität setzt sich wie folgt zusammen: 1. Tankkapazitäten, um die wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge eine Woche zu versorgen (Szenario 1 ca. 7.050kg; Szenario 2 ca. 25.000 kg). 2. Wasserstofftanks als strategische Reserve, um das Feldlager 1 Woche mit Energie durch rückverstromten Wasserstoff zu versorgen (Szenario 1 ca. 47.600 kg; Szenario 2 ca. 147.200 kg).

**79** Für die Wasserstoffverdichter wird ein Ionen-Kompressor zugrunde gelegt. Eine solche Einheit wird in einem 14 Fuß Container untergebracht und verfügt über einen Durchsatz von 33,34 kg/h (siehe Linde AG 2023).

**80** Es wird eine Kapazität von 4,2 MW/h pro Container angenommen (siehe Kapitel 4.2). Die Speicherkapazität setzt sich wie folgt zusammen: 1. Batteriespeicher für eine zusätzliche Tankfüllung aller batterieelektrischen Fahrzeuge (Szenario 1 ca. 97 MW/h; Szenario 2 ca. 243 MW/h). 2. Batteriespeicher für den täglichen Nachtbetrieb des Feldlagers (Szenario 1 ca. 60 MW/h; Szenario 2 ca. 155 MW/h).

Generatoren-Sets (Dual Fuel Motoren für H <sub>2</sub> und Syn Fuels)	9 <sup>81</sup>	22	9	22	9	22	9	22
Tanks f. syn. Fuel/ Diesel	8	22	8	22	8	22	8	22
Stromrichter (Inverter/ Konverter)	30	70	10	20	10	20	10	20
Regelungstechnik	5	10	5	10	5	10	5	10
Sonstiges (10%)	15	35	13	32	13	32	13	32
Zwischensumme	175	453	153	398	153	398	153	398
PV-Module	762 <sup>82</sup>	2218	131	383	105	303	155	447
PV-Anlage Unterkonstruktion	285 <sup>83</sup>	830	49	143	39	113	58	167
Gesamt	1222	3501	333	924	297	814	366	1012

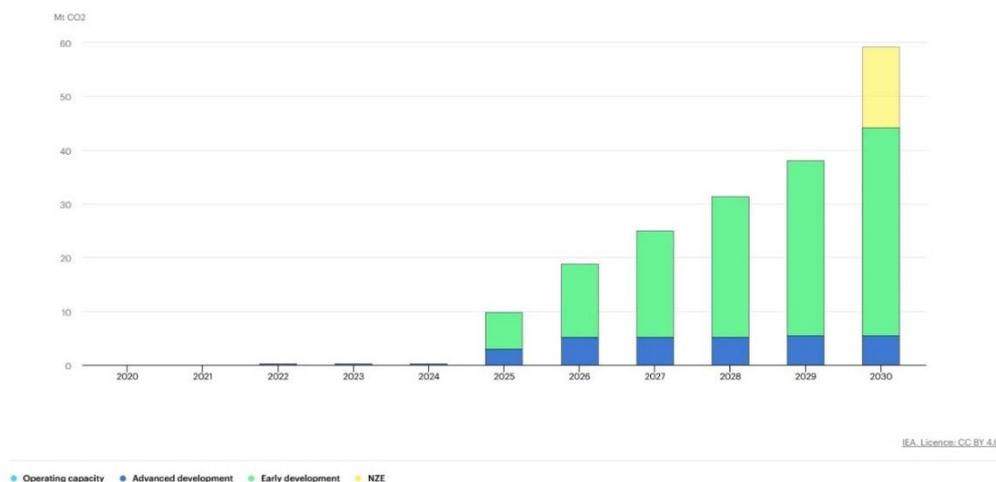
Bei einem längerfristigen Einsatz von Verbänden entsprechend Szenario 1 ist ein Einsatz zwar grundsätzlich denkbar. Kleinere Teileinheiten könnten dabei über lokale Logistikketten z. B. über Containerlösungen mit H<sub>2</sub> aus einem zentralen Standort versorgt werden. Lange Versorgungswege würden vermieden. Es wäre nur für den Transport verbleibender Syn-Fuel-Bedarfsmengen ein Transport über längere Distanzen abhängig von der geographischen Lage erforderlich.

Allerdings wird bei der Betrachtung der in Tabelle 5 dargestellten Transportvolumina der extreme logistische Aufwand insbesondere für den Aufbau deutlich. Selbst bei dem günstigsten Szenario 1 mit Teilautonomie (5 Monate) wird allein für die PV-Anlage und die Elektrolyse samt Speichercontainern ein Transport von 297 40-Fuß-Containern zusätzlich notwendig, das herkömmliche System zur Energieversorgung mit Dieselgeneratoren und Tanks oder ähnlichen Anlagen wird als Back-up-System und für die verbleibenden 7 Monate als Hauptversorgungseinheit trotzdem noch benötigt. Hinzu kommt der logistische Bedarf für die üblichen Einrichtungen eines Standortes/Feldlagers (siehe Tabelle II im Anhang).

**81** Es wird 1 MW Generatoren Set pro 40 Fuß Container angenommen. Aggregate wurden entsprechend der Leistung der Infrastruktur sowie dem Beladen der Fahrzeuge innerhalb von 6 Stunden ausgelegt. Die Wasserstoffherzeugung wurde nicht berücksichtigt.

**82** Es wurde folgende Berechnungsgrundlage angestellt: Jedes Modul (400 Wp) wurde mit einer Abmessung von 1722/1134/30 mm und einem Gewicht von 21,2 kg angenommen. In einem 40 Fuß Container lassen sich so 936 Module transportieren. In einem 40 Tonnen LKW etwa 1.008 Module (siehe Solar Fabrik GmbH 2022: 4).

**83** Die Firma Alumero gibt für ihre optimierte Unterkonstruktion einen Wert von einem 40 Fuß Container pro installierten MW an PV-Fläche an (siehe ALUMERO Systematic Solutions GmbH 2023).



**Abb. 10:** Direct-Air-Capture-Kapazitäten bis 2030 in Mt. CO<sub>2</sub> (aus: IEA 2022).

## 8 Lokale Erzeugung von E-Fuels

In den Anwendungsgebieten der Bundeswehr können sich Wasserstoffverbrennungsmotoren für Fahrzeuge mittlerer Gewichtsklassen eignen. Um den hier betrachteten Szenarien (2 Bataillone, 1 Brigade) eine größere Autonomie einzuräumen, wird im nachfolgenden Kapitel die Möglichkeit der Herstellung von E-Fuels, welche Dank der höheren volumetrischen Energiedichte auch schwerere Fahrzeuge (bspw. Schützenpanzer Marder) antreiben können, näher diskutiert.

Modulare E-Fuel-Anlagen für Containerlösungen sind aktuell jedoch in einer ersten Erprobungsphase. So verfügen diese Systeme bislang über eine Produktionskapazität von 2 Barrel Syn-Fuels pro Tag.<sup>84</sup> Obgleich eine Skalierung dieser Systeme bereits angestrebt wird und sich Anlagen mit einer installierten Leistung von 1 MW in der Entwicklung befinden,<sup>85</sup> ist eine abschließende Bewertung zum jetzigen Zeitpunkt nur schwer möglich.

Für die Herstellung von E-Fuels werden allerdings zusätzlich zu Wasserstoff ebenfalls große Mengen an Kohlenstoff benötigt. Dieser müsste, um die autonome Versorgung des Feldlagers mit E-Fuels zu gewährleisten, durch eine Direct-Air-Capture Anlage (DAC-Anlage) aus der Umgebungsluft gewonnen werden. Solche Systeme finden bisher nur vereinzelt in der Industrie Anwendung. Wie Prognosen der IEA aufzeigen, wird für Direct-Air-Capture Systemen im zivilen Markt nur eine begrenzte Rolle gesehen. So werden die DAC-Kapazitäten bis 2030 auf ca. 60 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr geschätzt.<sup>86</sup>

Für die vorliegenden Szenarien zur Energieautonomie der Streitkräfte wäre der Einsatz derartiger Systeme zur CO<sub>2</sub>-Gewinnung anzunehmen, um eine Vor-Ort-Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen realisieren zu können.

<sup>84</sup> Pfeifer et al. 2022.

<sup>85</sup> Pfeifer et al. 2022.

<sup>86</sup> IEA 2022.

Allein der Energiebedarf einer Direct-Air-Capture-Anlage zur Gewinnung von CO<sub>2</sub> aus der Luft wäre erheblich. Dieser liegt je nach Verfahren bereits bei ca. 1,2–2,5 MWh pro t CO<sub>2</sub>.<sup>87</sup>

Für die Erzeugung von synthetischen Fuels liegen unterschiedliche Angaben zum Energiebedarf vor.<sup>88</sup> Für den Prozess, bei dem aus Wasserdampf und CO<sub>2</sub> das Synthesegas (Methan) hergestellt und z. B. über das Fischer-Tropsch-Verfahren zu Syn-Fuels weiterverarbeitet werden kann, wird zusätzliche Energie<sup>89</sup> benötigt. Auf eine vertiefende Betrachtung soll im Rahmen dieser Ausarbeitung verzichtet werden.

Es bleibt allerdings festzuhalten, dass sich durch eine derartige Erweiterung des Camps selbst beim günstigsten Fall (Teilautonomie 5 Monate) ein substantiell höherer Logistikaufwand erwarten lässt, der nicht realisierbar erscheint. Auch das vor Ort erforderliche Fachpersonal für die Produktionsanlage wäre ein erwartbarer Engpass. Die Effizienz einer solchen Anlage mit einem Leistungsbetrieb von gesichert 5 bis 6 Stunden pro Tag wäre nicht ausreichend.

## 9 Ausblick: Energieautonomie von Liegenschaften

In der hier vorliegenden Arbeit werden zwei Szenarien verglichen, welche sich lediglich durch die Anzahl an Soldaten und die damit verbundene Hochskalierung der Verbraucher im Feldlager und der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge unterscheiden. Beide Szenarien gleichen sich in den Grundannahmen, die das Lager definieren. Es handelt sich um Feldlager, die je zwei Bataillone oder eine Brigade in einem Einsatzgebiet der Bundeswehr aufnehmen können. Diese Art des Feldlagers kann sowohl im Falle der Landes- und Bündnisverteidigung als auch in Friedens- oder Antiterrormissionen errichtet werden und die genannten Truppenkontingente mittel- oder längerfristig stützen. Durch die oben beschriebene PV-Anlage und Wasserstoffherzeugung wäre das Feldlager, je nach Auslegung der Anlage, zumindest teilautark mit Energie versorgt. Ein solches Feldlager kann im Falle der Beendigung des Einsatzes oder einer Verlegung der Truppen abgebaut und andernorts gegebenenfalls wiedererrichtet werden. In diesem Kapitel soll der Nutzen einer solchen Energieerzeugung für die Liegenschaften der Bundeswehr in Deutschland diskutiert werden. Dabei soll keine neue Energiebedarfsrechnung für Liegenschaften und auch keine darauf abgestimmte Energieerzeugung

<sup>87</sup> Heß et al. 2020.

<sup>88</sup> In der Forschungsliteratur werden für ein solches Verfahren folgende Kennzahlen angeführt: „In the developed fuel synthesis, 1 L of diesel equivalent (35.9 MJ) of synthetic fuels was produced, which was then broken down energetically into 38.9% kerosene and 61.1% diesel. An examination of the fuels produced indicated that both synthetic diesel and synthetic kerosene meet the requirements of the above standards. To produce one liter of diesel equivalent, 2.54 kg of CO<sub>2</sub>, 3.99 kg of water, and 0.34 kg of oxygen are required. The energetic analysis of the process shows that the energy requirement of the high-temperature co-electrolysis was reduced by the energy integration from about 75 MJ/l DE [diesel equivalent] over 20% to about 59 MJ/l DE. [...] In addition, it was found that the energy requirement of the process and so the power-to-liquid efficiency depends heavily on the efficiency of the electrolysis. [...] The assumed base case electrolysis efficiency of 80% resulted in a PtL efficiency of 52%, whereby the electrical energy for the co-electrolysis, with about 59 MJ/l DE, made up more than 85% of the total energy requirement of about 69 MJ/l DE.“ (Peters et al. 2022: 37).

<sup>89</sup> Peters et al. 2022: 37

errechnet werden. Es werden lediglich die Unterschiede und möglichen Vorteile einer solchen Anlage in einer Liegenschaft der Bundeswehr in Deutschland aufgezeigt.

Viele Verbraucher in einer Liegenschaft ähneln den Verbrauchern in einem Feldlager. Die Liegenschaft verfügt über einen vergleichbaren Fuhrpark, welcher, wie in dieser Arbeit ausgeführt, batterieelektrisch und mit Wasserstoffverbrennungsmotoren betrieben werden kann. Auch Einrichtungen wie ein Rechenzentrum, Küchen und Sanitätsdienst müssen betrieben werden. Im Gegensatz zu einem Feldlager verfügt die Liegenschaft jedoch über herkömmliche Gebäude, die eine höhere Energieeffizienz als Unterkünfte in einem Feldlager aufweisen. Auch ein dauerhafter Schutz durch Flugabwehrsysteme und Radar ist in Friedenszeiten auf Liegenschaften nicht gegeben. Der bedeutsamste Unterschied liegt jedoch in der Betrachtung der Energieversorgung. Während das Feldlager von Energielieferungen abhängt und/oder durch eine PV-Anlage (teil)autark versorgt wird, ist die Liegenschaft in die Infrastruktur Deutschlands oder eines Bündnispartners eingebunden und wird über diese versorgt. Nach den Plänen der Bundesregierung wird sich diese Infrastruktur in ganz Europa bis in das Jahr 2030 wandeln.<sup>90</sup> Erneuerbare Energien und Wasserstoff als Transport- und Speichermedium werden eine große Rolle in der Versorgung von Städten und Industrieanlagen spielen. Dies zieht den Schluss nach sich, dass sich auch die Energieversorgung der Liegenschaften zukünftig stark verändern wird, um weiterhin mit dem öffentlichen Energienetz kompatibel zu sein. Dieser Wandel ermöglicht es, die oben beschriebene Kombination aus PV-Anlage und Wasserstoffherzeugung auch in Liegenschaften zur Anwendung zu bringen und somit die Liegenschaften ebenfalls (teil)autark mit Energie zu versorgen. Damit könnten die Liegenschaften langfristig nicht nur Kosten durch den gesunkenen Bedarf an extern zugeführter Energie einsparen, sondern in Zeiten von Energieknappheit auch zu Wärmeinseln für die Bevölkerung werden und den Betrieb zu einem gewissen Grad aufrechterhalten.<sup>91</sup> Im Gegensatz zu Feldlagern sind Liegenschaften nicht für einen gewissen Zeitraum errichtet und weniger limitiert in ihrer räumlichen Ausdehnung. Dadurch könnten die in dieser Arbeit beschriebenen Nachteile der PV-Anlage teilweise ausgeglichen werden. Je nach Dimensionierung der Anlage kommt es in den Sommermonaten zu einer Überproduktion an Energie, während in den Wintermonaten, gerade in Nord- und Mitteleuropa mit einem deutlich zu geringem Ertrag zu rechnen ist, welcher den Bedarf einer Liegenschaft ebenso wenig decken kann wie den Bedarf eines Feldlagers. Aufgrund der geringen Energiedichte von Wasserstoff benötigen Drucktanks zur Speicherung von Wasserstoff erhebliche Flächen, welche in Feldlagern in Einsatzgebieten nicht immer zur Verfügung stehen und einen erheblichen logistischen Mehraufwand bedeuten. In einer Liegenschaft der Bundeswehr in Deutschland wäre diese platzintensive Art der Speicherung leichter umsetzbar. Kann die Überproduktion an Energie oder Wasserstoff nicht auf der Liegenschaft vorgehalten werden, könnte sie auch direkt in das öffentliche Energienetz eingespeist werden. Wasserstoff kann beispielsweise in unterirdischen Kavernen zur Speicherung von Gas vorgehalten werden.<sup>92</sup> Auch die Versorgung lokaler Wasserstofftankstellen für Lkw wäre mit der Überproduktion denkbar. Damit können Liegenschaften der Bundeswehr nicht nur vom

---

<sup>90</sup> BMUV 2020.

<sup>91</sup> Bruhn 2022.

<sup>92</sup> NDR 2023.

Markthochlauf der Wasserstoffinfrastruktur profitieren, sondern auch zu diesem beitragen.<sup>93</sup> Eine Bestimmung des Energiebedarfs einer Liegenschaft und der benötigten PV-Anlage und Wasserstoffproduktion zu seiner Deckung ist nicht Zweck dieser Arbeit und soll deswegen nicht weiter diskutiert werden. Ziel des Kapitels ist lediglich das Aufzeigen von möglichen Vorteilen einer (teil)autarken Energieversorgung von Liegenschaften der Bundeswehr.

## 10 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die Möglichkeiten für eine Energieautonomie von Streitkräften auf regenerativer Basis wurden untersucht. Dabei standen verschiedene Szenarien für unterschiedliche Truppengrößen im Fokus. Für die regenerative Stromerzeugung wurden PV-Anlagen wegen geringerer Logistikerfordernisse und flexiblerer Möglichkeiten der Errichtung ausgewählt. Dabei fand eine Betrachtung verschiedener geographischer Lagen statt. Den militärischen Erfordernissen zum Schutz der Anlagen wurde durch Implementierung relevanter Verteidigungssysteme als Verbraucher Rechnung getragen.

Die Einrichtungen der militärischen Standorte orientieren sich an den jeweiligen Truppengrößen und berücksichtigen deren Erfordernisse. Diese Form der Betrachtung war erforderlich, um den Energiebedarf der Standorte näher zu untersuchen und eine relevante Basis für die Analyse zu schaffen. Dabei wurden auch spezifische Annahmen für den Tag- und Nachtbetrieb getroffen (Tabelle II im Anhang).

Für die Mobilität wurde für einen Teil des Fuhrparks batterieelektrische Antriebe angenommen. Darüber hinaus wurde für größere Fahrzeuge, Lkw und geschützte Fahrzeuge bis 15 Tonnen reiner Wasserstoff als Treibstoff definiert. Die erforderliche Wasserstoffherzeugung wird in den Szenarien über eine den Bedürfnissen angepasste Elektrolyse realisiert. Sowohl für wasserstoffbetriebene als auch batterieelektrische Fahrzeuge werden Wasserstoffspeicher bzw. Batteriespeicher vorgesehen. Schwere Einheiten wie Schützen- oder Kampfpanzer werden in Zukunft mit synthetischen Fuels versorgt. Nähere Angaben zu den Annahmen der einzelnen Szenarien sind den Kapiteln 4 bis 6 zu entnehmen.

Bei der Betrachtung zeigte sich eine erhebliche Komplexität bei Micro Grids mit verschiedensten technischen Anlagenteilen, deren Zusammenwirken und Betrieb ein relevantes Vor-Ort-Know-How erforderlich machen, was für eine Verlässlichkeit des Betriebes zwingend notwendig ist. Der störungsfreie Betrieb kann nur unter Einsatz modernster Technologie realisiert werden. Dabei ist eine Fernüberwachung nur bis zu einem gewissen Grad möglich.

Die betrachteten Szenarien unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Truppenstärke und den Fahrzeugpark (Szenario 1: 2 Bataillone (1.500 Soldaten), Szenario 2: 1 Brigade (4.500 Soldaten)).

Eine wesentliche Kenngröße ist bei der Betrachtung der Ergebnisse der Flächenbedarf für die zu installierende PV-Leistung. Dabei wird in vollautonome und teilautonome Betrachtungen unterschieden. Bereits bei Szenario 1 (2 Bataillone) zeigt sich für den vollautonomen Betrieb ein Flächenbedarf für die Photovoltaikanlage von 285 ha bei einer installierten Leistung von 285 MWp. Ein autonomer Betrieb größerer

<sup>93</sup> Rappuhn/Struck 2021.

Einheiten (1 Brigade: 840 ha) erweist sich als unrealistisch. Der Flächenbedarf für Szenario 1 lässt sich sehr gut an der Campgröße von Masar-e Scharif in Afghanistan messen. Die seinerzeitige Standortgröße lag bei insgesamt rund 375 ha. Selbst bei Szenario 1 (2 Bataillone) mit relativ kleiner Truppengröße würden derartige Standorte durch die einzurichtende PV-Anlage eine erhebliche Vergrößerung erfahren.

Eine Teilautonomie erlaubt hingegen erheblich mehr Spielraum bei der Standortgröße. Bei Szenario 1 würden bei 6 Monaten Nutzung regenerativer Energien im Sommerhalbjahr in Nordeuropa bzw. 5 Monaten erhebliche Anpassungen beim Flächenbedarf mit 49 bzw. 39 ha möglich. Bei größeren Einheiten erscheint der Flächenbedarf auch für diese Szenarien nicht realisierbar (siehe Tabelle 4). Für andere geographische Breitengrade lässt sich die Teilautonomie auf einen längeren Zeitraum ausdehnen. Die Sonneneinstrahlung im Gebiet von Masar-e Scharif zeigt für Szenario 1 sogar die grundsätzliche Möglichkeit einer Vollautonomie.

Eine militärische Exposition durch die große PV-Fläche ist nicht zu unterschätzen. Ihr kann jedoch durch Einsatz entsprechender Verteidigungssysteme begegnet werden.

Das Optimierungspotenzial für Energieverbräuche innerhalb von Smart Grids ist auch für die vorliegenden Szenarien nicht zu unterschätzen. Die mit dem in den jeweiligen Szenarien evaluierten Leistungsbedarf verbundenen Auslegungen der Energieerzeugung müssen allerdings bestehen bleiben, um die Leistungsanforderungen für Wasserstoffherzeugung, Infrastruktur und Verteidigungsfähigkeit erfüllen zu können. Aber auch wenn durch Smart Grids eine Optimierung von 20 % erreicht werden könnte, würde sich das Gesamtbild der Ergebnisse nicht ändern.

Ein weiteres Ergebnis ist, dass keines der Szenarien ohne eine herkömmliche Stromerzeugung zur Herstellung der Grundlastfähigkeit und als Back-up/Notstromsystem auskommt.

Ein weiterer Betrachtungswinkel ist die Logistik, die für die Errichtung derartiger regenerativer Erzeugungsanlagen und der assoziierten Anlagen für die Wasserstoffherzeugung erforderlich wird. Selbst bei Szenario 1 mit teilautonomen Betrieb von 5 Monaten werden 297 zusätzliche 40 Fuß Container zum Standardcamp benötigt. Für den vollautonomen Betrieb wären dies sogar ca. 1.220 40 Fuß Container. Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse für die verschiedenen Szenarien.

Der Aufbau einer regenerativen Stromerzeugung samt Wasserstoffherzeugung liefert klare militärische Vorteile. Selbst eine Teilautonomie kann eine erhebliche Reduzierung der Treibstofftransporte ermöglichen. Gegen diesen Vorteil steht der große Logistikaufwand bei der Errichtung des Camps. Der Aufbau des Camps ist eine Phase wesentlicher militärischer Exposition. Die Bereitstellung der ohnehin erforderlichen konventionellen Stromerzeugung mit nachgeschalteter Installation der regenerativen Elemente kann zwar diese Exposition mildern, aber nicht ausschließen.

Aufbau und Inbetriebnahme einer derart komplexen verfahrenstechnischen Anlage erfordern einen erheblichen Zeitraum und die Anwesenheit einer großen Anzahl technisch hochqualifizierten Personals.

Die Betrachtung zeigt klar, dass ein derartiges Konzept für bewegliche Verbände nicht denkbar ist. Eine kurzfristige Verlegbarkeit ist nicht möglich. Eine Skalierbarkeit für größere Verbände besteht nicht.

Der effektive Einsatz eines regenerativen Energiesystems im Bündnisgebiet lässt sich abhängig von der geographischen Lage nur sehr bedingt realisieren.

Mit Blick auf die Entwicklungen im zivilen Bereich bis 2050 werden allerdings im Gebiet der europäischen Union ganz erhebliche infrastrukturelle Veränderungen entstehen, die eine Nutzung regenerativer Energien sowie eine Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff nahelegen. Eine begrenzte Verfügbarkeit von synthetischen Kraftstoffen würde dies sogar zu einem Imperativ machen. Die militärische Herausforderung besteht im Bereich beweglicher Verbände, die spätestens nach Verlassen ihrer Standorte und dem Bezug ihrer Verfügungsräume vor einer logistischen Herausforderung stehen würden. Ein Transport von Wasserstoff mit 8-fachem Volumen (700 bar Drucktanks) ließe sich zwar bei dezentraler Erzeugung über geringere Distanzen realisieren, würde aber auch eine schnelle Verlegbarkeit dezentraler Erzeugungseinrichtungen zur Grundbedingung machen.

Dies erscheint beim Einsatz von PV-Anlagen nicht realistisch. Konzepte, bei denen PV-Zellen auf Containern installiert sind, können den benötigten Energiebedarf bisher nicht decken. Lösungen für eine Optimierung im Sinne der Deckung des Bedarfs sind bis 2050 nicht absehbar.

Die Betrachtung dieser Rahmenbedingungen zeigt auf der anderen Seite auf, wie nah das Konzept der Nutzung von Wasserstoff für die Mobilität vor realisierbaren Lösungen steht. Die sich bis 2050 entwickelnde Infrastruktur wird eine wichtige Säule für die Energie- und Treibstoffversorgung in Europa werden. Deshalb ist es für die Streitkräfte unerlässlich, an Projekten und Studien zu Fragen der Energieautonomie teilzunehmen und aktiv Entwicklungsvorhaben in diesem Bereich voranzutreiben. Die Erzeugung von synthetischen Fuels ist im Vergleich zu Wasserstoff noch energieintensiver und im Energiekonzept der EU für die zivile Mobilität nur in Teilbereichen vorgesehen. Die damit verbundene begrenzte Verfügbarkeit stellt Streitkräfte vor die Frage nach Alternativen oder nach einer eigenen, aufwendigen und teuren Erzeugung. Das gewählte Beispiel für die Erzeugung von synthetischen Fuels an einem Standort zeigt dabei klar die Herausforderungen bei der Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien wie PV. Der Energiebedarf für die Gewinnung von CO<sub>2</sub> über Direct-Air-Capture-Anlagen wäre zu groß.

Die Betrachtung der bestehenden Rahmenbedingungen und die Erwartungen an die technologischen Entwicklungen im Bereich der regenerativen Stromerzeugung zeigen, dass auch bis 2050 eine Vollautonomie von Streitkräften nicht realisierbar wird.

Eine Teilautonomie ist wie aufgezeigt ein probater Weg, den Verbrauch synthetischer Kraftstoffe zu reduzieren. Allerdings erfordert sie ebenfalls einen erheblichen zusätzlichen technischen und logistischen Aufwand.

Die NATO verfolgt auf Basis der bisherigen technischen Lösungen für die Mobilität eine Single Fuel Policy. Sie dient der Interoperabilität von Streitkräften im Bündnis. Die neue Realität mit der Entwicklung der zivilen Gesellschaften und damit der zivilen Infrastrukturen hin zu regenerativ erzeugten Treibstoffen definiert neue Rahmenbedingungen, denen sich Streitkräfte unmittelbar und kurzfristig stellen müssen, um ihre Einsatzfähigkeit nicht zu verlieren. In der zivilen Industrie wird anwendungsbezogen eine Vielzahl von Treibstoffen zum Einsatz kommen.<sup>94</sup>

Hier ist dringend ein neuer Denkansatz gefragt, der anders als bisher nicht von der Treibstoffseite aus gedacht werden kann. Eine potenzielle Lösung kann nur in der Motorenteknologie gefunden werden. Das Ziel der Interoperabilität zwischen den

94 Struck 2023a.

Streitkräften der NATO ließe sich gegebenenfalls durch eine neue Form der Standardisierung z. B. über eine Art „Single Engine System Policy“ realisieren.

In der Antriebstechnik sind bereits sogenannte Bi-Fuel-Ottomotoren und Dual-Fuel-Motoren auf Dieselmotorprinzip in vielen Unternehmen in der Entwicklung bzw. stehen kurz vor der Markteinführung. Sie lassen sich sowohl mit Wasserstoff als auch mit synthetischen Fuels und nach Modifizierung auch mit fossilen Kraftstoffen betreiben und ermöglichen damit eine hohe Flexibilität über die Antriebstechnik. Die Autoren erachten es als zwingend erforderlich, dass sich Streitkräfte umfänglich an diesen Entwicklungen orientieren und in entsprechenden Projekten, die zum Teil bereits unter Beteiligung vieler Staaten laufen oder von Industrieunternehmen geführt werden, beteiligen. Nur eine proaktive Rolle im Rahmen der NATO-Partner kann hier zur Vermeidung von militärischen Defiziten und nicht geeigneter Ausrüstung in der Zukunft beitragen.

## Literaturverzeichnis

- AEG Power Solutions (2021): World's Largest Green Hydrogen Plant. Electrolyzer Powered by 8 Transformer-rectifier Units, <https://www.aegps.com/en/technology/references/ceog/>, zuletzt aufgerufen am 23.05.2023.
- AEG Power Solutions GmbH (2023): Convert SC Flex, <https://www.aegps.com/de/produkte/konverter/convert-sc-flex/>, zuletzt aufgerufen am 04.07.2023.
- Agecon GmbH (2023a): Klimageräte Flyer, [https://www.algeco.de/media/algeco\\_klimageraete\\_flyer\\_1.pdf](https://www.algeco.de/media/algeco_klimageraete_flyer_1.pdf), zuletzt aufgerufen am 28.08.2023.
- Agecon GmbH (2023b): Raumcontainer TX26, <https://www.algeco.de/media/raumcontainer-tx26.pdf>, zuletzt aufgerufen am 28.08.2023.
- ALUMERO Systematic Solutions GmbH (2023): Solar. Montagesysteme, [https://www.alumerogroup.eu/fileadmin/user\\_upload/downloads/folder/solar/ALUMERO\\_Solarkatalog\\_2020\\_WEB.pdf](https://www.alumerogroup.eu/fileadmin/user_upload/downloads/folder/solar/ALUMERO_Solarkatalog_2020_WEB.pdf), zuletzt aufgerufen am 04.07.2023.
- Ballard Power Systems (2023): Megawatt-Scale Power Generation with Hydrogen Fuel Cells, <https://www.ballard.com/markets/mw-stationary-power>, zuletzt aufgerufen am 27.07.2023.
- Berardi, Umberto/Tomassoni, Elisa/Khaled, Khaled (2020): A Smart Hybrid Energy System Grid for Energy Efficiency in Remote Areas for the Army, in: *Energies* 13 (9), S. 2279.
- BMUV (2020): Nationale Wasserstoffstrategie, <https://www.bmuv.de/download/nationale-wasserstoffstrategie>, zuletzt aufgerufen am 01.12.2023.
- BMVg (2021): Waffensysteme und Großgerät der Bundeswehr, <https://www.bmvg.de/resource/blob/5261462/b60dd780d41a5c5b8e03e8b8275230bd/waffensysteme-und-grossgeraet-data.pdf>, zuletzt aufgerufen am 22.10.2022.
- Bruhn, Claus-Jürgen (2022): Energieautonomie von militärischen Liegenschaften. Wasserstoff als Enabler (#GIDSstatement 9/2022), [https://gids-hamburg.de/wp-content/uploads/2022/10/GIDSstatement2022\\_09\\_Bruhn\\_221010.pdf](https://gids-hamburg.de/wp-content/uploads/2022/10/GIDSstatement2022_09_Bruhn_221010.pdf), zuletzt aufgerufen am 09.11.2023.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023): Intelligente Netze, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/intelligente-netze.html>, zuletzt aufgerufen am 09.11.2023.
- Bundeswehr/Radio Andernach (2022): Brunnen-TÜV im Camp Castor, <https://www.bundeswehr.de/de/brunnen-tuev-5367092>, zuletzt aufgerufen am 04.07.2023.
- Bundeswehr (2023a): Die Geschichte des Heeres, <https://www.bundeswehr.de/de/ueber-die-bundeswehr/geschichte-bundeswehr/geschichte-heer>, zuletzt aufgerufen am 28.08.2023.
- Bundeswehr (2023b): Vom Trupp zur Division. Die militärischen Einheiten der Bundeswehr, <https://www.bundeswehr.de/de/ueber-die-bundeswehr/zahlen-daten-fakten/militaerische-einheiten-bundeswehr>, zuletzt aufgerufen am 28.08.2023.
- Chemie.de (2023): Interkalation (Chemie), [https://www.chemie.de/lexikon/Interkalation\\_%28Chemie%29.html](https://www.chemie.de/lexikon/Interkalation_%28Chemie%29.html), zuletzt aufgerufen am 09.11.2023.
- CHV Container (2023): Kühlcontainer. CHV 40ft KGN, <https://chv.at/container-kauf-und-miete/kuehlcontainer/kuehlcontainer-reefer/chv-40ft-kgn-40-fuss-kuehlcontainer-reefer/#1546708459014-254ac449-bee3f51b-eff2988-0384c6b9-26f22767-474f68cd-0827ad65-f777>, zuletzt aufgerufen am 22.08.2023.
- Council of the EU (27.10.2022): First 'Fit for 55' Proposal Agreed. The EU Strengthens Targets for CO<sub>2</sub> Emissions for New Cars and Vans, Brüssel, <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/10/27/first-fit-for-55-proposal>

- agreed-the-eu-strengthens-targets-for-co2-emissions-for-new-cars-and-vans/, zuletzt aufgerufen am 03.11.2023.
- E.ON SE (2022): Durchschnittliche Photovoltaik-Leistung & PV-Erträge in Deutschland, <https://www.eon.de/de/pk/solar/kwp-bedeutung-umrechnung.html>, zuletzt aufgerufen am 09.11.2023.
- Électricité de France/Implementa Sur (2022): Prefeasibility Study for a Synthetic Fuel Project in the Magallanes Region Based on Green Hydrogen, [https://energia.gob.cl/sites/default/files/ch-t1235-p003\\_final\\_report\\_28-03-2022\\_vf.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/ch-t1235-p003_final_report_28-03-2022_vf.pdf), zuletzt aufgerufen am 28.06.2023.
- EnBw AG (2023): EnBW-Solarpark Weesow-Willmersdorf, <https://www.enbw.com/erneuerbare-energien/solarenergie/solarpark-weesow/>, zuletzt aufgerufen am 15.06.2023.
- Ergin Şahin, Mustafa (2020): A Photovoltaic Powered Electrolysis Converter System with Maximum Power Point Tracking Control, in: *International Journal of Hydrogen Energy* 45, 16, S. 9293–9304.
- Europäisches Parlament (2022): EU-Verkaufsverbot für neue Benzin- und Dieselfahrzeuge ab 2035 – Was bedeutet das?, vom 03.11.2022, <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20221019STO44572/verkaufsverbot-fur-neue-benzin-und-dieselfahrzeuge-ab-2035-was-bedeutet-das>, zuletzt aufgerufen am 09.11.2023.
- Fathima, A. Hina/Palanisamy, K. (2015): Optimization in Microgrids with Hybrid Energy Systems – A Review, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45, S. 431–446.
- Feng, Wei/Jin, Ming/Liu, Xu/Bao, Yi/Marnay, Chris/Yao, Cheng/Yu, Jiancheng (2018): A Review of Microgrid Development in the United States – A Decade of Progress on Policies, Demonstrations, Controls, and Software Tools, in: *Applied Energy* 228, S. 1656–1668.
- FORVIA-Gruppe (2023): Hannover Messe: Faurecia plant die Einführung der Wasserstoffmobilität erheblich zu beschleunigen, <https://www.faurecia.de/newsroom/hannover-messe-faurecia-plant-die-einfuehrung-der-wasserstoffmobilitaet-erheblich-zu>, zuletzt aufgerufen am 01.07.2023.
- Friedrich, Bernd/Estermann, Lukas/Tolgos, Sokrates/McCarthy, Andrew/Makarov, Stepan (2022): MAN LH2. Marine Power Pack, <https://www.man-es.com/campaigns/download-Q3-2023/Download/man-lh-sub-2-sub-marine-power-pack/5123cf76-6869-4326-aa69-0bb2ba15a6e2/MAN-LH2-Power-Pack>, zuletzt aufgerufen am 27.07.2023.
- Futuretech Kärcher Group (2023a): Vorbereitungscontainer, <https://www.karcher-futuretech.com/de/geraete/mobile-verpflegung/kuechencontainer/vorbereitungscontainer-19302020.html>, zuletzt aufgerufen am 09.11.2023.
- Futuretech Kärcher Group (2023b): Wäschereicontainer FL 6-6 C, <https://s1.kaercher-media.com/media/file/102930/datenblatt-waeschereicontainer.pdf>, zuletzt aufgerufen am 30.08.2023.
- Futuretech Kärcher Group (2023c): Zubereitungscontainer, <https://www.karcher-futuretech.com/de/geraete/mobile-verpflegung/kuechencontainer/zubereitungscontainer-1-ohne-generator-19301010.html>, zuletzt aufgerufen am 09.11.2023.
- Günneweig, Dieter/Johannwerner, Esther/Kelm, Tobias/Metzger, Jochen/Wegner, Nils (2022): Anpassung der Flächenkulisse für PV-Freiflächenanlagen im EEG vor dem Hintergrund erhöhter Zubauziele. Notwendigkeit und mögliche Umsetzungsoptionen (Texte 76/22), Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte\\_76-2022\\_anpassung\\_der\\_flaechenkulisse\\_fuer\\_pv-freiflaechenanla](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_76-2022_anpassung_der_flaechenkulisse_fuer_pv-freiflaechenanla)

- gen\_im\_eeg\_vor\_dem\_hintergrund\_erhoelter\_zubauziele.pdf, zuletzt aufgerufen am 16.11.2023.
- Haagensen, Anke (2022): In Kassö: Sonnenenergie wird zu klimaneutralem Treibstoff, in: Der Nordschleswiger 2022, <https://www.nordschleswiger.dk/de/nordschleswig-apenrade-tingleff-apenrade-tingleff/kassoe-sonnenenergie-wird-zu-klimaneutralem>, zuletzt aufgerufen 03.12.2023.
- Heß, Dominik/Klumpp, Michael/Dittmeyer, Roland (2020): Nutzung von CO<sub>2</sub> aus Luft als Rohstoff für synthetische Kraftstoffe und Chemikalien, <https://vm.badenwuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/29-01-2021-DAC-Studie.pdf>, zuletzt aufgerufen am 03.12.2023.
- H-TEC Systems (2023): H-TEC SYSTEMS PEM-Elektrolyseur. Hydrogen Cube System, [https://www.h-tec.com/fileadmin/user\\_upload/produkte/produktseiten/HCS/spec-sheet/H-TEC-Datenblatt-HCS-DE-23-03.pdf](https://www.h-tec.com/fileadmin/user_upload/produkte/produktseiten/HCS/spec-sheet/H-TEC-Datenblatt-HCS-DE-23-03.pdf), zuletzt aufgerufen am 04.07.2023.
- Huawei (2023): What Are Containerized and Modular Data Centers? An Innovation-Driven Data Center, <https://forum.huawei.com/enterprise/en/what-are-containerized-and-modular-data-centers-an-innovation-driven-data-center/thread/669364517303369728-667213875235401728>, zuletzt aufgerufen am 24.08.2023.
- Iberdrola (2023): Green Hydrogen Plant for Industrial Use: Europe's Most Ambitious Innovation Project to Promote Decarbonization of Industrial Sectors, [https://www.iberdrola.com/documents/20125/41329/Puertollano\\_hidrogeno\\_verde\\_EN.pdf](https://www.iberdrola.com/documents/20125/41329/Puertollano_hidrogeno_verde_EN.pdf), zuletzt aufgerufen am 25.06.2023.
- IEA (2022): Direct Air Capture. Technology Deep Dive, <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>, zuletzt aufgerufen am 21.06.2023.
- IEA (2023): Hydrogen Projects Database, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database>, zuletzt aufgerufen am 03.12.2023.
- Inciner8 (2023): Inciner 18-250G Technical Datasheet, <https://pdf.directindustry.com/pdf/inciner8-ltd/i8-250g-general-waste-incinerator-datasheet/222034-980648.html>, zuletzt aufgerufen am 22.08.2023.
- Kasikci, Ismail (2018): Planung von Elektroanlagen. Theorie, Vorschriften, Praxis, Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Khorramdel, Hossein/Khorramdel, Benyamin/Poshtyafteh, Marzieh (2015): Programming of Energy Storage System in an Island Microgrid with Photovoltaic and Fuel Cell, in: Walailak Journal of Science and Technology (WJST) 12, 4, S. 361–371.
- Klell, Manfred/Eichseder, Helmut/Trattner, Alexander (2018): Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Kohler, Robert (2013): Lasergestützte Strukturierung und Gefügemodifikation der Elektrodenmaterialien Lithiumcobaltoxid und Zinnoxid für Lithium-Ionen-Batterien, Karlsruhe.
- Kurzweil, Peter/Dietlmeier, Otto K. (2016): Elektrochemische Speicher: Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Grundlagen, Hamburg: Springer Verlag.
- Linde AG (2023): Hydrogen Technologies. The Ionic Compressor 90 MPa – IC90, <http://donar.messe.de/exhibitor/hannovermesse/2017/A488848/hydrogen-technologies-the-ionic-compressor-90-fo-eng-358503.pdf>, zuletzt aufgerufen am 16.06.2023.
- Loges, André (2023): Thermisches Design von Lithium-Ionen Batteriezellen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge, in: Karlsruher Institut für Technologie, [https://www.tvt.kit.edu/21\\_984.php](https://www.tvt.kit.edu/21_984.php), zuletzt aufgerufen am 30.05.2023.

- Losberger de Boer/Bachmann RDS (2023): Kitchen & Buffet Containers, [https://www.losbergerdeboer.com/globalassets/media-blocks/product-sheets/english/rds/product-sheet\\_kitchen-buffet-containers-losberger-de-boer-en.pdf](https://www.losbergerdeboer.com/globalassets/media-blocks/product-sheets/english/rds/product-sheet_kitchen-buffet-containers-losberger-de-boer-en.pdf), zuletzt aufgerufen am 09.11.2023.
- Milanzi, Sarah/Spiller, Carla/Grosse, Benjamin/Hermann, Lisa/Kochems, Johannes/Müller-Kirchenbauer, Joachim (2018): Technischer Stand und Flexibilität des Power-to-Gas-Verfahrens, [google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiH7IOQ-fOCAxUbSvED-HXweBqAQFnECA8QAQ&url=https%3A%2F%2Fzenodo.org%2Frecord%2F2620254%2Ffiles%2FTechnischer\\_Stand\\_und\\_Flexibilitaet\\_des\\_Power-to-Gas-Verfahrens.pdf%3Fdownload%3D1&usq=AOvVaw1Fkn\\_4r0qH8coLvgr4QnLO&opi=89978449](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiH7IOQ-fOCAxUbSvED-HXweBqAQFnECA8QAQ&url=https%3A%2F%2Fzenodo.org%2Frecord%2F2620254%2Ffiles%2FTechnischer_Stand_und_Flexibilitaet_des_Power-to-Gas-Verfahrens.pdf%3Fdownload%3D1&usq=AOvVaw1Fkn_4r0qH8coLvgr4QnLO&opi=89978449), zuletzt aufgerufen am 15.12.2023.
- Möller, Marius C./Krauter, Stefan (2022): Hybrid Energy System Model in Matlab/Simulink Based on Solar Energy, Lithium-Ion Battery and Hydrogen, in: *Energies* 15, 6, S. 2201.
- NDR (2023): Speichern von Wasserstoff: Kaverne besteht Test zur Dichtheit, [https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/oldenburg\\_ostfriesland/Speichern-von-Wasserstoff-Kaverne-besteht-Test-zur-Dichtheit,wasserstoff446.html](https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/oldenburg_ostfriesland/Speichern-von-Wasserstoff-Kaverne-besteht-Test-zur-Dichtheit,wasserstoff446.html), zuletzt aufgerufen am 01.12.2023.
- Neher, Ina (2020): Impact of Atmospheric Variability on a Solar Based Power System in West Africa, [https://kups.ub.uni-koeln.de/25108/1/Dissertation\\_Neher\\_2020.pdf](https://kups.ub.uni-koeln.de/25108/1/Dissertation_Neher_2020.pdf), zuletzt aufgerufen am 09.11.2023.
- Nitschke, Stefan/Autorenteam BAUIDBw (2018): Leistungsprofil Feldlager, in: *Wehrtechnik* 50, 1, S. 89–94.
- NS Energy (2023): Centrale Electrique de l’Ouest Guyanais (CEOG) Hydrogen Power Project, <https://www.nsenergybusiness.com/projects/centrale-electrique-de-louest-guyanais-ceog-hydrogen-power-project/>, zuletzt aufgerufen am 09.11.2023.
- PCK Raffinerie GmbH (2023): Unsere PCK, <https://www.pck.de/unternehmen#unsere-pck>, zuletzt aufgerufen am 27.07.2023.
- Peters, Ralf/Wegener, Nils/Samsun, Remzi Can/Schorn, Felix/Riese, Julia/Grünewald, Marcus/Stolten, Detlef (2022): A Techno-Economic Assessment of Fischer–Tropsch Fuels Based on Syngas from Co-Electrolysis, in: *Processes* 10 (4), <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/4/699>, zuletzt aufgerufen am 16.11.2023.
- Pfeifer, Peter/Schmidt, Sebastian/Betzner, Florian/Kollmann, Max/Loewert, Marcel/Böltken, Tim/Piermartini, Paolo (2022): Scale-up of Microstructured Fischer–Tropsch Reactors – Status and Perspectives, in: *Current Opinion in Chemical Engineering* 36, S. 100776.
- Plast Engineering Knauff e.K. (2023): Mobile Water Purification & Packaging Systems, <http://www.plastics-equipments.de/mobile-systeme%20-%20en.htm>, zuletzt aufgerufen am 09.11.2023.
- Rappuhn, Thomas/Struck, Simon (2021): Streitkräfte der Zukunft. Energieautonomie durch Wasserstoff und Beitrag für die Entwicklung eines neuen Energiemarktes? (#GIDSstatement 12/2021), [https://gids-hamburg.de/wp-content/uploads/2022/02/GIDSStatement\\_2021\\_12\\_Rappuhn\\_Struck\\_220225.pdf](https://gids-hamburg.de/wp-content/uploads/2022/02/GIDSStatement_2021_12_Rappuhn_Struck_220225.pdf), zuletzt aufgerufen am 09.11.2023.
- Riegel, Bernhard (2013): Anforderungen an Batterien für den stationären Einsatz, in: Reiner Korthauer (Hg.): *Handbuch lithium-ionen-batterien*, Springer Vieweg: Wiesbaden, S. 417–428.

- Seete Großkücheneinrichtungen (2023): Bandgeschirrspülmaschine, <https://www.seete.com/spuelcontainer/>, zuletzt aufgerufen am 09.11.2023.
- Shayeghi, Hossein/Shahryari, Elnaz/Moradzadeh, Mohammad/Siano, Pierluigi (2019): A Survey on Microgrid Energy Management Considering Flexible Energy Sources, in: *Energies* 12, 11, S. 2156.
- Siemens AG (2018): Planung der elektrischen Energieverteilung. Technische Grundlagen, <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:d683c81df25afb360b79c5d48441eeda8b23477b/planung-der-elektrischen-energieverteilung-technische-grundlagen.pdf>, zuletzt aufgerufen am 30.08.2023.
- Siemens Energy (2021): Siemens Energy Will Build Climate-neutral Hybrid Power Plant Using Hydrogen to Supply 10,000 Households in French Guiana, <https://press.siemens-energy.com/global/en/feature/siemens-energy-will-build-climate-neutral-hybrid-power-plant-using-hydrogen-supply-10000>, zuletzt aufgerufen am 23.05.2023.
- Siemens Energy (2023): Haru Oni. Base Camp of the Future, <https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2022/haru-oni.html>, zuletzt aufgerufen am 01.07.2023.
- Smolinka, Tom/Günther, Martin/Garche, Jürgen (2011): Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien, in: Fraunhofer; FCBAT, <https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/now-studie-wasserelektrolyse-2011.pdf>, zuletzt aufgerufen am 03.12.2023.
- Smolinka, Tom/Wiebe, Nikolai/Sterchele, Philip/Palzer, Andreas/Lehner, Franz/Jansen, Malte/Kiemel, Steffen/Miehe, Robert/Wahren, Sylvia/Zimmermann, Fabian (2018): Studie IndWEDe. Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland, [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/indwede-studie\\_v04.1.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/indwede-studie_v04.1.pdf), zuletzt aufgerufen am 02.12.2023.
- Solar Fabrik GmbH (2022): Entladen und Entpacken von Solarmodulen. Anweisung zur sicheren Vorgehensweise, [https://www.solar-fabrik.de/wp-content/downloads/anleitungen/Entladen\\_und\\_Entpacken\\_von\\_Solarmodulen.pdf](https://www.solar-fabrik.de/wp-content/downloads/anleitungen/Entladen_und_Entpacken_von_Solarmodulen.pdf), zuletzt aufgerufen am 15.06.2023.
- Solargis (2023a): Preliminary assessment of the photovoltaic electricity production. Project: Prenzlau, <https://solargis.com/products/prospect/overview>, zuletzt aufgerufen am 29.07.2024.
- Solargis (2023b): Solargis PV Simulation, <https://solargis.com/docs/methodology/pv-energy-modeling>, zuletzt aufgerufen am 04.07.2023.
- Soni, Anmol (2020): Disruptive Energy Technologies and Military Capabilities, in: Margaret E. Kosal (Hg.): *Disruptive and Game Changing Technologies in Modern Warfare: Development, Use, and Proliferation*, Springer International Publishing: Cham, S. 115–134.
- Struck, Simon (2023a): Energieautonome Streitkräfte. Wasserstoff als Fuel für die militärische Mobilität (#GIDSresearch 2/2023), [https://gids-hamburg.de/wp-content/uploads/2023/05/GIDSresearch2023\\_02\\_Struck20230426.pdf](https://gids-hamburg.de/wp-content/uploads/2023/05/GIDSresearch2023_02_Struck20230426.pdf), zuletzt aufgerufen am 09.11.2023.
- Struck, Simon (2023b): Energieautonome Streitkräfte. Wasserstoff als Fuel für die militärische Mobilität? Zusammenfassung der Studie (#GIDSstatement 7/2023), [https://gids-hamburg.de/wp-content/uploads/2023/05/GIDSstatement2023\\_07\\_Struck\\_20230426-1.pdf](https://gids-hamburg.de/wp-content/uploads/2023/05/GIDSstatement2023_07_Struck_20230426-1.pdf), zuletzt aufgerufen am 09.11.2023.
- Tjarks, Geert Hauke/Stolten, Detlef/Weßling, Matthias (2017): PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung in Power-to-Gas Anlagen, <https://publications.rwth-aachen.de/record/689617?ln=de>, zuletzt aufgerufen am 03.12.2023.
- U-Project (2017): Field Hospital Project,

- <https://www.eximmed.de/yuklemeler/katalog/u-project-catalogue-en.pdf>, zuletzt aufgerufen am 31.08.2023.
- Vision Aqua (2023): Trinkwassercontainer, <https://www.vision-aqua.de/projekte/trinkwasser-aufbereitungs-container/>, zuletzt aufgerufen am 20.06.2023.
- Wananchi (2022): Séon IFC, <https://wananchi-uk.com/product/seon-ifc/>, zuletzt aufgerufen am 25.08.2023.
- Weniger, Johannes/Maier, Selina/Orth, Nico/Quaschnig, Volker/Solarspeichersysteme, Forschungsgruppe (2020): Stromspeicherinspektion 2020, [https://www.researchgate.net/profile/Johannes-Weniger/publication/340050929\\_Stromspeicher-Inspektion\\_2020/links/5e748aa7a6fdccda8b7101c4/Stromspeicher-Inspektion-2020.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Johannes-Weniger/publication/340050929_Stromspeicher-Inspektion_2020/links/5e748aa7a6fdccda8b7101c4/Stromspeicher-Inspektion-2020.pdf), zuletzt aufgerufen am 04.07.2023.
- Zhao, Guangling/Kraglund, Mikkel Rykær/Frandsen, Henrik Lund/Wulff, Anders Christian/Jensen, Søren Højgaard/Chen, Ming/Graves, Christopher R. (2020): Life Cycle Assessment of H<sub>2</sub>O Electrolysis Technologies, in: International Journal of Hydrogen Energy 45, 43, S. 23765–23781.
- Žigman, Dubravko/Tomiša, Tomislav/Osman, Krešimir (2023): Methodology Presentation for the Configuration Optimization of Hybrid Electrical Energy Systems, in: Energies 16, 5, S. 2158.

## Anhang

**Tab. I:** Nennleistung und Energieverbrauch eines Feldlagermoduls Typ 2II (eigene Annahmen).

Feldlager Modul Typ II			
	Nennleistung	Gleichzeitigkeitsfaktor	Nennleistung in kW mit Gleichzeitigkeitsfaktor
Unterkünfte	1250	1	1000
Verpflegung	270	1	216
Wäscherei	50	1	40
Entsorgung		1	0
Sozialbereich	160	1	128
Feldlagerbetrieb	20	1	16
Waffenkammer	20	1	16
Sanitär	200	1	160
Militärische Sicherheit	20	1	16
Trinkwasserabfüllanlage	55	1	44
Zahlstelle	20	1	16
Energieversorgung	20	1	16
Gesamt (Liegenschaftsbe- trieb)	2085		1668

	Nennleistung	Gleichzeitigkeitsfaktor	Nennleistung in kW mit Gleichzeitigkeitsfaktor
Lazarett	300	1	180
Radar	100	1	100
System 2	400	1	400
Rechenzentrum/ IT	500	1	450
Gesamt (weitere Infrastruk- tur)	1300		1130

**Tab. II:** Nennleistung und Energieverbrauch eines Feldlagers je Szenario.

Szenario 1: 2 Bataillone						
	Anzahl Feldlagermodule	Nennleistung in kW mit Gleichzeitigkeitsfaktor	Energieverbrauch am Tag (6 h) in kWh/d		Energieverbrauch in der Nacht (18 h) in kWh/d	
			Auslastung der Systeme in %	Energieverbrauch in kWh	Auslastung der Systeme in %	Energieverbrauch in kWh
Unterkünfte	3	3000	0	7200	1	32400
Verpflegung	3	648	1	2722	0	3499
Wäscherei	3	120	1	576	0	432
Entsorgung	3	0	1	0	1	0
Sozialbereich	3	384	0	922	0	2765
Feldlagerbetrieb	3	48	1	230	1	518
Waffenkammer	3	48	1	288	1	864
Sanitär	3	480	1	1440	0	1728
Militärische Sicherheit	3	48	1	288	1	864
Trinkwasserabfüllanlage	3	132	1	554	0	475
Zahlstelle	3	48	0	115	1	432
Energieversorgung	3	48	1	288	1	864
Gesamt (Liegenchaftsbetrieb)		5004		14623		44842

	Anzahl	Nennleistung in kW mit Gleichzeitigkeitsfaktor	Energieverbrauch am Tag (6 h) in kWh/d		Energieverbrauch in der Nacht (18 h) in kWh/d	
			Auslastung der Systeme in %	Energieverbrauch in kWh	Auslastung der Systeme in %	Energieverbrauch in kWh
Lazarett	1	180	1	540	1	1620
Radar	1	100	1	600	1	1800
Flugabwehrsystem	1	400	0	240	0	720
Rechenzentrum/ IT	1	450	1	2700	1	8100
Gesamt (weitere Infrastruktur)		1130		4080		12240

	Anzahl	Nennleistung in kW	Energieverbrauch am Tag (6 h)	Energieverbrauch am Tag (18 h)
--	--------	--------------------	-------------------------------	--------------------------------

		mit Gleichzeitigkeitsfaktor	Auslastung der Systeme in %	Energieverbrauch in kWh	Auslastung der Systeme in %	Energieverbrauch in kWh
Wasseraufbereitung		60	1	360	0	0
Wasserförderung		60	1	360	0	0
Wasserstoffherzeugung		10000	1	56830	0	0
Wasserstoffspeicherung (Kompression)		755	1	4530	0	0
Gesamt (Wasserstoffherzeugung)		10875		62080	0	0
					0	
batterieelektrische Fahrzeuge		2195	1	13170	0	0
Verluste Batteriespeicher		70	1	1680	0	
<b>Gesamt in kW/kWh</b>		<b>19274</b>		<b>95633</b>		<b>57082</b>

Szenario 2: 1 Brigade					
Anzahl Feldlagermodule	Nennleistung in kW mit Gleichzeitigkeitsfaktor	Energieverbrauch am Tag (6 h)		Energieverbrauch am Tag (18 h)	
		Auslastung der Systeme in %	Energieverbrauch in kWh	Auslastung der Systeme in %	Energieverbrauch in kWh
9	9000	0	21600	1	97200
9	1944	1	8165	0	10498
9	360	1	1728	0	1296
9	0	1	0	1	0
9	1152	0	2765	0	8294
9	144	1	691	1	1555
9	144	1	864	1	2592
9	1440	1	4320	0	5184
9	144	1	864	1	2592
9	396	1	1663	0	1426
9	144	0	346	1	1296
9	144	1	864	1	2592
	15012		43870		134525

Anzahl	Nennleistung in kW mit Gleichzeitigkeitsfaktor	Energieverbrauch am Tag (6 h)		Energieverbrauch am Tag (18 h)	
		Auslastung der Systeme in %	Energieverbrauch in kWh	Auslastung der Systeme in %	Energieverbrauch in kWh
2	360	1	1080	1	3240
1	100	1	600	1	1800
1	400	0	240	0	720
1	450	1	2430	1	7290
	1310		4350		13050

Anzahl	Nennleistung in kW mit Gleichzeitigkeitsfaktor	Energieverbrauch am Tag (6 h)		Energieverbrauch am Tag (18 h)	
		Auslastung der Systeme in %	Energieverbrauch in kWh	Auslastung der Systeme in %	Energieverbrauch in kWh
	120	1	720	0	0
	120	1	720	0	0
	32000	1	190494	0	0
	2415	1	14490	0	0
	34655		206424	0	0
				0	
	5491	1	32946	0	0
	176	1	4220	0	0

Gesamt in kW/kWh	56644	291810	147575
------------------	-------	--------	--------

**Tab. III:** Energiebedarf des Fahrzeugparks nach Szenario.

Energieverbrauch Fahrzeuge	2 Bataillone	1 Brigade
Anzahl Dingos	50	125
Tankvolumen in l (Diesel)	260	260
Tankfüllungen pro Jahr	52	52
Gesamtverbrauch in l/d	1857	4643
Energie in kWh/d	18200	45500
Antriebssystem	Wasserstoffverbrennungsmotor	Wasserstoffverbrennungsmotor
Anzahl Wölfe	40	100
Tankvolumen in l	96	96
Tankfüllungen pro Jahr	52	52
Gesamtverbrauch in l/d	549	1371
Energie in kWh/d	5376	13440
Antriebssystem	Batterieelektrisch	Batterieelektrisch
Anzahl Eagle	10	25
Tankvolumen in l	180	180
Tankfüllungen pro Jahr	52	52
Gesamtverbrauch in l/d	257	643
Energie in kWh/d	2520	6300
Antriebssystem	Wasserstoffverbrennungsmotor	Wasserstoffverbrennungsmotor
Anzahl Fennek	0	38
Tankvolumen in l		200
Tankfüllungen pro Jahr		52
Gesamtverbrauch in l/d	0	1086
Energie in kWh/d	0	10640
Antriebssystem	Wasserstoffverbrennungsmotor	Wasserstoffverbrennungsmotor
Anzahl 10 Tonner (4 Achsen)	20	100
Tankvolumen in l	270	270
Tankfüllungen pro Jahr	52	52
Gesamtverbrauch in l/d	771	3857
Energie in kWh/d	7560	37800
Antriebssystem	Wasserstoffverbrennungsmotor	Wasserstoffverbrennungsmotor
Anzahl 5 Tonner	40	100
Tankvolumen in l	270	270

Tankfüllungen pro Jahr	52	52
Gesamtverbrauch in l/d	1543	3857
Energie in kWh/d	15120	37800
Antriebssystem	Batterieelektrisch	Batterieelektrisch
Anzahl Transporter/Busse	20	50
Tankvolumen in l	270	270
Tankfüllungen pro Jahr	52	52
Gesamtverbrauch in l/d	771	1929
Energie in kWh/d	7560	18900
Antriebssystem	Wasserstoffverbrennungsmotor	Wasserstoffverbrennungsmotor
Anzahl Marder	88	88
Tankvolumen in l	650	650
Tankfüllungen pro Jahr	52	52
Gesamtverbrauch in l/d	8171	8171
Energie in kWh/d	80080	80080
Antriebssystem	Verbrennungsmotor für E-Fuel	Verbrennungsmotor für E-Fuel
Anzahl Leopard 2	0	88
Tankvolumen in l		1160
Tankfüllungen pro Jahr		52
Gesamtverbrauch in l/d	0	14583
Energie in kWh/d	0	142912
Antriebssystem	Verbrennungsmotor für E-Fuel	Verbrennungsmotor für E-Fuel
Energiebedarf für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge in kWh/d	35742	118814
Liter Diesel	3657	12157
Energiebedarf für batterieelektrische Antriebe in kWh/d	20496	51240
Liter Diesel	2091	5229
Energiebedarf gesamt in kWh/d	56238	170054